

Київський національний університет будівництва і архітектури  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ШУГАЙЛО ОЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ**

УДК 624.014, 621.039.58

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РОБОТА СТАЛЕВИХ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ ТА  
ТРУБОПРОВОДІВ АТОМНИХ СТАНЦІЙ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ  
НАВАНТАЖЕННЯХ**

Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ О.П. Шугайло

Науковий керівник – Білик Сергій Іванович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2022

## АНОТАЦІЯ

*Шугайло О.П.* Робота сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів атомних станцій при сейсмічних навантаженнях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія, галузь знань 19 – Архітектура та будівництво. – Київський національний університет будівництва і архітектури. Міністерство освіти і науки України, Київ, 2022 р.

### **Основний зміст дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота спрямована на покращення та розвиток методів оцінки безпеки об'єктів атомної енергетики України шляхом уточнення та вдосконалення підходів до оцінки міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів (СОКОіТ) енергоблоків атомних електростанцій (АЕС) при сейсмічних навантаженнях.

За результатами виконаних оглядів, аналізів та скінчено-елементних досліджень мод, значень частот власних коливань, напружено-деформованого стану:

– визначені закономірності динамічних характеристик та напружено-деформованого стану СОКОіТ в залежності від типової конструктивної форми, умов закріплення на конструктивній основі, а також особливих умов експлуатації;

– розвинені та науково обґрунтовані основні положення методу граничних станів в частині, що стосується СОКОіТ енергоблоків АЕС України з урахуванням особливих умов їх експлуатації, а також ступеню їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів;

– в розвиток положень нормативно-правових актів з ядерної та радіаційної безпеки, а також державних будівельних норм розроблена методика оцінки міцності СОКОіТ енергоблоків Запорізької (ЗАЕС) та Південноукраїнської (ПАЕС) АЕС при сейсмічних навантаженнях.

З погляду філософії науки дисертаційна робота спрямована на вирішення актуального філософського питання щодо цінностей сучасної науки та підвищення соціальної відповідальності науковців стосовно прийнятих рішень для забезпечення безпеки АЕС. В межах дослідження використовується класична методологія, що вивчає стійкі залежності, які можна виразити переважно математичною мовою. Основними рисами класичної методології, які найважливіші для дисертаційного дослідження, є такі: досліджувані явища, розглядаються як реально існуючі та такі, що не залежить від суб'єкта пізнання; розглядаються факти, які об'єктивно існують у природі та пов'язані незмінними постійними залежностями.

**В першому розділі** висвітлені особливості підходів до забезпечення сейсмостійкості елементів АЕС, які є відмінними від підходів до оцінки сейсмостійкості загальнопромислових об'єктів. Розглянуто існуючі національні та сучасні міжнародні методи оцінки сейсмостійкості конструкцій. Визначені особливості сучасної концепції розвитку нормативно-правової бази України щодо забезпечення безпеки АЕС. Проаналізовані сучасні національні та європейські (Єврокоди) підходи до розрахунків конструкцій на міцність, в тому числі сейсмічну. Окреслені недосконалості державних будівельних норм в частині використання їх положень під час оцінки сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС України.

**У другому розділі** розкриваються особливі умови експлуатації СОКОіТ енергоблоків АЕС, які обумовлені одночасною дією таких двох епізодичних впливів як землетрус та максимальна проектна аварія «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850» на енергоблоці АЕС.

Проаналізовані геологічні умови розташування енергоблоків АЕС України, а також результати сучасних додаткових сейсмологічних досліджень їх промислових майданчиків. З'ясовані пікові значення прискорення горизонтальної складової руху ґрунту при землетрусі на промислових майданчиках АЕС України. Досліджені рівні сейсмічних навантажень, яким піддані СОКОіТ, розташовані у діапазоні висотних відміток від 0 м. до 36-38 м.

реакторних відділень енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС. Приведені аргументи на користь вибору саме цих АЕС для виконання дослідження. Врахування фактичних геологічних та сейсмологічних умов експлуатації СОКОіТ здійснено шляхом використання репрезентативних сейсмічних навантажень (поверхових спектрів відгуку), які визначені на підставі фактичних рівнів сейсмічної небезпеки майданчиків ЗАЕС та ПАЕС із врахуванням взаємодії «грунт-конструкція». Представлена визначена номенклатура розрахункових навантажень, яким піддані СОКОіТ енергоблоків АЕС під час особливих умов експлуатації.

Описана математична модель напружено-деформованого стану СОКОіТ, окреслені використані гіпотези щодо структури та властивостей матеріалів, а також щодо характеру деформацій. Представлені розроблені скінчено-елементні моделі СОКОіТ типових конструктивних форм з використанням ліцензійного розрахункового комплексу ANSYS.

Обґрунтовано, що розроблена фізико-математична модель СОКОіТ енергоблоків АЕС: відображає дійсні умови їх роботи; враховує важливі для оцінки сейсмічної міцності особливості геометрії конструкцій, а також розподілу мас і жорсткостей; представляє конструкції як єдині просторові системи; враховує чинники, що визначають напружено-деформований стан.

*У третьому розділі* на підставі результатів виконаних 64 варіаційних скінчено-елементних досліджень наведені визначені закономірності:

- динамічних характеристик СОКОіТ в залежності від типової конструктивної форми, умов закріплення на конструктивній основі, а також особливих умов експлуатації;
- впливу приєднаного обладнання на динамічні характеристики сталеві опорної конструкції;
- зміни напружено-деформованого стану СОКОіТ в залежності від типових конструктивних форм та умов закріплення на конструктивній основі під час сейсмічних навантажень та одночасної дії двох епізодичних впливів.

Результати досліджень динамічних характеристик сталеві опорної конструкції продемонстрували, що пряме врахування обладнання в розрахунковій моделі змінює як моди, так і самі значення частот власних коливань. Це обумовлено тим, що врахування безпосередньо обладнання змінює, серед іншого, кінематичні граничні умови сталеві опорної конструкції, оскільки накладає додаткові в'язі на її конструктивні елементи.

Визначено, що динамічні характеристики СОКОіТ типових конструктивних форм суттєво впливають на їх конструктивну безпеку в діапазоні частот власних коливань до значення, яке відповідає прискоренню нульового періоду. Ґрунтуючись на отриманих результатах розроблено та науково обґрунтовано підходи щодо вибору раціональних СОКОіТ для кращого сприйняття сейсмічних навантажень.

Результати досліджень напружено-деформованого стану продемонстрували, що розрахункові напруження від сейсмічних навантажень можуть підвищуватися у 1,5 – 3 рази в залежності від висотної відмітки розташування СОКОіТ в реакторному відділенні енергоблоків ЗАЕС, ПАЕС та сягати значень приблизно від 1 МПа до 96 МПа для різних типових конструктивних форм. Такий суттєвий розкид значень сейсмічних напружень в СОКОіТ різних типових конструктивних форм обумовлений кардинально різними спектрами значень частот власних коливань конструкцій та, відповідно, значним розкидом значень сейсмічних навантажень (сейсмічні прискорення змінюється від  $4,8 \text{ м/с}^2$  до  $22,7 \text{ м/с}^2$ ).

Продемонстровано, що особливі умови експлуатації СОКОіТ впливають на їх конструктивну безпеку внаслідок наявності у поверхових спектрах відгуку ділянок стрибкоподібного підвищення значень сейсмічних навантажень при незначній зміні (в межах 1 Гц) значень частот власних коливань конструкцій. Встановлено, що зміна (з  $U_X=U_Y=U_Z=0$ ,  $M_X=M_Y=M_Z=0$  на  $U_X=U_Y=U_Z=0$ ,  $M_X \neq 0$ ,  $M_Y \neq 0$ ,  $M_Z \neq 0$ ) умов закріплення СОКОіТ на конструктивній основі також чутлива до вказаної особливості поверхових спектрів відгуку реакторних відділень енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС.

Розроблено та науково обґрунтовано підходи щодо вибору раціональних СОКОіТ для кращого сприйняття сейсмічних навантажень.

*У четвертому розділі* на підставі виконаних досліджень динамічних характеристик та напружено-деформованого стану розроблені та науково обґрунтовані пропозиції щодо розвитку основних положень методу граничних станів по відношенню до СОКОіТ енергоблоків АЕС за сейсмічних навантажень, а також під час одночасної дії двох епізодичних впливів. Суттєвою перевагою розроблених вдосконалень в порівнянні із положеннями методу граничних станів, регламентованими державними будівельними нормами, є те, що вони враховують особливі умови експлуатації СОКОіТ та ступень їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів.

В межах розвитку сучасного міжнародного методу оцінки граничної сейсмостійкості елементів АЕС розроблені підходи до адаптації математичного апарату ліцензійного розрахункового комплексу ANSYS для автоматизованого розрахунку граничної сейсмостійкості СОКОіТ енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС. Перевагою розроблених підходів є те, що їх реалізація унеможливорює потенційні помилки у виборі репрезентативних перерізів СОКОіТ енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС під час визначення їх граничної сейсмостійкості.

Виконані дослідження та розроблені вдосконалення методу граничних станів, а також методу граничної сейсмостійкості дозволили створити нову методику розрахунку СОКОіТ енергоблоків АЕС України при сейсмічних навантаженнях, а також при одночасній дії двох епізодичних впливів. Для СОКОіТ науково обґрунтовано нові критерії сейсмічної міцності, а також отримані числові значення коефіцієнтів умов роботи та відповідальності за ядерну та радіаційну безпеку. Методика розроблена в розвиток нормативно-правових актів з ядерної та радіаційної безпеки, а також державних будівельних норм.

Нові наукові результати роботи впроваджені:

– експлуатуючою організацією в межах розробки обґрунтувань сейсмостійкості елементів енергоблоків АЕС України під час реалізації

Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 07.12.2011 № 1270;

– при проведенні Державних експертиз ядерної та радіаційної безпеки вказаних обґрунтувань.

**Ключові слова:** сталеві конструкції, динамічні навантаження, частоти власних коливань, форми коливань, метод скінчених елементів, скінчено-елементна модель, епізодичні навантаження, поверхові спектри відгуку, міцність, метод граничних станів.

## ABSTRACT

*Shugaylo O.* Operation of steel supporting structures of nuclear power plant equipment and piping under seismic loads. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis on conferment of a scientific degree of the Doctor of philosophy on a specialty 192 – Building and civil engineering, area of knowledge 19 – Architecture and building. – Kyiv National University of Construction and Architecture. Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2022.

### **The main content of the thesis.**

The research was aimed at improving and developing the methods of safety assessment of Ukrainian nuclear power plants (NPP) by clarifying and improving approaches to assessing the strength of steel supporting structures of equipment and piping (SSSEP) of NPP power units under seismic loads.

According to the results of the performed reviews, analyses and finite-element research's of modes, values of natural frequencies, stress-strain state:

- regularities of dynamic characteristics and stress-strain state of SSSEP depending on the standard structural form, conditions of fastening components on the structural basis, as well as special operating conditions were determined;

- main provisions of the limit states method in the part related to Ukrainian NPP power units SSSEP, taking into account the special conditions of their operation, as well as the degree of their responsibility for ensuring the NPP safety during and after seismic hazards were developed and scientifically justified;

- a methodology for assessing the strength of Zaporizhzhya NPP (ZNPP) and Pivdenoukrainska NPP (PNPP) power units SSSEP under seismic loads has been developed to supplement the provisions of regulations on nuclear and radiation safety, as well as state building code.

From the philosophical view point, the dissertation was aimed at solving an urgent philosophical issue concerning the values of contemporary science and increasing the social responsibility of scientists in relation to the decisions made to ensure the safety of nuclear power plants. The research uses a classical methodology that studies stable



dependencies that can be expressed mainly in mathematical language. The main features of the classical methodology, which were the most important for the research, are the following: the studied phenomena were considered as actually existing and such that do not depend on the subject of study; facts that objectively exist in nature and are associated with unchanging permanent dependencies were addressed as well.

*Section 1* highlights the peculiarities of approaches to ensuring the seismic resistance of NPP components, which are different from approaches to assessing the seismic resistance of general industrial facilities. The existing national and up-to-date international methodologies of assessing the seismic resistance of structures were considered. The specific features of the modern concept of the Ukrainian regulatory and legal framework development with respect to ensuring the safety of nuclear power plants were determined. Up-to-date national and European (Eurocodes) approaches to structural strength calculations, including seismic ones, were analyzed. Imperfections of the state construction standards in terms of using their provisions during the assessment of the seismic SSSEP strength of Ukrainian NPP power units were outlined.

*Section 2* reveals special operating conditions of NPP power units SSSEP, which are caused by the simultaneous action of two episodic impacts, such as an earthquake and the maximum design basis accident “Two-Sided Rupture of the Main Circulation Pipeline Dn 850” at an NPP power unit.

The geological conditions of the location of Ukrainian NPP power units, as well as the results of advanced additional seismological studies of their industrial sites, were analyzed. The peak ground acceleration values of the horizontal component of soil movement during an earthquake at the industrial sites of the Ukrainian NPPs have been determined. The investigated levels of seismic loads to which SSSEP are subjected are located in the range of elevations from 0 m to 36-38 m of ZNPP and PNPP reactor compartments. Arguments in favor of choosing these NPPs for the research were provided. Consideration of actual geological and seismological SSSEP operating conditions has been carried out by using representative seismic loads (floor response spectra), which were determined based on the actual seismic hazard levels of ZNPP and PNPP sites, taking into account the “soil-structure” interaction. The defined list of

calculated loads to which SSSEP of NPP power units are subjected during special operating conditions was presented.

The mathematical model of the SSSEP stress-strain state was described, and the hypotheses used regarding the structure and properties of materials, as well as the nature of deformations, were outlined. The developed finite-element models of SSSEP standard structural forms using the licensed calculation complex ANSYS were presented.

It was substantiated that the developed physico-mathematical model of NPP power units SSSEP: reflects the actual conditions of their operation; takes into account the features of the geometry of structures, as well as the distribution of masses and stiffnesses, which are important for the assessment of seismic resistance; represents constructions as single spatial systems; considers the factors that determine the stress-strain state.

*Section 3* presents the determined regularities based on the results of 64 variational finite-element research`s:

- dynamic characteristics of SSSEP depending on the standard design form, conditions of fastenings on the structural basis, as well as special operating conditions;
- the impact of the fastened equipment on the dynamic characteristics of the steel supporting structure;
- changes in the stress-strain state of the SSSEP depending on the standard structural forms and conditions of fastening on the structural basis during the simultaneous action of two episodic impacts.

The research results of the dynamic characteristics of the steel supporting structure demonstrated that the direct consideration of the equipment in the calculation model changes both the modes of its natural frequencies as well as the values of the natural frequencies themselves. This is due to the fact that the consideration of the equipment itself changes, among other things, the kinematic boundary conditions of the steel supporting structure, as it imposes additional loads on its structural components.

It was determined that the dynamic SSSEP characteristics of the standard structural design significantly affect their structural safety in the frequency range up to the value that corresponds to the acceleration of the zero period. Based on the obtained results, approaches for choosing rational SSSEPs for better perception of seismic loads have been developed and scientifically justified.

The results of research's of the stress-strain state demonstrated that the calculated stresses from seismic loads can increase by 1.5-3 times depending on the elevation of the SSSEP location in the reactor compartments of the ZNPP and PNPP power units and reach values from approximately 1 MPa to 96 MPa for various standard design forms. Such a significant distribution of seismic stress values in SSSEP of various standard design forms is due to radically different spectra values of frequencies of natural oscillations of structures and, accordingly, a significant distribution of seismic load values (seismic acceleration varies from  $4.8 \text{ m/s}^2$  to  $22.7 \text{ m/s}^2$ ).

It has been demonstrated that the special operating conditions of SSSEP affect their structural safety due to the presence in the floor response spectra of areas of a jump-like increase in the values of seismic loads with a slight change (within 1 Hz) in the values of the natural frequencies of the structures. It was established that the change (from  $U_X=U_Y=U_Z=0$ ,  $M_X=M_Y=M_Z=0$  to  $U_X=U_Y=U_Z=0$ ,  $M_X \neq 0$ ,  $M_Y \neq 0$ ,  $M_Z \neq 0$ ) of the SSSEP fastening conditions on the structural basis is also sensitive to the specified feature of the surface response spectra of the reactor compartments of ZNPP and PNPP power units.

Approaches to selecting rational SSSEPs for better perception of seismic loads have been developed and scientifically justified.

**Section 4** presents proposals for the development of the main provisions of the limit state method in relation to the NPP power units SSSEP under seismic loads, as well as during the simultaneous action of two episodic impacts developed and scientifically justified based on the performed researches of dynamic characteristics and stress-strain state. A significant advantage of the developed improvements in comparison with the provisions of the limit state method, regulated by state building code, was that they consider special operating conditions of SSSEPs and the degree of

their responsibility for ensuring the NPP safety during and after seismic hazards.

As part of the development of the up-to-date international seismic margin assessment method of NPP components, approaches to the adaptation of the mathematical apparatus of the ANSYS licensed calculation complex have been developed for the automated calculation of the seismic margin assessment of SSSEP of ZNPP and PNPP power units. The advantage of the developed approaches is that their implementation prevents potential errors in the selection of representative sections of SSSEP of ZNPP and PNPP power units when determining their seismic margin assessment.

The conducted research and developed improvements to the limit states method, as well as the seismic margin assessment method, allowed creating a new methodology for calculating the SSSEP for Ukrainian NPP power units under seismic loads, as well as under simultaneous action of two episodic impacts. For SSSEP, new seismic strength criteria were scientifically substantiated, as well as numerical values of coefficients of operating conditions and responsibility for nuclear and radiation safety were obtained. The methodology was developed to update regulations on nuclear and radiation safety, as well as state building code.

New scientific research results have been implemented:

- by the operator in the framework of the development of justifications for the seismic resistance of components of Ukrainian NPP power units during the implementation of the Comprehensive (Integrated) Safety Improvement Program for Nuclear Power Plants (C(I)SIP) approved by Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1270 dated 7 December 2011;

- under State nuclear and radiation safety reviews of the specified justifications.

**Key words:** steel structures, dynamic loads, frequencies of natural oscillations, form of oscillations, finite element method, finite element model, episodic loads, floor response spectra, strength, limit states method.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України категорії «А», яке цитується у реферативній базі Scopus*

1. 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. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. № 3(95). С. 15-26. [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3\(95\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3(95).02). *Особисто автором досліджені динамічні характеристики сталеві опорної конструкції, її напружено-деформований стан при сейсмічних навантаженнях, а також сполученні сейсмічних навантажень та особливих умов експлуатації* (квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2021 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).

2. 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. doi: 10.32918/nrs.2021.1(93).07. *Особисто автором визначено номенклатуру параметрів особливих умов експлуатації сталевих опорних конструкцій на АЕС та досліджено їх вплив на несучу здатність конструкцій під час оцінки їх сейсмічної міцності* (квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2021 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).

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. doi: 10.32918/nrs.2021.4(92).01. *Особисто автором розроблені загальні принципи оцінки сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій, які враховують ступень їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів* (квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2021 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).

4. 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. doi: 10.32918/nrs.2020.2(86).02. *Особисто автором проаналізовані рівні сейсмічної небезпеки промислових майданчиків АЕС України у яких експлуатуються сталеві конструкції елементів енергоблоків АЕС (квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2020 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).*

Статті у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України категорії «Б»

5. Oleksandr P. Shugaylo, Serhii I. Bilyk «The specifics of the compilation of the calculated load combinations in the assessment of seismic resistance of steel supporting structures of nuclear power plant equipment and piping». *Journal of Mechanical Engineering – Problemy mashynobuduvannia*, 2022, vol. 25, № 3. P. 6–15. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.006>. *Особисто автором розроблені підходи до складання розрахункових сполучень навантажень та їх конкретна номенклатура, що враховують особливі умови експлуатації, а також ступень відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС сталевих опорних конструкцій під час та після сейсмічних впливів.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. О.П. Шугайло «Розвиток методу граничних станів по відношенню до сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС України». *IV Міжнародна конференція «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику»*, Київ, 30 вересня 2022. С. 49-50.

7. Shugaylo O.P. «The problem of specialists' training to assess the strength of steel structures under special operating conditions». *Scientific and pedagogical internship «Modern European trends in the development of engineering education»*, Wloclawek, the Republic of Poland, May 16 – June 26, 2022. P. 71 – 75.

8. О-р П.Шугайло, Д.І.Рижов «Особливості оцінки сейсмостійкості сталевих конструкцій елементів енергоблоків атомних станцій у відповідності до сучасних нормативних вимог». *XII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Будівництво в сейсмічних районах України», Одеса, 23-25 вересня 2021. С. 48-49. Особисто автором розроблені умови використання положень сучасних нормативних документів при розрахунку сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС.*

9. Д.І.Рижов, О-р.П.Шугайло, О-й.П.Шугайло, Р.Я.Буряк, М.А.Мустафін, Т.В.Підгасецький, Я.Д.Круглій «Стан справ з реалізацією на АЕС України нормативних вимог щодо оцінки сейсмостійкості конструкцій, систем та елементів». *Науково-технічна конференція «Геофізичні технології і геопросторове моделювання в задачах геотехніки, інженерної геології, сейсмології та будівництва», Дніпро, 24-27 червня 2019. С. 22-23. Особисто автором досліджено рівень сейсмічних навантажень на елементи АЕС в залежності від їх розташування на різних висотних позначках реакторного відділення.*

Монографія та статті, які додатково відображають наукові результати дисертації

10. Оцінка сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій : монографія / Д. Рижов, О-р Шугайло, О. Сахно та ін. ; ред. Д. Рижов. Київ : ДНТЦ ЯРБ, 2022. 144 с. *Особисто автором розроблені розділ 3.1 «Детерміністичний метод» з підрозділами 3.1.1 «Будівельні конструкції та основи АЕС», 3.1.2 «Технологічне обладнання та трубопроводи», 3.1.3 «Електротехнічне обладнання, обладнання інформаційно-керуючих систем, а також засобів автоматизації та зв'язку», 3.1.4 «Забезпечення дотримання сучасних нормативних вимог до сполучень експлуатаційних та сейсмічних навантажень для елементів АЕС», 3.1.5 «Аналіз стійкості елементів АЕС до сейсмічних впливів у межах методу граничної сейсмостійкості» та розділ 4.1 «Прямі методи (аналіз, випробування)» з підрозділами 4.1.1 «Сейсмічна кваліфікація обладнання з використанням методу*

аналізу (розрахунку)», 4.1.2 «Сейсмічна кваліфікація обладнання за допомогою випробувань».

11. 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. doi: 10.32918/nrs.2021.3(91).01. *Особисто автором сформульована проблематика визначення навантажень від середовища в елементах АЕС I і II категорії сейсмостійкості при сполученні експлуатаційних та сейсмічних навантажень* (видання проіндексовано у базі даних Scopus, кuartиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2021 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).

12. 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 непрямими методами. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 1(85). С. 56-61. doi: 10.32918/nrs.2020.1(85).06. *Особисто автором визначені та сформульовані недоліки непрямого методу оцінки сейсмостійкості елементів АЕС* (видання проіндексовано у базі даних Scopus, кuartиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2020 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ .....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ МІЦНОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	27
1.1 Особливості підходів до забезпечення сейсмостійкості елементів АЕС .....	27
1.2 Теорії та методи оцінки сейсмостійкості елементів АЕС.....	34
1.3 Огляд і оцінка сучасних національних та європейських підходів до розрахунків конструкцій на міцність, в том числі сейсмічну .....	48
1.4 Висновки до розділу 1 .....	57
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СТАЛЕВИХ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ ТА ТРУБОПРОВІДІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....	60
2.1 Опис об'єкту моделювання та фізико-механічних властивостей моделі .....	60
2.2 Особливі умови експлуатації об'єкту моделювання .....	65
2.3 Геологічні умови та сейсмічні навантаження, що враховуються в фізико- математичній моделі .....	70
2.4 Механічні навантаження, що враховуються в фізико-математичній моделі .....	80
2.5 Математична модель сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм.....	88
2.6 Скінчено-елементні моделі сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм.....	93
2.7 Висновки до розділу 2 .....	96

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ ТА ТРУБОПРОВОДІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ .....	99
3.1 Дослідження динамічних характеристик сталевих опорних конструкцій.....	99
3.2 Дослідження напружено-деформованого стану сталевих опорних конструкцій при сейсмічних навантаженнях .....	109
3.3 Дослідження впливу зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій на їх сейсмічну міцність.....	115
3.4 Дослідження впливу зміни умов закріплення сталевих опорних конструкцій на їх сейсмічну міцність .....	124
3.5 Висновки до розділу 3 .....	133
РОЗДІЛ 4. ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ МІЦНОСТІ СТАЛЕВИХ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ ТА ТРУБОПРОВОДІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ .....	136
4.1 Розвиток методу граничних станів по відношенню до сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АЕС .....	136
4.2 Розвиток методу граничної сейсмостійкості по відношенню до сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АЕС .....	142
4.3 Методика оцінки міцності сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів атомних електричних станцій при сейсмічних навантаженнях .....	149
4.4 Висновки до розділу 4 .....	160
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	162
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	164
ДОДАТКИ.....	180

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС	– атомна електростанція;
ВВЕР	– водо-водяний енергетичний реактор;
МГС	– метод граничної сейсмостійкості;
МПА	– максимальна проєктна аварія;
МРЗ	– максимальний розрахунковий землетрус;
НДС	– напружено-деформований стан;
НЕ	– нормальна експлуатація;
ПЗ	– проєктний землетрус;
РВ	– реакторне відділення;
СОКОіТ	– сталеві опорні конструкції обладнання і трубопроводів;
СОУ	– стандарт організації України;
PGA	– peak ground acceleration (пікове значення прискорення ґрунту);
$A_n$	– площа перерізу нетто;
$I_x$	– момент інерції перерізу бруто відносно головних осей інерції x-x;
$R_s$	– розрахунковий опір сталі зсуву;
$R_y$	– розрахунковий опір сталі розтягу, стиску за границею плинності;
$R_{yn}$	– характеристичний опір сталі, за границею плинності;
$t_w$	– товщина стінки;
$\gamma_m$	– коефіцієнт надійності за матеріалом;
$\gamma_n$	– коефіцієнт відповідальності конструкції;
$\gamma_{nc/cI}, \gamma_{nc/cII}$	– коефіцієнти відповідальності СОКОіТ I-ої та II-ої категорії сейсмостійкості відповідно за ядерну та радіаційну безпеку;
$\gamma_c$	– коефіцієнт умов роботи конструкції;
$N$	– поздовжня сила, що спричиняє розтяг (стиск);
$\sigma$	– напруження, МПа.

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження:** Атомна енергетика є стратегічною галуззю країни, доля вироблення електроенергії якої складає близько 55 % від загального балансу України. Сейсмічні впливи відносяться до одного з найнебезпечніших впливів природного характеру для енергоблоків АЕС, який може призвести до відмов із загальної причини. За даними Інституту геофізики Національної академії наук України за останні декілька століть на території України відбулось близько 30 крупних землетрусів. Гарантоване забезпечення сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС є вкрай актуальною задачею.

У зв'язку із подіями на АЕС «Фукусіма-1» на засіданні Ради національної безпеки й оборони України (РНБО) 8 квітня 2011 р. розглянуто питання підвищення безпеки АЕС України. Рішення РНБО вказувало на необхідність проведення поглиблених оцінок безпеки енергоблоків АЕС України, зокрема перевірки їх сейсмостійкості. Відповідне рішення РНБО введено в дію Указом Президента України № 585/2011 від 12 травня 2011 року.

Сейсмостійкість обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС визначається, в тому числі, сейсмостійкістю їх сталевих опорних конструкцій. Для виготовлення цих конструкцій загалом використовують швелери, кутики, профілі гнуті замкнені.

Загалом оцінка сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС має виконуватися на підставі специфічних вимог, регламентованих нормативно-правовими актами з ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ), а також з урахуванням положень Державних будівельних норм (ДБН). Втім, нормативно-правові акти з ЯРБ регламентують загалом лише вимоги до сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів. Така ситуація 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. Втім, пряме використання положень ДБН для оцінки міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС при сейсмічних навантаженнях є недостатньо коректним та прийнятним, оскільки їх положення

не враховують особливі умови експлуатації опорних конструкцій (підвищена температура оточуючого середовища, необхідність одночасного врахування двох епізодичних впливів, врахування землетрусу з повторюваністю 1 раз на 10000 років тощо), а також ступень їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів. Актуальність теми дисертації обумовлена також тим, що згідно чинного законодавства України вона відноситься до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки, а також входить в перелік пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок.

Існуюча практика показує, що сьогодні ми можемо говорити про амбівалентність ролі атомної енергетики в житті людства: з одного боку, її досягнення сприяють вирішенню соціальних, економічних та технічних проблем, а з іншого – вона є об'єктом підвищеної небезпеки з погляду обсягу можливих негативних наслідків відмови її елементів на здоров'я людей та стан навколишнього природного середовища. Отже, з погляду філософії науки дисертаційна робота спрямована на вирішення актуального філософського питання щодо цінностей сучасної науки та підвищення соціальної відповідальності науковців стосовно прийнятих рішень для забезпечення безпеки АЕС. До філософських проблем, що пов'язані з напрямом наукового дослідження, відносяться теоретико-пізнавальні. В межах дослідження використовується класична методологія, що вивчає стійкі залежності, які можна виразити переважно математичною мовою. Основними рисами класичної методології, які найважливіші для дисертаційного дослідження, є такі: досліджувані явища, розглядаються як реально існуючі та такі, що не залежить від суб'єкта пізнання; розглядаються факти, які об'єктивно існують у природі та пов'язані незмінними постійними залежностями.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Основні дослідження теоретичного і прикладного характеру пов'язані з напрямом наукових досліджень, що виконуються науково-педагогічними працівниками кафедри металевих та дерев'яних конструкцій Київського

національного університету будівництва і архітектури (КНУБА) в межах науково-дослідної теми: «Розвиток теорії вибору раціональних ресурсозберігаючих конструкцій сталевих рам з використанням ефективних двотаврових профілів енергоекономічних будівель» (номер держреєстрації: 0121U111715), що виконується на підставі наказу КНУБА від 03.06.2021 № 243.

**Метою роботи** є покращення та розвиток методів оцінки безпеки об'єктів атомної енергетики шляхом уточнення та вдосконалення підходів до оцінки міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС при сейсмічних навантаженнях.

**Об'єктом дослідження** є СОКОіТ енергоблоків АЕС України.

**Предмет дослідження:** міцність СОКОіТ енергоблоків АЕС України при сейсмічних навантаженнях.

**Методи досліджень:** аналіз, узагальнення, чисельні методи скінчених елементів, методи теорії коливань, опору матеріалів та будівельної механіки.

**Основні завдання дослідження:**

- дослідити моди та частоти власних коливань СОКОіТ в залежності від їх типових конструктивних форм, умов закріплення на конструктивній основі та особливих умов експлуатації;
- визначити напружено-деформований стан СОКОіТ при сейсмічних навантаженнях, а також під час одночасної дії двох епізодичних впливів;
- дослідити вплив умов закріплення на напружено-деформований стан СОКОіТ при сейсмічних навантаженнях, а також під час одночасної дії двох епізодичних впливів;
- дослідити вплив зміни технологічних умов експлуатації СОКОіТ на їх сейсмічну міцність.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у такому:

Уперше:

- визначені закономірності динамічних характеристик СОКОіТ енергоблоків АЕС в залежності від типової конструктивної форми, умов закріплення на конструктивній основі, а також особливих умов експлуатації;

- визначені закономірності впливу приєднаного обладнання на динамічні характеристики сталеві опорної конструкції. Встановлені особливості впливу зміни динамічних характеристик СОКОіТ на їх конструктивну безпеку;

- встановлені закономірності зміни напружено-деформованого стану СОКОіТ в залежності від типових конструктивних форм та умов закріплення на конструктивній основі під час одночасної дії двох епізодичних впливів;

- розроблені та науково обґрунтовані підходи щодо вибору раціональних СОКОіТ для кращого сприйняття сейсмічних навантажень;

Удосконалено:

- основні положення методу граничних станів стосовно міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС України за сейсмічних навантажень, а також під час одночасної дії двох епізодичних впливів;

- критерії сейсмічної міцності СОКОіТ, а також числові значення коефіцієнтів умов роботи та відповідальності за ядерну та радіаційну безпеку;

- підходи до складання розрахункових сполучень навантажень та їх конкретна номенклатура, що враховують особливі умови експлуатації СОКОіТ, а також ступень їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів;

Отримала подальшого розвитку:

- методика розрахунку СОКОіТ енергоблоків АЕС України при сейсмічних навантаженнях, а також при одночасній дії двох епізодичних впливів.

**Обґрунтованість та достовірність** отриманих результатів досліджень забезпечується:

- точністю та достовірністю вихідних даних;
- врахуванням результатів сучасних репрезентативних досліджень сейсмологічних умов розташування промислових майданчиків ЗАЕС та ПАЕС;
- врахуванням фактичних геологічних умов основ реакторних відділень енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС;

- використанням репрезентативних сейсмічних навантажень на СОКОіТ реакторних відділень ЗАЕС та ПАЕС;
- застосуванням фізико-математичних моделей СОКОіТ, які відображають дійсні (в тому числі особливі) умови їх роботи, враховують важливі для оцінки сейсмічної міцності особливості геометрії конструкцій, а також розподілу мас і жорсткостей;
- використанням ліцензійного розрахункового комплексу ANSYS та скінчено-елементних моделей СОКОіТ із оптимальним розміром скінчених елементів, перевіркою збіжності результатів розрахунків.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що удосконалений метод граничних станів, а також розроблена методика можуть бути використані науковими, науково–дослідними, конструкторськими та експлуатуючими організаціями України, серед яких: «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект», «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування», «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» тощо.

**Впровадження** результатів дисертаційної роботи здійснено в межах:

- розробок експлуатуючою організацією обґрунтувань сейсмостійкості елементів енергоблоків АЕС України під час реалізації Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 07.12.2011 № 1270;
- проведення Державних експертиз ядерної та радіаційної безпеки матеріалів експлуатуючої організації щодо обґрунтувань сейсмостійкості елементів енергоблоків АЕС України.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 12 робіт. Основні результати дослідження викладені у 6-и статтях у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України категорії «А», яке цитується у реферативній базі Scopus, 1 стаття у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України категорії «Б». Одна робота представлена у



вигляді двох розділів, підготовлених здобувачем у колективній монографії. Три роботи представлені як тези доповідей у національних та міжнародній науково-технічних конференціях, ще одна робота – як тези доповіді на міжнародному науково-педагогічному стажуванні за кордоном.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати та розробки, які відображають суть дисертації, виконані здобувачем самостійно. Вибір теми та формування основних завдань дослідження виконані спільно з науковим керівником. Особистий внесок здобувача полягає у встановленні закономірностей, наукових обґрунтуваннях, узагальненні отриманих результатів, розвиненні методу граничних станів, адаптуванні математичного апарату ліцензійного розрахункового комплексу ANSYS, розробленні методики оцінки сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС. У наукових публікаціях, підготовлених у співавторстві, викладені наукові результати, що належать здобувачу: дослідження динамічних характеристик, напружено-деформованого стану, впливу особливих умов експлуатації СОКОіТ під час оцінки їх сейсмічної міцності, розроблення підходів до складання розрахункових сполучень навантажень та їх конкретної номенклатури для СОКОіТ енергоблоків АЕС, розвинення методу граничних станів, розроблення методики оцінки сейсмічної міцності СОКОіТ.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на національних та міжнародних науково-технічних конференціях, а також та під час міжнародного науково-педагогічного стажування за кордоном, а саме:

- IV Міжнародна конференція «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику» (м. Київ, Україна, 30 вересня 2022 року);
- Scientific and pedagogical internship «Modern European trends in the development of engineering education», галузь знань «Архітектура та будівництво», спеціальність «Будівництво та цивільна інженерія», сертифікат про проходження стажування № TSI-162616-KSW від 26.06.2022 (м. Влоцлавек, Республіка Польща, 16 травня – 26 червня 2002 року);

– XII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Будівництво в сейсмічних районах України» (м. Одеса, Україна, 23 – 25 вересня 2021);

– Науково-технічна конференція «Геофізичні технології і геопросторове моделювання в задачах геотехніки, інженерної геології, сейсмології та будівництва» (м. Дніпро, Україна, 24 – 27 червня 2019 року).

Публічна презентація наукових результатів дисертації, а також її обговорення відбувались на засіданнях кафедри металевих та дерев'яних конструкцій КНУБА (м. Київ, 2022 рік).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із переліку скорочень та позначень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та п'яти додатків. Загальний обсяг роботи становить 194 сторінки, у тому числі основна частина складає 124 сторінок, список використаних джерел – 16 сторінок і додатки – 15 сторінок. Основна частина, крім тексту, включає таблиці, рисунки та формули.

**Подяка.** Висловлюю глибоку подяку науковому керівнику – доктору технічних наук, професору Білику Сергію Івановичу. Також завдячую керівництву Держаного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» за сприяння та моральну підтримку під час написання дисертаційної роботи.

## **РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ МІЦНОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

### **1.1 Особливості підходів до забезпечення сейсмостійкості елементів АЕС**

Об'єкти атомної галузі України, які знаходяться на етапах життєвого циклу «експлуатація» та «зняття з експлуатації», мають різноманітні сталеві конструкції, в тому числі нетипові (як то конструкції підсилення на об'єкті «Укриття» над зруйнованим енергоблоком № 4 Чорнобильської АЕС) та унікальні за своїм призначенням та масштабами (як то Новий безпечний конфайнмент над об'єктом «Укриття»). Серед широкого різноманіття сталевих конструкцій важливе місце займають СОКОіТ енергоблоків АЕС, приклади яких наведені в підрозділі 2.1 розділу 2 дисертації Ці конструкції набувають особливої актуальності для забезпечення безпечної експлуатації АЕС внаслідок того, що сейсмостійкість обладнання та трубопроводів АЕС визначається, в тому числі, сейсмостійкістю їх сталевих опорних конструкцій. Сейсмічний вплив відноситься до одного з найнебезпечніших впливів природного характеру для енергоблоків АЕС, який може призвести до відмов із загальної причини. Під цією відмовою йдеться про численні відмови конструкцій, систем і елементів енергоблоку АЕС внаслідок однієї причини, що включає, зокрема зовнішні впливи. Прикладом такої негативної події є аварія на АЕС «Фукусіма-1» в Японії у 2011 році. За даними Інституту геофізики Національної академії наук України за останні декілька століть на території України відбулось близько 30 крупних землетрусів [1], [2].

Підходи до забезпечення сейсмостійкості елементів АЕС є відмінними від тих, що використовуються для елементів загальнопромислових об'єктів. Ця відмінність обумовлена тим, що АЕС є об'єктом підвищеної небезпеки з погляду обсягу можливих негативних наслідків відмови її елементів на здоров'я людей та стан навколишнього природного середовища. Враховуючи викладене, а також у зв'язку із згаданими подіями на АЕС «Фукусіма-1», на засіданні РНБО 8 квітня 2011 розглянуто питання підвищення безпеки АЕС України. Рішення

РНБО вказувало на необхідність проведення поглиблених оцінок безпеки енергоблоків АЕС України, зокрема перевірки їх сейсмостійкості. Відповідне рішення РНБО введено в дію Указом Президента України № 585/2011 від 12 травня 2011 року [1].

Під сейсмостійкістю загальнопромислових об'єктів загалом розуміється забезпечення відсутності глобальних пошкоджень за динамічних навантажень та можливості подальшої експлуатації після відновлювання або ремонту. Водночас, під сейсмостійкістю елементів АЕС розуміють їх здатність забезпечувати ядерну та радіаційну безпеку за динамічних навантажень, які виникають під час сейсмічних впливів, що є більш жорсткішим ніж вимагається від загальнопромислових об'єктів. Внаслідок цього до безпеки АЕС висуваються значно жорстокіші вимоги, що призводить до необхідності врахування суттєво сильніших сейсмічних впливів в поєднанні із особливими технологічними умовами експлуатації елементів енергоблоків АЕС. Ще важливими відмінностями елементів АЕС від елементів загальнопромислових об'єктів є те, що [1]:

- «Сейсмічність майданчика атомних станцій і параметри сейсмічних впливів визначаються на підставі сейсмологічних досліджень з урахуванням конкретних геодинамічних, сеймотектонічних, сейсмологічних, ґрунтових і гідрологічних умов розміщення майданчика ...» [3];

- відповідно до сучасної міжнародної практики, зокрема рекомендацій Міжнародної агенції з атомної енергії та референтних рівнів безпеки Асоціації регулюючих органів західної Європи, для енергоблоків АЕС незалежно від фактичної сейсмічності промислового майданчика пікове значення прискорення горизонтальної складової руху ґрунту під час сейсмічних впливів інтенсивністю до максимального розрахункового землетрусу (МРЗ) приймається не менше 0,1 g. Це значення відповідає 7-бальному землетрусу за шкалою сейсмічної інтенсивності Медведева-Спонхоейра-Карника та ДСТУ Б В.1.1-28:2010 [4]. Отже, приймається, що для АЕС України не існує несейсмічних майданчиків;

– реальні характеристики сейсмічних впливів можуть переважати характеристики, прийняті за результатами геолого-тектонічних та сейсмологічних вишукувань відповідного майданчику. З урахуванням цього, для промислових майданчиків АЕС України встановлюється сейсмічний запас до визначених за результатами вишукувань сейсмічних характеристик майданчика (головним чином це стосується значення пікового прискорення ґрунту);

– оцінка сейсмічної небезпеки майданчика АЕС виконується імовірнісними та детерміністичними методами.

29 листопада 2016 року набув чинності нормативно-правовий акт [3], розроблений з урахуванням сучасних підходів до забезпечення сейсмостійкості елементів АЕС, а також уроків аварії на АЕС «Фукусіма-1». Відповідно до нього при обґрунтуванні сейсмостійкості елементів АЕС необхідно враховувати два рівні сейсмічного впливу, а саме: проєктний землетрус (ПЗ) і МРЗ. При цьому, «проєктний землетрус – землетрус прогнозованої інтенсивності на майданчику атомної станції з повторюваністю один раз на 100 років для діючих енергоблоків атомних станцій та один раз на 1000 років для нових енергоблоків атомних станцій, що відповідає середньому значенню річної імовірності перевищення  $10^{-2}$  та  $10^{-3}$  відповідно», «максимальний розрахунковий землетрус – землетрус максимально прогнозованої інтенсивності на майданчику атомної станції з повторюваністю один раз на 10000 років, що відповідає середньому значенню річної імовірності перевищення  $10^{-4}$ » [3].

Важливим аспектом для визначення сейсмічних вимог до СОКОіТ є коректна оцінка ступеня їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час і після сейсмічних впливів. Втім, не всі сталеві опорні конструкції елементів енергоблоку АЕС в рівному ступеню важливі для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки. Тому не доцільно встановлювати для всіх елементів АЕС єдині вимоги до їх сейсмостійкості. В [3] передбачено три категорії сейсмостійкості елементів АЕС (I, II та III): найбільш відповідальні елементи відносяться до I категорії, найменш відповідальні – до III. Задум такого поділу полягає в тому, щоб в залежності від важливості елементів щодо забезпечення

безпеки АЕС під час і після сейсмічних впливів розділяти вимоги до їх сейсмостійкості та критеріїв міцності. Отже, до I категорії сейсмостійкості належать системи та елементи АЕС:

«віднесені до класів 1 та 2 за впливом на безпеку відповідно до Загальних положень безпеки атомних станцій;

системи та елементи безпеки необхідні для виконання таких функцій безпеки: безпечна зупинка реактора та підтримання його в безпечному стані, аварійне відведення тепла від активної зони реактора та басейну витримки, запобігання або обмеження виходу радіоактивних речовин, що виділяються під час аварій, за передбачені проектом межі;

системи нормальної експлуатації та їх елементи, відмова яких під час сейсмічних впливів до МРЗ включно внаслідок виходу радіоактивних речовин може призвести до перевищення на межі санітарно-захисної зони та поза її межами хоча б одного з рівнів безумовної виправданості для невідкладних контрзаходів, що встановлені Державними гігієнічними нормативами «Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)», затвердженими наказом Міністерства охорони здоров'я України від 14 липня 1997 року № 208 і введеними в дію постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01 грудня 1997 року № 62 (далі - НРБУ-97);

будівлі, споруди та їх основи, обладнання, трубопроводи та їх елементи, механічне пошкодження яких при сейсмічних впливах до МРЗ включно шляхом силового або температурного впливу на вказані вище системи та їх елементи може призвести до їх відмови;

додаткові технічні засоби, призначені для управління запроектними, зокрема важкими, аваріями» [3].

Згідно [3] елементи АЕС, що належать до I категорії сейсмостійкості, мають виконувати свої функції із забезпечення безпеки під час та після проходження землетрусу інтенсивністю до МРЗ включно. Підтвердження сейсмостійкості таких елементів виконується із врахуванням одночасної дії сейсмічного впливу за трьома компонентами (двома горизонтальними та вертикальним).

«До II категорії сейсмостійкості належать будівлі, споруди, системи та елементи АС (які не увійшли до I категорії), відмова яких окремо або в сукупності з іншими системами й елементами може призвести до перерви у виробленні електроенергії та/або до перевищення допустимих рівнів загального радіоактивного забруднення робочих поверхонь, та/або допустимих концентрацій радіонуклідів у повітрі робочих приміщень, встановлених НРБУ-97» [3].

Згідно [3] елементи АЕС, що належать до II категорії сейсмостійкості, мають зберігати свою працездатність після землетрусу інтенсивністю до ПЗ включно. Для обґрунтування їх сейсмостійкості допускається врахування сейсмічного навантаження за компонентами окремо.

Відповідно до [3] до III категорії сейсмостійкості належить решта елементів, які не увійшли до категорій I та II. В свою чергу [3] не поширюється на елементи III категорії сейсмостійкості, оскільки їх відмова при землетрусі не вплине на ядерну та радіаційну безпеку.

Сучасна концепція розвитку нормативно-правової бази України щодо забезпечення безпеки АЕС передбачає розробку та впровадження нормативно-правових актів, які містять загальні регулюючі вимоги [5]. При цьому, передбачається, що детальні технічні вимоги повинні міститися, наприклад в стандартах організації України (так звані СОУ), які розробляються в підтримку та технічний розвиток загальних регулюючих вимог. Нормативно-правовий акт [3] містить загальні регулюючі вимоги до:

- оцінки сейсмічної небезпеки майданчика АЕС;
- проектування енергоблоків АЕС з урахуванням сейсмічних впливів;
- антисейсмічних попереджувальних та захисних заходів;
- переоцінки сейсмічної безпеки енергоблоків АЕС, що знаходяться в експлуатації.

Згідно підходів [3] номенклатура сполучень технологічних умов експлуатації обладнання, трубопроводів АЕС та їх сталевих опорних конструкцій і сейсмічних впливів («Нормальна експлуатація + максимальний

розрахунковий землетрус», «Нормальна експлуатація + проєктна аварія + максимальний розрахунковий землетрус» тощо) приймається постульованою та не залежить від значення імовірності одночасної реалізації різних технологічних умов в цих сполученнях.

В [3] встановлено, що обґрунтування сейсмостійкості конструкцій АЕС виконується, зокрема з урахуванням чинних нормативних документів та стандартів, а також положень [3]. По відношенню до конструкцій діючих АЕС в Україні історично склався такий підхід:

1) за основу технічних прийомів та теоретичних засад оцінки міцності конструкцій приймають положення відповідних державних будівельних норм. Врахування відповідальності конструкцій АЕС за ядерну та радіаційну безпеку, а також особливих умов їх експлуатації здійснюється шляхом:

- введення коригуючих коефіцієнтів (наприклад по відношенню до розрахункових значень навантажень та впливів тощо);
- встановлення спеціальних значень відповідних критеріїв (наприклад, крен будівлі тощо);
- встановлення вимог щодо необхідності розгляду особливих впливів та навантажень (наприклад, падіння літака, «гільйотинний» розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850 реакторної установки тощо);
- встановлення специфічних вимог до матеріалів тощо;

2) для конструкцій АЕС I категорії сейсмостійкості встановлюються жорсткі вимоги, наприклад: врахування сейсмічних впливів з високою прогнозованою інтенсивністю (зокрема, МРЗ з повторюваністю один раз на 10000 років), врахування сейсмічного впливу одночасно за трьома напрямками (двома горизонтальними та одним вертикальним), жорсткі критерії міцності тощо. Для конструкцій АЕС II категорії сейсмостійкості в порівнянні із конструкціями I категорії сейсмостійкості встановлюються менш жорсткі вимоги, наприклад: врахування сейсмічних впливів меншої прогнозованої інтенсивності (зокрема, ПЗ з повторюваністю один раз на 100 років), врахування



сейсмічного впливу за трьома напрямками окремо, менш жорсткі критерії міцності тощо.

Цей підхід успішно апробований багаторічною практикою проектування, оцінки безпеки енергоблоків АЕС та використовується по теперішній час для різноманітних елементів АЕС.

Процес проектування сталевих опорних конструкцій трубопроводів діючих енергоблоків АЕС загалом можна описати так:

1) першочергово виконується оцінка сейсмічної міцності безпосередньо трубопроводу, за результатами якої визначається відсутність/наявність дефіцитів міцності;

2) в разі виявлення дефіцитів сейсмічної міцності трубопроводу проектувальником виконуються варіанти розрахунки з метою пошуку та визначення оптимальних параметрів опорної системи трубопроводу, які забезпечують його сейсмічну міцність при заданому рівні сейсмічних впливів;

3) шляхом встановлення відповідних кінематичних граничних умов трубопроводу проектувальник підбирає конкретні типи додаткових стандартизованих трубопровідних опор (направляюча, ковзна, жорстка) та їх місце розташування в просторовій розгалуженій трубопровідній системі;

4) наступним кроком є виконання статичних та сейсмічних розрахунків трубопроводу з урахуванням змін в його опорній системі з метою підтвердження достатності запропонованих заходів для забезпечення сейсмічної міцності трубопроводу при заданому рівні сейсмічних впливів;

5) на підставі результатів розрахунків сейсмічної міцності трубопроводів визначається навантаження від них на кожну сталеву опорну конструкцію розгалуженої трубопровідної системи (використані нами підходи до визначення навантажень від трубопроводів на сталеві опорні конструкції детально описані в розділі 2 наукової праці);

6) після реалізації описаних кроків відбувається проектування безпосередньо сталевих опорних конструкцій під обрані додаткові стандартизовані опори трубопроводу (див. наприклад рисунки 2.2, 2.3 підрозділу

2.1 розділу 2 наукової праці).

Особливостями описаного процесу є те, що:

– місцем розташування сталевих опорних конструкцій трубопроводів може бути будь-яка конструктивна основа (підлога, стіна, стеля відповідного приміщення);

– проектування сталевих опорних конструкцій трубопроводів відбувається «за місцем», часто у вкрай стиснених умовах фактичного розташування відповідної ділянки трубопроводу на енергоблоці АЕС.

Аналогічна ситуація спостерігається при проектуванні сталевих опорних конструкцій під серійне обладнання (трубопровідна арматура, електро та пневмоприводи трубопровідної арматури і насосів, розширювальні баки тощо). Встановлення (заміна) такого обладнання на діючих енергоблоках АЕС відбуватися також «за місцем». Отже, проектувати сталеві опорні конструкції такого обладнання доводиться з урахуванням того, щоб воно могло бути під'єднаним до існуючих трубопроводів з їх фактичним трасуванням (наприклад, необхідно приймати задану висоту опорних стоек, яка буде забезпечувати можливість під'єднання розширювального баку до існуючих трубопроводів, що розташовані на відповідній висоті від підлоги) [6].

У зв'язку із викладеним особливої актуальності набуває також питання визначення раціональних СОКОіТ енергоблоків АЕС для кращого сприйняття сейсмічних навантажень.

## **1.2 Теорії та методи оцінки сейсмостійкості елементів АЕС**

На різних етапах розвитку науки і техніки науковцями та дослідниками пропонувались різноманітні теорії оцінки сейсмостійкості конструкцій [7–11]. Наразі можна виділити 3 основні теорії, а саме: статична, динамічна та спектральна теорії сейсмостійкості.

Засновником статичної теорії сейсмостійкості вважається японський вчений Ф. Оморі, який запропонував визначати сейсмічні навантаження як добуток маси на прискорення, тобто конструкція приймалась абсолютно твердим тілом та вважалось, що у всіх точках конструкції діють однакові сейсмічні сили. Для

обґрунтування своєї теорії Ф. Оморі виконав значну кількість експериментів на вібраційній платформі. Предметом цих досліджень були цегляні блоки, які навантажувалися гармонічним навантаженням до їх перекидання та руйнування. Отримані Ф. Оморі результати засвідчили, що прискорення коливань зразків відрізнялись від значення прискорення в основі не більше ніж на 20 %. Внаслідок цього ним зроблено припущення, що величина прискорень зразків збільшується несуттєво і цим аспектом можна знехтувати. Саме тому ця теорія отримала назву «статична теорія». Максимальні значення сейсмічних сил за теорією Ф. Оморі визначаються за співвідношенням

$$S_{\max} = m \cdot \ddot{u}_0, \quad (1.1)$$

де  $m$  – маса конструкції,  $\ddot{u}_0$  – максимальне прискорення основи. Враховуючи, що  $m = Q/g$ , де  $Q$  – вага конструкції, а  $g$  – прискорення вільного падіння, формулу (1.1) можна представити як

$$S_{\max} = \frac{\ddot{u}_0}{g} \cdot Q = k_c \cdot Q. \quad (1.2)$$

Коефіцієнт  $k_c$  називають «коефіцієнтом сейсмічності», який показує ту частину сейсмічного навантаження, яку сейсмічний вплив передає на конструкцію. Статична теорія сейсмостійкості домінувала тривалий час та у середині ХХ століття була покладена в основу нормативних документів з оцінки сейсмостійкості низки країн світу. При цьому, для розрахункової сейсмічності майданчику 7, 8, 9 балів коефіцієнт  $k_c$  приймався рівним 0,025, 0,05, 0,1 відповідно. Згодом було з'ясовано, що статична теорія застосовна для вкрай жорстких конструкцій, а у випадку значної їх піддатливості може приводити до значних похибок. Крім цього, вона не враховує вплив деформативності основи та демпфуючих властивостей матеріалу. Додатково, аналіз наслідків землетрусів показав, що статична теорія не може пояснити характер пошкоджень та руйнувань багатьох конструкцій. Втім, практика продемонструвала, що частина конструкцій, які проєктувались та розраховувались на підставі засад статичної теорії, також виявились сейсмостійкими при різних рівнях сейсмічних впливів. Це засвідчило про потенційну можливість подальшого використання основних

засад статичної теорії сейсмостійкості за умови їх вдосконалення та уточнення. Тому різними науковцями світу (А. Дануссо, Н. Мононобе, К. Сюехіро, Нейман, К.С. Заврієв та інші) почалась робота з розробки основних положень динамічної теорії сейсмостійкості. Метою цієї розробки було врахування при розрахунку сейсмічних навантажень як параметрів коливання основи, так і вплив вимушених пружних коливань конструкції. Так Н. Мононобе розглядав конструкцію як пружне тіло, що деформується. Передбачалось, що коливання основи відбувається згідно гармонічного закону. Динамічна розрахункова модель прийнята як система з одним ступенем вільності. Поставлена задача зводиться до вирішення диференціальних рівнянь коливань конструкції при гармонічному збуренні. Н. Мононобе розглянув випадок вимушених коливань без урахування початкових умов руху конструкції. Запропоноване ним співвідношення для визначення сейсмічних сил ( $S$ ) має такий вигляд

$$S = \beta \cdot k_c \cdot Q, \quad (1.3)$$

де:  $\beta$  – коефіцієнт динамічності, що визначається за співвідношенням (1.4)

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{T^2}{T_0^2}}, \quad (1.4)$$

де:  $T$ ,  $T_0$  – період власних коливань конструкції та основи відповідно.

Для жорстких конструкцій можна наближено вважати, що  $T \ll T_0$ , тоді коефіцієнт динамічності  $\beta = 1$ . В даному випадку теорія Н. Мононобе співпадає з теорією Ф. Оморі. У випадку коли  $T \approx T_0$  коефіцієнт динамічності  $\beta \rightarrow \infty$ . Цей стан системи називається резонансом. Втім, оскільки всі матеріали мають демпфуючі властивості в дійсності коефіцієнт динамічності приймає скінченні значення. Співвідношення (1.3), (1.4) вказують, що сейсмічне навантаження, окрім іншого, залежить також від динамічних властивостей конструкції. Проте, цій теорії притаманні свої недоліки, наприклад: не врахування взаємодії конструкції та основи, пластичних властивостей конструкції, початкових умов руху конструкції.

Академік К.С. Заврієв в якості вихідних умов прийняв передумову, що в початковий момент руху основи прискорення досягає максимального значення, а швидкість коливань дорівнює нулю. В теорії К.С. Заврієва рівняння руху системи при кінематичному збуренні в основі представлено у вигляді

$$\ddot{u} + \frac{k}{m} \cdot u = \ddot{u}_{0 \max} \cdot \cos \omega_0 t, \quad (1.5)$$

де  $k$  – жорсткість системи. Вирішивши це рівняння з урахуванням початкових умов можна прийти до того, що сейсмічне навантаження визначається аналогічно (1.3), за винятком коефіцієнта динамічності  $\beta$ , який з урахуванням прийнятого закону коливань буде рівним

$$\beta = \frac{2}{1 - \frac{T^2}{T_0^2}}, \quad (1.6)$$

Рівняння (1.6) демонструє, що врахування початкових умов руху основи (без урахування загасання) призводить до підвищення коефіцієнта динамічності  $\beta$  в два рази в порівнянні із теорією Н. Мононобе. Одним з проблемних питань динамічної теорії сейсмостійкості була не достатня вивченість закономірностей коливань основи внаслідок чого використовувалось спрощене уявлення про її рух.

Подальший розвиток динамічної теорії визначення сейсмічних навантажень здійснений М. Біо, який запропонував використання інструментальних записів коливань поверхні ґрунту під час сейсмічних впливів. Для цього ним був спроектований механічний інтегратор у вигляді системи з одним ступенем вільності із змінним періодом вільних коливань маятника, який реєстрував максимальну амплітуду переміщень. Потім вираховувались прискорення коливань за якими для різних періодів коливань будувалась спектральна крива  $\tau(T)$  та визначалось сейсмічне навантаження на конструкцію. Згодом А.Г. Назаров та Б.К. Карапетян розвили інструментальний спосіб, запропонований М. Біо, за допомогою приладу, який названо багатомаятниковим сейсмометром. Це дозволило підвищити обґрунтованість сейсмічного аналізу шляхом використання спектрів відгуку. На цьому

представленні сейсмічних даних побудована так звана спектральна теорія. В різні часи у розбудові та вдосконаленні спектральної теорії приймали участь науковці різних країн світу (Г. Хаузнер, Р. Мартел, Дж. Блюм, Н. Ньюмарк, Дж. Халл, Х. Беньоффа, Дж. Альфорд, С.В. Медведів, І.Л. Корчинський, Ш.Г. Напетварідзе, Е.Є Хачіян та інші).

Аналіз сейсмограм землетрусів продемонстрував, що в якості спрощеного представлення переміщень основи при сейсмічних впливах може бути прийнята сума згасаючих синусоїд, яка в якості наближеної передумови може бути представлена у вигляді однієї загасаючої синусоїди виду

$$u_0 = a_0 \cdot e^{-\varepsilon t} \cdot \sin \omega t, \quad (1.7)$$

де  $a_0$  – початкова амплітуда переміщень,  $\varepsilon$  – коефіцієнт загасання при колюванні основи,  $\omega$  – колова частота колювань. Диференційне рівняння руху системи із загасанням можна наближено представити у вигляді

$$\ddot{u} + 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n \cdot \dot{u} + \omega_n^2 \cdot u = \frac{P(t)}{m}, \quad (1.8)$$

де  $P(t) = -\ddot{u}_0(t)$  – інерційна сила. Рішення цього рівняння при нульових початкових умовах можна записати так

$$u(t, \omega, \varepsilon) = \frac{-1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2} \cdot \omega_n} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\varepsilon \omega_n (t - \tau)} \sin \omega_n \sqrt{1 - \varepsilon^2} (t - \tau) dt. \quad (1.9)$$

Використання спектральної теорії дозволило застосувати реальні інструментальні записи колювань поверхні ґрунту під час сейсмічних впливів, врахувати динамічні характеристики конструкції. Розрахунки за спектральною теорією широко використовують при оцінці сейсмостійкості елементів промислових та цивільних об'єктів. Її положення увійшли до нормативних документів різних країн світу. Результатам оцінки сейсмостійкості за спектральною теорією загалом притаманна достатня надійність інженерних розрахунків конструкцій.

Розвиток комп'ютерної техніки та чисельних методів вирішення інженерних задач сприяв можливості проведення детального аналізу та моделювання складних часових процесів, яким піддана конструкція під час

динамічних навантажень за сейсмічних впливів. Це дозволило розробити та впровадити метод прямого динамічного аналізу, який використовується для аналізу вимушених коливань конструкції при сейсмічному впливі, що заданий розрахунковими акселерограмами землетрусу. Використання цього методу дозволяє розрахувати стан конструкції впродовж всього часу землетрусу.

При реалізації методу прямого динамічного аналізу в якості сейсмічного впливу задається акселерограма руху основи розрахункової моделі. Динамічний аналіз систем з кінцевим числом ступенів свободи, у тому числі нелінійних за однакової закономірності кінематичного збудження опор, проводиться методами чисельного інтегрування систем диференціальних рівнянь виду [1]:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [B]\{\dot{x}\} + [C]\{x\} + \{R\} = -\ddot{\psi}(t)[M]\{\cos \alpha\}, \quad (1.10)$$

де,  $[M]$ ,  $[B]$  та  $[C]$  – матриці мас, демпфування та жорсткості відповідно,  $\{R\}$  – вектор реактивних сил від нелінійних зв'язків,  $\ddot{\psi}$  – прискорення основи розрахункової моделі (тобто акселерограма). Вектор реактивних сил  $\{R\}$ , що діють у напрямку узагальнених координат системи, являє собою суму реакцій додаткових нелінійних зв'язків системи (демпферів, амортизаторів тощо). Необхідно відзначити, що метод прямого динамічного аналізу є трудомістким та чутливим до коректності його реалізації.

Вагому роль у розвитку теорій та методів оцінки сейсмостійкості конструкцій відіграли А.Н. Бірбраєр, І.І. Гольденблат, В.І. Старостенко, В.Д. Омельченко, К.В. Єгупов, О.В. Мурашко, І.Л. Корчинський, С.В. Поляков, Г.Г. Фаренюк, Ю.І. Немчинов, А.М. Бамбура, М.Г. Мар'єнков, О.В. Кендзера та багато інших. Відповідні наукові розробки вчених знайшли своє відображення в ДБН щодо проектування та розрахунків конструкцій на сейсмічні впливи.

Значний внесок [12–13] в розвиток сучасних розрахункових комплексів для оцінки напружено-деформованого стану конструкцій, а також оптимізації чисельного моделювання життєвого циклу об'єктів будівництва внесла М.С. Барабаш. При цьому, в її роботах [14–16] також висвітлені актуальні аспекти визначення резервів несучої здатності конструкцій у сейсмічно небезпечних зонах України, підходи до моделювання пошкодженого перерізу

конструкції, методика та спеціальний скінчений елемент, використання яких дозволяє розробити конструктивні заходи з сейсмічної безпеки конструкцій.

В даний час для оцінки сейсмостійкості елементів АЕС широко використовується лінійно-спектральний метод, який взагалі можна вважати основним методом для атомної галузі. При цьому, це відноситься до всіх типів елементів АЕС: сталеві та будівельні конструкції, споруди, трубопроводи, різноманітне обладнання тощо. Заради справедливості слід відзначити, що в атомній галузі досі використовуються навіть положення статичної теорії сейсмостійкості. Проте, з урахуванням відомих недоліків цієї теорії її використання прийнято обмежувати випадком коли перша частота власних коливань елемента АЕС є високою, тобто вище 33 Гц.

В лінійно-спектральному методі розрахунку в якості вихідних сейсмічних даних використовуються спектри відгуку, зокрема поверхові. В основу цього методу 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. Лінійно-спектральний метод передбачає з початку проведення модального аналізу елемента, що розглядається. При визначенні сейсмічних навантажень у розрахунку враховують нижчі форми коливань, власна частота яких не перевищує найбільшу частоту, для якої задані спектри відповіді, в тому числі поверхові. Сейсмічне навантаження, що діє у напрямку  $i$ -ої узагальненої координати та відповідає  $j$ -ї формі власних коливань системи, визначають за формулою [1]:

$$S_{ij} = m_{ii} \ddot{\Phi}_j \Phi_j x_{ij}, \quad (1.11)$$

де  $\ddot{\Phi}_j$  – прискорення згідно спектру відповіді для відповідної частоти,  $\Phi_j$  – постійна  $j$ -ої форми коливань, що визначається за формулою:

$$\Phi_j = \frac{\sum_{i=1}^N m_{ii} x_{ij} \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^N m_{ii} x_{ij}^2}, \quad (1.12)$$

де  $\alpha_i$  – кут між напрямками сейсмічного впливу та  $i$ -ої узагальненої координати.



При зовнішньому збуренні системи сейсмічними впливами постає питання визначення максимального розрахункового сейсмічного відгуку системи за відомими значеннями її модальних відгуків (моментів, сил, переміщень, напружень тощо). Для визначення сумарного сейсмічного відгуку системи в інженерній практиці застосовуються декілька способів. До першого можна віднести спосіб згідно з яким приймається, що всі модальні відгуки за виключенням  $j$ -го, взаємно знищуються, та враховувати тільки одну частоту власних коливань. Цей спосіб дасть нам «нижню» оцінку відгуку. Втім, для підвищення точності розрахунку необхідно враховувати внесок більше ніж від однієї форми власних коливань. Цього можна досягти виконав сумування за модулем всіх врахованих в розрахунку модальних відгуків. Цей спосіб побудований на передумові, що всі максимуми модальних відгуків досягаються одночасно та співпадають за знаком. Загалом цей спосіб в порівнянні із першим дасть нам вже «верхню» оцінку відгуку системи. До недоліків цих способів можна віднести, що вони загалом не враховують дійсну роботу системи при сейсмічних навантаженнях. В інженерній практиці (в тому числі для елементів енергоблоків АЕС України) для сумування модальних відгуків широко застосовується так званий спосіб «Корінь квадратний із суми квадратів» (ККСК). Цей спосіб відображає найбільш імовірні значення сумарного відгуку системи. Подальша модифікація ККСК дозволила розробити спосіб «10 відсотків». Згідно йому частоти власних коливань системи розкладаються на дві групи: близько та далеко розташовані одна від одної. При цьому, дві частоти вважаються близько розташованими, якщо вони відрізняються не більше ніж на 10 %. Якщо різниця сусідніх частот більше 10 %, такі частоти вважаються далеко розташованими. Ще один спосіб сумування, який враховує близькість розташування частот, прийнято називати «Методом групування». При реалізації цього способу частоти власних коливань, починаючи з нижчої, групуються. В кожную групу включають частоти, які перевищують нижчу частоту в групі не більше ніж на 10 %. При виборі способу сумування рекомендується враховувати, що точність використаних процедур повинна відповідати точності вихідних даних. Водночас,

при визначенні сейсмічних навантажень у вигляді поверхових спектрів відгуку використовуються низка спрощень та припущень, що в свою чергу впливає на точність цих даних [7-10, 17].

Сейсмічні впливи характеризуються двома горизонтальними та вертикальним напрямками. Для визначення сумарних значень відгуків (напруження, зусилля, деформації тощо) за трьома напрямками знову ж таки користуються способом ККСК. В атомній енергетиці України цей спосіб є основним. Водночас, аналіз записів землетрусів продемонстрував, що дві горизонтальні та вертикальна компоненти руху ґрунту статистично взаємно незалежні. Це означає, що вкрай малою є імовірність того, що максимумами відгуків конструкції на ці компоненти співпадуть в часі. З урахуванням викладеного, запропоновано такий спосіб сумування як «Правило 100-40-40». На відміну від способу ККСК «Правило 100-40-40» ґрунтується на статистичному аналізі сейсмічних відгуків. У відповідності до цього способу приймається, що в момент часу коли одна з компонент приймає максимальне значення на дві інші компоненти приходить 40 % від максимумів відповідних компонент [7-10, 18]. Отже, «Правило 100-40-40» передбачає розгляд всіх можливих комбінацій відгуків з урахуванням знаків та записується таким чином:

$$R = \pm(R_x \pm 0,4R_y \pm 0,4R_z) \text{ або} \\ \pm(R_y \pm 0,4R_z \pm 0,4R_x), \text{ або} \\ \pm(R_z \pm 0,4R_x \pm 0,4R_y) \quad (1.13)$$

Водночас, в Єврокодi EN 1998-1 [19] пропонується замість коефіцієнту 0,4 використовувати 0,3. У випадку коли спектри відгуку однакові для всіх компонент сейсмічного впливу, але їх пікові прискорення мають різні значення, «Правило 100-40-40» можна використати не по відношенню до відгуків системи за трьома напрямками, а вважати, що за цим правилом розподілені сейсмічні навантаження на конструкцію [7].

Прикладні інженерні методи оцінки сейсмостійкості елементів діючих АЕС стало та системно розвиваються у світі на підставі набутого досвіду і знань щодо наслідків землетрусів. На сучасному етапі сейсмостійкість елементів діючих

АЕС прийнято оцінювати з використанням прямих та непрямих методів. При цьому, до прямих методів відносять розрахунок та випробування, а до непрямих – досвід експлуатації. Під непрямим методом розуміється оцінка сейсмостійкості елементів АЕС, що побудована на виконанні аналізу сейсмічного досвіду, отриманого під час реальних землетрусів та в результаті випробувань аналогічних за своїми конструктивними та функціональними характеристиками елементів. Прикладами розвитку інженерних методів оцінки сейсмостійкості елементів діючих АЕС є:

- процедура GIP (Generic Implementation Procedure) для реакторної установки з ВВЕР (процедура GIP-ВВЕР);
- Seismic Margin Assessment (SMA) (метод граничної сейсмостійкості (МГС)).

Вказані методи широко використовуються при переоцінці сейсмічної безпеки діючих енергоблоків АЕС України. Втім, проєктування нових елементів АЕС здійснюється на підставі вимог національних нормативних документів.

Аналіз сейсмостійкості, що заснований на виконанні оцінки сейсмічного досвіду, використовується в Сполучених Штатах Америки (США) більше 30 років. В той час були зібрані перші в США бази даних сейсмостійкості елементів АЕС. Ґрунтуючись на відомостях цих баз даних в свій час була розроблена загальна експлуатаційна процедура GIP. У середині 90-х років її використали для оцінки сейсмостійкості елементів енергоблоків АЕС з ВВЕР у країнах Східної Європи (Чеській Республіці, Словацькій Республіці, Угорщині), а пізніше – у Республіці Вірменія й модифікували безпосередньо до цього типу реактору та створили відповідні бази даних сейсмостійкості елементів. Отже, процедура GIP-ВВЕР є одним з варіантів початкового методу GIP. Загалом процедура GIP-ВВЕР застосовується для більш ніж 20 класів елементів АЕС серед яких горизонтальні та вертикальні насоси, арматура з пневматичним, електричним та електромагнітним приводами, вентилятори, компресори, дизель-генератори, акумулятори на стелажах, трансформатори тощо. Процедура GIP-ВВЕР полягає у виконанні оцінки відповідності елементу встановленим критеріям за

результатами проведення візуальних оглядів елементів у місці експлуатації. Отже, головним засобом процедури GIP-BBER є інженерна оцінка [1], [20]-[23].

При реалізації процедури GIP-BBER виконують такі етапи [22]:

- підбір групи сейсмічної оцінки (ГСО);
- встановлення елемента, сейсмостійкість якого має бути оцінена, і формування переліку таких елементів;
- виконання візуальних оглядів елементів та оцінка їх сейсмостійкості;
- визначення несейсмостійкого елемента та прийняття рішення щодо подальших дій.

При візуальних оглядах елементів під час процедури GIP-BBER оцінюється значна кількість різних аспектів (стан кріплення до будівельних конструкцій, надійність закладних деталей, тріщини в бетоні навколо анкерів тощо). Як відзначено вище, сейсмостійкість елементів АЕС визначається також сейсмостійкістю їх сталевих опорних конструкцій. Виходячи з цього для забезпечення сейсмостійкості елемента АЕС в цілому процедурою GIP-BBER загалом передбачена необхідність виконання розрахунку сейсмостійкості цих сталевих опорних конструкцій. Втім, процедурою GIP-BBER не встановлюються методи, вимоги та критерії підтвердження їх сейсмостійкості. Отже, до недоліків процедури GIP-BBER можна віднести те, що вона не розглядає такі важливі аспекти, які впливають на сейсмічну міцність СОКОіТ енергоблоків АЕС [23]:

- зміна рівня навантажень на СОКОіТ в режимах порушення нормальної експлуатації (ПНЕ) та проектної аварії (ПА) на енергоблоці АЕС;
- зміна технологічних умов експлуатації СОКОіТ в режимах ПНЕ та ПА.

Розрахунки елементів діючих АЕС згідно МГС виконуються для встановлення інтегрального параметра сейсмостійкості. Цим параметром є величина HCLPF (High Confidence Low Probability of Failure (висока забезпеченість низької імовірності відмови)), яка характеризує рівень сейсмостійкості відповідного елемента. В імовірнісному значенні величина HCLPF визначається як 95-відсоткова достовірність того, що відмова елемента

виникне менш ніж у 5 % випадків. Визначення інтегрального показника граничної сейсмостійкості HCLPF систем та елементів АЕС першочергово зумовлено необхідністю подальшого виконання з його урахуванням сейсмічного імовірнісного аналізу безпеки енергоблоків АЕС України [1], [24]. Параметр HCLPF, який виражається в одиницях прискорення вільного падіння  $g$ , порівнюється із значенням максимального прискорення ґрунту майданчику конкретної АЕС. В МГС елемент вважається сейсмостійким, якщо значення HCLPF перевищує значенням максимального прискорення ґрунту для конкретного промислового майданчику АЕС [1], [22], [25-27].

У відповідності до підходів [27] при визначенні HCLPF враховується лише одне сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів, а саме: «Нормальна експлуатація + землетрус». Параметр HCLPF при розрахунках в пружній області визначається таким чином [22], [27]:

$$HCLPF = FS \cdot F_{\mu} \cdot PGA_{RLE}, \quad (1.14)$$

де  $FS$  – коефіцієнт сейсмічного запасу,  $F_{\mu}$  – безрозмірний коефіцієнт непружного поглинання енергії,  $PGA_{RLE}$  – прискорення нульового періоду на ґрунті для рівня сейсмічного впливу, що розглядається (Review Level Earthquake). В свою чергу, коефіцієнт  $FS$  показує, у скільки разів необхідно підвищити інтенсивність сейсмічних навантажень, щоб досягти допустимого значення параметру, за яким йде оцінювання. У загальному випадку коефіцієнт  $FS$  розраховують за формулою

$$FS = \frac{C - D_{NS}}{\sqrt{D_S^2 + D_{SAM}^2 + \delta C_S}}, \quad (1.15)$$

У формулі (1.15)  $C$  – допустиме значення параметра за яким йде оцінювання (наприклад, допустимі напруження, зусилля тощо),  $D_{NS}$  – внесок у параметр, що оцінюється, всіх несейсмічних навантажень,  $D_S$  – внесок у параметр, що оцінюється, сейсмічних інерційних навантажень,  $D_{SAM}$  – внесок у параметр, що оцінюється, навантажень від сейсмічного зміщення опор;  $\delta C_S$  – зниження величини допустимого параметра внаслідок впливу сейсмічного навантаження

(в якості прикладу цієї ситуації в [27] описується випадок коли міцність стіни щодо зсувних навантажень може бути зменшена вертикальним розтягуючим навантаженням на цю стіну, яке спричинене сейсмічною подією). Водночас, при практичних розрахунках параметрами  $\delta C_S$  та  $D_{SAM}$  нехтують внаслідок відсутності відповідних факторів або їх не суттєвого впливу, який допустимо не враховувати.

Для врахування можливості роботи конструкції в пружно-пластичній області в МГС передбачається використання коефіцієнту непружного поглинання енергії  $F_\mu$ . При цьому, розрахунок виконується в пружній області, а частина загального навантаження, яка викликана сейсмічним впливом, коригується з використанням коефіцієнта  $F_\mu$ . В залежності від типу конструкції  $F_\mu$  рекомендується приймати від 1,00 до 2,00. При розрахунку сталевих опорних конструкцій в пружній постановці  $F_\mu$  приймається рівним 1,25.

При впровадженні МГС в Україні була виконана його певна модифікація, яка полягала, зокрема в такому: в початковому варіанті МГС оцінка сейсмічної міцності елемента виконується одразу на підставі результатів розрахунку параметру  $HCLPF$  (тобто з використанням коефіцієнту  $F_\mu$ ). В Україні прийнято, що оцінка сейсмічної міцності елементів АЕС виконується у відповідності до національних стандартів (тобто без використання коефіцієнту  $F_\mu$ ). Безпосередньо гранична сейсмостійкість елемента АЕС визначається за результатами розрахунку параметру  $HCLPF$  з використанням коефіцієнту  $F_\mu$ . Вказана модифікація МГС знайшла своє відображення в [27]. Як відзначено вище, в подальшому саме значення  $HCLPF$  використовується у сейсмічному імовірнісному аналізі безпеки енергоблоків АЕС України.

Досвід використання МГС при оцінці сейсмостійкості елементів діючих енергоблоків АЕС України продемонстрував, що вона також не позбавлена окремих недоліків. За підходами МГС коефіцієнт сейсмічного запасу  $FS$  прийнято визначати для перерізу конструкції, в якому виникають максимальні значення сейсмічних напружень. Втім, на практиці виявлена низка

розрахункових випадків коли розгляд лише цього перерізу конструкції не забезпечував достатній рівень достовірності та консерватизму розрахунку FS, тобто виявлялися інші перерізи в цій самій конструкції в яких сейсмічні напруження не сягали максимального значення, але коефіцієнт FS, розрахований за формулою (1.15), виявлявся меншим. Ця ситуація обумовлена не врахуванням результатів аналізу напруженого стану всієї конструкції в режимі НЕ, зокрема перетинів в яких виникають екстремуми напружень в цьому режимі [28]. В свою чергу в [28] запропонована загальна ідея щодо компенсування вказаного недоліку, згідно якої пропонується із застосуванням можливостей сучасних розрахункових комплексів аналізувати перерізи конструкції в яких напруження окремо під час НЕ та окремо під час МРЗ сягають своїх екстремумів. Вказана ідея буде розвинена нами безпосередньо для СОКОіТ енергоблоків АЕС шляхом врахування особливих умов їх експлуатації, а також підходів будівельної механіки та державних будівельних норм до оцінки міцності сталевих конструкцій.

В якості підсумку виконаного огляду необхідно відзначити, що ґрунтовний, об'ємний та тривалий науковий пошук в розглядуваній галузі знань (див. наприклад [7–11, 15, 16, 29–48]) продемонстрував, що загалом дослідженнями сейсмостійкості конструкцій займається значна кількість вітчизняних науковців. Об'єктами цих досліджень здебільшого є поведінка будівель і споруд при сейсмічних впливах з урахуванням ґрунтових умов; фактична робота будівель і споруд при сейсмічних впливах; зміни напружено-деформованого стану конструкцій будівель, що піддані динамічним впливам; конструкції причальних споруд при статичних і динамічних впливах; сталеві несучі елементи будівель та споруд у сейсмонебезпечних районах тощо. В статтях [49–52] авторами розглянуті окремі типи сталевих конструкцій, в тому числі при суттєво підвищених температурах.

Отже, дослідження роботи СОКОіТ енергоблоків АЕС України при сейсмічних навантаженнях, а також під час одночасної дії декількох епізодичних впливів, залишилися поза увагою наукового співтовариства внаслідок

багатогранності особливих умов їх експлуатації (сейсмологія, теплогідрравлічні процеси в обладнанні та трубопроводах в різних режимах експлуатації енергоблоків АЕС, міцність конструкцій) [53].

### **1.3 Огляд і оцінка сучасних національних та європейських підходів до розрахунків конструкцій на міцність, в том числі сейсмічну**

Металеві конструкції виготовляють із сталі або алюмінієвих сплавів. В атомній енергетиці алюмінієві сплави практично не застосовуються. Загалом використання алюмінієвих сплавів (наприклад, АД00, АМГ2, САВ 1 тощо) обмежено поодинокими випадками виготовлення окремого обладнання. Водночас, сталі мають практично необмежене застосування. За їх допомогою на АЕС реалізують різноманітні конструктивні форми будь-якого призначення: від СОКОіТ до елементів крану кругової дії реакторного відділення енергоблоку АЕС вантажопідемністю 400 тс.

Дослідженнями роботи, проектуванням, питаннями реконструкції, розробкою і вдосконаленням методів та методик розрахунку металевих конструкцій різноманітного призначення займалися та продовжують займатися багато відомих вітчизняних науковців, серед яких: О.І. Шумицький, І.Г. Затуловський, А.І. Калінічев, Є.В. Горохов, В.В. Фурсов, М.С. Стрелецький, А.В. Перельмутер, В.М. Шимановський, В.М. Гордєєв, С.І. Білик, В.Є. Волкова, О.В. Шимановський, М.С. Барабаш, О.О. Нілов, В.В. Юрченко, М.О. Вабіщевич, В.Г. Тонкачєєв, А.С. Білик, В.О. Пермьков, І.Д. Пелешко, А.А. Михайлов, С.Ф. Пічугін. Відповідні наукові розробки вітчизняних вчених знайшли своє відображення, зокрема в ДБН щодо проектування та розрахунків сталевих конструкцій.

Наразі активно розвиваються методи оптимального проектування сталевих конструкцій. При цьому, постановки задач та методи їх вирішення стають більш витонченими. В цьому напрямі необхідно відзначити роботи В.В. Юрченко [54–57], в яких розглядаються проблеми використання методів оптимізації конструкцій, критерії оптимальності, задачі параметричної оптимізації розмірів поперечного перерізу елементів конструкцій.



Зазвичай під динамічними навантаженнями на конструкцію розуміють дію сейсмічних впливів або техногенного походження, які викликають коливання конструкції. Дослідженнями коливань, викликаних в системі полігармонійним зовнішнім збудженням, ефективного керування структурними коливаннями, чисельного моделювання динамічної поведінки конструкцій, типу та рівня нелінійності за даними структурних коливань для моніторингу змін у стані конструкцій присвячені роботи [58–63] В.Є. Волкової.

Серед досліджень динамічної дії на конструкції необхідно виділити також роботи М.О. Вабіщевича [64–66], в яких розглядаються процес поширення коливань на металоконструкції від динамічного впливу, динамічне деформування конструкцій, бібліотека скінчених елементів для апроксимації просторових тіл під час їх деформування за динамічного навантаження з урахуванням великих пластичних деформацій.

Аналіз національної методичної та технічної документації продемонстрував, що наразі в Україні по відношенню до СОКОіТ енергоблоків АЕС відсутні документи, які регламентують критерії сейсмічної міцності та методики оцінки напружено-деформованого стану з урахуванням особливих умов їх експлуатації, а також ступеню їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів. Масштабний та ґрунтовний огляд існуючих різновидів технічної документації продемонстрував, що описана ситуація загалом стосується лише СОКОіТ енергоблоків АЕС, оскільки для великої кількості інших різноманітних елементів АЕС (серед яких будівельні конструкції та споруди, підйомно-транспортне обладнання, тепломеханічне обладнання, трубопроводи, внутрішньокорпусні пристрої обладнання тощо) існують відповідні документи, які загалом регламентують вказані аспекти. До цих документів належать такі різновиди як методика, керівний документ (з умовним позначенням «РД»), правила та норми в атомній енергетиці (документи з умовним позначенням «ПНАЭ»), СОУ, керівний технічний матеріал (документи з умовним позначенням «РТМ»).

Як відзначено вище, СОКОіТ енергоблоків АЕС є класичними сталевими конструкціями. Отже, з технічного погляду для розрахунку цих конструкцій можна використовувати положення ДБН [17, 67, 68, 69].

Згідно підходів ДБН розрахунок сталевих конструкцій полягає у визначенні характеристик напружено-деформованого стану, що виникає під дією зовнішніх навантажень як у конструкції в цілому, так і в її окремих елементах. Тривалий час розрахунки металевих конструкцій виконувались методом допустимих напружень. При цьому, конструкція розглядалась в експлуатаційному стані. Розрахункові напруження в її елементах обмежувались значенням так званих допустимих напружень. Ці допустимі напруження визначались шляхом ділення значення границі плинності матеріалу на коефіцієнт запасу, який призначався сталим незалежно від конкретних умов роботи конструкції. Згодом для конструкцій було обґрунтовано та розроблено метод розрахунку за граничними станами, що є досягненням вітчизняної будівельної науки. Це дозволило враховувати дійсну роботу конструкції і диференційовано підходити до змінності навантажень, властивостей матеріалу, умов роботи та інших факторів. Метод розрахунку за граничними станами передбачає використання системи коефіцієнтів умов роботи конструкції, безпеки та сполучень навантажень. В свою чергу ці коефіцієнти ґрунтуються на результатах теоретичних та експериментальних досліджень дійсної роботи відповідних конструкцій у відповідних умовах експлуатації, а також імовірісно-економічних обґрунтувань. В сучасних ДБН знайшов своє відображення саме цей метод [70], [71].

Згідно [68] розрахункові вимоги ДБН формулюються для граничних станів, які визначають межу між допустимими і недопустимими (позаграничними) станами конструкцій. Перехід через граничний стан відповідає одному з видів відмови, самі граничні стани вважаються при цьому допустимими. Граничні стани можуть бути віднесені до конструкції в цілому, до її окремих елементів, з'єднань або поперечних перерізів. Виокремлюють дві групи граничних станів: перша – за втратою несучої здатності або за повною непридатністю до

експлуатації; друга група містить граничні стани, які ускладнюють нормальну експлуатацію конструкції або зменшують її довговічність порівняно зі встановленим терміном експлуатації.

Розрахункові сполучення навантажень (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. В розрахунках конструкцій використовуються сполучення двох типів: основні та аварійні. 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 1.1 [69, 71, 72].

Таблиця 1.1. Значення коефіцієнтів сполучень для навантажень.

Сполучення та навантаження, що входять до них	Коефіцієнт сполучень $\psi$ для навантажень			
	постійних	тривалих ( $\psi_1$ )	коротко-часних ( $\psi_2$ )	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

Згідно [17] загалом дозволені до використання такі методи оцінки сейсмостійкості конструкцій:

- спектральний метод;

- метод динамічного аналізу із використанням інструментальних або синтезованих акселерограм землетрусу;
- метод нелінійного статичного розрахунку (використовується в разі необхідності врахування нелінійної реакції конструкції та/або як альтернатива нелінійному динамічному розрахунку).

Підходами [17] передбачається, що розрахункове значення зусилля, напруження або іншого силового фактора, який відповідає розрахунковій комбінації сейсмічного та інших навантажень і за яким реалізується перевірка несучої здатності конструктивного елемента, розраховується за формулою:

$$N_d = \gamma_n \cdot N_{stat} + \frac{N_p}{m}, \quad (1.16)$$

- де  $\gamma_n$  – коефіцієнт відповідальності конструкції;
- $N_{stat}$  – доля розрахункового значення силового фактора, зумовлена всіма врахованими навантаженнями, що увійшли в аварійне сполучення відповідно до [17], крім сейсмічного навантаження;
- $N_p$  – доля розрахункового значення силового фактора, пов'язана із виключно сейсмічним навантаженням;
- $m$  – коефіцієнт, який враховує підвищення механічних властивостей матеріалів за високих швидкостей навантаження (відповідно до [17] приймається рівним 1,3 для сталевих конструкцій при розрахунку на несучу здатність).

Поглиблений аналіз ДБН [17, 67, 68, 69] виявив, що пряме використання їх положень та підходів не може вважатися достатньо обґрунтованим та коректним по відношенню СОКОіТ енергоблоків АЕС. До основних причин, які обумовлюють цю ситуацію, можна віднести такі:

- 1) з метою врахування можливих відхилень від передбачених умов роботи конструкції документом [67] регламентується необхідність використання коефіцієнту умов роботи  $\gamma_c$ . При цьому, в [67] цей коефіцієнт встановлений для опор водонапірних башт, а також значної кількості інших конструкцій (балки суцільного перерізу і стиснуті елементи ферм перекриттів під залами театрів,

клубів, кінотеатрів тощо). Значення коефіцієнтів умов роботи, запропоновані [67], ґрунтуються на результатах теоретичних та експериментальних досліджень дійсної роботи відповідних конструкцій у відповідних умовах експлуатації [71]. Отже, в [67] при встановленні конкретних числових значень  $\gamma_c$  не враховані особливі умови експлуатації СОКОіТ енергоблоків АЕС;

2) з метою врахування можливих матеріальних збитків та соціальних втрат, пов'язаних з відмовою (пошкодженням) конструкції, документами [67, 68] регламентується необхідність використання в розрахунках сталевих конструкцій коефіцієнту надійності за відповідальністю  $\gamma_n$ . Значення цього коефіцієнту, запропоновані [68], ґрунтуються на результатах імовірнісно-економічних обґрунтувань [71]. В [68] для аварійних ситуацій встановлюється єдине (в межах одного класу наслідків (СС1, СС2, СС3)) значення коефіцієнту  $\gamma_n$  для різних категорій відповідальності конструкції (А, Б, В). Використання єдиного значення  $\gamma_n$  призводить до не врахування ступеню відповідальності СОКОіТ енергоблоків АЕС під час та після сейсмічних впливів, а саме: відмова сталеві опорної конструкції першої категорії сейсмостійкості може призвести до аварії на АЕС, а відмова сталеві опорної конструкції другої категорії сейсмостійкості – до перевищення допустимих рівнів загального радіоактивного забруднення робочих поверхонь та/або допустимих концентрацій радіонуклідів у повітрі робочих приміщень. Крім цього, у відповідності до [3] критерії сейсмічної міцності елементів АЕС ґрунтуються не на імовірнісно-економічних аспектах, а на детерміністичних з використанням такого принципу: до більш важливих для безпеки елементів АЕС висуваються більш жорсткі критерії сейсмічної міцності, до менш важливих – менш жорсткі;

3) у відповідності до [69] до аварійного сполучення крім постійних і змінних навантажень може входити тільки один епізодичний вплив. При цьому, до епізодичних належать: сейсмічні впливи, вибухові впливи, навантаження, викликані різкими порушеннями технологічного процесу, тимчасовою несправністю чи руйнуванням обладнання тощо. Втім, для СОКОіТ енергоблоків

АЕС, які віднесені до I категорії сейсмостійкості, загалом необхідним є розгляд одночасної дії двох епізодичних впливів, а саме [3]:

- максимальна проектна аварія «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850» (при якій температура середовища, що оточує сталеві опорні конструкції, буде сягати  $\approx 150^{\circ}\text{C}$  в герметичній частині реакторного відділення енергоблоку АЕС);
- сейсмічний вплив з повторюваністю 1 раз на 10000 років.

Отже, вказані підходи [69] не враховують особливі умови експлуатації та ступень відповідальності СОКОіТ енергоблоків АЕС під час та після сейсмічних впливів;

4) згідно з [17] при визначенні розрахункового значення горизонтального сейсмічного навантаження ( $S_{ki}$ ) необхідно використовувати:

- коефіцієнт, що враховує тип і призначення будівлі (виробничі корпуси, готелі, спальні корпуси, вокзали, театри тощо);
- коефіцієнт, що враховує поверховість будівлі заввишки понад 5 поверхів;
- розрахункову амплітуду прискорення основи в залежності від сейсмічності майданчику в балах (6, 7, 8 та 9);
- спектральний коефіцієнт динамічності, який залежить від, зокрема категорії ґрунту.

Отже, формула для визначення  $S_{ki}$  орієнтована на будівлі та споруди, розташовані на ґрунті, а також на використання узагальнених даних щодо сейсмічності майданчику. Водночас, СОКОіТ розташовані не на ґрунті, а на відповідних висотних відмітках будівель енергоблоку АЕС. Для кожної відмітки розташування СОКОіТ в будівлі вже розраховані сейсмічні навантаження у вигляді поверхових спектрів відгуку на підставі спектрів відгуку на ґрунті, специфічних для конкретного промислового майданчику АЕС. Таким чином, описані вище коефіцієнти не застосовні для СОКОіТ енергоблоків АЕС, які розташовані всередині будівлі. Більш того, на пряму ці коефіцієнти не застосовні також для будівель та споруд АЕС, які розташовані на ґрунті. Розрахунок цих

будівель та споруд виконується з урахуванням відповідних специфічних вимог, серед яких є такі [3]:

- розрахункова амплітуда прискорення основи приймається відповідно до пікового прискорення ґрунту, визначеного на підставі сейсмологічних досліджень конкретного промислового майданчику АЕС;
- спектральний коефіцієнт динамічності визначається відповідно до спектра відгуку ґрунту, отриманого за результатами сейсмологічних досліджень конкретного промислового майданчика АЕС.

5) згідно з [17] до номенклатури сейсмічних впливів, які мають бути враховані в розрахунках конструкцій, входять слабкий землетрус (СЗ), ПЗ та МРЗ. Ця номенклатура сейсмічних впливів є дещо ширшою ніж прийнята для АЕС де не розглядається СЗ [3]. Втім, [17] навіть для об'єктів класу наслідків ССЗ регламентує врахування МРЗ з періодом повторюваності 1 раз на 5000 років, в той час коли згідно [3] для СОКОіТ енергоблоків АЕС І категорії сейсмостійкості необхідним є врахування МРЗ з повторюваністю у два рази вищою (1 раз на 10000 років). Отже, підходи [17] не враховують в достатній мірі ступень відповідальності СОКОіТ щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів.

Наведений перелік прикладів не є вичерпним, але яскраво демонструє основні проблеми та перешкоди з якими доведеться зіткнутися фахівцю з розрахунків в разі спроби прямого використання положень та підходів ДБН [17, 67, 68, 69] під час оцінки сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС України. Оскільки висвітлені питання є вкрай специфічними, то відповіді на них відсутні також в технічній та науковій літературі.

В Європі для проєктування та розрахунків конструкцій на міцність, в тому числі сейсмічну, розроблені, зокрема Єврокод EN 1990 «Основи проєктування конструкцій» [73], група кодів Єврокод 3 «Проєктування сталевих конструкцій» та група кодів Єврокод 8 «Проєктування сейсмостійких конструкцій». Основними документами груп Єврокоду 3 та Єврокоду 8 є EN 1993-1-1 [74] та EN 1998-1 [19] відповідно. В цих документах визначені загальні правила та

вимоги до проектування конструкцій з урахуванням відповідних навантажень та впливів.

В Єврокодах використовується метод розрахунку конструкцій за граничними станами, а саме: несуча здатність та експлуатаційна придатність. При цьому, застосовується система часткових коефіцієнтів надійності та комбінаційних коефіцієнтів. Числові значення вказаних коефіцієнтів відрізняються від національних, які регламентовані ДБН, внаслідок використання різних статистичних даних при їх визначенні [71]. За допомогою часткових та комбінаційних коефіцієнтів отримують відповідні розрахункові величини навантажень [73]. Числові значення часткових та комбінаційних коефіцієнтів можуть визначатися на підставі [73]:

- 1) багаторічного досвіду будівельних традицій (основний метод визначення переважної кількості коефіцієнтів в Єврокодах);
- 2) статистичної оцінки експериментальних даних та польових спостережень (це повинно виконуватись у рамках імовірнісної теорії надійності.)

Навантаження поділяються на постійні, змінні та епізодичні [73].

Згідно [74] розрахункова схема та основні припущення при розрахунках сталевих конструкцій повинні відображати їх дійсну роботу у відповідному граничному стані, а також поведінку перерізів та вузлів із достатньою достовірністю. При цьому, в [74], на відміну від [67], встановлюються 4, а не 3 класи поперечних перерізів.

Згідно [19] загалом дозволені до використання такі методи оцінки сейсмостійкості конструкцій:

- метод горизонтального зсувного навантаження («lateral force method of analysis»);
- спектральний метод з використанням модального аналізу («modal response spectrum analysis»);
- метод нелінійного статичного розрахунку («non-linear static (pushover) analysis»);



– метод нелінійного динамічного розрахунку («non-linear time history (dynamic) analysis»).

Узагальнюючи необхідно відзначити, що Єврокоди, так само як і національні ДБН, не враховують особливі умови експлуатації та ступень відповідальності СОКОіТ щодо забезпечення безпеки АЕС.

#### **1.4 Висновки до розділу 1**

Сейсмічний вплив відноситься до одного з найнебезпечніших впливів природного характеру для енергоблоків АЕС, який може призвести до відмови із загальної причини. Отже, гарантоване забезпечення сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС є вкрай актуальною задачею. Крім цього, актуальність теми наукової праці обумовлена також тим, що згідно чинного законодавства України вона відноситься до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки, а також входить в перелік пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок.

Нормативно-правовий акт [3] не поширюється на елементи енергоблоків АЕС III-ої категорії сейсмостійкості, оскільки їх відмова при землетрусі не вплине на ядерну та радіаційну безпеку. Викладене дозволяє нам для подальшого дослідження виділити СОКОіТ енергоблоків АЕС I та II категорій сейсмостійкості.

Аналіз національної методичної та технічної документації продемонстрував, що наразі в Україні по відношенню до СОКОіТ енергоблоків АЕС відсутні документи, які регламентують критерії сейсмічної міцності та методики оцінки напружено-деформованого стану з урахуванням особливих умов їх експлуатації, а також ступеню їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів. З'ясовано, що описана ситуація загалом стосується лише розглядуваних СОКОіТ, оскільки для великої кількості інших різноманітних елементів АЕС існують відповідні документи, які в цілому регламентують згадані аспекти.

Поглиблений аналіз ДБН [17, 67–69] виявив, що пряме використання їх положень та підходів не може вважатися достатньо обґрунтованим та коректним

по відношенню СОКОіТ енергоблоків АЕС. Встановлено, що ДБН та Єврокоди об'єднує те, що вони не регламентують специфічні аспекти оцінки міцності, в тому числі сейсмічної, СОКОіТ енергоблоків АЕС.

Виконаний аналіз сучасних світових інженерних методів оцінки сейсмостійкості елементів діючих АЕС (зокрема, процедура GIP-VVER та МГС) дозволив визначити їх недоліки та недосконалість. В свою чергу в [28] запропонована загальна ідея щодо усунення виявленого недоліку МГС, яка буде розвинена нами для СОКОіТ енергоблоків АЕС шляхом врахування особливих умов їх експлуатації, а також підходів будівельної механіки та державних будівельних норм до оцінки міцності сталевих конструкцій.

Ґрунтовний, об'ємний та тривалий науковий пошук в розглядуваній галузі знань продемонстрував, що загалом дослідженнями сейсмостійкості конструкцій займається значна кількість науковців. Втім, з'ясовано, що дослідження роботи СОКОіТ енергоблоків АЕС України при сейсмічних навантаженнях, а також під час одночасної дії декількох епізодичних впливів, залишились поза увагою наукового співтовариства.

Визначено, що при оцінці сейсмостійкості елементів діючих АЕС України в якості основного інструментарію використовується лінійно-спектральний метод. При цьому, додатково з'ясовано, що це відноситься до всіх типів елементів діючих АЕС (сталеві та будівельні конструкції, споруди, трубопроводи, різноманітне обладнання тощо).

Встановлено, що в подальших дослідженнях доцільно врахувати успішно апробований багаторічною практикою в атомній галузі України підхід згідно з яким:

- за основу технічних прийомів та теоретичних засад оцінки міцності конструкцій елементів АЕС приймають положення відповідних державних будівельних норм. Водночас, врахування відповідальності СОКОіТ енергоблоків АЕС за ядерну та радіаційну безпеку, а також особливих умов їх експлуатації необхідно здійснювати шляхом введення відповідних коефіцієнтів, встановленням специфічних вимог та критеріїв сейсмічної міцності;

– для конструкцій АЕС I категорії сейсмостійкості встановлюються жорсткі вимоги та критерії. Для конструкцій АЕС II категорії сейсмостійкості встановлюються менш жорсткі вимоги та критерії в порівнянні із конструкціями I категорії сейсмостійкості.

На підставі результатів виконаного огляду нами сформовані такі задачі дослідження:

1) дослідити моди та частоти власних коливань СОКОіТ в залежності від їх типових конструктивних форм, умов закріплення на конструктивній основі та особливих умов експлуатації;

2) визначити напружено-деформований стан СОКОіТ при сейсмічних навантаженнях, а також під час одночасної дії двох епізодичних впливів;

3) дослідити вплив умов закріплення на напружено-деформований стан СОКОіТ при сейсмічних навантаженнях, а також під час одночасної дії двох епізодичних впливів;

4) дослідити вплив зміни технологічних умов експлуатації СОКОіТ на їх сейсмічну міцність.

Основні матеріали розділу висвітлено в працях автора [1, 5, 6, 23, 53].

## РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СТАЛЕВИХ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ ТА ТРУБОПРОВОДІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

### 2.1 Опис об'єкту моделювання та фізико-механічних властивостей моделі

Аналіз та узагальнення проєктів, зокрема [75-83], СОКОіТ енергоблоків АЕС України дозволили нам виділити основні типові конструктивні форми об'єкту моделювання [6]: «стійка» (див. рисунок 2.1), «консоль» (див. рисунок 2.2), «стельовий каркас» (див. рисунок 2.3), «підлоговий каркас» (див. рисунок 2.4).



Рисунок 2.1. Сталеві опорні конструкції трубопроводів типової конструктивної форми «стійка»

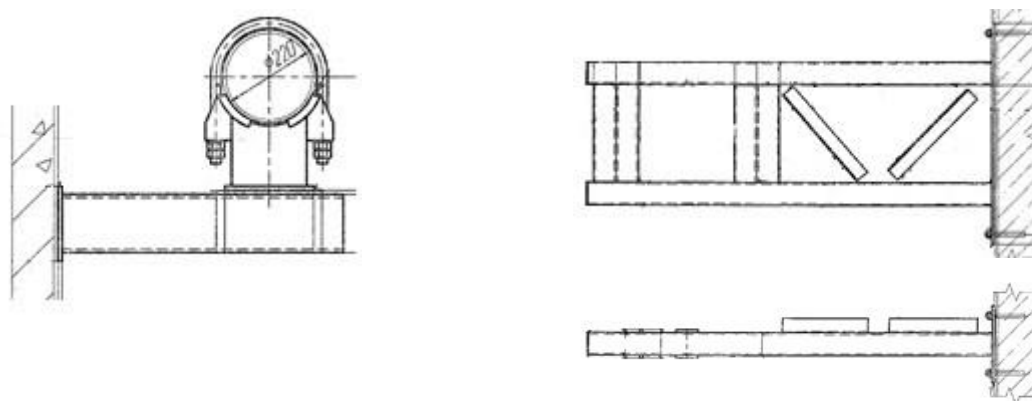


Рисунок 2.2. Сталеві опорні конструкції трубопроводів типової конструктивної форми «консоль»



Рисунок 2.3. Сталеві опорні конструкції трубопроводів типової конструктивної форми «стельовий каркас»

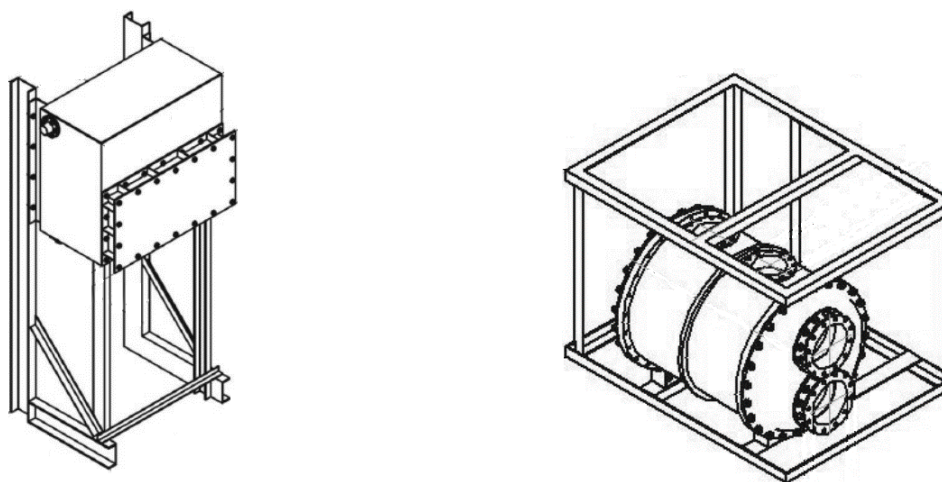


Рисунок 2.4. Сталеві опорні конструкції обладнання типової конструктивної форми «підлоговий каркас»

Ці СОКОіТ використовуються у більшості систем енергоблоку АЕС, наприклад: системи головного циркуляційного контуру, вентиляції та кондиціонування, резервної дизельної електростанції тощо. Отже, виділені типові конструктивні форми об'єкту моделювання експлуатуються в системах нормальної експлуатації, важливих для безпеки та системах безпеки. Згідно [84] системи безпеки це системи, призначені для виконання функцій безпеки, які поділяються на захисні, локалізувальні, забезпечувальні та керівні. Системи нормальної експлуатації, важливі для безпеки, це такі системи відмови яких з урахуванням відмови активного або пасивного елемента системи безпеки, що має механічні рухомі частини, чи однієї, незалежної від цієї відмови помилки персоналу, можуть призвести до аварії [84]. З урахуванням викладеного, а також враховуючи положення [67, 68], СОКОіТ енергоблоків АЕС будемо відносити

до категорії відповідальності «А», тобто конструкцій, відмова яких може призвести до повної непридатності до експлуатації елементів АЕС, та до класу наслідків ССЗ (значні наслідки). Розрахунковий переріз будемо відносити до І класу напружено-деформованого стану згідно [67], тобто нормальні напруження на всіх ділянках розрахункового перерізу є меншими за розрахунковий опір сталі за границею плинності і можуть досягати його лише в найбільш напружених волокнах перерізу (пружна робота перерізу).

Параметри внутрішнього середовища обладнання та трубопроводів згаданих систем при нормальній експлуатації енергоблоку АЕС змінюються у великому діапазоні значень, а саме:

- тиск змінюється від атмосферного та гідростатичного до значення робочого тиску головного циркуляційного контуру  $160 \text{ кгс/см}^2$ ;
- температура змінюється від «кімнатної» до діапазону значень робочої температури головного циркуляційного контуру  $290^\circ\text{C} - 320^\circ\text{C}$ .

Виділені типові конструктивні форми об'єкту моделювання здебільшого знаходяться в будівлі реакторного відділення (РВ) енергоблоку, яка в свою чергу для реакторних установок з ВВЕР-1000 має типову конструктивну форму у вигляді герметичної захисної циліндричної оболонки (див. додаток А). Таким чином, загалом сталеві опорні конструкції типових конструктивних форм, які розглядаються, розташовані у будівлі типової конструктивної форми.

Для виготовлення СОКОіТ енергоблоків АЕС загалом використовуються швелери, кутики, профілі гнуті замкнені [75-83].

Аналіз [75-83] в частині обраних матеріалів для проектування сталевих опорних конструкцій продемонстрував, що широко вживаним матеріалом для їх виготовлення є сталь марки Ст3сп5. Згідно [67] загалом можуть використовуватися ще такі варіації сталі Ст3 в залежності від класів міцності прокату:

- С235: сталь Ст3кп2;
- С245: сталь Ст3пс5 (листовий прокат товщиною до 20 мм, фасонний – до 40 мм);

– С255: сталь Ст3сп5 (листовий прокат товщиною понад 4 мм, фасонний – до 10 мм), Ст3Гпс5 (листовий прокат товщиною понад 4 мм), Ст3Гсп5 (листовий прокат товщиною понад 40 мм).

Механічні характеристики моделі можуть приймати значення, приведені у таблиці 2.1 для листового і широкоштабового універсального прокату та заготовок для гнутих профілів [85], а також у таблиці 2.2 для сортового та фасонного прокатів [86].

Таблиця 2.1. Механічні характеристики сталі для листового і широкоштабового універсального прокату та заготовок для гнутих профілів класів міцності С235, С245, С255

Назва сталі	Товщина, мм	Механічні характеристики		
		Границя плинності $\sigma_T$ , МПа	Тимчасовий опір $\sigma_B$ , МПа	Відносне видовження $\delta_5$ , %,
		не менше ніж		
С235	Від 2,0 до 3,9 включ.	235	360	–
	4,0	235	360	–
С245	Від 2,0 до 3,9 включ.	245	370	20
	Від 4,0 до 30 включ	235	370	24
С255	Від 2,0 до 3,9 включ.	255	380	20
	Від 4,0 до 10 включ.	245	380	25
	Понад 10 до 20 включ.	245	370	25
	Понад 20 до 40 включ.	235	370	25

Таблиця 2.2. Механічні характеристики для сортового та фасонного прокатів марок сталей Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп

Марка сталі	Тимчасовий опір $\sigma_B$ , МПа, для прокату товщин, мм		Границя плинності $\sigma_T$ , МПа, для прокату товщини, мм					Відносне видовження $\delta_5$ , %, для прокату товщин, мм		
	до 10 включ.	понад 10	до 10 включ.	понад 10 до 20 включ.	понад 20 до 40 включ.	понад 40 до 100 включ.	понад 100	до 20 включ.	понад 20 до 40 включ.	понад 40
			не менше							
Ст3кп	360-460		235	235	225	215	195	27	26	24
Ст3пс	370-480		245	245	235	225	205	26	25	23
Ст3сп	380-490	370-480	255	245	235	225	205	26	25	23
Ст3Гпс	370-490		–	245	235	225	205	26	25	23
Ст3Гсп	390-570		–	–	245	–	–	–	24	–



Фізичні характеристики моделі наведені в таблиці 2.3 згідно [67].

Таблиця 2.3. Фізичні характеристики вуглецевих сталей.

Характеристика	Позначення	Одиниця виміру	Значення
Густина	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	7850
Коефіцієнт лінійного розширення	$\alpha$	°С <sup>-1</sup>	$0,12 \times 10^{-4}$
Модуль пружності	$E_a$	МПа	$2,06 \times 10^5$
Модуль зсуву	$G$	МПа	$0,79 \times 10^5$
Коефіцієнт поперечної деформації (Пуассона)	$\nu$	–	0,3

В таблиці 2.4 представлені значення коефіцієнтів зниження для діаграми «напруження-деформація» вуглецевої сталі під час підвищення температури [87].

Таблиця 2.4. Значення коефіцієнтів зниження для діаграми «напруження-деформація» вуглецевої сталі за підвищеної температури.

Температура, °С	Коефіцієнт зниження для розрахункової границі плинності	Коефіцієнт зниження для нахилу лінійної пружної ділянки
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
150	1,000*	0,950*
200	1,000	0,900

Примітка: \* – значення розраховано з використанням лінійної інтерполяції.

Матеріал фізичної моделі приймається суцільним, однорідним та ізотропним.

## 2.2 Особливі умови експлуатації об'єкту моделювання

До особливих умов експлуатації, які потребують розгляду при моделюванні, будемо відносити вплив внутрішньоцехового середовища, а саме: температурно-вологісні та радіаційні умови. До складу РВ входить система герметичного

огороження, яка являє собою будівельні конструкції, що відділяють реакторну установку від навколишнього природного середовища. Система герметичного огороження є фізичним бар'єром на шляху розповсюдження радіоактивних продуктів у навколишнє природне середовище при аваріях на АЕС, а також захищає персонал АЕС та населення від іонізуючого опромінення. При цьому, система герметичного огороження захищає реакторну установку від зовнішніх впливів (наприклад: повітряна ударна хвиля, предмети, що летять тощо). З огляду на важливість РВ енергоблоку щодо забезпечення безпеки АЕС при моделюванні сфокусуємо свою увагу на умовах, які виникають саме в ньому.

В таблиці 2.5 згідно [88] приведені параметри середовища в приміщеннях системи герметичного огороження при різних режимах роботи енергоблоку АЕС з реакторною установкою ВВЕР-1000. В таблиці 2.5 під позначенням:

- режим «малої» течі розуміють течі головного циркуляційного контуру еквівалентним діаметром до 100 мм;
- режим «великої» течі розуміють максимальну проєктну аварію «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850».

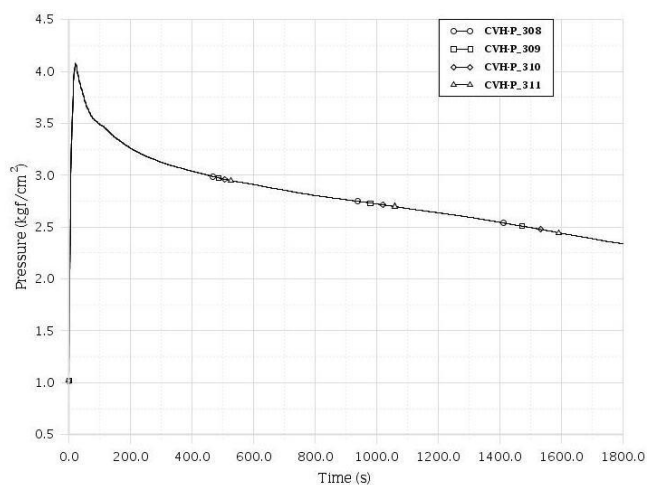
Таблиця 2.5. Параметри середовища в приміщеннях системи герметичного огороження при різних режимах роботи енергоблоку АЕС з реакторною установкою ВВЕР-1000

№ з/п	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення параметрів в режимах			
			Режим нормальної експлуатації	Режим порушення тепловідводу з герметичної частини	Режим «малої» течі	Режим «великої» течі
1	Температура	°С	15 – 60	30 – 75	до 90	до 150
2	Абсолютний тиск	МПа	0,083 – 0,101	0,069 – 0,118	до 0,167	до 0,49

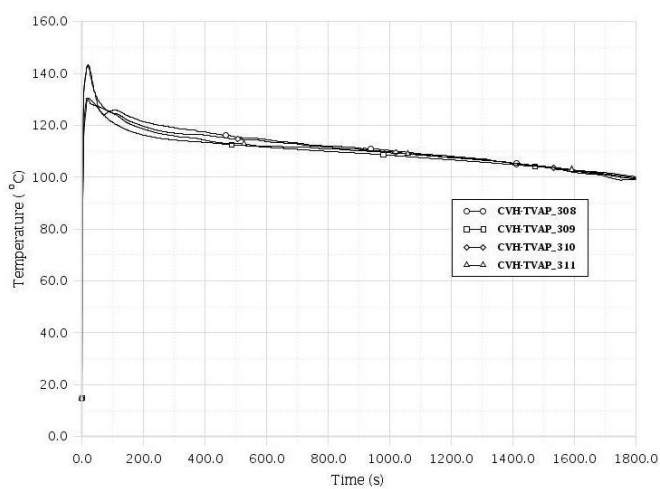
№ з/п	Найменування параметра	Одиниці виміру	Значення параметрів в режимах			
			Режим нормальної експлуатації	Режим порушення тепловідводу з герметичної частини	Режим «малої» течі	Режим «великої» течі
3	Відносна вологість	%	до 90	до 100	парогазова суміш	парогазова суміш
4	Об'ємна активність	Бк/м <sup>3</sup>	до $7,4 \cdot 10^7$	до $7,4 \cdot 10^7$	до $5,55 \cdot 10^9$	до $4,68 \cdot 10^{13}$
5	Потужність поглиненої дози	Гр/годину	до 1	до 1	до 1	до $10^3$
6	Тривалість існування режиму	година	–	до 15	до 5	до 10
7	Частота виникнення режиму	–	–	1 раз на рік	1 раз на 2 роки	1 раз за строк служби
8	Післяаварійна температура	°С	–	–	20 – 60	20 – 60
9	Післяаварійний абсолютний тиск	МПа	–	–	0,049 – 0,118	0,049 – 0,118
10	Тривалість існування післяаварійних параметрів	доба	–	–	до 30	до 30

Аналіз параметрів в системі герметичного огороження РВ в різних режимах показав, що найгірші значення параметрів виникають в режимі «великої» течі. Отже, саме цей режим буде представницьким з погляду впливу параметрів оточуючого середовища на об'єкт моделювання.

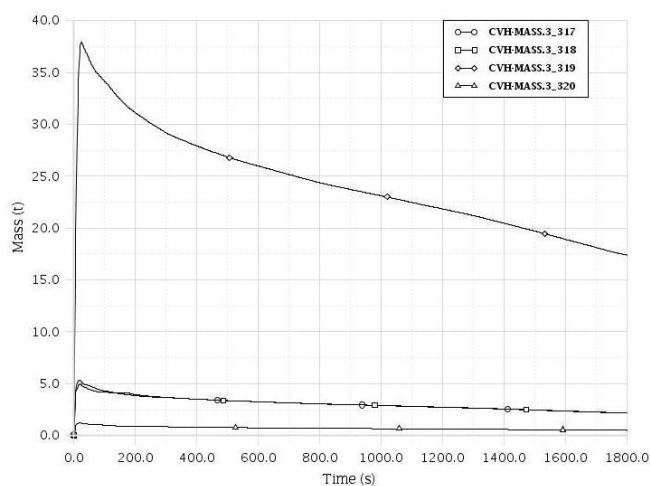
Під час максимальної проєктної аварії «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850» впродовж першої хвилини відбувається інтенсивний викид теплоносія першого контуру, що призводить до інтенсивного зростання тиску та температури в приміщеннях системи герметичного огороження. Після зниження розходу течі, роботи систем безпеки енергоблоку та зниження температури теплоносія першого контуру починається зниження параметрів середовища в герметичному об'ємі. Нижче на рисунку 2.5 представлено графіки зміни значення тиску, температури та маси пари в залежності від часу в різних приміщеннях герметичного об'єму під час максимальної проєктної аварії «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850» [89].



а) значення тиску в різних приміщеннях герметичного об'єму



б) значення температури в різних приміщеннях герметичного об'єму



в) значення маси пари в різних приміщеннях герметичного об'єму

Рисунок 2.5. Значення тиску, температури та маси пари в різних приміщеннях герметичного об'єму під час максимальної проєктної аварії «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850»

Аналіз зміни значень параметрів в герметичному об'ємі під час максимальної проєктної аварії «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850» демонструє таке [90]:

- 1) Максимальні абсолютні значення тиску, температури та маси пари сягають близько 4 кгс/см<sup>2</sup>, 143°C та 37 т відповідно.
- 2) Починаючи із близько 100-ої секунди аварії:
  - тиск плавно стабілізується та у 1800-у секунду складає близько 2,4 кгс/см<sup>2</sup>;
  - температура плавно стабілізується від 120°C до 100°C на 1800-ій секунді;
  - маса пари з 35 т поступово зменшується приблизно до 1 т – 17 т на 1800-ій секунді.

### **2.3 Геологічні умови та сейсмічні навантаження, що враховуються в фізико-математичній моделі**

Територія промислового майданчику Запорізької АЕС (ЗАЕС) знаходиться в області з'єднання двох великих геологічних структур, а саме: Українського кристалічного масиву та Причорноморської впадини. В геологічній будові промисловий майданчик ЗАЕС розвіданий буровими роботами до глибини 80 м. В районі широко розвинуті складноскладчасті та платформенні типи структур. Особливістю промислового майданчику ЗАЕС є наявність в геологічному розрізі достатньо великої потужності насипних ґрунтів, які утворились при будівництві, коли виривалися котловани під фундаменти з наступним засипанням навколо фундаментного простору. Геологічний розріз промислового майданчика ЗАЕС до розвіданої глибини 80 м представлений гранітами архейського віку (шар 14) та його корою вивітрювання (шари 12, 13) мезо-кайнозойського віку; глинами, пісками водонасиченими та песчаниками палеогена (шари 9, 10, 11); пісками водонасиченими з лінзами та прошарками суглинків та супісків (шари 4-7); пісками маловологими та водонасиченими насипними та зворотного засипання котлованів. Матеріали інженерно-геологічних вишукувань демонструють, що на промисловому майданчику ЗАЕС має місце техногенне розущільнення насипних

пісків. Матеріали динамічного зондування, виконаного в різні роки, вказують на те, що піски рихлі заміщуються гранично рихлими, яким властиве руйнування структури ґрунту при динамічному впливі [91]-[93]. Підсумовуючи викладене можна зробити висновок, що загалом промисловий майданчик ЗАЕС представлений піщаними ґрунтами.

Промисловий майданчик Південноукраїнської АЕС (ПАЕС) розташований на лівому виположеному приводороздільному склоні балки Ташлик. Рельєф району промислового майданчику ПАЕС рівнинний, інтенсивно зсічений мережею оврагів, балок та долин. Район розміщення ПАЕС відноситься до територій, які добре вивчені в геологічному відношенні. Геологічна будова промислового майданчику неоднорідна, оскільки підперті скальними ґрунтами глинисті ґрунти поверхових шарів мають в межах промислового майданчику різну товщину. Геологічний розріз промислового майданчика ПАЕС до розвіданої глибини близько 60 м представлений (зверху вниз) суглинками і глинами чорними та темносиніми твердої консистенції; суглинками та глинами серовато-жовтими та жовтобурими, макропористими, карбонатними, від твердої до тугопластичної консистенції; глинами жовтобурими, бурими та червонобурими, з включенням карбонатів, від твердої до тугопластичної консистенції, щільними; глинами корінними, червонобурими та зеленувато-сірими, твердими та напівтвердими, карбонатними з включенням кристалів гіпсу; дресвяним ґрунтом та дресвянистим піском місцями із заповнювачем суглинком; гранитами та їх різновидами, сірими та рожево-сірими, від дрібно до крупно-зернистих, тріщиноватих, вивітрелих [94], [95]. Підсумовуючи викладене можна зробити висновок, що загалом промисловий майданчик ПАЕС представлений глинистими ґрунтами.

В геологічній будові району розташування Хмельницької АЕС (ХАЕС) приймають участь утворення широкого вікового діапазону та складу: від рихлих відкладень четвертинного періоду до кристалічних порід фундаменту Східно-Європейської платформи архей-протерозойського віку. Геологічний розріз промислового майданчика ХАЕС до розвіданої глибини близько 60 м

представлений (зверху вниз) пісками дрібними, середньої щільності від маловологих до водонасичених; пісками пилюватими, середньої щільності від маловологих до водонасичених; пісками середньої крупності з прошарками крупного, середньої щільності від маловологих до водонасичених; пісками середньої крупності, рихлими від маловологих до водонасичених; супіском плинної, рідше пластичної консистенції; глинами та суглинками здебільшого тугопластичної консистенції; глинами з домішками органічних речовин, здебільшого тугопластичної консистенції; крейдою перевідкладеною, тиксотропною; глинами консистенції від твердої до тугопластичної, тріщинуватої, набухаючої, з прошарками аргілітів та пісчаників; ґрунтами скальними різної міцності. Перевідкладена крейда – порода не однорідна, яка містить включення піску, глинистого матеріалу, щебня та гальки. На частині промислового майданчику, де виконана заміна перевідкладеної крейди насипними ґрунтами (пісками), потужність останніх складає 2,5 м-3,5 м. На інших частинах промислового майданчику, де заміна крейди не виконувалась, верхню частину розрізу складають флювіогляційні піщано-глинисті ґрунти невеликої потужності, перевідкладена крейда потужністю 0 м-4 м, які підстеляються породами алевроліто-аргілітової товщі [96]. Підсумовуючи викладене можна зробити висновок, що загалом промисловий майданчик ХАЕС представлений піщано-глинистими ґрунтами.

В геологічній будові району розташування Рівненської АЕС (РАЕС) приймають участь утворення широкого вікового діапазону та складу: від рихлих відкладень четвертинного періоду до кристалічних порід фундаменту Східно-Європейської платформи архей-протерозойського віку. Геологічний розріз промислового майданчика РАЕС до розвіданої глибини близько 60 м представлений (зверху вниз) пісками дрібними щільними та рихлими від маловологих до водонасичених; супісками пластичної та плинної консистенції; пісками середньої крупності та пилюватими, крупними, неоднорідними за гранульованим складом від маловологих до водонасичених; суглинком консистенції від твердого та м'якого до тугопластичного; пісками від дрібних до



крупних, рихлими, водонасиченими; супіском від пластичної до плинної консистенції; суглинком, консистенції від напівтвердої до тугопластичної; глиною, консистенцією від напівтвердої до туго та м'якопластичної; крейдою плинної та плиннопластичної консистенції; крейдою тріщиноватою та сильнотріщиноватою; крейдою масивною туго та м'якопластичної консистенції; базальним конгломератом на карбонатному цементі, міцним, тріщиноватим, слабовивітрелим; базальтом слабовивітрелим, міцним, тріщиноватим. Крейда – порода, що карстується, тому під впливом техногенних факторів може активізуватися процес карстоутворення. У шарах крейди відслідковуються пустотні інтервали та крупні тріщини, які заповнені крейдовою суспензією або частками порід, які лежать вище [97]. Підсумовуючи викладене можна зробити висновок, що загалом промисловий майданчик РАЕС представлений піщано-глинистими ґрунтами.

Інтенсивність сейсмічних коливань споруди (та відповідно рівень сейсмічних навантажень на СОКОіТ енергоблоків АЕС) залежить не лише від її конструкції та динамічних характеристик, а й від геологічної будови ґрунту та характеристик порід з яких він складається. Загалом ґрунт уявляє собою нелінійне середовище. Для врахування цього фактору використовують фізичні розрахункові характеристики різних ґрунтів. При сейсмічних впливах важливою характеристикою ґрунтових умов є також швидкість розповсюдження пружних хвиль ( $V_p$  – повздовжня, м/с, та  $V_s$  – поперечна, м/с). Орієнтовні значення щільності та швидкостей розповсюдження пружних хвиль у різних ґрунтах представлені в таблиці 2.6 за даними [7].

Таблиця 2.6. Орієнтовні значення щільності та швидкостей розповсюдження пружних хвиль у різних ґрунтах

Найменування ґрунтів	Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Швидкість розповсюдження пружних хвиль, м/с	
		$V_p$	$V_s$
Насипні ґрунти рихлі, неводонасичені	1400-1700	100-300	70-150

Найменування ґрунтів	Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Швидкість розповсюдження пружних хвиль, м/с	
		$V_p$	$V_s$
Піщані ґрунти маловологі (сухі)	1400-1700	150-900	160-500
Піщані ґрунти водонасичені	1700-2200	300-1600	200-800
Супіски	1600-2000	300-1200	120-600
Суглинки	1600-2100	300-1400	140-700
Глинисті ґрунти вологі, пластичні	1700-2200	500-2800	130-1200
Глинисті ґрунти щільні, напівтверді та тверді	1900-2600	2000-3500	1100-2000

Примітка: нижня границя швидкостей розповсюдження пружних хвиль відноситься до ґрунтів з мінімальною об'ємною вагою, а верхня – максимальною.

Загалом енергія землетрусу в одиниці ґрунту пропорційна такій величині [8]:

$$\ddot{E} = \rho \cdot c \cdot \vartheta^2 \quad (2.1)$$

де  $c$  та  $\vartheta$  швидкість сейсмічної хвилі та швидкість коливань часток ґрунту відповідно. В разі нехтування частиною енергії відбитих хвиль на межі різних середовищ, то згідно із законом збереження енергії перехід сейсмічної хвилі з одного шару ґрунту з індексом «0» в інший шар з індексом «1» не може змінити її енергії. Тоді наближено можна записати

$$\rho_0 \cdot c_0 \cdot \vartheta_0^2 = \rho_1 \cdot c_1 \cdot \vartheta_1^2 \quad (2.2)$$

При переході сейсмічної хвилі з більш щільного в більш рихлий шар ґрунту з співвідношення (2.2) можна отримати

$$\vartheta_1^2 / \vartheta_0^2 = \rho_0 \cdot c_0 / \rho_1 \cdot c_1 \quad (2.3)$$

Залежність (2.3) вказує на те, що оскільки в рихлому шарі густина та швидкість хвилі менша, ніж в корінній породі (наприклад, граніті), то у відповідності до закону збереження енергії коливань підвищиться амплітуда

коливань. Для певного шару ґрунту «і» величину  $\rho_i \cdot c_i$  прийнято називати «сейсмічною жорсткістю» шару ґрунту [8].

Для визначення рівнів сейсмічної небезпеки промислових майданчиків АЕС України використовуються такі методи: детерміністичний та імовірнісний. Детерміністичний аналіз сейсмічної небезпеки виконаний для всіх промислових майданчиків розташування АЕС України. Імовірнісний аналіз сейсмічної небезпеки наразі виконаний лише для промислового майданчику Запорізької АЕС. Для інших АЕС України імовірнісний аналіз сейсмічної небезпеки ще виконується [98].

При проєктуванні рівні сейсмічності промислових майданчиків АЕС України приймалися такими: МРЗ – 6 балів та ПЗ – 5 балів за шкалою інтенсивності землетрусів Медведева-Спонхоейра-Карника. Відповідні пікові значення прискорення руху ґрунту (горизонтальної складової) під час землетрусу приймалися 0,05 g для МРЗ та 0,025 g для ПЗ [98].

Наразі за результатами сучасних додаткових сейсмологічних досліджень промислових майданчиків АЕС України встановлені пікові значення прискорення (PGA) горизонтальної складової руху ґрунту [99]-[102], які наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7. Пікові значення прискорення (горизонтальна складова) руху ґрунту промислових майданчиків АЕС України

АЕС	PGA при МРЗ, g	PGA при ПЗ, g
Хмельницька	0,1	0,040
Рівненська	0,1	0,046
Південноукраїнська	0,12	0,046
Запорізька	0,17	0,085

Під час землетрусу безпосередньо динамічним навантаженням (струшуванню) піддані будівлі та споруди. На конструкції, які знаходяться всередині цих будівель, передаються вже відповідні сейсмічні прискорення [6]. Таким чином, динамічними навантаженнями для об'єкту моделювання будуть,

так звані спектри відгуку, які відображають розподіл максимальних значень прискорень відгуку матеріальної системи за частотами зовнішнього впливу, які залежать від співвідношення частотної характеристики системи і спектра впливу. Для визначення спектрів відгуку знаходять закони коливань (зазвичай акселерограми) всіх точок будівлі, які представляють інтерес (наприклад, відмітка розташування відповідних СОКОіТ). Оскільки на різних відмітках закони коливань різні, їх називають поверховими законами сейсмічних рухів, зокрема поверхові акселерограми. Розраховані на підставі поверхових акселерограм спектри відгуку називаються відповідно поверховими [7].

Під час землетрусу будівля коливається разом з основою. Внаслідок цього при визначенні сейсмічних навантажень на об'єкт моделювання необхідно розглядати не тільки споруду окремо, а систему «грунт-конструкція».

Аналіз джерел [91]-[95] дозволив визначити, що для РВ енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС поверхові спектри відгуку розраховані з урахуванням взаємодії «грунт-конструкція» [6]. Цей підхід дозволяє вихідні коливання ґрунту при землетрусі на промислових майданчиках ЗАЕС та ПАЕС, визначені для умов вільної поверхні, трансформувати у вплив на рівні фундаменту конструкції. В подальшому, з урахуванням конкретних ґрунтових умов промислових майданчиків ЗАЕС та ПАЕС розраховуються поверхові спектри відгуку РВ.

Аналіз джерела [103], який містить поверхові спектри відгуку РВ РАЕС та ХАЕС з реакторною установкою ВВЕР-1000, дозволив встановити, що при їх побудові в якості вихідних акселерограм на ґрунті були прийняті акселерограми, як для типової АЕС розташованої на європейській території колишнього радянського союзу та Кавказу. Отже, представлені в [103] поверхові спектри РВ не враховують конкретні ґрунтові умови промислових майданчиків РАЕС та ХАЕС. Отже, врахування в фізико-математичній моделі сейсмічних навантажень згідно з поверховими спектрами [103] призведе до зниження достовірності та репрезентативності дослідження.

З урахуванням викладеного, в подальшому будемо розглядати репрезентативні сейсмічні навантаження на СОКОіТ РВ ЗАЕС та ПАЕС.

Узагальнені характеристики основ РВ енергоблоків ЗАЕС в різних шарах ґрунту загалом можна охарактеризувати так [91-93]:

- щільність змінюється в діапазоні від 1,78 г/см<sup>3</sup> до 2,6 г/см<sup>3</sup>;
- модуль деформації змінюється в діапазоні від 11,4 МПа до 45 МПа;
- коефіцієнт пористості змінюється в діапазоні від 0,450 до 0,880.

За сейсмічними властивостями ґрунти основ РВ енергоблоків ЗАЕС загалом відносяться до III категорії.

Узагальнені характеристики основ РВ енергоблоків ПАЕС в різних шарах ґрунту загалом можна охарактеризувати так [94, 95]:

- щільність змінюється в діапазоні від 1,61 г/см<sup>3</sup> до 1,93 г/см<sup>3</sup>;
- модуль деформації змінюється в діапазоні від 14 МПа до 40 МПа;
- коефіцієнт пористості змінюється в діапазоні від 0,553 до 0,831.

За сейсмічними властивостями ґрунти основ РВ енергоблоків ПАЕС загалом відносяться до II категорії.

Переважаюча більшість СОКОіТ енергоблоків АЕС розташовані у діапазоні висотних відміток від 0 м (нижні відмітки) до 36-38 м (верхні відмітки) РВ (див. додаток А). Огинаючі поверхові спектри відгуку (динамічні навантаження) під час МРЗ, розроблені на підставі даних [94], [95], [104]-[107], на нижніх та верхніх відмітках РВ енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС для 2 % демпфування представлені в додатку Б [108]. Безпосередньо розрахунок огинаючих поверхових спектрів відгуків виконувався з використанням таких співвідношень [6]:

$$a_{x,y,z}^{\text{ЗАЕС}}(f) = \left\{ \max \left\{ \begin{matrix} a_{1(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-1}} \\ a_{1(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-2}} \\ a_{1(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-3}} \\ a_{1(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-4}} \\ a_{1(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-5}} \\ a_{1(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-6}} \end{matrix} \right\}; \max \left\{ \begin{matrix} a_{2(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-1}} \\ a_{2(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-2}} \\ a_{2(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-3}} \\ a_{2(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-4}} \\ a_{2(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-5}} \\ a_{2(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-6}} \end{matrix} \right\}; \dots; \max \left\{ \begin{matrix} a_{k(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-1}} \\ a_{k(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-2}} \\ a_{k(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-3}} \\ a_{k(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-4}} \\ a_{k(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-5}} \\ a_{k(x,y,z)}^{\text{ЗАЕС-6}} \end{matrix} \right\} \right\}, \quad (2.4)$$

$$a_{x,y,z}^{\text{ПАЕС}}(f) = \left\{ \max \left\{ \begin{matrix} a_{1(x,y,z)}^{\text{ПАЕС-1}} \\ a_{1(x,y,z)}^{\text{ПАЕС-2}} \\ a_{1(x,y,z)}^{\text{ПАЕС-3}} \end{matrix} \right\}; \max \left\{ \begin{matrix} a_{2(x,y,z)}^{\text{ПАЕС-1}} \\ a_{2(x,y,z)}^{\text{ПАЕС-2}} \\ a_{2(x,y,z)}^{\text{ПАЕС-3}} \end{matrix} \right\}; \dots; \max \left\{ \begin{matrix} a_{k(x,y,z)}^{\text{ПАЕС-1}} \\ a_{k(x,y,z)}^{\text{ПАЕС-2}} \\ a_{k(x,y,z)}^{\text{ПАЕС-3}} \end{matrix} \right\} \right\}, \quad (2.5)$$

де  $a_{x,y,z}^{\text{ЗАЕС}}(f)$ ,  $a_{x,y,z}^{\text{ПАЕС}}(f)$  – огибаючі значень прискорень  $a$  ( $\text{м/с}^2$ ) поверхових спектрів відповіді в трьох взаємно перпендикулярних напрямках сейсмічного впливу (X, Y, Z) від 1-го до k-го значень частоти  $f$  (Гц) поверхових спектрів відповіді для енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС відповідно.

На рисунках 2.6-2.11 на підставі даних [94], [95], [104]-[107] представлені визначені огибаючі діапазони (виділені кольоровою заливкою) значень сейсмічних прискорень (динамічних навантажень), які будуть передаватися на об'єкт моделювання під час МРЗ на промислових майданчиках ЗАЕС та ПАЕС [6].

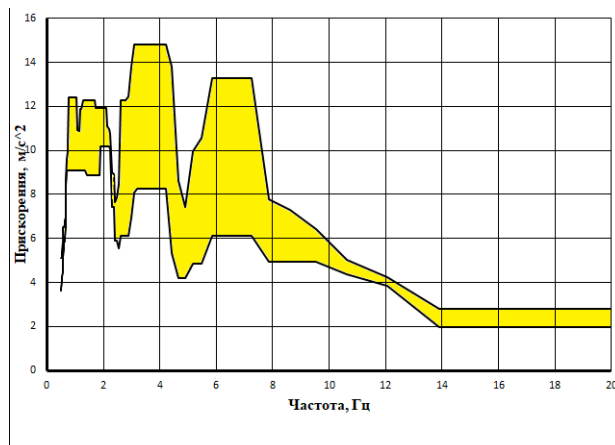


Рисунок 2.6. Огибаючі діапазони значень прискорень РВ енергоблоків ЗАЕС для горизонтального напрямку Ax та 2 % демпфування

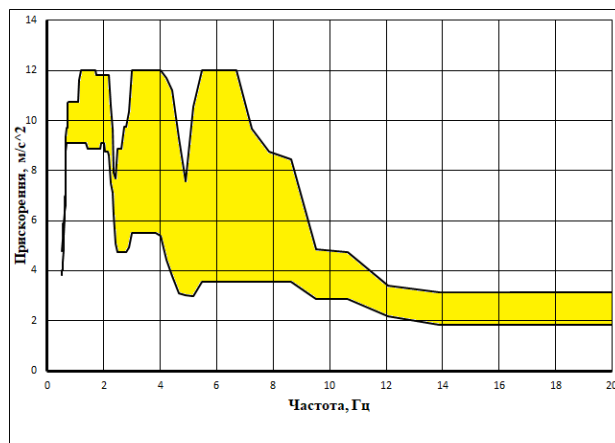


Рисунок 2.7. Огибаючі діапазони значень прискорень РВ енергоблоків ЗАЕС для горизонтального напрямку Ay та 2 % демпфування

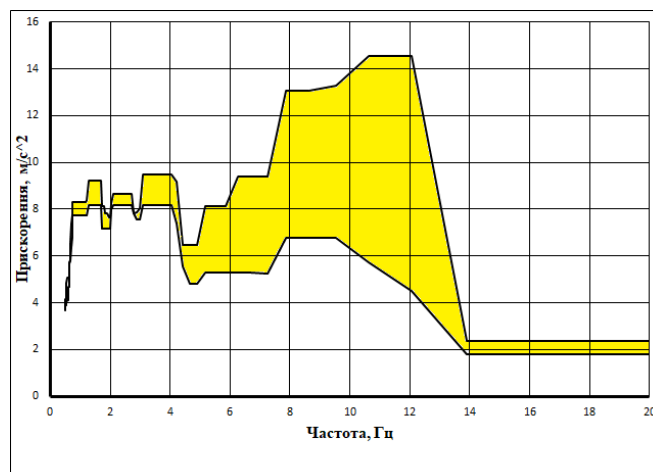


Рисунок 2.8. Огибаючі діапазони значень прискорень РВ енергоблоків ЗАЕС для вертикального напрямку  $A_z$  та 2 % демпфування

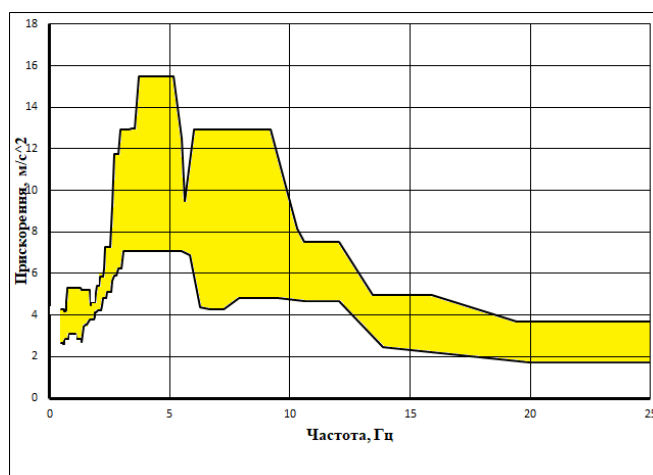


Рисунок 2.9. Огибаючі діапазони значень прискорень РВ енергоблоків ПАЕС для горизонтального напрямку  $A_x$  та 2 % демпфування

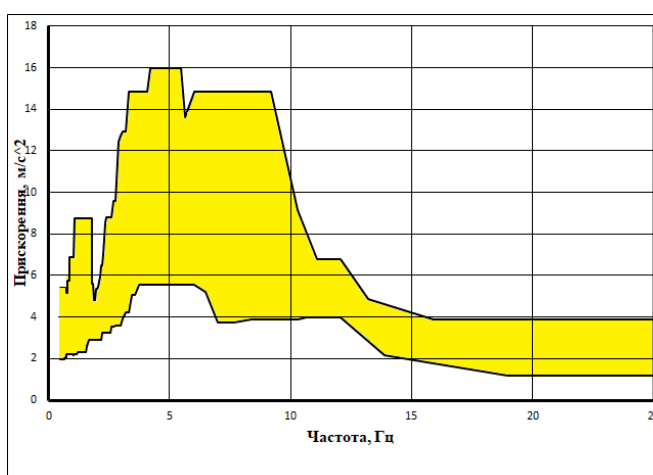


Рисунок 2.10. Огибаючі діапазони значень прискорень РВ енергоблоків ПАЕС для горизонтального напрямку  $A_y$  та 2 % демпфування

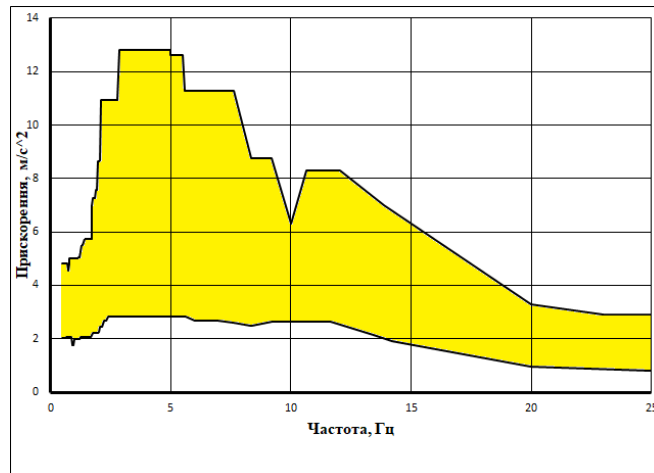


Рисунок 2.11. Огинаючі діапазони значень прискорень РВ енергоблоків ПАЕС для вертикального напрямку Az та 2 % демпфування

## 2.4 Механічні навантаження, що враховуються в фізико-математичній моделі

СОКОіТ працюють в усіх режимах експлуатації енергоблоку АЕС, а саме: нормальна експлуатація, порушення нормальної експлуатації, проєктна аварія. В [84] встановлено такі визначення цих термінів:

- нормальна експлуатація – експлуатація АЕС у визначених проєктом експлуатаційних межах і умовах;
- порушення нормальної експлуатації – порушення в роботі АЕС, за якого сталося відхилення від установлених експлуатаційних меж і умов, яке не призвело до аварійної ситуації;
- проєктна аварія – аварія, для якої проєктом 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.

Проєктні режими роботи (та їх допустима кількість) енергоблоку АЕС визначені типовим технологічним регламентом безпечної експлуатації енергоблоку [109]. В таблиці 2.8 представлені відомості щодо основних проєктних режимів роботи енергоблоку АЕС згідно [109].



Таблиця 2.8. Основні проєктні режими роботи енергоблоку АЕС та їх допустима кількість.

Найменування режиму	Допустима кількість
<b>1. Нормальна експлуатація</b>	
1.1 Плановий розігрів реакторної установки з «холодного» стану при значенні швидкості не більше 20°C/годину	130
1.2 Стаціонарний режим (зміна потужності в межах значення $\pm 2\%$ від номінальної потужності, яка викликана роботою системи регулювання реактора)	Не регламентується
1.3 Хибне спрацювання аварійного захисту реактора	150
1.4 Планове відключення головного циркуляційного насосу (ГЦН)	200 на насос
1.5 Включення ГЦН на петлі головного циркуляційного контуру, яка раніше не працювала	230 на насос
1.6 Відключення підігрівача високого тиску та наступне його включення	300
1.7 Опробування запобіжних клапанів компенсатора тиску	Згідно регламенту опробування клапанів
1.8 Опробування запобіжних клапанів парогенератора	Згідно регламенту опробування клапанів
1.9 Опробування пасивного вузла системи аварійного охолодження активної зони реактора	50
1.10 Планове розхолодження до «холодного» стану при значенні швидкості розхолодження не більше 30°C/годину	70

Найменування режиму	Допустима кількість
<b>2. Порушення нормальної експлуатації</b>	
2.1 Знеструмлення ГЦН в стані реакторної установки «Робота на потужності»	30 (для кожного ГЦН)
2.2 Повне знеструмлення АЕС	10
2.3 Припинення подачі живильної води в парогенератор	30
2.4 Режим течі парогенератора: розрив теплообмінної трубки	30
2.5 Хибне впорскування в компенсатор тиску від штатного вузла підживлення з температурою живильної води в діапазоні значень від 60°C до 70°C	10
2.6 Раптовий перехід на підживлення першого контуру з температурою живильної води в діапазоні значень від 60°C до 70°C	30 по кожній петлі з непрацюючим ГЦН
2.7 Режим роботи при порушенні тепловідведення з герметичного об'єму	30
2.8 Прискорене розхолодження реакторної установки при значенні швидкості розхолодження 60°C/годину при температурі першого контуру в межах від номінального значення до 220°C	30
<b>3. Аварійні режими</b>	
3.1 Режим малої течі: розрив трубопроводів першого контуру діаметром Ду менше 100 мм	15
3.2 Режим великої течі: розрив трубопроводу першого контуру діаметром Ду більше 100 мм, включаючи Ду 850	1

Найменування режиму	Допустима кількість
3.3 Не закриття запобіжного клапану компенсатора тиску	по одному на кожний клапан
3.4 Не закриття запобіжного клапану парогенератора	по одному на кожний клапан
3.5 Не закриття клапанів пристрою скидання пари з парогенератора	по одному на кожний пристрій
3.6 Розрив паропроводу парогенератора	по одному на парогенератор
3.7 Розрив трубопроводу живильної води парогенератора	по одному на парогенератор
3.8 Розрив колектора паропроводів «гострої» пари	1

При роботі енергоблока в будь-якому режимі на СОКОіТ передаються механічні навантаження від обладнання та трубопроводів, які на них встановлені [5]. В залежності від причин виникнення навантаження і впливи на СОКОіТ енергоблоків АЕС поділяються на основні та епізодичні. При цьому, в залежності від змінюваності у часі навантаження і впливи поділяються на постійні та змінні. Залежно від тривалості неперервної дії змінні навантаження і впливи поділяються на тривалі, короткочасні та епізодичні [69]. Аналіз джерел [88, 109] дозволив сформулювати номенклатуру розрахункових навантажень, яким загалом підданий об'єкт моделювання в режимах НЕ, ПНЕ та ПА. При цьому, також розроблена розгорнута система умовних позначень навантажень, які характеризують вид навантаження та використані в подальшому при складанні розрахункових сполучень навантажень (PCH). Отже, прийнято такі складові умовного позначення [5]: L (**L**oad): навантаження; R (**R**egular): постійне; W (**W**eight): вага; VL (**V**ariables **L**ong): змінне тривале; THI (**T**hermal **I**solation): тепла ізоляція; I (**I**nternal): внутрішнє середовище; VSH (**V**ariables **S**hort): змінне короткочасне; T (**T**ransient): навантаження в перехідному режимі; E (**E**pisodic): епізодичне навантаження; SM (**S**eismic **M**aximum): навантаження

від МРЗ; SD (Seismic Design): навантаження від ПЗ; А (Accident): навантаження від ПА.

Навантаження від одного джерела (наприклад, дія сейсмічного впливу за трьома компонентами: двома горизонтальними та вертикальною) розглядається як одне епізодичне навантаження.

Розроблена номенклатура розрахункових навантажень, а також їх умовні позначення [5] наведені в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9. Номенклатура розрахункових навантажень, яким підданий об'єкт моделювання в режимах 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 обладнання/трубопроводу при НЕ	LVL3IW
<u>Змінні короточасні:</u>		
5.	Навантаження від обладнання/трубопроводу у пускозупинному та випробувальних режимах	LVSH1TW
6.	Навантаження від 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

№ з/п	Опис навантаження	Умовне позначення навантаження
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 обладнання/трубопроводу при ПА	LE5IAW

Надійність розрахунку забезпечується також коефіцієнтом надійності за навантаженням  $\gamma_f$ , що призначається з огляду на вид навантаження та залежить від встановленого терміну експлуатації конструкції. Розрахункові значення навантажень визначаються множенням характеристичних значень на коефіцієнт надійності за навантаженням [69], [72]. У відповідності до [69] при визначенні навантаження від ваги конструкції коефіцієнт  $\gamma_f$  для металевих конструкцій приймається рівним:

- 1,05, якщо зусилля від власної ваги менші 50 %;
- 1,10, якщо дорівнюють або перевищують 50 %.

Для інших навантажень з таблиці 2.9 коефіцієнт  $\gamma_f$  приймається рівним одиниці, оскільки в [69] він не регламентований для цих особливих видів навантажень СОКОіТ енергоблоків АЕС.

Визначення та врахування в розрахунку СОКОіТ енергоблоків АЕС числових значень кожного з навантажень, які представлені в таблиці 2.9, здійснюється так:

1) навантаження LR1W визначається та враховується автоматично використаним розрахунковим комплексом для розрахунків сталевих опорних конструкцій;

2) значення навантажень LVL3IW, LVSH2TW, LE5IAW визначаються на підставі аналізу проектно-конструкторської та експлуатаційної документації (інструкцій з експлуатації, карт уставок захистів та блокування, паспортів

елементів тощо) з використанням методологічних підходів, представлених в [110];

3) далі в розрахунковому комплексі АСТРА-АЕС проводиться розрахунок міцності та сейсмостійкості трубопроводів (див. додаток В). Під час розрахунку трубопроводів в АСТРА-АЕС враховуються:

- геометричні характеристики трубопроводу;
- фізико-механічні властивості матеріалу трубопроводу в залежності від температури внутрішнього середовища;
- кінематичні граничні умови трубопроводу, які моделюють його опорну систему;
- власна вага трубопроводу та його внутрішнього середовища (вода, пар, пароводяна суміш), параметри теплової ізоляції;
- встановлені в трубопровідній системі арматури та обладнання з їх ваговими та геометричними характеристиками;
- параметри (тиск та температура) внутрішнього середовища трубопроводу;
- сейсмічні навантаження, що передаються на трубопровід;
- переміщення трубопроводу внаслідок дії всіх врахованих навантажень.

За результатами розрахунків міцності та сейсмостійкості трубопроводів в АСТРА-АЕС на апаратному рівні розраховуються та виводяться відомості щодо числових значень навантажень на всі сталеві опорні конструкції трубопроводу. Отже, навантаження LVL1W, LVL2THIW, LVL3IW, LVSH2TW, LE5IAW, LE3SM, LE4SD (або відповідні їх сполучення) задаються на сталеві опорні конструкції у вигляді результуючих сил та моментів від дії розташованих на них трубопроводів. На рисунку 2.12 представлено формат таблиці у якому АСТРА-АЕС надає інформацію щодо навантажень на сталеві опорні конструкції трубопроводів, де під позначеннями «P1», «P2», «P3», «M1», «M2» та «M3» йдеться про значення сил та моментів за відповідними осями розрахункової схеми трубопроводу.

Номер опоры	Участок (N сеч.)/ Узел	Краткая характеристика опоры	Статическое воздействие									Динамическое воздействие			D × S, мм
			Рабочее состояние			Холодное состояние			Гидроиспытание			Сейсмика			
			Сила, кг			Сила, кг			Сила, кг			Сила, кг			
			Момент, кг·см			Момент, кг·см			Момент, кг·см			Момент, кг·см			
P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	

Рисунок 2.12. Формат таблиці АСТРА-АЕС із значеннями навантажень на сталеві опорні конструкції трубопроводів

4) навантаження LVL1W, LVL2THIW, LVL3IW, LVSH2TW, LE5IAW, LE3SM, LE4SD (або відповідні їх сполучення) на сталеву опорну конструкцію обладнання враховуються шляхом прямого моделювання обладнання в ліцензійному розрахунковому комплексі ANSYS (див. додаток В);

5) навантаження LE1SM, LE2SD враховуються шляхом прикладання поверхових спектрів відгуку за трьома напрямками сейсмічного впливу безпосередньо до розрахункових моделей СОКОіТ енергоблоків АЕС.

Оскільки згідно [69] сейсмічні впливи та ПА відносяться до епізодичних впливів, то при моделюванні розглядається саме аварійне сполучення. При цьому, на виконання вимог [3] та на відміну від підходів [69] в аварійне сполучення включаються одночасно ці два епізодичні впливи.

Значення коефіцієнтів сполучень [69], [72], які враховуються при складанні РСН, наведені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10. Значення коефіцієнтів сполучень для навантажень.

Сполучення	Коефіцієнт сполучень для навантажень			
	постійних	тривалих	короткочасних	епізодичних
Аварійне	1,0	0,95	0,8	1,0

Згідно вимог [3] до сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів не входять пускозупинні та випробувальні режими. Отже, при складанні РСН навантаження LVSH1TW не використовується.

За підходами [69] на підставі визначеної номенклатури навантажень складено РСН. З урахуванням завдань нашого дослідження (зокрема, визначення

закономірностей напружено-деформованого стану (НДС) при сейсмічних навантаженнях, а також під час одночасної дії двох епізодичних впливів) приймемо, що навантаження від обладнання та трубопроводів під час МПА не змінюється в порівнянні із режимом НЕ. Отже, в межах вказаного завдання для досліджень НДС СОКОіТ енергоблоків АЕС при сейсмічних навантаженнях за температури в РВ  $60^{\circ}\text{C}$  та  $150^{\circ}\text{C}$  РСН прийнято нами таким:  $1,0 \times \text{LR1W} + 0,95 \times \text{LVL1W} + 0,95 \times \text{LVL2THIW} + 1,0 \times \text{LE1SM} + 1,0 \times \text{LE3SM}$ . Загалом розроблена номенклатура РСН для всіх сполучень технологічних умов експлуатації і сейсмічних впливів представлена в підрозділі 4.3 розділу 4 наукової праці.

## **2.5 Математична модель сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм**

Одним з головних етапів розрахунку є математичний опис поведінки розробленої моделі. Загалом цей опис включає в себе вхідні та вихідні дані, а також сформульований математичний апарат який безпосередньо забезпечує перехід від одних до інших.

Під час математичного моделювання використовується гіпотеза плоских перетинів. Крім цього, приймається гіпотеза про малість деформацій, тобто деформації малі в порівнянні з розмірами тіла, яке деформується [6]. Таким чином, пружні розрахунки виконуються при початковій геометрії конструкції.

Як відзначено вище, особливістю нашого дослідження є те, що при оцінці міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС з урахуванням ПА та сейсмічних навантажень відбувається врахування одночасно двох епізодичних впливів в аварійному сполученні навантажень. Для цього випадку у відповідності до [68] розглядається лише перша група граничних станів, тобто втрата несучої здатності. Згідно [68, 71] досягнення першої групи граничних станів визначають при розрахунках конструкцій на міцність з урахуванням можливих несприятливих відхилень характеристик матеріалу, значень та сполучень навантажень, а також особливостей умов експлуатації. Умову неруйнування СОКОіТ енергоблоків АЕС за першою групою граничних станів сформулюємо з



використанням підходів [71] у такому вигляді: максимальний силовий фактор  $S_{\max}^D$  від наявних навантажень у несприятливому їх сполученні не повинен перевищувати мінімальний опір сталевій опорної конструкції ( $S_{\min}^k$ ) з урахуванням відхилення характеристик матеріалу в бік зменшення

$$S_{\max}^D \leq S_{\min}^k \quad (2.6)$$

Максимальний силовий фактор  $S_{\max}^D$  приймається функцією навантажень та впливів на СОКОіТ енергоблоків АЕС.

Мінімальний опір сталевій опорної конструкції  $S_{\min}^k$  визначає її несучу здатність. За цю характеристику СОКОіТ енергоблоків АЕС (тобто реалізацію позаграничного стану) приймемо допустимі значення напружень, що відповідають переходу від пружної до пластичної роботи матеріалу. Тоді загалом мінімальний опір СОКОіТ енергоблоків АЕС можна записати у такому вигляді

$$S_{\min}^k = \frac{\gamma_c \cdot R_{yn}(T)}{\gamma_m \cdot \gamma_n} \quad (2.7)$$

З урахуванням особливих умов експлуатації СОКОіТ енергоблоків АЕС в загальному випадку в нашому дослідженні  $R_{yn}$  залежить від температури.

Розділивши співвідношення (2.6) на  $S_{\min}^k$  ми прийдемо до рівняння вигляду

$$\frac{S_{\max}^D}{S_{\min}^k} \leq 1, \quad (2.8)$$

що саме й прийнято в нормах [67].

З урахуванням викладеного, розрахунок елементів суцільного перерізу зі сталі з характеристичним опором за границею плинності не більше 440 МПа при центральному розтягу (стиску) виконується за таким співвідношенням [67]

$$\frac{N \cdot \gamma_n}{A_n \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1 \quad (2.9)$$

Розрахунок на міцність згинальних елементів суцільного перерізу виконується за такими співвідношеннями [67]:

– при дії згинального моменту в одній із головних площин:

$$\frac{M \cdot \gamma_n}{W_{n,\min} \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1; \quad (2.10)$$

– при дії поперечної сили  $Q$ , що спрямована паралельно серединній площині стінки:

$$\frac{Q \cdot S_x \cdot \gamma_n}{I_x \cdot t_w \cdot R_s \cdot \gamma_c} \leq 1; \quad (2.11)$$

– при дії згинальних моментів  $M_x$ ,  $M_y$  у двох головних площинах:

$$\frac{M_x \cdot \gamma_n}{I_{xn} \cdot R_y \cdot \gamma_c} \cdot y \pm \frac{M_y \cdot \gamma_n}{I_{yn} \cdot R_y \cdot \gamma_c} \cdot x \leq 1, \quad (2.12)$$

де  $x$  та  $y$  це відстані від головних осей інерції до точки перерізу, яка розглядається.

У загальному випадку розрахунок згинальних елементів виконується з використанням співвідношення [67]

$$\frac{0,87 \cdot \gamma_n}{R_y \cdot \gamma_c} \cdot \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1, \quad (2.13)$$

де  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  це нормальні напруження у серединній площині стінки, спрямовані паралельно та перпендикулярно до поздовжньої осі балки відповідно;

$$\tau_{xy} = \frac{Q \cdot S_x}{I_x \cdot t_{w_s}} - \text{дотичні напруження у точці стінки балки, яка розглядається.}$$

Нормальні напруження приймаються у співвідношенні (2.13) зі своїми знаками. Складові напруженого стану (нормальні та дотичні напруження) визначаються для однієї точки.

У випадку одночасної дії на конструкцію повздовжньої сили на згинального моменту співвідношення для розрахунку на міцність прийме вид [67]

$$\frac{N \cdot \gamma_n}{A_n \cdot R_y \cdot \gamma_c} \pm \frac{M_x \cdot \gamma_n}{I_{xn} \cdot R_y \cdot \gamma_c} \cdot y \pm \frac{M_y \cdot \gamma_n}{I_{yn} \cdot R_y \cdot \gamma_c} \cdot x \leq 1, \quad (2.14)$$

де  $x$  та  $y$  це відстані від головних осей до точки перерізу, яка розглядається.

Державні будівельні норми з розрахунку металевих конструкцій орієнтовані на використання четвертої теорії міцності (критерію питомої потенційної енергії формозміни) [71]. При складному напруженому стані інтенсивність напружень

буде визначатися як

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}. \quad (2.15)$$

Записавши (2.15) через нормальні та дотичні напруження у загальному випадку отримаємо

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}. \quad (2.16)$$

Для чисельних розрахунків конструкцій існує багато відомих програмних комплексів, серед яких ЛІРА, ANSYS, SCAD, ABAQUS, MSC.Marc, ROBOT, APM тощо. Для нашого дослідження будемо використовувати метод скінченних елементів, реалізований в ліцензійному розрахунковому комплексі ANSYS. Це багатоцільовий програмний комплекс, який дозволяє вирішувати широкий клас різноманітних задач при дослідженні напружено-деформованого стану просторових конструкцій довільної форми. Для вирішення основної системи рівнянь при скінчено-елементних розрахунках в розрахунковому комплексі ANSYS загалом формуються глобальні матриці жорсткості  $[K]$ , демпфування  $[C]$  та матриця мас  $[M]$ , а також вектор зовнішнього вузлового навантаження  $\{F\}$  [6]. Вирішується система алгебраїчних рівнянь [111]:

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (2.17)$$

або

$$[K] \cdot \{u\} = \{F^a\} + \{F^r\}, \quad (2.18)$$

де:  $[K] = \sum_{m=1}^N [K_e]$ ;

$\{u\}$  – вектор вузлових переміщень;

$N$  – кількість елементів;

$[K_e]$  – елементна матриця жорсткості;

$\{F^r\}$  – вектор реакції від навантажень;

$\{F^a\}$  – вектор глобального зовнішнього навантаження.

В свою чергу

$$\{F^a\} = \{F^{nd}\} + \{F^{ac}\} + \sum_{m=1}^N (\{F_e^{th}\} + \{F_e^{pr}\}), \quad (2.19)$$

де  $\{F^{nd}\}$  – вектор прикладеного вузлового навантаження;

$\{F^{ac}\}$  – вектор інерційних сил

$$\{F^{ac}\} = -M \cdot \{a_c\}, \quad (2.20)$$

де  $[M] = \sum_{m=1}^N [M_e]$ ;

$[M_e]$  – елементна матриця мас;

$\{a_c\}$  – глобальний вектор прискорень;

$\{F_e^{th}\}$  – вектор температурного навантаження в межах одного елемента;

$\{F_e^{pr}\}$  – вектор тисків в межах одного елемента.

Рівняння руху для задач визначення власних частот та форм коливань має вигляд [111]:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{0\}. \quad (2.21)$$

Для лінійних систем вільні коливання є гармонічними

$$\{u\} = \{\phi\}_i \cdot \cos \omega_i t, \quad (2.22)$$

де  $\{\phi\}_i$  – власний вектор, який відповідає  $i$ -ій власній частоті;

$\omega_i$  –  $i$ -а власна кругова частота (радіан в одиницю часу);

$t$  – час.

Отже, рівняння (2.21) прийме вигляд

$$(-\omega_i^2 \cdot [M] + [K]) \cdot \{\phi\}_i = \{0\}. \quad (2.23)$$

Одним з рішень (2.23) є

$$|[K] - \omega^2 \cdot [M]| = \{0\}. \quad (2.24)$$

Через отримані значення кругової частоти власних коливань  $\{\omega\}$  можна знайти частоти власних коливань  $\{f\}$

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}. \quad (2.25)$$

де  $f_i$  –  $i$ -та власна частота.

Приведені в підрозділі 2.3 сейсмічні навантаження задані спектрами відгуку. Отже, для оцінки міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС при сейсмічних

навантаженнях використовується вбудований в ANSYS модуль «Single-Point Response Spectrum» (SPRS). Цей модуль реалізує лінійно-спектральний метод в якому результати розрахунку власних коливань конструкції використовуються сумісно з наперед відомим спектром збудження (поверховим спектром відгуку) для визначення в конструкції на різних частотах переміщень, деформацій, зусиль та напружень, тобто відгуків системи. Модальні внески для відповідного напрямку збудження визначають як [111]:

$$\gamma_i = \{\phi\}_i^T [M] \{D\}, \quad (2.26)$$

де  $\gamma_i$  – модальний внесок для  $i$ -ої форми коливань;

$\{\phi\}_i^T$  – вектор переміщень для  $i$ -ої форми коливань;

$\{D\}$  – вектор, що описує напрям збудження (X, Y, Z).

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

$$R_a = \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i)^2} \quad (2.27)$$

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

## **2.6 Скінчено-елементні моделі сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм**

Для виконання скінчено-елементних розрахунків СОКОіТ енергоблоків АЕС типових конструктивних форм розроблені відповідні скінчено-елементні моделі [6]. Скінчено-елементні моделі складаються з 3-D 3-вузлового елемента BEAM 189. Це просторовий, квадратичний елемент балки, що має 4 вузла, три з яких лежать на осі елемента (два на краях та один всередині), четвертий – вузол орієнтації. На рисунку 2.13 зображені геометрія, розташування вузлів та система координат елемента BEAM 189 [112].

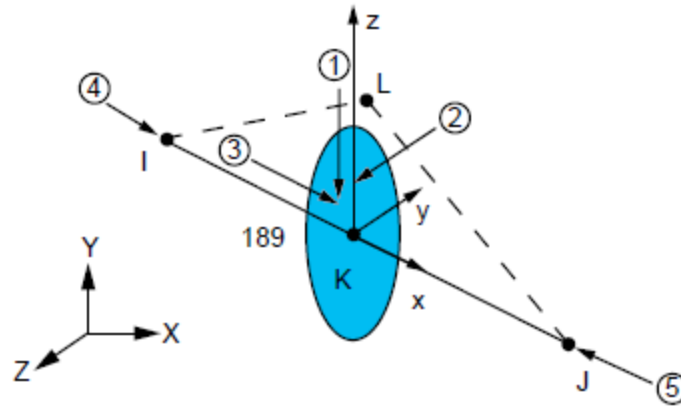


Рисунок 2.13. Опис скінченного елемента BEAM 189.

Згідно даних бібліотеки скінчених елементів програмного комплексу ANSYS [112] елемент BEAM 189:

- має шість ступенів свободи у кожному вузлі (три переміщення та три повороти);
- дозволяє виконувати, зокрема пружні та пружно-пластичні розрахунки;
- може мати поперечний переріз, який складений з більше ніж одного матеріалу;
- рекомендується для аналізу складених конструкцій (тобто тих, що виготовлені з двох або більше елементів, що з'єднані між собою).

Визначення раціональної скінчено-елементної сітки є важливою частиною чисельного моделювання, оскільки її якість впливає на збіжність та точність результатів, що отримуються. Отже, з метою визначення оптимального розміру скінченного елемента при дослідженні НДС СОКОіТ енергоблоків АЕС типових конструктивних форм проаналізовано результати розрахунків на трьох різних скінчено-елементних сітках. Оскільки наукова праця присвячена роботі СОКОіТ енергоблоків АЕС при сейсмічних навантаженнях вибір розміру скінченного елемента здійснювався при навантаженні саме сейсмічними впливами у вигляді поверхових спектрів відгуку [6]. Описаний підхід продемонструємо на прикладі сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас». На рисунку 2.14 представлені скінчено-елементні сітки трьох різних розмірів.

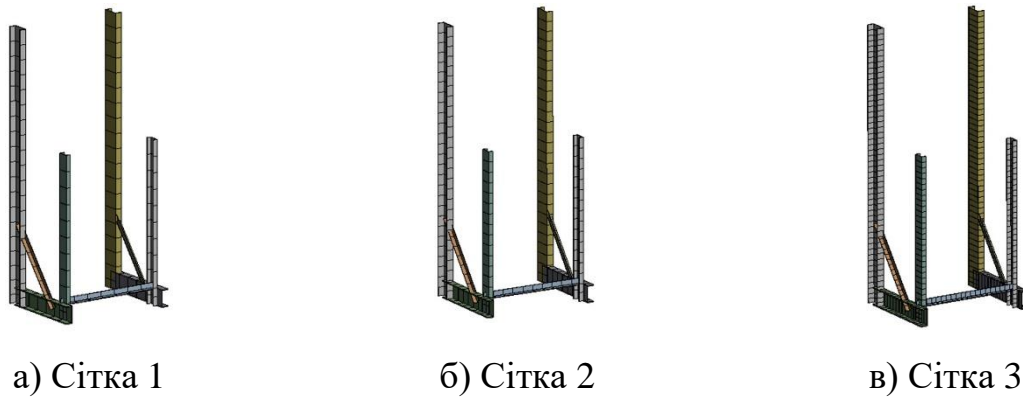


Рисунок 2.14. Скінчено-елементі сітки різних розмірів.

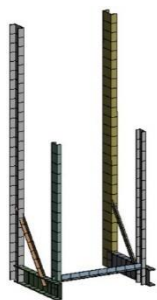
Результати розрахунку максимальних значень інтенсивності напружень за четвертою теорією міцності для різних сіток представлені в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11. Результати розрахунку максимальних значень інтенсивності напружень для різних сіток.

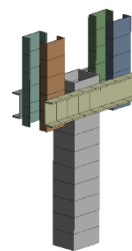
Тип сітки	Розмір скінченого елементу, м	Інтенсивність напружень, МПа
Сітка 1	0,15	10,638
Сітка 2	0,1	10,637
Сітка 3	0,075	10,639

Як видно з таблиці 2.11 всі три сітки забезпечують прийнятну збіжність результатів розрахунку. Отже, для подальших досліджень НДС СОКОіТ енергоблоків АЕС типових конструктивних форм будемо використовувати сітку 2.

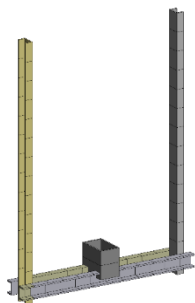
Розроблені скінчено-елементі моделі СОКОіТ енергоблоків АЕС типових конструктивних форм представлені на рисунку 2.15.



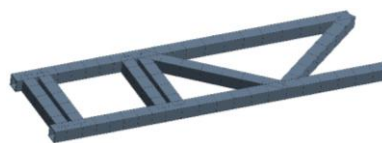
а) «Підлоговий каркас»



б) «Стійка»



в) «Стельовий каркас»



г) «Консоль»

Рисунок 2.15. Скінчено-елементі моделі опорних конструкцій типових конструктивних форм

## 2.7 Висновки до розділу 2

З метою розробки фізико-математичної моделі виконані аналіз та узагальнення низки проєктів СОКОіТ енергоблоків АЕС України, які дозволили виділити основні типові конструктивні форми об'єкту моделювання.

Сформульовані основні фізичні та математичні припущення і гіпотези, використані при розробці моделі.

Визначені параметри навантажень фізико-математичної моделі при максимальній проєктній аварії «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850» на енергоблоці АЕС.

Врахування в фізико-математичній моделі фактичних геологічних та сейсмологічних умов експлуатації СОКОіТ енергоблоків АЕС здійснено шляхом використання сейсмічних навантажень (поверхових спектрів відгуку), які визначені на підставі:

- встановлених рівнів сейсмічної небезпеки конкретних промислових майданчиків АЕС;



– врахування взаємодії «грунт-конструкція».

При аналізі наявних поверхових спектрів відгуків енергоблоків АЕС України з'ясовано, що для енергоблоків РАЕС та ХАЕС поверхові спектри відгуків РВ не враховують конкретні ґрунтові умови цих промислових майданчиків. Отже, врахування в фізико-математичній моделі сейсмічних навантажень, які виникають в РВ РАЕС та ПАЕС призведе до зниження достовірності та репрезентативності дослідження. З урахуванням викладеного, прийнято рішення про врахування в подальших дослідженнях виключно репрезентативних сейсмічних навантажень на СОКОіТ РВ ЗАЕС та ПАЕС.

Розраховані та побудовані огибаючі діапазони значень прискорень (сейсмічних навантажень), які будуть передаватися на об'єкт моделювання під час МРЗ на промислових майданчиках ЗАЕС та ПАЕС.

Встановлено, що режими ПНЕ на АЕС за підходами [68], [69] можуть бути віднесені до змінних короткочасних навантажень по відношенню СОКОіТ енергоблоків АЕС. В цьому випадку під час складання сполучень навантажень з урахуванням сейсмічних впливів коефіцієнт сполучення  $\psi_2$  має прийматися мінімальним з усіх можливих значень для основних та аварійного сполучень (див. таблицю 1.1 підрозділу 1.3 наукової праці), що зменшує консервативність результатів оцінки міцності СОКОіТ. Це викликає певне занепокоєння з огляду на те, що в окремих режимах ПНЕ відбувається спрацювання систем безпеки енергоблоку. Отже, за вказаним аспектом підходи [68], [69] не враховують ступінь відповідальності СОКОіТ систем безпеки щодо забезпечення безпеки АЕС при сейсмічних навантаженнях. Рекомендації щодо компенсації виявленого дефіциту безпеки будуть представлені в межах розділу 4 наукової праці.

Сейсмічні впливи та ПА відносяться до епізодичних впливів. Отже, при моделюванні розглядається саме аварійне сполучення. При цьому, на виконання вимог [3] та на відміну від підходів [69] в аварійне сполучення включаються одночасно ці два епізодичні впливи.

Використана загальна модель розглядуваної системи враховує всі чинники (від сейсмологічних до внутрішньоцехових), які впливають на сейсмічну міцність СОКОіТ енергоблоків АЕС.

Розроблені скінчено-елементні моделі СОКОіТ типових конструктивних форм:

- відображають дійсні умови їх роботи;
- враховують важливі для оцінки сейсмічної міцності особливості геометрії конструкцій, а також розподілу мас і жорсткостей;
- представляють сталеві опорні конструкції як єдині просторові системи;
- враховують чинники, що визначають напружений і деформований стан сталевих опорних конструкцій.

Підсумовуючи викладене необхідно відзначити, що розроблена фізико-математична модель СОКОіТ енергоблоків АЕС є коректною, обґрунтованою та може бути використана для подальших досліджень НДС.

Основні матеріали розділу висвітлено в працях автора [5, 6, 90, 98, 108].

## РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ І НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТАЛЕВИХ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ ТА ТРУБОПРОВІДІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

### 3.1 Дослідження динамічних характеристик сталевих опорних конструкцій

Чисельні дослідження динамічних характеристик (під якими в нашій роботі ми розуміємо моди та значення частот власних коливань) СОКОіТ типових конструктивних форм («підлоговий каркас», «стійка», «стельовий каркас», «консоль») проводились на фізико-математичних моделях, розроблених в розділі 2 наукової праці, з використанням ліцензійного розрахункового комплексу ANSYS. В якості кінематичних граничних умов в місцях кріплення СОКОіТ до конструктивних основ РВ енергоблоків АЕС прийнято жорстке закріплення, тобто заборонені переміщення та моменти у трьох напрямках (надалі – ГУ 1).

3.1.1 Результати досліджень сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «підлоговий каркас»

На рисунках 3.1 та 3.2 наведені результати досліджень спектру частот власних коливань при температурі в РВ енергоблоку АЕС 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчиків ЗАЕС і ПАЕС [6].

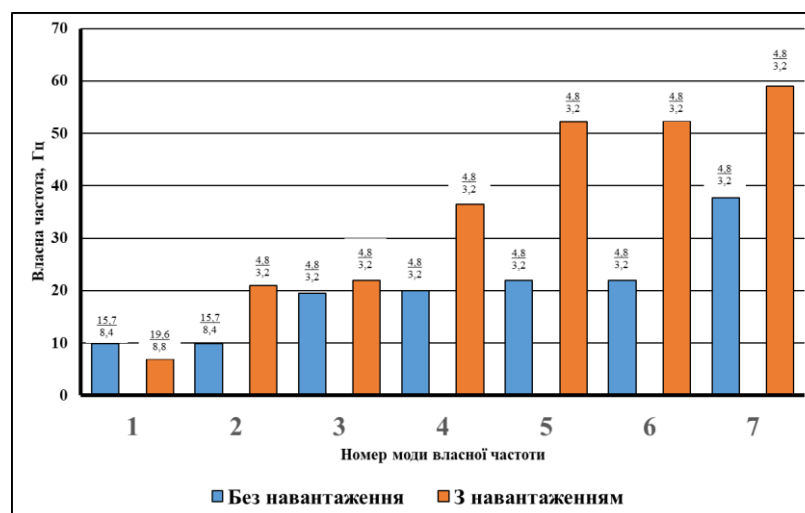


Рисунок 3.1. Результати досліджень спектру частот власних коливань сталевій опорній конструкції «підлоговий каркас» при температурі в РВ 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчику ЗАЕС

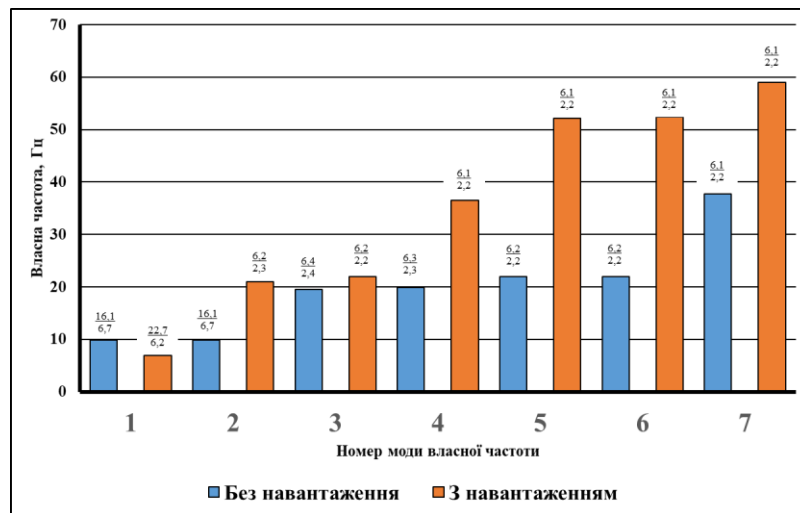


Рисунок 3.2. Результати досліджень спектру частот власних коливань сталевій опорної конструкції «підлоговий каркас» при температурі в РВ 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчику ПАЕС

На рисунках 3.1 та 3.2 ми використовуємо такі позначення:

1) «Без навантаження» – йдеться про сталеву опорну конструкцію «підлоговий каркас» без урахування обладнання, яке на ній встановлено (див. рисунок 2.15 (а) підрозділу 2.6 наукової праці);

2) «З навантаженням» – йдеться про сталеву опорну конструкцію «підлоговий каркас» в режимі експлуатації НЕ, тобто з урахуванням встановленого на неї обладнання зі своїми навантажувальними параметрами (власна вага та вага внутрішнього середовища, внутрішній тиск, навантаження від приєднаних до обладнання трубопроводів тощо (див. рисунок В.3 додатку В наукової праці));

3) « $\frac{\text{число}}{\text{число}}$ » (наприклад, « $\frac{15,7}{8,4}$ ») відповідає значенням прискорень ( $\text{м/с}^2$ )

з огинаючих поверхових спектрів відгуку (див. рисунки 2.6 – 2.11 підрозділу 2.3 наукової праці) для відповідної частоти власних коливань сталевій опорної конструкції. При цьому, число в чисельнику відповідає прискоренню верхньої огинаючої, в знаменнику – нижньої. З урахуванням того, що ми розглядаємо одночасну дію сейсмічних навантажень за трьома напрямками (двома горизонтальними та вертикальним) значення прискорень в чисельнику та знаменнику визначені за таким співвідношенням:

$$a_i^{\text{рез}} = \sqrt{a_x^2(f_i) + a_y^2(f_i) + a_z^2(f_i)} \quad (3.1)$$

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

Отже, зображений на рисунку 3.3 фрагмент рисунку 3.1 необхідно розуміти так: першій моді та частоті власних коливань сталеві опорної конструкції відповідають сейсмічні навантаження від  $8,4 \text{ м/с}^2$  до  $15,7 \text{ м/с}^2$  в залежності від висотної відмітки розташування СОКОіТ в РВ енергоблоку АЕС.

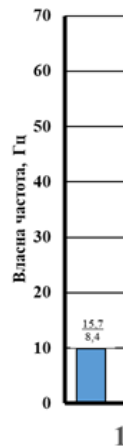
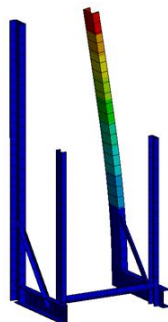
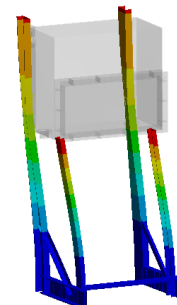


Рисунок 3.3. Фрагмент рисунку 3.1

На рисунку 3.4 представлена перша мода власних коливань сталеві опорної конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням».



а) «Без навантаження»



б) «З навантаженням»

Рисунок 3.4. Перша мода власних коливань сталеві опорної конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням»

### 3.1.2 Результати досліджень сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «стійка»

На рисунках 3.5 та 3.6 наведені результати досліджень спектру частот власних коливань при температурі в РВ 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчиків ЗАЕС і ПАЕС.

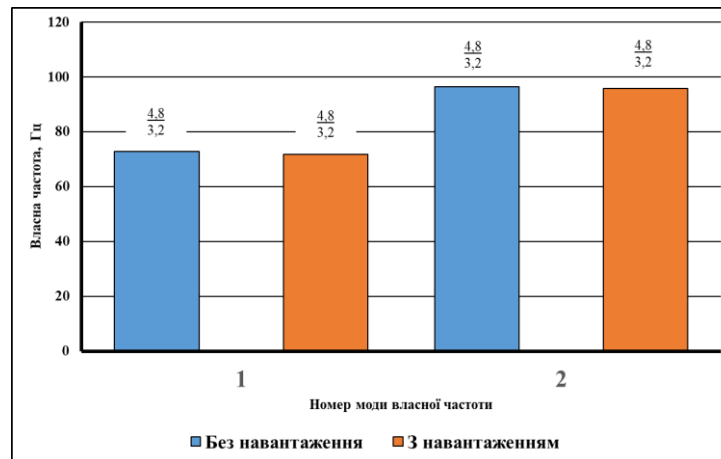


Рисунок 3.5. Результати досліджень спектру частот власних коливань сталеві опорної конструкції «стійка» при температурі в РВ 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчику ЗАЕС

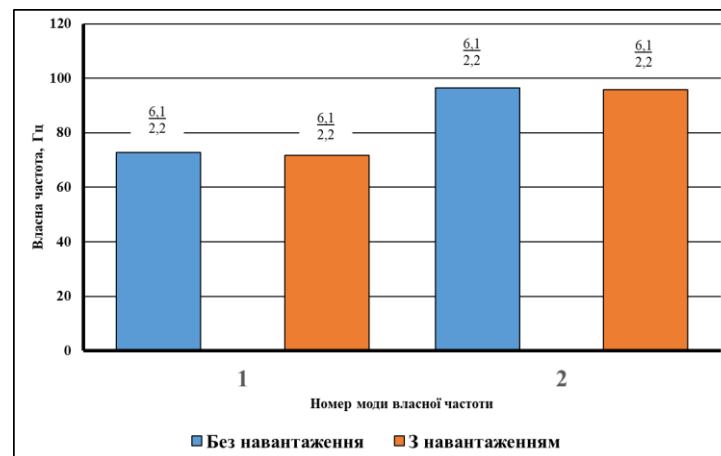


Рисунок 3.6. Результати досліджень спектру частот власних коливань сталеві опорної конструкції «стійка» при температурі в РВ 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчику ПАЕС

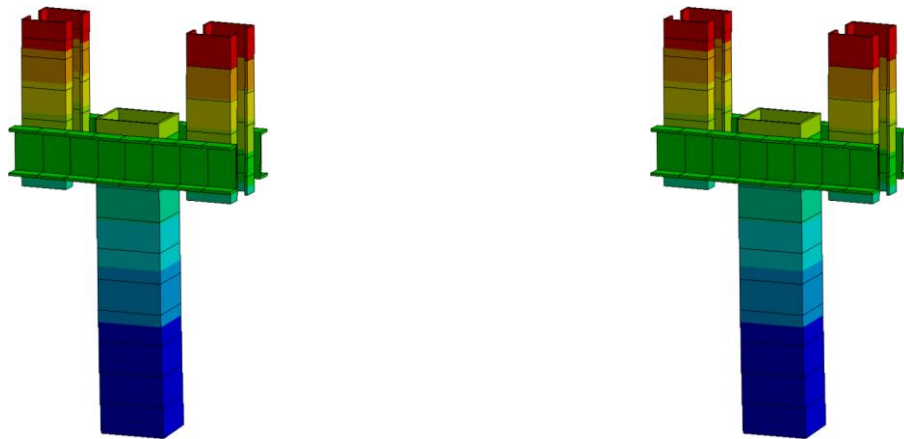
На рисунках 3.5 та 3.6 ми використовуємо такі позначення:

1) «Без навантаження» – йдеться про сталеву опорну конструкцію «стійка» без урахування трубопроводу, який на ній встановлено;

2) «З навантаженням» – йдеться про сталеву опорну конструкцію «стійка» в режимі експлуатації НЕ, тобто з урахуванням встановленого на неї трубопроводу зі своїми навантажувальними параметрами (власна вага, вага внутрішнього середовища, внутрішній тиск).

Інші позначення аналогічні тим, що прийняті в п. 3.1.1 наукової праці.

На рисунку 3.7 представлені перша мода власних коливань сталеві опорної конструкції типової конструктивної форми «стійка» для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням».



а) «Без навантаження»

б) «З навантаженням»

Рисунок 3.7. Перша мода власних коливань сталеві опорної конструкції типової конструктивної форми «стійка» для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням».

3.1.3 Результати досліджень сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «стельовий каркас»

На рисунках 3.8 та 3.9 наведені результати досліджень спектру частот власних коливань при температурі в РВ 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчиків ЗАЕС і ПАЕС.

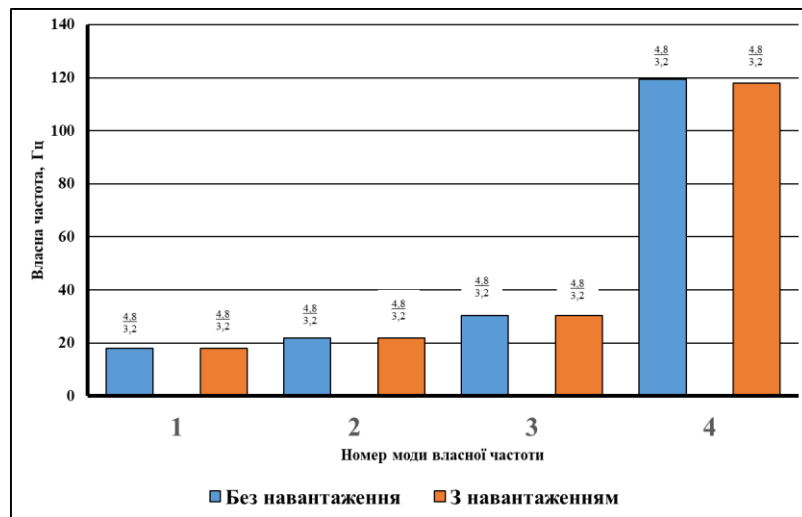


Рисунок 3.8. Результати досліджень спектру частот власних коливань сталевій опорної конструкції «стельовий каркас» при температурі в РВ 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчику ЗАЕС

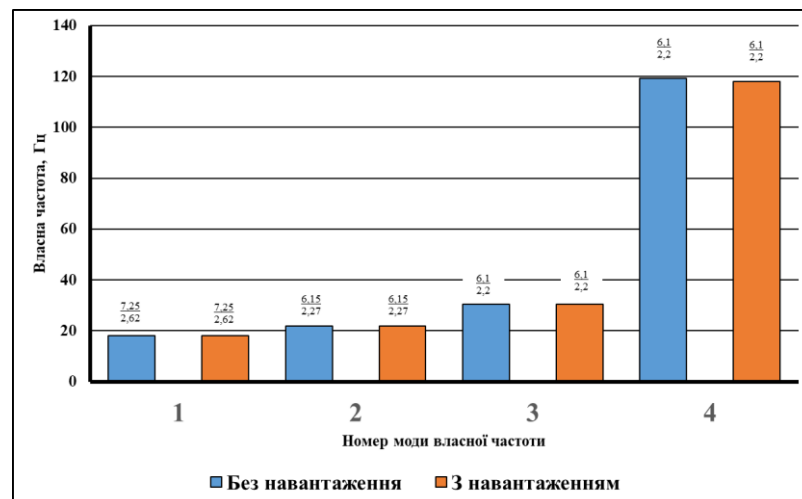


Рисунок 3.9. Результати досліджень спектру частот власних коливань сталевій опорної конструкції «стельовий каркас» при температурі в РВ 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчику ПАЕС

На рисунках 3.8 та 3.9 ми використовуємо такі позначення:

- 1) «Без навантаження» – йдеться про сталеву опорну конструкцію «стельовий каркас» без урахування трубопроводу, який на ній встановлено;
- 2) «З навантаженням» – йдеться про сталеву опорну конструкцію «стельовий каркас» в режимі експлуатації НЕ, тобто з урахуванням встановленого на неї трубопроводу зі своїми навантажувальними параметрами (власна вага, вага внутрішнього середовища, внутрішній тиск).

Інші позначення аналогічні тим, що прийняті в п. 3.1.1 наукової праці.



На рисунку 3.10 представлені перша мода власних коливань сталеві опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням».



а) «Без навантаження»

б) «З навантаженням»

Рисунок 3.10. Перша мода власних коливань сталеві опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням».

3.1.4 Результати досліджень сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «консоль»

На рисунках 3.11 та 3.12 наведені результати досліджень спектру частот власних коливань при температурі в РВ 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчиків ЗАЕС і ПАЕС.

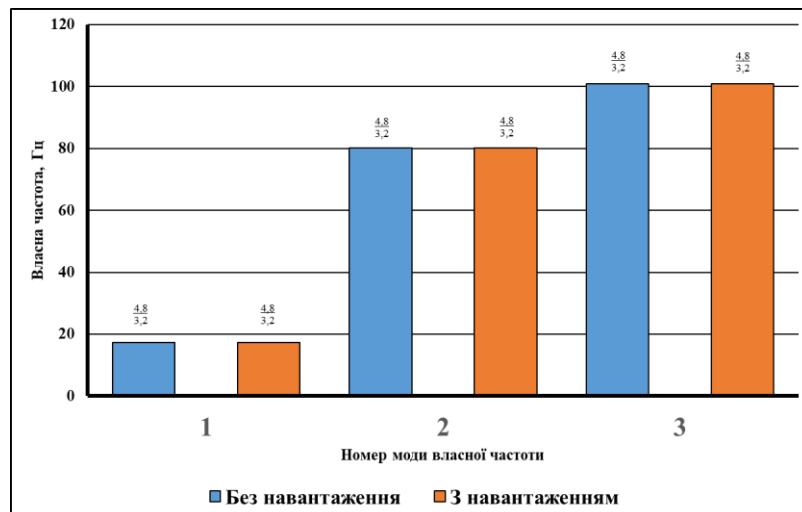


Рисунок 3.11. Результати досліджень спектру частот власних коливань сталеві опорної конструкції «консоль» при температурі в РВ 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчику ЗАЕС

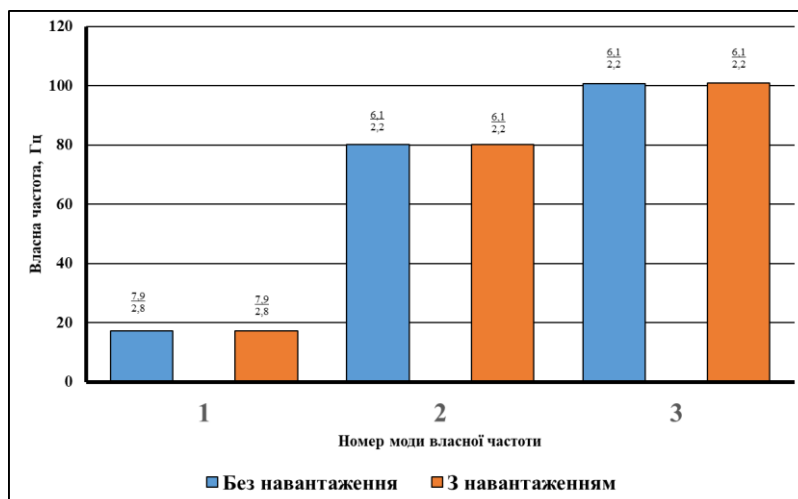


Рисунок 3.12. Результати досліджень спектру частот власних коливань сталевій опорній конструкції «консоль» при температурі в РВ 60°C та сейсмічні навантаження в умовах майданчику ПАЕС

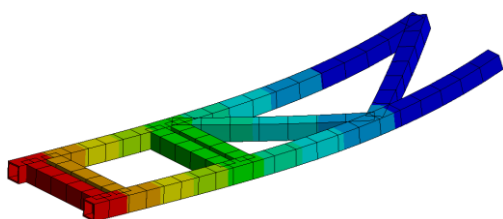
На рисунках 3.11 та 3.12 ми використовуємо такі позначення:

3) «Без навантаження» – йдеться про сталеву опорну конструкцію «консоль» без урахування трубопроводу, який на ній встановлено;

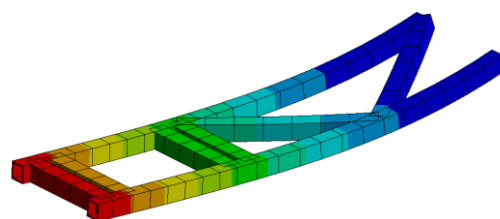
4) «З навантаженням» – йдеться про сталеву опорну конструкцію «консоль» в режимі експлуатації НЕ, тобто з урахуванням встановленого на неї трубопроводу зі своїми навантажувальними параметрами (власна вага, вага внутрішнього середовища, внутрішній тиск).

Інші позначення аналогічні тим, що прийняті в п. 3.1.1 наукової праці.

На рисунку 3.13 представлені перша мода власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «консоль» для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням».



а) «Без навантаження»



б) «З навантаженням»

Рисунок 3.13. Перша мода власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «консоль» для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням».

### 3.1.5 Висновки за результатами дослідження спектрів частот власних коливань СОКОіТ типових конструктивних форм

Виконані дослідження спектру частот власних коливань сталеві опорної конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» продемонстрували, що пряме врахування обладнання в розрахунковій моделі сталеві опорної конструкції змінює як моди її власних коливань, так і самі значення частот власних коливань. Ця ситуація обумовлена тим, що врахування безпосередньо обладнання змінює, серед іншого, кінематичні граничні умови сталеві опорної конструкції, оскільки накладає додаткові в'язі на її конструктивні елементи. На нашу думку, отриманий результат є важливим та вказує на те, що загалом врахування обладнання в розрахунковій моделі лише у вигляді додаткової ваги може обумовити ситуацію коли така розрахункова модель не буде відображати дійсні умови роботи сталеві опорної конструкції, а також важливі для оцінки сейсмічної міцності особливості геометрії, розподілу мас і жорсткостей. Також встановлено, що врахування обладнання призводить до зміни рівня сейсмічних навантажень (як в більший, так і в менший бік) на сталеву опорну конструкцію внаслідок зміни значень її частот власних коливань (див. рисунки 3.1 та 3.2 підрозділу 3.1 розділу 3 наукової праці). Отже, при проектуванні сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «підлоговий каркас» необхідно використовувати такі в'язі елементів конструкції, які забезпечують відсутність зміни кінематичних граничних умов сталеві опорної конструкції у разі прямого врахування обладнання в розрахунковій схемі. Дотримання цього принципу дозволить спростити розрахунки сталеві опорної конструкції шляхом врахування обладнання лише у вигляді зосередженої або розподіленої ваги. Крім цього, цей підхід загалом покращить сприйняття сталеві опорною конструкцією сейсмічних навантажень, оскільки зсуне переважну більшість резонансних частот сталеві опорної конструкції у бік високих значень, що знизить сейсмічні навантаження [6].

Для сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стійка» всі значення частот власних коливань є вкрай високими та починаються із значення приблизно 72 Гц (див. рисунки 3.5 та 3.6 підрозділу 3.1 розділу 3 наукової праці). При цьому:

- зміна значень частот власних коливань для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням» знаходиться в межах 1,5 %;
- врахування навантажень від трубопроводу в режимі НЕ на сталеву опорну конструкцію не призводить до змін мод власних коливань.

Сейсмічні навантаження на «стійку» для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням» не змінюються внаслідок вкрай високих значень частот власних коливань конструкції, які відповідають прискоренню нульового періоду (див. рисунки 2.6 – 2.11 підрозділу 2.3 розділу 2 наукової праці).

Для сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм «стельовий каркас» та «консоль» значення частот власних коливань починаються приблизно з 18 Гц та 17 Гц (див. рисунки 3.8, 3.9 та 3.11, 3.12 підрозділу 3.1 розділу 3 наукової праці). При цьому:

- зміна значень частот власних коливань для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням» знаходиться в межах 1,2 % для «стельового каркасу» та 0,5 % для «консоли»;
- врахування навантажень від трубопроводів в режимі НЕ на сталеві опорні конструкції типових конструктивних форм «стельовий каркас» та «консоль» не призводить до змін мод власних коливань.

Сейсмічні навантаження на «стельовий каркас» та «консоль» для випадків «Без навантаження» та «З навантаженням» можна вважати не змінними внаслідок їх не чуттєвості до вкрай малих змін (наприклад, з 18,0225 Гц до 18,0073 Гц, з 17,2897 Гц до 17,1981 Гц) значень частот власних коливань (див. рисунки 3.8, 3.9 та 3.11, 3.12 підрозділу 3.1 розділу 3 наукової праці).

### 3.2 Дослідження напружено-деформованого стану сталевих опорних конструкцій при сейсмічних навантаженнях

Чисельні дослідження НДС СОКОіТ типових конструктивних форм («підлоговий каркас», «стійка», «стельовий каркас», «консоль») проводились нами на фізико-математичних моделях, наведених в розділі 2 наукової праці, з використанням ліцензійного розрахункового комплексу ANSYS. В якості кінематичних граничних умов в місцях кріплення СОКОіТ до конструктивних основ РВ енергоблоків АЕС прийняті ГУ 1. Розглядається розрахунковий випадок «3 навантаженням». Розрахунок НДС СОКОіТ виконується в пружній постановці. Інтенсивність напружень  $\sigma_{red}$  розрахована за формулою (2.15) підрозділу 2.5 наукової праці. Розглядаються випадки розташування СОКОіТ між нижніми (0 м.) та верхніми (36-38 м.) відмітками при температурі 60°C в РВ ЗАЕС та ПАЕС.

3.2.1 Результати досліджень сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «підлоговий каркас»

Результати чисельних досліджень НДС сталеві опорної конструкції при її розташуванні в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.1 та 3.2 відповідно.

Таблиця 3.1. Результати чисельних досліджень НДС сталеві опорної конструкції у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

Сейсмічні навантаження	Максимальні значення напружень $\sigma_{red}$ , МПа
Огинаючі спектри відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	44,347
Огинаючі спектри відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	96,157

Таблиця 3.2. Результати чисельних досліджень НДС сталевій опорній конструкції у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

Сейсмічні навантаження	Максимальні значення напружень $\sigma_{red}$ , МПа
Огинаючі спектри відгуку на нижніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	31,048
Огинаючі спектри відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	93,503

На рисунку 3.14 представлені ізополя інтенсивності напружень  $\sigma_{red}$  при сейсмічних навантаженнях сталевій опорній конструкції у випадку її розташування на верхніх відмітках РВ ЗАЕС та ПАЕС.

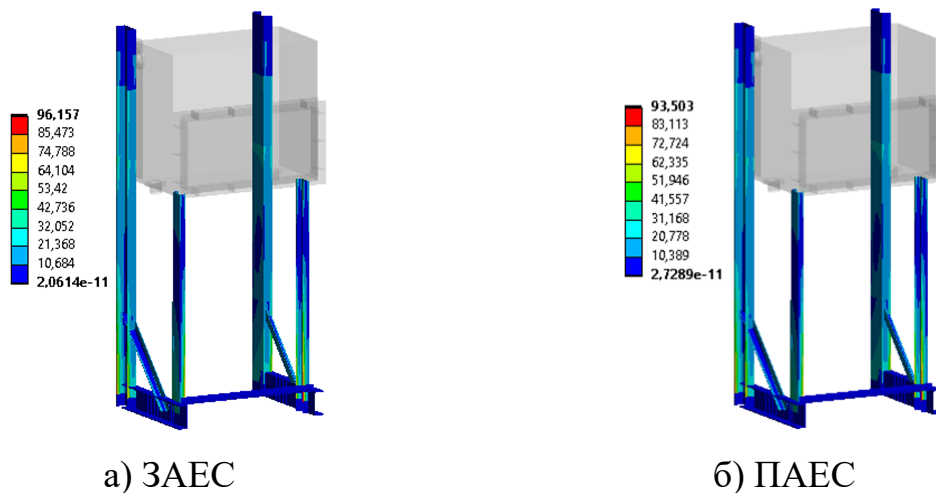


Рисунок 3.14. Ізополя інтенсивності напружень  $\sigma_{red}$  (МПа) у випадку розташування сталевій опорній конструкції на верхніх відмітках РВ ЗАЕС та ПАЕС.

3.2.2 Результати досліджень сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «стійка»

Результати чисельних досліджень НДС сталевій опорній конструкції при її розташуванні в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.3 та 3.4 відповідно.

Таблиця 3.3. Результати чисельних досліджень НДС сталевій опорної конструкції у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

Сейсмічні навантаження	Максимальні значення напружень $\sigma_{red}$ , МПа
Огинаючі спектри відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	0,53
Огинаючі спектри відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	0,86

Таблиця 3.4. Результати чисельних досліджень НДС сталевій опорної конструкції у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

Сейсмічні навантаження	Максимальні значення напружень $\sigma_{red}$ , МПа
Огинаючі спектри відгуку на нижніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	0,39
Огинаючі спектри відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	1,09

На рисунку 3.15 представлені ізополя інтенсивності напружень  $\sigma_{red}$  при сейсмічних навантаженнях сталевій опорної конструкції у випадку її розташування на верхніх відмітках РВ ЗАЕС та ПАЕС.



Рисунок 3.15. Ізополя інтенсивності напружень  $\sigma_{red}$  (МПа) у випадку розташування сталевій опорної конструкції на верхніх відмітках РВ ЗАЕС та ПАЕС.

### 3.2.3 Результати досліджень сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «стельовий каркас»

Результати чисельних досліджень НДС сталеві опорної конструкції при її розташуванні в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.5 та 3.6 відповідно.

Таблиця 3.5. Результати чисельних досліджень НДС сталеві опорної конструкції у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

Сейсмічні навантаження	Максимальні значення напружень $\sigma_{red}$ , МПа
Огинаючі спектри відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	3,73
Огинаючі спектри відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	5,48

Таблиця 3.6. Результати чисельних досліджень НДС сталеві опорної конструкції у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

Сейсмічні навантаження	Максимальні значення напружень $\sigma_{red}$ , МПа
Огинаючі спектри відгуку на нижніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	3,53
Огинаючі спектри відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	9,24

На рисунку 3.16 представлені ізополя інтенсивності напружень  $\sigma_{red}$  при сейсмічних навантаженнях сталеві опорної конструкції у випадку її розташування на верхніх відмітках РВ ЗАЕС та ПАЕС.



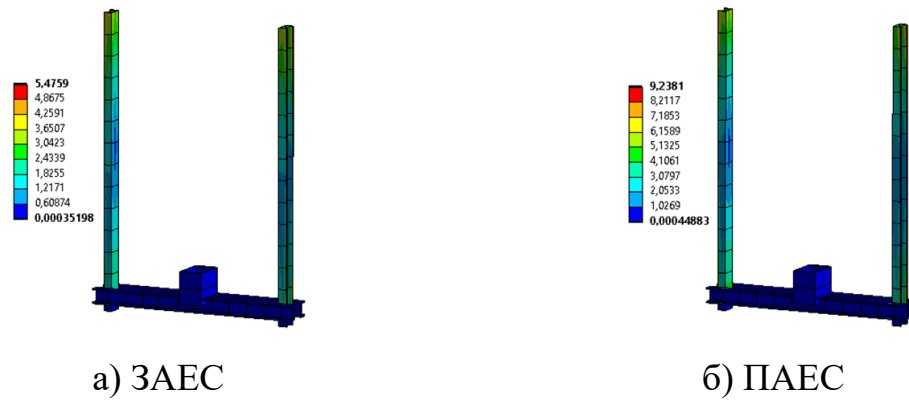


Рисунок 3.16. Ізополя інтенсивності напружень  $\sigma_{red}$  (МПа) у випадку розташування сталеві опорної конструкції на верхніх відмітках РВ ЗАЕС та ПАЕС.

### 3.2.4 Результати досліджень сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «консоль»

Результати чисельних досліджень НДС сталеві опорної конструкції при її розташуванні в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.7 та 3.8 відповідно.

Таблиця 3.7. Результати чисельних досліджень НДС сталеві опорної конструкції у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

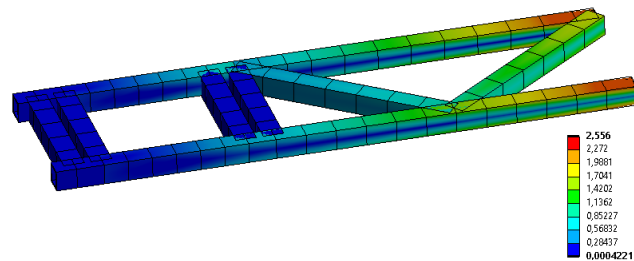
Сейсмічні навантаження	Максимальні значення напружень $\sigma_{red}$ , МПа
Огинаючі спектри відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	1,50
Огинаючі спектри відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	2,56

Таблиця 3.8. Результати чисельних досліджень НДС сталеві опорної конструкції у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

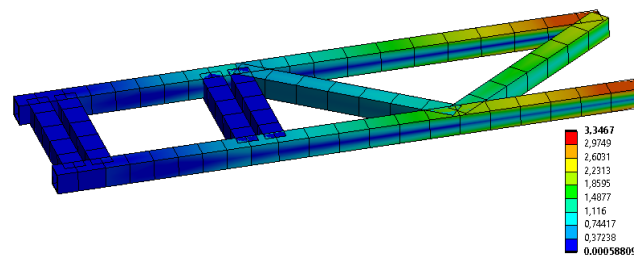
Сейсмічні навантаження	Максимальні значення напружень $\sigma_{red}$ , МПа
Огинаючі спектри відгуку на нижніх відмітках	1,11

Сейсмічні навантаження	Максимальні значення напружень $\sigma_{red}$ , МПа
ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	
Огинаючі спектри відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	3,35

На рисунку 3.17 представлені ізополя інтенсивності напружень  $\sigma_{red}$  при сейсмічних навантаженнях сталевій опорній конструкції у випадку її розташування на верхніх відмітках РВ ЗАЕС та ПАЕС.



а) ЗАЕС



б) ПАЕС

Рисунок 3.17. Ізополя інтенсивності напружень  $\sigma_{red}$  (МПа) у випадку розташування сталевій опорній конструкції на верхніх відмітках РВ ЗАЕС та ПАЕС.

3.2.5 Висновки за результатами дослідження напружено-деформованого стану сталевих опорних конструкцій типових конструктивних форм при сейсмічних навантаженнях

Виконані дослідження НДС СОКОіТ типових конструктивних форм продемонстрували, що розрахункові напруження від сейсмічних навантажень можуть підвищуватися у 1,5 – 3 рази в залежності від висотної відмітки

розташування СОКОіТ в РВ енергоблоку АЕС та сягати близько 96 МПа для «підлогового каркасу», 1 МПа для «стійки», 10 МПа для «стельового каркасу» та 4 МПа для «консолі». Такий суттєвий розкид значень сейсмічних напружень в СОКОіТ різних типових конструктивних форм обумовлений кардинально різними спектрами значень частот їх власних коливань та, відповідно, значним розкидом значень сейсмічних навантажень (від  $4,8 \text{ м/с}^2$  до  $22,7 \text{ м/с}^2$ ). Отже, виконані дослідження продемонстрували, що найбільш раціональною типовою конструктивною формою сталевих опорних конструкцій для кращого сприйняття сейсмічних навантажень при температурі  $60^\circ\text{C}$  в РВ енергоблоків АЕС є «стійка».

### **3.3 Дослідження впливу зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій на їх сейсмічну міцність**

3.3.1 Результати дослідження впливу зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій на їх сейсмічну міцність

В підрозділі 2.2 розділу 2 наукової праці проаналізовані параметри середовища в приміщеннях системи герметичного огороження при різних режимах роботи енергоблоку АЕС з реакторною установкою ВВЕР-1000. Встановлено, що найгірші значення параметрів в РВ виникають під час МПА «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850». В цьому режимі температура в РВ енергоблоку АЕС змінюється від  $60^\circ\text{C}$  (що відповідає режиму НЕ) до  $150^\circ\text{C}$ . Отже, МПА «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850» буде представницьким режимом з погляду впливу внутрішньоцехової температури на СОКОіТ енергоблоків АЕС.

Відповідно до [68] у розрахункових ситуаціях, в яких властивості матеріалів конструкцій можуть змінюватися у часі або якщо зміни цих властивостей можуть спричинитися умовами навколишнього середовища (наприклад, у разі впливу нагрівання) розрахункове значення повинно встановлюватися з урахуванням таких змін. Водночас, в [67] відсутні характеристики сталей залежно від температури.

Підвищення температури загалом впливає на розрахункові значення фізико-механічних властивостей матеріалу СОКОіТ, зокрема: характеристичний опір за границею плинності, модуль пружності, густину, коефіцієнт лінійного розширення [90].

Як продемонстровано в таблиці 2.4 підрозділу 2.1 розділу 2 наукової праці підвищення температури в РВ енергоблоку АЕС до 150°C не призводить до зниження характеристичного опору за границею плинності матеріалу, але дещо знижує значення модулю пружності.

За результатами розгляду та аналізу відомостей [113], [114] можна дійти висновку, що густина конструкційних вуглецевих сталей, до яких належить сталь СтЗсп5, практично не змінюється в діапазоні температур до 100°C-150°C та під час виконання розрахунків може прийматися рівною 7850 кг/м<sup>3</sup>. Такий підхід узгоджується також з положеннями [87] стосовно того, що густину матеріалу приймають незалежною від температури.

Щодо використання коефіцієнта лінійного розширення під час виконання оцінки сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС зауважимо таке: документ [3] під час оцінки сейсмічної міцності елементів енергоблока АЕС не передбачає необхідність врахування безпосередньо температурних навантажень, спричинених нерівномірним розподілом температур по об'єму тіла або внаслідок різниці коефіцієнтів лінійного розширення різних матеріалів. Цей підхід є основою оцінки сейсмічної міцності всіх елементів енергоблока АЕС (див., наприклад, [22], [115, 116]). При цьому, в [27] навіть наводиться застереження, що збір навантажень для оцінки сейсмічної міцності повинен виконуватися дуже уважно щоб не включити помилково до них температурні навантаження. З урахуванням зазначеного, немає потреби в подальшому аналізі зміни коефіцієнта лінійного розширення матеріалу в залежності від температури [90].

Викладене вище дозволяє нам дійти висновку, що в дослідженні впливу зміни технологічних умов експлуатації (тобто підвищення температури з 60°C до 150°C) СОКОіТ на їх сейсмічну міцність достатньо врахувати зниження модулю пружності [90].

Чисельні дослідження впливу зміни технологічних умов експлуатації СОКОіТ на їх сейсмічну міцність проводились на фізико-математичних моделях, наведених в розділі 2 наукової праці, з використанням ліцензійного розрахункового комплексу ANSYS для випадку «З навантаженням» при ГУ 1.

В таблицях 3.9 – 3.12 наведені результати дослідження зміни спектру частот власних коливань СОКОіТ типових конструктивних форм «підлоговий каркас», «стійка», «стельовий каркас» та «консоль» для випадку «З навантаженням» при температурах 60°C та 150°C (яка відповідає режиму МПА «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850»).

Таблиця 3.9. Результати дослідження зміни спектру частот власних коливань сталеві опорної конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при температурах 60°C та 150°C

Номер моди власних коливань	Значення частоти власних коливань при 60°C, Гц	Значення частоти власних коливань при 150°C, Гц	Різниця значень частот власних коливань при 60°C та 150°C, %
1	6,9466	6,8227	1,8160
2	20,9732	20,6174	1,7257
3	21,9799	21,6031	1,7442
4	36,4633	36,4330	0,0832
5	52,1668	51,7644	0,7774
6	52,3933	52,0218	0,7141
7	59,0476	58,9791	0,1161

Таблиця 3.10. Результати дослідження зміни спектру частот власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «стійка» при температурах 60°C та 150°C

Номер моди власних коливань	Значення частоти власних коливань при 60°C, Гц	Значення частоти власних коливань при 150°C, Гц	Різниця значень частот власних коливань при 60°C та 150°C, %
1	71,7016	70,9022	1,1275
2	95,7924	94,7421	1,1086

Таблиця 3.11. Результати дослідження зміни спектру частот власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при температурах 60°C та 150°C

Номер моди власних коливань	Значення частоти власних коливань при 60°C, Гц	Значення частоти власних коливань при 150°C, Гц	Різниця значень частот власних коливань при 60°C та 150°C, %
1	18,0073	17,5476	2,6197
2	21,8154	21,2646	2,5902
3	30,3552	29,5886	2,5909
4	117,923	114,780	2,7383

Таблиця 3.12. Результати дослідження зміни спектру частот власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «консоль» при температурах 60°C та 150°C

Номер моди власних коливань	Значення частоти власних коливань при 60°C, Гц	Значення частоти власних коливань при 150°C, Гц	Різниця значень частот власних коливань при 60°C та 150°C, %
1	17,2897	17,1048	1,0810

Номер моди власних коливань	Значення частоти власних коливань при 60°C, Гц	Значення частоти власних коливань при 150°C, Гц	Різниця значень частот власних коливань при 60°C та 150°C, %
2	80,1230	79,2576	1,0919
3	100,851	99,7610	1,0926

Результати чисельних досліджень зміни НДС сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при температурах 60°C та 150°C під час її розташування між нижніми (0 м.) та верхніми (36-38 м.) відмітками в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.13 та 3.14 відповідно.

Таблиця 3.13. Результати досліджень зміни НДС сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при температурах 60°C та 150°C у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ , МПа	
	МРЗ <sup>60°C</sup>	МРЗ <sup>150°C</sup>
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	44,347	43,982
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	96,157	95,365

Таблиця 3.14. Результати досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при температурах 60°C та 150°C у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ , МПа	
	МРЗ <sup>60°C</sup>	МРЗ <sup>150°C</sup>
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	31,048	30,792
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	93,503	92,733

Результати чисельних досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стійка» при температурах 60°C та 150°C під час її розташування між нижніми (0 м.) та верхніми (36-38 м.) відмітками в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.15 та 3.16 відповідно.

Таблиця 3.15. Результати досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стійка» при температурах 60°C та 150°C у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ , МПа	
	МРЗ <sup>60°C</sup>	МРЗ <sup>150°C</sup>
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	0,53079	0,53108
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	0,85834	0,85882



Таблиця 3.16. Результати досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стійка» при температурах 60°C та 150°C у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ , МПа	
	МРЗ <sup>60°C</sup>	МРЗ <sup>150°C</sup>
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	0,39317	0,39337
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	1,0913	1,0919

Результати чисельних досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при температурах 60°C та 150°C під час її розташування між нижніми (0 м.) та верхніми (36-38 м.) відмітками в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.17 та 3.18 відповідно.

Таблиця 3.17. Результати досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при температурах 60°C та 150°C у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ , МПа	
	МРЗ <sup>60°C</sup>	МРЗ <sup>150°C</sup>
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	3,7302	3,7409
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	5,4759	5,4902

Таблиця 3.18. Результати досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при температурах 60°C та 150°C у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ , МПа	
	МРЗ <sup>60°C</sup>	МРЗ <sup>150°C</sup>
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	3,5316	3,6284
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	9,2381	9,2679

Результати чисельних досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «консоль» при температурах 60°C та 150°C під час її розташування між нижніми (0 м.) та верхніми (36-38 м.) відмітками в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.19 та 3.20 відповідно.

Таблиця 3.19. Результати досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «консоль» при температурах 60°C та 150°C у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ , МПа	
	МРЗ <sup>60°C</sup>	МРЗ <sup>150°C</sup>
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	1,5009	1,4967
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	2,5560	2,5488

Таблиця 3.20. Результати досліджень зміни НДС сталеві опірної конструкції типової конструктивної форми «консоль» при температурах 60°C та 150°C у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ , МПа	
	МРЗ <sup>60°C</sup>	МРЗ <sup>150°C</sup>
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	1,1128	1,1268
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	3,3467	3,3559

3.3.2 Висновки за результатами дослідження впливу зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій на їх сейсмічну міцність

За результатами дослідження впливу зміни технологічних умов експлуатації СОКОіТ на їх сейсмічну міцність встановлено, що підвищення температури в РВ енергоблоку АЕС до 150°C при МПА «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850» знижує значення частот власних коливань СОКОіТ типових конструктивних форм, а саме: для «підлогового каркасу» на 1,82 %, для «стійки» на 1,13 %, для «стельового каркасу» на 2,74 % та для «консолі» на 1,09 %. У абсолютних величинах зниження значень частот власних коливань СОКОіТ знаходиться в межах 0,2 Гц – 0,5 Гц (для діапазону частот власних коливань до значення прискорення нульового періоду). Особливістю поверхових спектрів відгуку РВ ЗАЕС та ПАЕС є те, що вони мають стрибкоподібні ділянки зміни сейсмічних навантажень для певних значень частот (див. рисунки 2.6 – 2.11 підрозділу 2.3 розділу 2 наукової праці), наприклад, для РВ:

– ЗАЕС зниження значення частоти власних коливань з 4,90 Гц до 4,22 Гц призводить до стрибкоподібного підвищення значення сейсмічного навантаження, розрахованого за правилом «ККСК», з 12,4 м/с<sup>2</sup> до 20,97 м/с<sup>2</sup>;

– ПАЕС зниження значення частоти власних коливань з 5,64 Гц до 5,18 Гц призводить до стрибкоподібного підвищення значення сейсмічного навантаження, розрахованого за правилом «ККСК», з 20,09 м/с<sup>2</sup> до 25,59 м/с<sup>2</sup>.

З іншого боку, на поверхових спектрах відгуку присутні також ділянки стрибкоподібного зниження сейсмічних навантажень при зменшенні значень частот власних коливань СОКОіТ. Отже, внутрішньоцехові параметри РВ ЗАЕС та ПАЕС під час МПА можуть як позитивно, так і вкрай негативно впливати на конструктивну безпеку СОКОіТ енергоблоків АЕС.

Врахування особливих умов експлуатації опорних конструкцій (одночасна дія двох таких епізодичних впливів як МПА з температурою 150°C та землетрус) загалом вказує на необхідність введення в розрахунки коефіцієнту умов роботи конструкції за температурою  $\gamma_c^T$  [117].

Виконані дослідження продемонстрували, що найбільш раціональною типовою конструктивною формою сталевих опорних конструкцій для кращого сприйняття сейсмічних навантажень при температурі 150°C в РВ енергоблоків АЕС є «стійка» [117].

### **3.4 Дослідження впливу зміни умов закріплення сталевих опорних конструкцій на їх сейсмічну міцність**

Вихідні дані прийняті як в підрозділі 3.2 розділу 3 наукової праці за виключенням кінематичних граничних умов. В поточному дослідженні впливу зміни умов закріплення СОКОіТ на їх сейсмічну міцність, на відміну від підрозділу 3.2 розділу 2 наукової праці, кінематичні граничні умови в місцях їх кріплення до конструктивних основ РВ енергоблоків АЕС прийняті такими: переміщення у трьох напрямках заборонені, а моменти – дозволені (надалі – ГУ 2).

На підставі виконаних 44 чисельних досліджень динамічних характеристик, НДС при сейсмічних навантаженнях, а також одночасній дії двох епізодичних впливів, наведених в підрозділах 3.1 – 3.3 розділу 3 наукової праці, для дослідження впливу зміни умов закріплення СОКОіТ на їх сейсмічну міцність нами обрані сталеві опорні конструкції типових конструктивних форм

«підлоговий каркас» та «стельовий каркас» за такими критеріями [117]:

- найнижчі значення частот власних коливань;
- найбільша кількість перших частот власних коливань в діапазоні до значення прискорення нульового періоду;
- найбільші значення динамічних навантажень (сейсмічних прискорень);
- найбільші значення напружень в сталевій опорній конструкції від динамічних навантажень.

3.4.1 Результати досліджень сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «підлоговий каркас»

В таблицях 3.21 та 3.22 наведені результати дослідження зміни спектру частот власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 60°C та 150°C для ГУ 1 та ГУ 2.

Таблиця 3.21. Результати дослідження зміни спектру частот власних коливань сталевій конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2.

Номер моди власних коливань	Значення частоти власних коливань при 60°C для ГУ 1, Гц	Значення частоти власних коливань при 60°C для ГУ 2, Гц	Різниця значень частот власних коливань для ГУ 1 та ГУ 2, %
1	6,9466	6,5075	6,7473
2	20,9732	20,1812	3,9244
3	21,9799	20,9379	4,9766
4	36,4633	36,4077	0,1527
5	52,1668	50,8714	2,5464

Таблиця 3.22. Результати дослідження зміни спектру частот власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 150°C для ГУ 1 та ГУ 2.

Номер моди власних коливань	Значення частоти власних коливань при 150°C для ГУ 1, Гц	Значення частоти власних коливань при 150°C для ГУ 2, Гц	Різниця значень частот власних коливань для ГУ 1 та ГУ 2, %
1	6,8227	6,4799	5,2902
2	20,6174	20,0999	2,5746
3	21,6031	20,8534	3,5951
4	36,4330	36,4010	0,0879
5	51,7644	50,7731	1,9524

На рисунку 3.18 представлена перша мода власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2.



Рисунок 3.18. Перша мода власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2.

Результати чисельних досліджень зміни НДС сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування між нижніми (0 м.) та верхніми (36-38 м.) відмітками в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.23 та 3.24 відповідно.

Таблиця 3.23. Результати досліджень зміни НДС сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ при 60°C, МПа	
	ГУ 1	ГУ 2
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	44,347	45,177
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	96,157	97,96

Таблиця 3.24. Результати досліджень зміни НДС сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ при 60°C, МПа	
	ГУ 1	ГУ 2
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	31,048	31,958
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	93,503	95,252

Результати чисельних досліджень зміни НДС сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 150°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування між нижніми (0 м.) та верхніми (36-38 м.) відмітками в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.25 та 3.26 відповідно.

Таблиця 3.25. Результати досліджень зміни НДС сталевій опорної конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 150°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ при 150°C, МПа	
	ГУ 1	ГУ 2
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	43,982	45,094
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	95,365	97,78

Таблиця 3.26. Результати досліджень зміни НДС сталевій опорної конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 150°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ при 150°C, МПа	
	ГУ 1	ГУ 2
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	30,792	31,944
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від обладнання	92,733	95,078

3.4.2 Результати досліджень сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «стельовий каркас»

В таблицях 3.27 та 3.28 наведені результати дослідження зміни спектру частот власних коливань сталевій опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при 60°C та 150°C для ГУ 1 та ГУ 2.



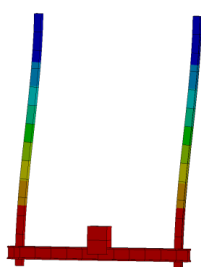
Таблиця 3.27. Результати дослідження зміни спектру частот власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2.

Номер моди власних коливань	Значення частоти власних коливань при 60°C для ГУ 1, Гц	Значення частоти власних коливань при 60°C для ГУ 2, Гц	Різниця значень частот власних коливань для ГУ 1 та ГУ 2, %
1	18,0073	17,3399	3,8489
2	21,8154	21,8154	0,0000
3	30,3552	30,3551	0,0003
4	117,923	116,842	0,9252

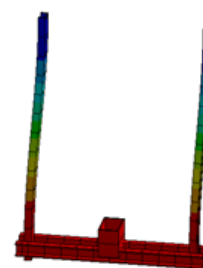
Таблиця 3.28. Результати дослідження зміни спектру частот власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при 150°C для ГУ 1 та ГУ 2.

Номер моди власних коливань	Значення частоти власних коливань при 150°C для ГУ 1, Гц	Значення частоти власних коливань при 150°C для ГУ 2, Гц	Різниця значень частот власних коливань для ГУ 1 та ГУ 2, %
1	17,5476	16,8982	3,8430
2	21,2646	21,2646	0,0000
3	29,5886	29,5884	0,0007
4	114,78	113,65	0,9943

На рисунку 3.19 представлена перша мода власних коливань сталевій опорній конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2.



а) ГУ 1



б) ГУ 2

Рисунок 3.19. Перша мода власних коливань сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2.

Результати чисельних досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування між нижніми (0 м.) та верхніми (36-38 м.) відмітками в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.29 та 3.30 відповідно.

Таблиця 3.29. Результати досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ при 60°C, МПа	
	ГУ 1	ГУ 2
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	3,7302	6,7959
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	5,4759	9,6321

Таблиця 3.30. Результати досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при 60°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ при 60°C, МПа	
	ГУ 1	ГУ 2
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	3,5316	6,9703
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	9,2381	17,245

Результати чисельних досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при 150°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування між нижніми (0 м.) та верхніми (36-38 м.) відмітками в РВ ЗАЕС та ПАЕС наведені в таблицях 3.31 та 3.32 відповідно.

Таблиця 3.31. Результати досліджень зміни НДС сталевий опорної конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при 150°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування у РВ енергоблоків ЗАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ при 150°C, МПа	
	ГУ 1	ГУ 2
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	3,7409	6,7935
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ЗАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	5,4902	9,6289

Таблиця 3.32. Результати досліджень зміни НДС конструкції типової конструктивної форми «стельовий каркас» при 150°C для ГУ 1 та ГУ 2 у випадку її розташування у РВ енергоблоків ПАЕС.

Навантаження	Максимальні напруження $\sigma_{red}$ при 150°C, МПа	
	ГУ 1	ГУ 2
Огинаючий спектр відгуку на нижніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	3,6284	7,1445
Огинаючий спектр відгуку на верхніх відмітках ПАЕС + сейсмічні навантаження від трубопроводу	9,2679	17,242

3.4.3 Висновки за результатами дослідження впливу зміни умов закріплення сталевих опорних конструкцій на їх сейсмічну міцність

За результатами дослідження впливу зміни умов закріплення СОКОіТ на їх сейсмічну міцність встановлено, що заміна ГУ 1 на ГУ 2 знижує значення частот власних коливань, а саме:

- при температурі 60°C в РВ для «підлогового каркасу» на 6,75 % та для «стельового каркасу» на 3,84 %;
- при температурі 150°C в РВ для «підлогового каркасу» на 5,29 % та для «стельового каркасу» на 3,84 %.

При цьому, моди власних коливань сталевих опорних конструкцій також зазнають змін.

У абсолютних величинах зниження значень частот власних коливань сталевих опорних конструкцій (для діапазону частот до значення прискорення нульового періоду) при заміні ГУ 1 на ГУ 2 знаходиться в межах:

- від 0,4391 Гц до 1,042 Гц (при температурі 60°C в РВ);
- від 0,3428 Гц до 0,7497 Гц (при температурі 150°C в РВ).

Як відзначено в підпункті 3.3.2 підрозділу 3.3 розділу 3 наукової праці особливістю поверхових спектрів відгуку РВ ЗАЕС та ПАЕС є те, що вони мають

стрибкоподібні ділянки збільшення та зменшення сейсмічних навантажень при зменшенні частоти в межах 1 Гц. Отже, зміна з ГУ 1 на ГУ 2 може як позитивно, так і вкрай негативно впливати на конструктивну безпеку СОКОіТ енергоблоків АЕС. Додатково, встановлено, що зміна з ГУ 1 на ГУ 2 призводить до збільшення сейсмічних напружень внаслідок зменшення загальної жорсткості сталеві опорної конструкції [117].

### 3.5 Висновки до розділу 3

За результатами виконаних досліджень визначені закономірності динамічних характеристик СОКОіТ енергоблоків АЕС в залежності від типової конструктивної форми, умов закріплення на конструктивній основі, а також особливих умов експлуатації, при тому:

1) найменші значення перших частот власних коливань притаманні типовим конструктивним формам «підлоговий каркас», «стельовий каркас» та «консоль»;

2) навантаження на СОКОіТ, зміна умов їх закріплення на конструктивній основі та особливі умови експлуатації зміщують їх резонансні частоти, що впливає на динамічні характеристики конструкцій всіх типових конструктивних форм та, відповідно, на значення сейсмічних навантажень.

Отримані результати дозволили встановити особливості впливу зміни динамічних характеристик СОКОіТ на їх конструктивну безпеку.

Визначені закономірності впливу приєднаного обладнання на динамічні характеристики його сталеві опорної конструкції. Встановлено, що пряме врахування обладнання в розрахунковій моделі сталеві опорної конструкції типової конструктивної форми «підлоговий каркас» змінює як моди її власних коливань, так і самі значення частот власних коливань. Це обумовлено тим, що врахування безпосередньо обладнання змінює, серед іншого, кінематичні граничні умови сталеві опорної конструкції, оскільки накладає додаткові в'язі на її конструктивні елементи. Отриманий результат вказує на те, що загалом врахування обладнання в розрахунковій моделі лише у вигляді додаткової ваги може обумовити ситуацію коли така розрахункова модель не буде відображати

дійсні умови роботи сталеві опорної конструкції, а також важливі для оцінки сейсмічної міцності особливості геометрії, розподілу мас і жорсткостей. Отже, при проектуванні сталевих опорних конструкцій типової конструктивної форми «підлоговий каркас» необхідно використовувати такі в'язі елементів конструкції, які забезпечують відсутність зміни кінематичних граничних умов опорної конструкції у разі прямого врахування обладнання в розрахунковій моделі.

Встановлені закономірності зміни НДС СОКОіТ в залежності від типових конструктивних форм та умов закріплення на конструктивній основі під час сейсмічних навантажень та одночасної дії двох епізодичних впливів. Розрахункові напруження від сейсмічних навантажень можуть підвищуватися у 1,5 – 3 рази в залежності від висотної відмітки розташування опорної конструкції в РВ енергоблоку АЕС та сягати близько 96 МПа для «підлогового каркасу», 1 МПа для «стійки», 10 МПа для «стельового каркасу» та 4 МПа для «консоли». Такий суттєвий розкид значень сейсмічних напружень в конструкціях різних типових конструктивних форм обумовлений кардинально різними спектрами значень частот власних коливань конструкцій та, відповідно, значним розкидом значень сейсмічних навантажень (від 22,7 м/с<sup>2</sup> до 4,8 м/с<sup>2</sup>). Для випадку одночасної дії двох таких епізодичних впливів як МПА з температурою 150°С та землетрус загалом необхідним є введення в розрахунки коефіцієнту умов роботи конструкції за температурою  $\gamma_c^T$ .

На підставі результатів виконаних досліджень розроблено та науково обґрунтовано підходи щодо вибору раціональних СОКОіТ для кращого сприйняття сейсмічних навантажень при температурах 60°С та 150°С в РВ.

Обґрунтованість та достовірність результатів досліджень забезпечується:

- точністю та достовірністю вихідних даних;
- врахуванням результатів сучасних репрезентативних досліджень сейсмологічних умов розташування промислових майданчиків ЗАЕС, ПАЕС;
- врахуванням фактичних геологічних умов основ реакторних відділень енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС;

- використанням репрезентативних поверхових спектрів відгуку реакторних відділень ЗАЕС та ПАЕС;

- застосуванням обґрунтованих фізико-математичних моделей СОКОіТ.

Репрезентативність визначених закономірностей динамічних характеристик та НДС СОКОіТ енергоблоків АЕС дозволяє нам використати ці результати під час:

- розвинення методу граничних станів по відношенню до СОКОіТ;
- розробки методики оцінки сейсмічної міцності СОКОіТ, яка враховує особливі умови їх експлуатації та ступень відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів.

Основні матеріали розділу висвітлено в працях автора [6, 90, 117].

## **РОЗДІЛ 4. ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ МІЦНОСТІ СТАЛЕВИХ ОПОРНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ ТА ТРУБОПРОВІДІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

### **4.1 Розвиток методу граничних станів по відношенню до сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АЕС**

Перш за все, з погляду важливості СОКОіТ енергоблоків АЕС для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки їх розрахунковий переріз будемо відносити до 1 класу згідно [67], оскільки відмова (не виконання своїх функцій в повному обсязі) СОКОіТ:

- першої категорії сейсмостійкості може призвести до аварії на АЕС;
- другої категорії сейсмостійкості – до перевищення допустимих рівнів загального радіоактивного забруднення робочих поверхонь та/або допустимих концентрацій радіонуклідів у повітрі робочих приміщень.

Згідно [67] допустимі напруження для сталевих опорних конструкцій загалом можна представити у вигляді формули (2.7) підрозділу 2.5 розділу 2 наукової праці.

Виконані скінчено-елементні дослідження дійсної роботи СОКОіТ енергоблоків АЕС продемонстрували, що коефіцієнт умов роботи  $\gamma_c$  доцільно прийняти рівним 1. Це обумовлено такими чинниками [117]:

- СОКОіТ можуть мати різноманітні складені профілі;
- загалом характер змін можливих експлуатаційних навантажень може бути суттєво різноманітним;
- сейсмічні навантаження характеризуються одночасною дією в трьох просторових взаємно перпендикулярних напрямках.

З урахуванням того, що для виготовлення СОКОіТ енергоблоків АЕС використовуються ті ж самі ГОСТ, ДСТУ та інші нормативні документи, що й для сталевих конструкцій будинків, будівель та споруд, то при виборі коефіцієнту надійності за матеріалом  $\gamma_m$  слід керуватися положеннями [67].



Врахування особливих умов експлуатації СОКОіТ (а саме: одночасна дія двох таких епізодичних впливів як МПА з температурою 150°C та землетрус) загалом вказує на необхідність використання в розрахунку коефіцієнту умов роботи конструкції за температурою  $\gamma_c^T$ . Виконані дослідження продемонстрували, що значення цього коефіцієнту, визначені на підставі оцінки напружень, можуть змінюватися в межах від 0,9918 до 1,0274 в залежності від [117]:

- типової конструктивної форми СОКОіТ;
- умов закріплення СОКОіТ на конструктивній основі;
- майданчику АЕС, на якому розташовані СОКОіТ;
- висотної відмітки розташування СОКОіТ в РВ енергоблоку АЕС.

З огляду на вказане та з метою уніфікації підходу до розрахунків СОКОіТ енергоблоків АЕС чисельне значення коефіцієнту  $\gamma_c^T$  пропонується прийняти рівним 1.

З іншого боку, підвищення температури до 150°C призводить, зокрема до зниження границі пропорційності вуглецевої сталі. У таблиці 4.1 на підставі даних [87] наведені значення коефіцієнту зниження для границі пропорційності вуглецевої сталі за підвищеної температури.

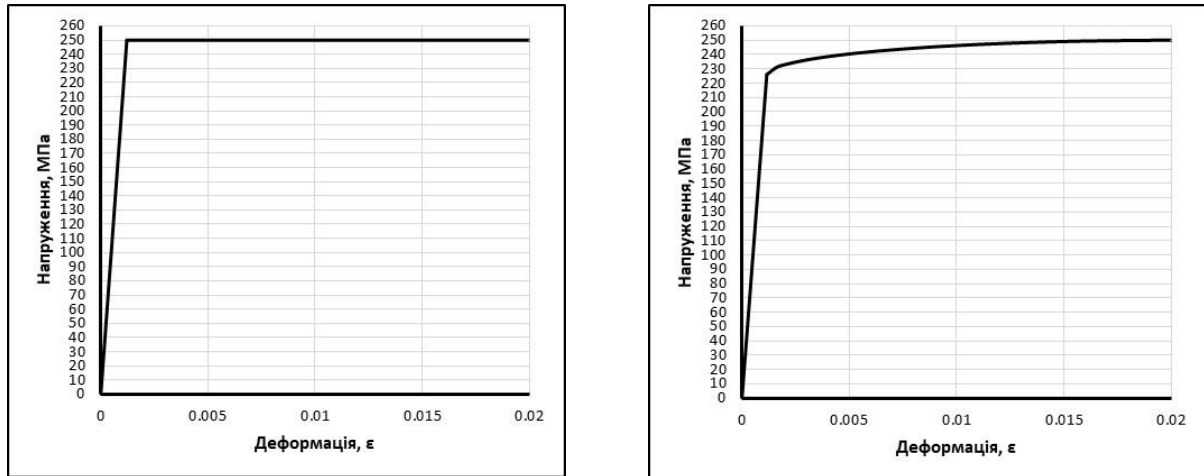
Таблиця 4.1. Значення коефіцієнту зниження для границі пропорційності вуглецевої сталі за підвищеної температури.

Температура, °C	Коефіцієнт зниження для границі пропорційності
20	1,000
100	1,000
150	0,904*
200	0,807

Примітка: \* – значення розраховано з використанням лінійної інтерполяції.

На рисунку 4.1 на підставі даних [87] зображені побудовані діаграми «напруження-деформація» для фасонного прокату з вуглецевої сталі для

діапазону температур від 20°C до 100°C та температури 150°C.



а) 20°C – 100°C

б) 150°C

Рисунок 4.1. Діаграми «напруження-деформація» вуглецевої сталі для діапазону температур від 20°C до 100°C та для 150°C.

Як видно з рисунку 4.1 при підвищенні температури до 150°C діапазон пружно-пластичної роботи матеріалу збільшиться, а залежність між напруженнями та деформаціями в цій зоні матиме вже нелінійний характер. Як відзначено вище, розрахунковий переріз СОКОіТ енергоблоків АЕС віднесений до I класу НДС (пружна робота перерізу) згідно [67]. Отже, при врахуванні одночасної дії двох епізодичних впливів (МПА з температурою 150°C та землетрус) замість  $R_{yn}$  пропонується приймати значення  $0,904 \cdot R_{yn}$  (див. таблицю 4.1).

У підрозділі 1.3 розділу 1 наукової праці продемонстровано, що пряме використання коефіцієнту надійності за відповідальністю  $\gamma_n$  згідно підходів [68] є не достатньо коректним по відношенню СОКОіТ енергоблоків АЕС I та II категорій сейсмостійкості. З урахуванням викладеного, пропонується замість коефіцієнту  $\gamma_n$  згідно [68] використовувати коефіцієнти  $\gamma_{nc/cI}$  та  $\gamma_{nc/cII}$ , які будемо називати коефіцієнтами відповідальності СОКОіТ енергоблоків АЕС I-ої та II-ої категорії сейсмостійкості відповідно за ядерну та радіаційну безпеку. Встановлювати числові значення коефіцієнтів  $\gamma_{nc/cI}$  та  $\gamma_{nc/cII}$  пропонується на підставі таких розроблених якісних та кількісних критеріїв [117]:

1) в якості основи значень коефіцієнтів надійності за відповідальністю конструкцій приймаються положення [68] для конструкцій класу наслідків ССЗ та категорії відповідальності А (обґрунтування цього підходу представлено в підрозділі 1.4 розділу 1 наукової праці);

2) числові значення  $\gamma_{nc/cI}$  та  $\gamma_{nc/cII}$  повинні бути меншими за коефіцієнт  $\gamma_n$  згідно [68] для усталених розрахункових ситуацій. Такий підхід відповідає як [68], так і нормам, правилам та стандартам з ЯРБ, згідно з якими для аварійних розрахункових ситуацій допустимі напруження в конструкціях приймаються більшими за допустимі напруження для усталених розрахункових ситуаціях (цим критерієм забезпечується врахування особливих умов експлуатації СОКОіТ);

3)  $\gamma_{nc/cI}$  та  $\gamma_{nc/cII}$  повинні бути більшими ніж регламентоване значення  $\gamma_n$  згідно підходів [68] для аварійної розрахункової ситуації (цим критерієм забезпечується врахування особливих умов експлуатації СОКОіТ та ступеню їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів);

4) числові значення  $\gamma_{nc/cI}$  та  $\gamma_{nc/cII}$  повинні забезпечувати ситуацію коли значення допустимих напружень (див. формулу (2.7) підрозділу 2.5 розділу 2 наукової праці) СОКОіТ I-ої категорії сейсмостійкості будуть меншими за значення допустимих напружень СОКОіТ II-ої категорії сейсмостійкості (цим критерієм забезпечується врахування ступеню відповідальності СОКОіТ щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів);

5) СОКОіТ енергоблоків АЕС I та II категорії сейсмостійкості повинні працювати в пружній області та не мати залишкові деформації (тобто  $\gamma_{nc/cI}$ ,  $\gamma_{nc/cII}$  мають бути більшими за одиницю) під час та після сейсмічних впливів рівнів МРЗ та ПЗ (цим критерієм забезпечується врахування ступеню відповідальності СОКОіТ щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів);

б)  $\gamma_n$  згідно [68] може цілком коректно використовуватися для конструкцій АЕС III категорії сейсмостійкості (тобто  $\gamma_n = \gamma_{nc/cIII}$ ), оскільки відмова (не виконання своїх функцій в повному обсязі) цих конструкції не впливає на ЯРБ. Виконаний аналіз положень норм, правил та стандартів з ЯРБ продемонстрував, що для елементів АЕС прийнятий такий підхід: підвищення категорії сейсмостійкості елементів АЕС зменшує значення допустимих напружень приблизно на 4,5 %, отже необхідно прийняти, що  $\gamma_{nc/cII} = 1,045 \cdot \gamma_n$ ,  $\gamma_{nc/cI} = 1,045 \cdot \gamma_{nc/cII}$  (цим критерієм забезпечується врахування апробованої багаторічної практики проєктування та оцінки безпеки енергоблоків АЕС, підходів норм, правил та стандартів з ЯРБ, а також ступеню відповідальності СОКОіТ щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів).

Ґрунтуючись на розроблених якісних та кількісних критеріях пропонується чисельні значення коефіцієнтів  $\gamma_{nc/cI}$  та  $\gamma_{nc/cII}$  прийняти рівними 1,15 та 1,10 відповідно.

В таблиці 4.2 на підставі виконаних досліджень наведені пропозиції щодо розвинення методу граничних станів по відношенню до СОКОіТ енергоблоків АЕС. Вказані пропозиції, на відміну від існуючих ДБН, враховують апробовану багаторічну практику проєктування та оцінки безпеки енергоблоків АЕС, особливі умови експлуатації СОКОіТ та ступень їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів [117].

Таблиця 4.2. Пропозиції щодо розвинення методу граничних станів по відношенню до СОКОіТ енергоблоків АЕС

Категорія сейсмостійкості	Сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів	Критерій міцності $\sigma_{red} \leq S_{min}^k$	$\gamma_c$	$\gamma_m$	$\gamma_c^T$	$\gamma_{nc/cI}$	$\gamma_{nc/cII}$
I	HE + MP3	$\sigma_{red} \leq \frac{\gamma_c \cdot R_{yn}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cI}}$	1	Згідно [58]	–	1,15	–
	HE + ПЗ				–		–
	ПНЕ + MP3				–		–
	ПНЕ + ПЗ				–		–
	HE + МПА + MP3	$\sigma_{red} \leq \frac{\gamma_c \cdot \gamma_c^T \cdot (0,904 \cdot R_{yn})}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cI}}$			1	–	
	HE + МПА + ПЗ				1	–	
II	HE + ПЗ	$\sigma_{red} \leq \frac{\gamma_c \cdot R_{yn}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cII}}$	–	–	–	1,10	
	ПНЕ + ПЗ		–	–			

В розділі 2 наукової праці при аналізі механічних навантажень, які передаються на СОКОіТ, нами виявлено дефіцит безпеки в частині чисельного значення коефіцієнту сполучення  $\psi_2$  для короточасних навантажень при складанні аварійного сполучення (докладніше див. підрозділ 2.7 розділу 2 наукової праці). Отже, для забезпечення не зниження конструктивної безпеки СОКОіТ енергоблоків АЕС пропонується таке: коефіцієнт  $\psi_2$  прийняти рівним 0,95 (як для випадку тривалих навантажень) для тих СОКОіТ систем безпеки енергоблоків АЕС, спрацювання яких може відбуватися в окремих режимах ПНЕ. Використання цього підходу відповідає загальним положенням безпеки енергоблоків АЕС [84] та вимогам з сейсмостійкості елементів АЕС [3], згідно з якими для більш важливих елементів АЕС висуваються більш жорсткі вимоги до їх конструктивної безпеки.

#### **4.2 Розвиток методу граничної сейсмостійкості по відношенню до сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів АЕС**

Виявлені недоліки МГС, актуальні для СОКОіТ енергоблоків АЕС, висвітлені в підрозділі 1.2 наукової праці.

Оцінка міцності СОКОіТ за першим граничним станом виконується в напруженнях. В [67] умови міцності встановлені у вигляді рівняння (2.8) підрозділу 2.5 наукової праці. Втім, по відношенню до напружень в МГС використовуються, зокрема такі величини: допустиме значення напружень, розрахункові напруження від несейсмічних навантажень, розрахункові напруження від сейсмічних навантажень. Отже, при використанні МГС формули [67] мають бути приведені у вигляд рівняння (2.6) підрозділу 2.5 наукової праці, а мінімальний опір СОКОіТ  $S_{\min}^k$  (допустимі напруження) відповідати співвідношенням таблиці 4.2 підрозділу 4.1 розділу 4 наукової праці. При цьому, слід врахувати, що у відповідності до положень МГС параметр  $NCLPF$  визначається лише для сполучення навантажень HE + MP3.

З метою забезпечення врахування перерізів СОКОіТ, в яких напруження окремо під час HE та окремо під час MP3 сягають своїх екстремумів, формулу (1.15) підрозділу 1.2 розділу 1 наукової праці в загальному вигляді запишемо так:

$$FS_i^{ЗАЕС,ПАЕС} = \min \left\{ \frac{\frac{\gamma_c \cdot R_{ун}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cI}} - \sigma_{red\ поточне}^{HE}}{\frac{\sigma_{red\ max}^{Сейсм}}{\sigma_{red\ поточне}^{Сейсм}}}; \frac{\frac{\gamma_c \cdot R_{ун}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cI}} - \sigma_{red\ max}^{HE}}{\sigma_{red\ поточне}^{Сейсм}} \right\}, \quad (4.1)$$

де  $\sigma_{red\ max}^{Сейсм}$  – максимальні сейсмічні напруження в СОКОіТ (розглядається відповідний переріз сталеві опорної конструкції або відповідна точка у цьому перерізі);

$\sigma_{red\ поточне}^{HE}$  – напруження в режимі HE у відповідному перерізі СОКОіТ (або у відповідній точці цього перерізу), в якому досягаються напруження  $\sigma_{max}^{Сейсм}$ ;

$\sigma_{red\ max}^{HE}$  – максимальні напруження в СОКОіТ для режиму HE (розглядається відповідний переріз сталеві опорної конструкції або відповідна точка у цьому перерізі);

$\sigma_{red\ поточне}^{Сейсм}$  – сейсмічні напруження у відповідному перерізі СОКОіТ (або у відповідній точці цього перерізу), в якому досягаються напруження  $\sigma_{max}^{HE}$ .

Згідно підходів [67] напруження  $\sigma_{red\ поточне}^{HE}$  та  $\sigma_{red\ max}^{HE}$  залежать від типу та врахованої номенклатури силових факторів. З урахуванням викладеного, використовуючи умовні позначення та підходи [67] для СОКОіТ енергоблоків АЕС з суцільним поперечним перерізом, співвідношення (4.1) буде приймати такі окремі варіаційні форми [1]:

1) за центрального розтягу, стиску ( $i=1$ ):

$$FS_1^{ЗАЕС,ПАЕС} = \min \left\{ \frac{\frac{\gamma_c \cdot R_{ун}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cI}} - \frac{N_{поточне}^{HE}}{A_n}}{\frac{N_{max}^{Сейсм}}{A_n}}; \frac{\frac{\gamma_c \cdot R_{ун}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cI}} - \frac{N_{max}^{HE}}{A_n}}{\frac{N_{поточне}^{Сейсм}}{A_n}} \right\}; \quad (4.2)$$

2) за дії поперечної сили  $Q$ , що спрямована паралельно серединній площині стінки ( $i=2$ ):

$$FS_2^{3АЕС,ПАЕС} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{\gamma_c \cdot 0,58R_{yn} - \frac{Q_{поточне}^{HE} \cdot S_x}{I_x \cdot t_w}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cl}}; \\ \frac{\frac{Q_{max}^{Сейсм} \cdot S_x}{I_x \cdot t_w}}{\gamma_c \cdot 0,58R_{yn} - \frac{Q_{max}^{HE} \cdot S_x}{I_x \cdot t_w}}; \\ \frac{\frac{Q_{поточне}^{Сейсм} \cdot S_x}{I_x \cdot t_w}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cl}} \end{array} \right\}; \quad (4.3)$$

3) при дії згинальних моментів  $M_x$  та  $M_y$  у двох головних площинах ( $i=3$ ):

$$FS_3^{3АЕС,ПАЕС} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{\frac{\gamma_c \cdot R_{yn}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cl}} - \left( \frac{M_x \cdot y}{I_{xn}} \pm \frac{M_y \cdot x}{I_{yn}} \right)_{поточне}^{HE}}{\left( \frac{M_x \cdot y}{I_{xn}} \pm \frac{M_y \cdot x}{I_{yn}} \right)_{max}^{Сейсм}}; \\ \frac{\frac{\gamma_c \cdot R_{yn}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cl}} - \left( \frac{M_x \cdot y}{I_{xn}} \pm \frac{M_y \cdot x}{I_{yn}} \right)_{max}^{HE}}{\left( \frac{M_x \cdot y}{I_{xn}} \pm \frac{M_y \cdot x}{I_{yn}} \right)_{поточне}^{Сейсм}} \end{array} \right\}; \quad (4.4)$$

4) при дії поздовжньої сили та згинальних моментів ( $i=4$ ):

$$FS_4^{3АЕС,ПАЕС} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{\frac{\gamma_c \cdot R_{yn}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cl}} - \left( \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x \cdot y}{I_{xn}} \pm \frac{M_y \cdot x}{I_{yn}} \right)_{поточне}^{HE}}{\left( \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x \cdot y}{I_{xn}} \pm \frac{M_y \cdot x}{I_{yn}} \right)_{max}^{Сейсм}}; \\ \frac{\frac{\gamma_c \cdot R_{yn}}{\gamma_m \cdot \gamma_{nc/cl}} - \left( \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x \cdot y}{I_{xn}} \pm \frac{M_y \cdot x}{I_{yn}} \right)_{max}^{HE}}{\left( \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x \cdot y}{I_{xn}} \pm \frac{M_y \cdot x}{I_{yn}} \right)_{поточне}^{Сейсм}} \end{array} \right\}; \quad (4.5)$$



5) у загальному випадку при дії згинальних моментів та поперечної сили (i=5):

$$FS_5^{ЗАЕС,ПАЕС} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{1,32 \cdot \gamma_c^2 \cdot R_{yn}^2}{\gamma_m^2 \cdot \gamma_{nc/cI}^2} - \left( \sigma_x^2 - \sigma_x \cdot (\sigma_y + \sigma_{loc}) + (\sigma_y + \sigma_{loc})^2 + 3\tau_{xy}^2 \right)_{\text{поточне}}^{HE} \\ \left( \sigma_x^2 - \sigma_x \cdot (\sigma_y + \sigma_{loc}) + (\sigma_y + \sigma_{loc})^2 + 3\tau_{xy}^2 \right)_{\text{max}}^{\text{Сейсм}} \\ \frac{1,32 \cdot \gamma_c^2 \cdot R_{yn}^2}{\gamma_m^2 \cdot \gamma_{nc/cI}^2} - \left( \sigma_x^2 - \sigma_x \cdot (\sigma_y + \sigma_{loc}) + (\sigma_y + \sigma_{loc})^2 + 3\tau_{xy}^2 \right)_{\text{max}}^{HE} \\ \left( \sigma_x^2 - \sigma_x \cdot (\sigma_y + \sigma_{loc}) + (\sigma_y + \sigma_{loc})^2 + 3\tau_{xy}^2 \right)_{\text{поточне}}^{\text{Сейсм}} \end{array} \right\} \quad (4.6)$$

Запропоновані варіантні форми (4.2) – (4.6) формули (4.1) звісно не вичерпують всі розрахункові випадки, умови та обмеження, встановлені [67] при оцінці міцності сталевих конструкцій, але наочно на конкретних випадках демонструють чіткий загальний алгоритм дій для забезпечення врахування перерізів СОКОіТ, в яких напруження окремо під час НЕ та окремо під час МРЗ сягають своїх екстремумів.

Керуючись положеннями [27] коефіцієнт непружного поглинання енергії  $F_\mu$  приймемо рівним 1,25. Необхідно відзначити, що  $F_\mu$  використовується виключно в МГС. При виконанні проєктних розрахунків сейсмічної міцності подібний коефіцієнт не використовується. З урахуванням викладеного, а також приймаючи до уваги фактичні рівні сейсмічної небезпеки промислових майданчиків ЗАЕС та ПАЕС формулу (1.14) підрозділу 1.2 розділу 1 наукової праці для визначення параметру HCLPF представимо у таких виглядах:

– для СОКОіТ енергоблоків ЗАЕС:

$$HCLPF^{ЗАЕС} = FS_i^{ЗАЕС} \cdot 0,2125g; \quad (4.7)$$

– для СОКОіТ енергоблоків ПАЕС:

$$HCLPF^{ПАЕС} = FS_i^{ПАЕС} \cdot 0,1500g. \quad (4.8)$$

Можливості сучасних розрахункових комплексів дозволяють автоматизувати розрахунки HCLPF для СОКОіТ енергоблоків АЕС. Однак, в цьому випадку виникає потреба в забезпеченні отримання власних результатів

розрахунків користувача в розрахунковому комплексі, оскільки лише стандартні результати розрахунків (переміщення, деформації, напруження) є недостатніми для автоматизованого визначення HCLPF. Для створення власних результатів розрахунків користувача в розрахунковому комплексі ANSYS застосовується функція «User Defined Results» [118]. З використанням цієї функції в модулі постпроцесінгу ANSYS користувач може самостійно згенерувати оператори, яким присвоїти відповідні значення стандартних результатів розрахунків. Наступним кроком задається змінна, яка виконує задані дії із створеними операторами за визначеними користувачем формулами. Значною перевагою такого автоматизованого розрахунку є те, що величина HCLPF для СОКОіТ розраховується в ANSYS безпосередньо вже на апаратному рівні для кожного скінченного елемента розробленої скінчено-елементної моделі, що в свою чергу унеможливорює потенційні помилки у виборі репрезентативних перерізів (див. співвідношення (4.1)) під час визначення величини HCLPF [1, 28].

Крім цього, математичний апарат розрахункового комплексу ANSYS можна ще розвинути для покращення візуалізації розрахованих значень HCLPF. В цьому випадку використовуються також функція «User Defined Results». Тобто, користувач може обмежити візуалізацію результатів розрахунку HCLPF до обраного значення  $K$  (наприклад, 0,12 g, 0,17 g, 0,2 g, 0,3 g тощо). Вибір значення  $K$  залежить від конкретних потреб користувача та цілей для яких виконується розрахунок HCLPF. Для виконання таких розрахунків обрані константи  $K$  необхідно помножити на одиничний масив тієї ж розмірності, що і розмірність масива результатів розрахунку. На рисунку 4.2 представлено розроблений алгоритм розвитку математичного апарату розрахункового комплексу ANSYS для автоматизованого визначення HCLPF СОКОіТ енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС, а на рисунку 4.3 наведені практичні приклади реалізації розвинутого математичного апарату розрахункового комплексу ANSYS. Описані вище запропоновані вдосконалення МГС застосовні для випадку розрахунку СОКОіТ енергоблоків АЕС в пружній постановці.

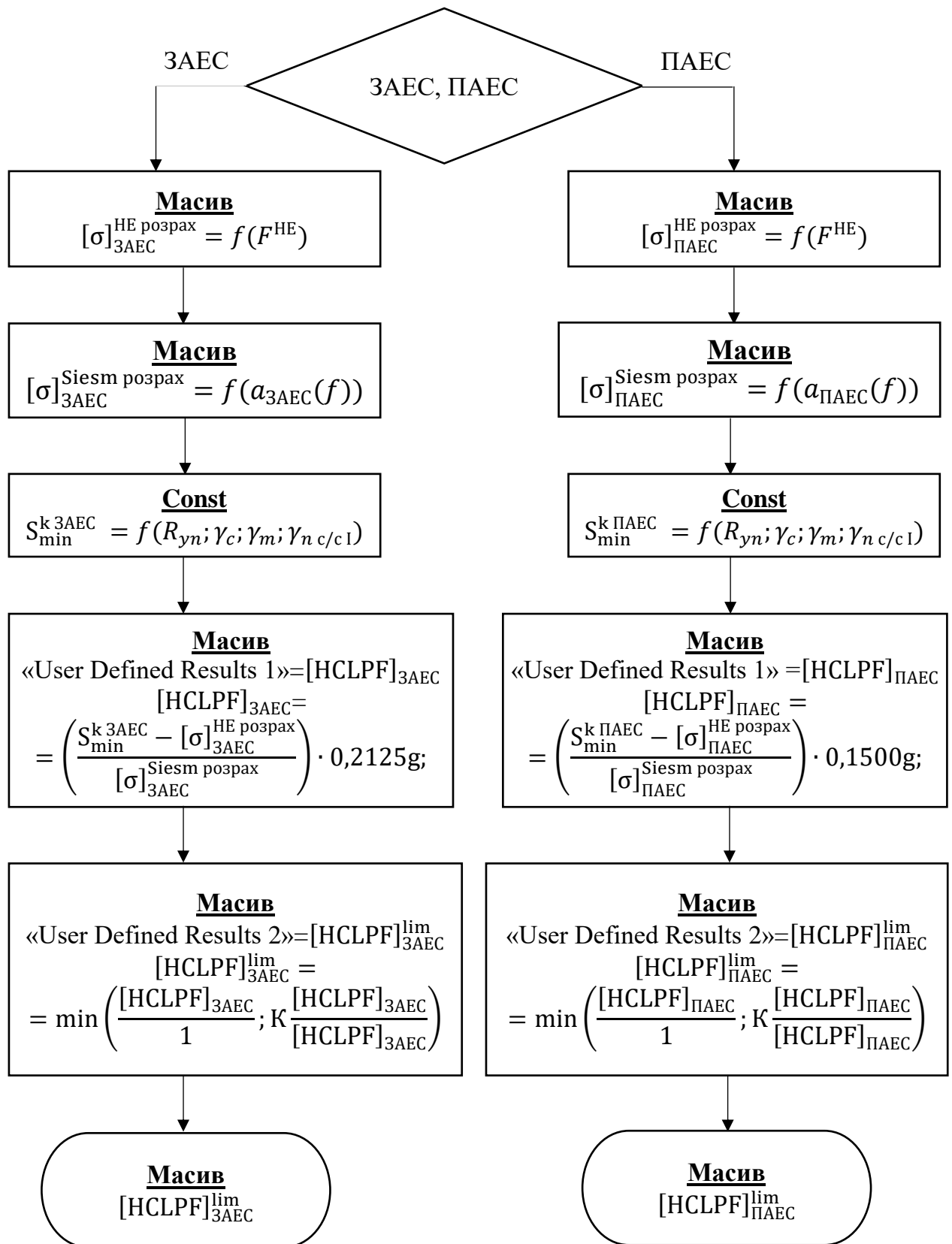


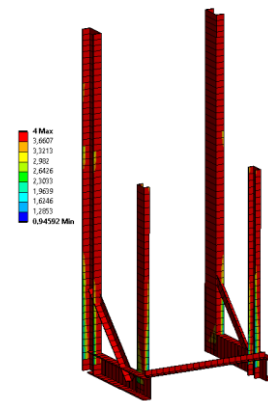
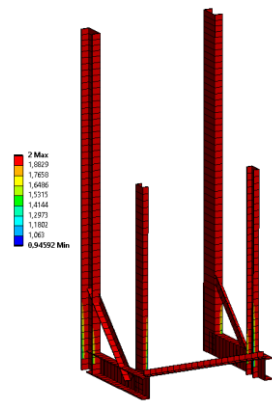
Рисунок 4.2. Алгоритм розвитку математичного апарату розрахункового комплексу ANSYS для визначення HCLPF для СОКОіТ енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС.

Details of "User Defined Result 1"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	opora
<b>Definition</b>	
Type	User Defined Result
Expression	$= ((211e6 \cdot NE) / MRZ) * 0,2125$
Input Unit System	Metric (m, kg, N, s, V, A)
Output Unit	
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Coordinate System	Global Coordinate System
Calculate Time History	Yes
Identifier	HCLPFZNP1
Suppressed	No
<b>Integration Point Results</b>	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No

Details of "User Defined Result 2"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	opora
<b>Definition</b>	
Type	User Defined Result
Expression	$= \min(HCLPFZNP1; 2 * HCLPFZNP1 / HCLPFZNP1)$
Input Unit System	Metric (mm, kg, N, s, mV, mA)
Output Unit	
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Coordinate System	Global Coordinate System
Calculate Time History	Yes
Identifier	Variant_1
Suppressed	No
<b>Integration Point Results</b>	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No

а) Діалогове вікно ANSYS для «User Defined Results 1» для ЗАЕС

б) Діалогове вікно ANSYS для «User Defined Results 2» для ЗАЕС



в) Результати автоматизованого розрахунку HCLPF (K=2 g) для ЗАЕС

г) Результати автоматизованого розрахунку HCLPF (K=4 g) для ЗАЕС

Рисунок 4.3. Практичні приклади реалізації розвиненого математичного апарату розрахункового комплексу ANSYS для автоматизованого визначення HCLPF для СОКОіТ.

Вказані вдосконалення МГС пройшли апробацію при:

- виконанні практичних обґрунтувань безпеки СОКОіТ енергоблоків АЕС України при сейсмічних впливах (див. наприклад [119]);
- проведенні Державних експертиз ядерної та радіаційної безпеки розрахунків сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС України (див. наприклад [120]).

Реалізація запропонованих вдосконалень МГС є перспективним напрямом покращення та розвитку на апаратному рівні сучасних розрахункових комплексів, призначених, зокрема для оцінки сейсмічної міцності конструкцій енергоблоків АЕС, що підвищить їх конкурентоздатність.

Згідно МГС в разі виконання нелінійних розрахунків конструкцій коефіцієнт непружного поглинання енергії  $F_{\mu}$  не використовується. В цьому випадку МГС передбачено, що коефіцієнт сейсмічного запасу  $FS_{\text{non-linear}}$  повинен визначатися ітераційним методом шляхом поступового збільшення використаних поверхових спектрів відгуку до тих пір поки оцінюваний параметр не досягне свого допустимого значення. З урахуванням викладеного, а також приймаючи до уваги фактичні рівні сейсмічної небезпеки промислових майданчиків ЗАЕС та ПАЕС формулу (1.14) підрозділу 1.2 розділу 2 наукової праці для визначення параметру  $HCLPF_{\text{non-linear}}^{\text{ЗАЕС,ПАЕС}}$  в нелінійній постановці представимо у таких виглядах:

- для СОКОіТ енергоблоків ЗАЕС:

$$HCLPF_{\text{non-linear}}^{\text{ЗАЕС}} = FS_{\text{non-linear}}^{\text{ЗАЕС}} \cdot 0,17g; \quad (4.9)$$

- для СОКОіТ енергоблоків ПАЕС:

$$HCLPF_{\text{non-linear}}^{\text{ПАЕС}} = FS_{\text{non-linear}}^{\text{ПАЕС}} \cdot 0,12g. \quad (4.10)$$

Алгоритм визначення  $FS_{\text{non-linear}}^{\text{ЗАЕС,ПАЕС}}$  ітераційним методом наведений в підрозділі 4.3 розділу 4 наукової праці.

### **4.3 Методика оцінки міцності сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів атомних електричних станцій при сейсмічних навантаженнях**

В розділі 1 наукової праці встановлено таке:

- нормативно-правовий акт [3] містить загальні регулюючі вимоги до оцінки сейсмічної безпеки елементів енергоблоків АЕС;
- пряме використання положень ДБН [17, 67–69] не може вважатися достатньо обґрунтованим та коректним по відношенню до СОКОіТ енергоблоків АЕС;
- в національній методичній та технічній документації відсутні положення, які регламентують критерії сейсмічної міцності та методики оцінки НДС СОКОіТ з урахуванням особливих умов їх експлуатації, а також ступеню їх

відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів.

Отже, для усунення вказаних недоліків необхідним є розробка Методики оцінки міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС при сейсмічних навантаженнях (надалі – Методика), яка буде враховувати особливі умови їх експлуатації та ступень відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів, з метою уточнення та деталізації вимог і положень нормативно-правових актів з ядерної та радіаційної безпеки [3, 84, 121], а також ДБН [17, 67–69]. Таким чином, Методика загалом не замінює документи [3, 17, 67–69, 84, 121], а розроблена в розвиток їх положень в частині, що стосується оцінки міцності безпосередньо СОКОіТ енергоблоків АЕС при сейсмічних навантаженнях.

З урахуванням викладеного, а також на підставі виконаних оглядів, аналізів та досліджень (див. розділи 1, 2 та 3 наукової праці) вперше розроблені та сформульовані такі положення Методики [1, 5, 6, 90, 117, 122, 123]:

1) Методика використовується для оцінки міцності СОКОіТ енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС при сейсмічних навантаженнях. Методика поширюється на СОКОіТ:

- типових конструктивних форм «підлоговий каркас», «стійка», «стельовий каркас» та «консоль»;
- виготовлені із швелерів, кутиків, профілей гнутих замкнених із сталі марки Ст 3сп5 (або іншої сталі у якої тенденції зниження фізико-механічних характеристик у разі підвищення температури до 150°C є не гіршими);
- які знаходяться в особливих умовах експлуатації (зокрема, одночасна дія таких двох епізодичних впливів як МПА та землетрус);
- не піддані нейтронному опроміненню.

2) Враховуючи положення [67, 68] СОКОіТ енергоблоків АЕС слід відносити до категорії відповідальності «А», тобто конструкцій, відмова яких може призвести до повної непридатності до експлуатації елементів АЕС, та до класу наслідків ССЗ (значні наслідки). Розрахунковий переріз відноситься до І

класу НДС згідно [67], тобто нормальні напруження на всіх ділянках розрахункового перерізу є меншими за розрахунковий опір сталі за границею плинності і можуть досягати його лише в найбільш напружених волокнах перерізу (пружна робота перерізу).

Для СОКОіТ:

- матеріал приймається суцільним, однорідним та ізотропним;
- використовуються гіпотези плоских перетинів та про малість деформацій.

3) Загальнопромислові вимоги до проектування (вибір матеріалу, вимоги до сталей, класи міцності, нормативні документи на матеріали тощо) необхідно приймати у відповідності до [67] з урахуванням встановленої в п. «2» класифікації та категоризації СОКОіТ енергоблоків АЕС.

4) Розрахунок на аварійне сполучення навантажень (до складу якого входять МПА та/або сейсмічні впливи) виконується після перевірки міцності та стійкості СОКОіТ на основне сполучення навантажень згідно ДБН.

5) Під час землетрусу безпосередньо сейсмічним струшуванням піддані будівлі та споруди. На СОКОіТ, які знаходяться всередині цих будівель, передаються сейсмічні навантаження. В якості навантажень на опорні конструкції під час землетрусу приймаються сейсмічні навантаження, що передаються від:

- будівельних конструкцій;
- обладнання та трубопроводів, встановлених на сталевих опорних конструкціях.

6) Визначення параметрів середовища конкретних обладнання та трубопроводів при ПНЕ та ПА здійснюється та підставі аналізу проектно-конструкторської та експлуатаційної документації (інструкцій з експлуатації, карт уставок захистів та блокувань, паспортів елементів тощо) з використанням методологічних підходів, розроблених в [110].

7) Номенклатура розрахункових значень навантажень приймається у відповідності до підрозділу 2.4 розділу 2 наукової праці.

При складанні РСН використовуються такі підходи [69]:

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

В таблиці 4.3 наведена номенклатура РСН, яка загалом має бути врахована при оцінці міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС під час сейсмічних навантажень. При цьому, коефіцієнт  $\psi_2$  в аварійному сполученні необхідно приймати рівним 0,95 для тих СОКОіТ систем безпеки енергоблоку, спрацювання яких може відбуватися в окремих режимах ПНЕ.

Таблиця 4.3. Номенклатура РСН для СОКОіТ енергоблоків АЕС

Сполучення навантажень	РСН для СОКОіТ енергоблоків АЕС
СОКОіТ 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 + МПА+ + 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 + МПА+ + 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	$1,0 \times LR1W + 0,95 \times LVL1W + 0,95 \times LVL2THIW + 0,95 \times LVL3IW + 1,0 \times LE2SD + 1,0 \times LE4SD$



Сполучення навантажень	РСН для СОКОіТ енергоблоків АЕС
ПНЕ + ПЗ	$1,0 \times LR1W + 0,95 \times LVL1W + 0,95 \times LVL2THIW + 0,8 \times LVSH2TW + 1,0 \times LE2SD + 1,0 \times LE4SD$
СОКОіТ II категорії сейсмостійкості	
НЕ + 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	$1,0 \times LR1W + 0,95 \times LVL1W + 0,95 \times LVL2THIW + 0,8 \times LVSH2TW + 1,0 \times LE2SD + 1,0 \times LE4SD$

8) При оцінці сейсмічної міцності СОКОіТ розглядається перша група граничних станів та використовується четверта теорія міцності.

9) Номенклатура сполучень технологічних умов експлуатації СОКОіТ і сейсмічних впливів, яка згідно [3] враховується під час оцінки сейсмічної міцності, представлена в таблиці 4.4. В цій же таблиці наведені критерії сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС для відповідних сполучень технологічних умов експлуатації.

Таблиця 4.4. Номенклатура сполучень технологічних умов експлуатації і сейсмічних впливів, критерії сейсмічної міцності.

Категорія сейсмостійкості згідно з [3]	Сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів	Критерій сейсмічної міцності $\sigma_{red} \leq S_{min}^k$
I	НЕ + МРЗ, НЕ + ПЗ, ПНЕ + МРЗ, ПНЕ + ПЗ	$\sigma_{red} \leq 0,870 \cdot \frac{R_{yn}}{\gamma_m}$
	НЕ + МПА + МРЗ, НЕ + МПА + ПЗ	$\sigma_{red} \leq 0,786 \cdot \frac{R_{yn}}{\gamma_m}$
II	НЕ + ПЗ, ПНЕ + ПЗ	$\sigma_{red} \leq 0,909 \cdot \frac{R_{yn}}{\gamma_m}$

10) Розрахунки сейсмічної міцності СОКОіТ повинні виконуватися у такій послідовності:

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

11) В таблиці 4.4 підрозділу 4.3 розділу 4 наукової праці наведена номенклатура сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів, яка загалом має бути врахована при оцінці сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС. Втім, необхідною та достатньою номенклатурою сполучень технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів, які мають бути враховані під час оцінки сейсмічної міцності СОКОіТ, можна вважати НЕ + МРЗ та НЕ + ПЗ для елементів I та II категорій сейсмостійкості відповідно. Водночас, обмежуватися розглядом цих сполучень можливо лише в разі дотримання таких умов:

- результати розрахунків СОКОіТ I категорії сейсмостійкості для сполучення НЕ + МРЗ демонструють наявність запасу до переходу через граничний стан першої групи не менше 10%;

- використані під час розрахунків для сполучення НЕ + МРЗ сейсмічні навантаження є не меншими за ті, що передаються на СОКОіТ під час МПА внаслідок зміни значень їх частот власних коливань;

- навантаження на сталеві опорні конструкції від обладнання та трубопроводів енергоблока АЕС під час ПНЕ та/або МПА не перевищують тих, які були використані під час розрахунків для сполучень НЕ + МРЗ та НЕ + ПЗ для елементів I та II категорій сейсмостійкості відповідно;

- матеріалом СОКОіТ є сталь, у якої тенденції зниження фізико-механічних характеристик у разі підвищення температури до 150°C є не гіршими ніж для сталі СтЗсп5.

У разі недотримання встановлених обмежень для СОКОіТ енергоблоків АЕС мають бути розглянуті всі сполучення технологічних умов експлуатації та сейсмічних впливів, наведені в таблиці 4.4 підрозділу 4.3 розділу 4 наукової праці.

12) Для оцінки сейсмічної міцності СОКОіТ рекомендується використовувати метод скінчених елементів, реалізований у сучасних розрахункових комплексах. Вибір розрахункового комплексу повинен здійснюватися з урахуванням меж його застосовності, визначених розробником відповідного розрахункового комплексу. Рекомендується використовувати скінчені елементи, які мають шість ступенів свободи у кожному вузлі (три переміщення та три повороти).

13) Розрахункова модель СОКОіТ повинна відображати дійсні умови їх роботи, враховувати важливі для оцінки сейсмічної міцності особливості геометрії конструкції, а також розподілу мас і жорсткостей, представляти сталеві опорні конструкції як єдині просторові системи.

Для забезпечення консервативності оцінки сейсмічної міцності поперхові спектри відгуку необхідно прикладати до моделі СОКОіТ таким чином, щоб горизонтальні та вертикальна складові поперхового спектру відгуку співпадали з горизонтальними та вертикальною вісями глобальної системи координат розрахункової моделі СОКОіТ.

При складанні розрахункової моделі сталеві опорної конструкції під обладнання з винесеним центром мас (наприклад, винесеним електродвигуном) необхідно враховувати цей ефект як такий, що суттєво впливає на динамічні характеристики системи «сталеві опорна конструкція + обладнання». Крім цього, навантаження на сталеві опорні конструкції від обладнання необхідно визначати з урахуванням:

- кінематичних граничних умов обладнання з урахуванням приєднаних до нього трубопроводів;
- власної ваги обладнання та його внутрішнього середовища (вода, пар, пароводяна суміш), параметрів теплоізоляції;

- параметрів (тиск та температура) внутрішнього середовища обладнання;

- сейсмічних навантажень на обладнання від приєднаних трубопроводів;

- переміщень обладнання внаслідок дії всіх врахованих навантажень.

Навантаження від трубопроводів прикладаються до розрахункових моделей сталевих опорних конструкцій у вигляді сил та моментів, які визначаються з урахуванням:

- геометричних характеристик трубопроводу;

- фізико-механічних властивостей матеріалу трубопроводу в залежності від температури внутрішнього середовища;

- кінематичних граничних умов трубопроводу, які моделюють його опорну систему;

- власної ваги трубопроводу та його внутрішнього середовища (вода, пар, пароводяна суміш), параметрів теплової ізоляції;

- встановлених в трубопровідній системі арматур та обладнання з їх ваговими та геометричними характеристиками;

- параметрів (тиск та температура) внутрішнього середовища трубопроводу;

- сейсмічних навантажень, що передаються на трубопровід;

- переміщення трубопроводу внаслідок дії всіх врахованих навантажень.

14) Визначення раціональної скінчено-елементної сітки є важливою частиною чисельного моделювання, оскільки її якість впливає на збіжність та точність результатів, що отримуються. Отже, обґрунтування оптимального розміру скінченого елемента при дослідженні НДС СОКОіТ повинно здійснюватися шляхом використання скінчено-елементних сіток різного розміру та вибором тієї сітки, яка забезпечує прийнятну збіжність результатів розрахунку НДС.

15) При проектуванні СОКОіТ слід прагнути до використання конструктивних форм, які забезпечують краще сприйняття сейсмічних навантажень (типова конструктивна форма «стійка»).

При проєктуванні сталевій опорній конструкції обладнання необхідно використовувати такі в'язі елементів, які забезпечують відсутність зміни її кінематичних граничних умов у разі прямого врахування обладнання в розрахунковій схемі.

Необхідно прагнути до використання відкритих профілів для виключення в них зон можливого скупчення реагентів та скидних радіоактивних вод, які утворюються при дезактивації елемента, що встановлений на відповідних сталевих опорних конструкціях.

16) При проєктуванні СОКОіТ необхідно 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 ( $U_X=U_Y=U_Z=0$ ,  $M_X \neq 0$ ,  $M_Y \neq 0$ ,  $M_Z \neq 0$ ). Остаточні умови закріплення, які забезпечують передачу найменших сейсмічних навантажень на СОКОіТ при параметрах НЕ та МПА в РВ енергоблоків ЗАЕС, ПАЕС.

17) У випадку якщо сейсмічна міцність СОКОіТ не забезпечується піддаються коригуванню розміри використаних профілів. Для нової розрахункової моделі з новими розмірами профілів повторюються розрахунки на основне сполучення навантажень. Після цього повторно виконуються розрахунки СОКОіТ на аварійне сполучення навантажень, до складу якого входять МПА та/або сейсмічні впливи.

Альтернативним методом підвищення сейсмічної міцності СОКОіТ є зміщення її резонансних частот від пікових значень прискорень на поверховому спектрі відгуку шляхом заміни ГУ 1 на ГУ 2 або навпаки ГУ 2 на ГУ 1.

18) Оцінка сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС повинна завершуватися визначенням величини параметра HCLPF. Співвідношення для розрахунку параметру HCLPF СОКОіТ енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС представлені в підрозділі 4.2 розділу 4 наукової праці.

Підходи до розрахунку коефіцієнту сейсмічного запасу  $FS^{ЗАЕС,ПАЕС}$  у пружній постановці представлені в підрозділі 4.2 розділу 4 наукової праці.

В разі розрахунку коефіцієнту сейсмічного запасу в нелінійній постановці ( $FS_{non-linear}^{ЗАЕС,ПАЕС}$ ) повинен використовуватися ітераційний метод шляхом збільшення

(з певним кроком  $n$ ) вихідних поверхових спектрів відгуку до тих пір поки оцінюваний параметр не досягне свого допустимого значення. Приклад реалізації ітераційного методу збільшення поверхових спектрів відгуку представлено на рисунку 4.4.

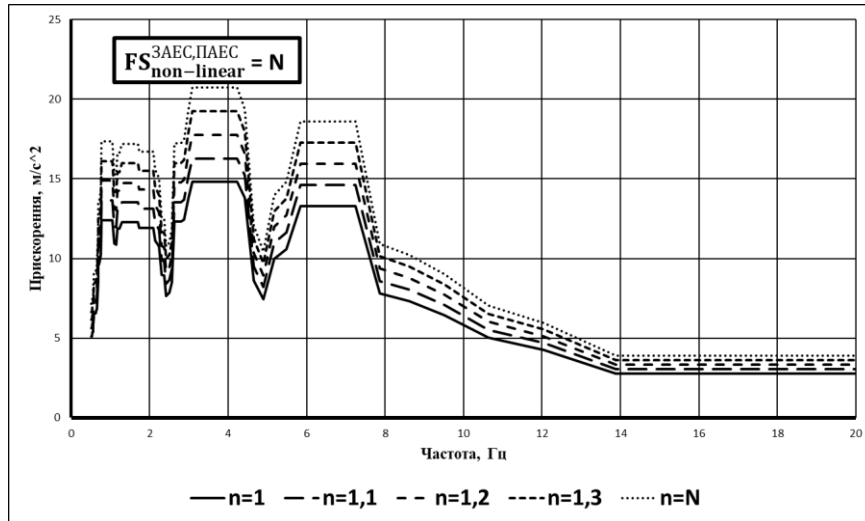


Рисунок 4.4. Приклад реалізації ітераційного методу збільшення поверхових спектрів відгуку.

Алгоритм ітераційної процедури визначення коефіцієнту сейсмічного запасу  $FS_{\text{non-linear}}^{\text{ЗАЕС, ПАЕС}}$  шляхом ітераційного збільшення вихідних поверхових спектрів відгуку представлено на рисунку 4.5.

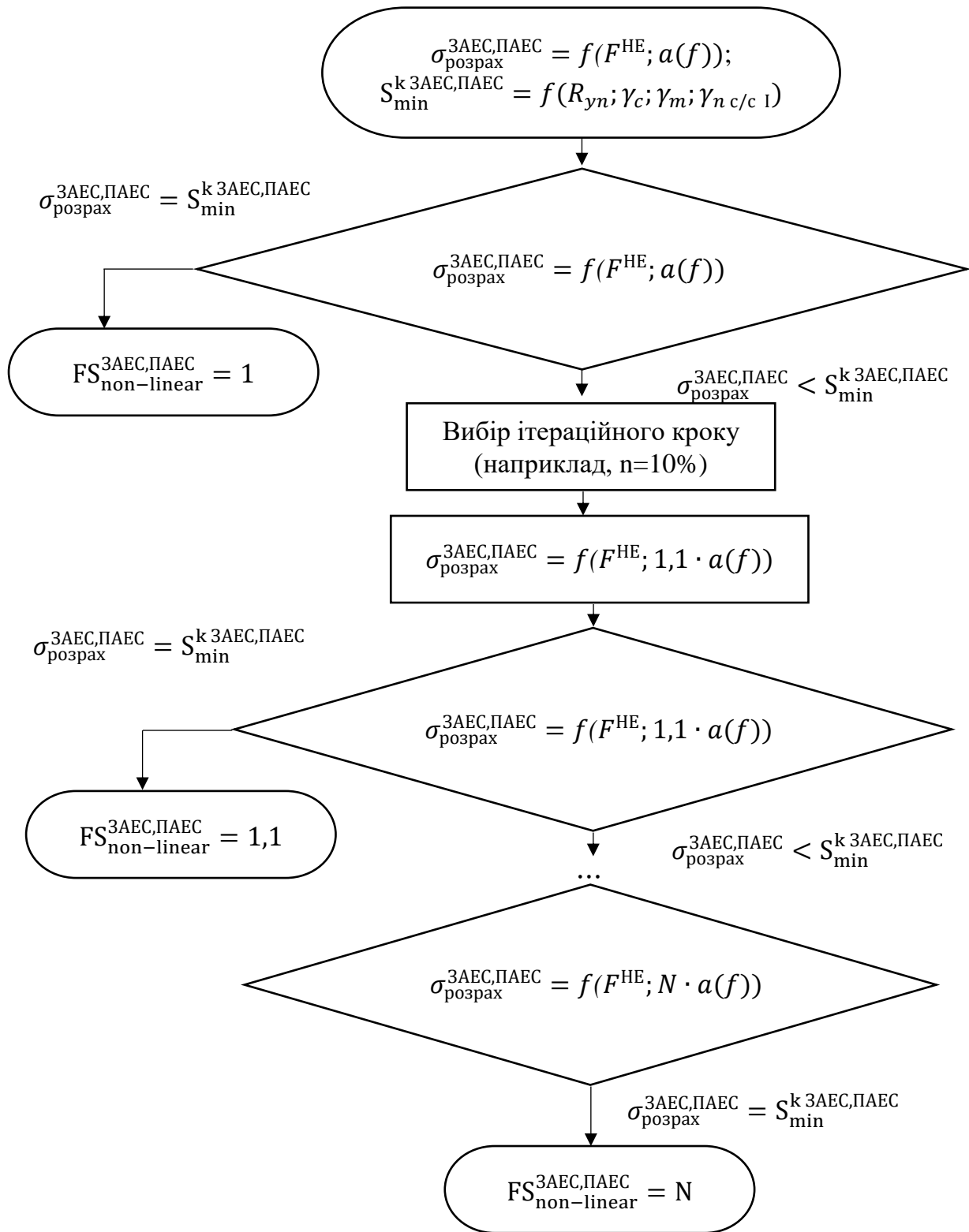


Рисунок 4.5. Алгоритм ітераційної процедури визначення коефіцієнту сейсмічного запасу  $FS_{\text{non-linear}}^{\text{ЗАЕС,ПАЕС}}$  шляхом ітераційного збільшення вихідних поверхових спектрів відгуку.

#### 4.4 Висновки до розділу 4

Пряме використання положень ДБН для оцінки міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС при сейсмічних навантаженнях є недостатньо коректним та прийнятним (див. розділ 1 наукової праці). З огляду на зазначене, на підставі виконаних досліджень динамічних характеристик та НДС СОКОіТ вперше розвинено та науково обґрунтовано основні положення методу граничних станів по відношенню до СОКОіТ енергоблоків АЕС України за сейсмічних навантажень, а також під час одночасної дії двох епізодичних впливів. Суттєвою перевагою розроблених вдосконалень в порівнянні із положеннями методу граничних станів, регламентованими ДБН, є те, що вони враховують особливі умови експлуатації СОКОіТ енергоблоків АЕС України та ступень їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів.

В межах розвитку міжнародного методу оцінки граничної сейсмостійкості адаптовано математичний апарат ліцензійного розрахункового комплексу ANSYS для автоматизованого розрахунку параметру HCLPF СОКОіТ енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС. Значною перевагою запропонованого автоматизованого розрахунку є те, що величина HCLPF визначається в ANSYS безпосередньо вже на апаратному рівні для кожного скінченного елемента розроблених моделей СОКОіТ, що в свою чергу унеможливорює потенційні помилки у виборі репрезентативних перерізів під час визначення параметру HCLPF. Реалізація запропонованих вдосконалень методу граничної сейсмостійкості є перспективним напрямом покращення та розвитку на апаратному рівні сучасних розрахункових комплексів, призначених, зокрема для оцінки сейсмічної міцності конструкцій енергоблоків АЕС, що підвищить їх конкурентоздатність.

Вперше розроблена нова Методика оцінки міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС України при сейсмічних навантаженнях, а також при одночасній дії двох епізодичних впливів. В межах розробки методики науково обґрунтовано нові критерії сейсмічної міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС України, а також



отримані числові значення коефіцієнтів умов роботи та відповідальності за ядерну та радіаційну безпеку. Методика розроблена в розвиток нормативно-правових актів з ядерної та радіаційної безпеки, а також ДБН в частині, що стосується оцінки міцності СОКОіТ енергоблоків ЗАЕС та ПАЕС.

Основні матеріали розділу висвітлено в працях автора [1, 5, 90, 122, 123].

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В науковій праці досліджено та вирішено актуальну науково-практичну задачу щодо роботи СОКОіТ енергоблоків АЕС України за особливих умов експлуатації, зокрема при сейсмічних навантаженнях, а також при одночасній дії двох епізодичних впливів (максимальний розрахунковий землетрус та двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу Ду 850 енергоблоку АЕС).

Проведені огляди, аналізи та репрезентативні дослідження забезпечили одержання таких результатів:

1. Визначені закономірності динамічних характеристик СОКОіТ енергоблоків АЕС в залежності від типової конструктивної форми, умов закріплення на конструктивній основі, а також особливих умов експлуатації.

2. Визначені закономірності впливу приєднаного обладнання на динамічні характеристики сталеві опорної конструкції. Встановлені особливості впливу зміни динамічних характеристик СОКОіТ на їх конструктивну безпеку.

3. Розроблені і обґрунтовані фізико-математичні моделі СОКОіТ та встановлені закономірності зміни їх НДС в залежності від типових конструктивних форм та умов закріплення на конструктивній основі під час сейсмічних навантажень та одночасної дії двох епізодичних впливів.

4. Розроблено та науково обґрунтовано підходи щодо вибору раціональних СОКОіТ для кращого сприйняття сейсмічних навантажень.

5. Розвинено та науково обґрунтовано основні положення методу граничних станів по відношенню до СОКОіТ енергоблоків АЕС України за сейсмічних навантажень, а також під час одночасної дії двох епізодичних впливів. Суттєвою перевагою розроблених вдосконалень в порівнянні із положеннями методу граничних станів, регламентованими ДБН, є те, що вони враховують особливі умови експлуатації СОКОіТ та ступень їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів.

6. Розроблені підходи до складання розрахункових сполучень навантажень та їх конкретна номенклатура, що враховують особливі умови експлуатації СОКОіТ, а також ступень їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів.

7. Створена нова методика розрахунку СОКОіТ енергоблоків АЕС України при сейсмічних навантаженнях, а також при одночасній дії двох епізодичних впливів. Для СОКОіТ науково обґрунтовано нові критерії сейсмічної міцності, а також отримані числові значення коефіцієнтів умов роботи та відповідальності за ядерну та радіаційну безпеку.

8. Нові наукові результати роботи реалізовані:

– експлуатуючою організацією в межах розробки обґрунтувань сейсмостійкості елементів енергоблоків АЕС України під час реалізації Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 07.12.2011 № 1270;

– при проведенні Державних експертиз ядерної та радіаційної безпеки вказаних обґрунтувань.

Загалом результати наукової праці дозволили покращити та розвинути методи оцінки безпеки об'єктів атомної енергетики України шляхом уточнення та вдосконалення підходів до оцінки міцності СОКОіТ енергоблоків АЕС за сейсмічних навантажень.

З погляду філософії науки результати наукової праці підвищують соціальну відповідальність науковців стосовно прийнятих рішень для забезпечення безпеки АЕС.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Оцінка сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій : монографія / Д. Рижов, О-р Шугайло, О. Сахно та ін. ; ред. Д. Рижов. Київ : ДНТЦ ЯРБ, 2022. 144 с.
2. Немчинов Ю. И. Строительная наука и обеспечение сейсмической безопасности в Украине с учетом рекомендаций Еврокодов. *Наука та будівництво*. 2021. № 3 (29), С. 3-14. URL: <https://doi.org/10.33644/2313-6669-14-2021-1>.
3. 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 07.11.2016 за № 1449/29579. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1449-16#Text> (дата звернення: 16.05.2022).
4. ДСТУ Б В.1.1-28:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 60 с.
5. Oleksandr P. Shugaylo, Serhii I. Bilyk «The specifics of the compilation of the calculated load combinations in the assessment of seismic resistance of steel supporting structures of nuclear power plant equipment and piping». *Journal of Mechanical Engineering – Problemy mashynobuduvannia*, 2022, vol. 25, № 3. P. 6–15. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.006>.
6. 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. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. С. 15-26. [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3\(95\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3(95).02).
7. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб. : Наука, 1998. 255 с.
8. Немчинов Ю. И. Сейсмостойкость зданий и сооружений. В двух частях. Київ, 2008. 480 с.

9. Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости / Ю. И. Немчинов, Н. Г. Марьенков, А. К. Хавкин, К. Н. Бабики; под ред. Ю. И. Немчинова. Київ : Гудименко С. В., 2012. 384 с.
10. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В. Н. Гордеев и др. ; под общей ред. А. В. Перельмутера. Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 482 с.
11. Калиберда И. В. Оценка параметров внешних воздействий природного и техногенного происхождения. Москва : Логос, 2002. 544 с.
12. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: монография. Київ : Сталь, 2014. 301 с.
13. Городецкий А. С., Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процесса возведения строительных конструкций. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2014. № 5 (256). С. 28–33.
14. Барабаш М. С., Костира Н. О., Томашевський А. В. Визначення напружено-деформованого стану та міцності пошкоджених несних конструкцій інструментами ПК «ЛІРА-САПР». *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 1 (007). С. 7-14. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.220222.7.827>.
15. Барабаш М.С., Костыра Н. А., Писаревский Б.Ю., Башинский А.В. Напряженно-деформированное состояние конструкций с учетом категории технического состояния здания и изменения интенсивности сейсмической нагрузки. *Строительство: новые технологии-новое оборудование*. 2020. № 8. С. 28-33.
16. Барабаш М.С., Пикуль А.В., Писаревский Б.Ю. Моделирование демпфирования при расчете конструкций на динамические воздействия в программном комплексе ЛИРА-САПР. 2017. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. № 100. С. 42-47.
17. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. Київ : Мінрегіон України, 2014. 110 с.

18. Nie, J., Morante, R., Miranda, M. & Braverman, J. On the Correct Application of the 100-40-40 Rule for Combining Responses Due to three Directions of Earthquake Loading. ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Division/K-PVP Conference. Bellevue, Washington, USA. July 18-22, 2010. Washington: ASME, 2010. P. 257-262. <https://doi.org/10.1115/PVP2010-25466>.
19. EN 1998-1. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels : European committee for standardization, 2004. 229 p.
20. Generic Implementation Procedure (GIP) for Seismic Verification of Nuclear Power Plant Equipment, SQUG [Seismic Qualification Utility Group]. Revision 2A, 1992.
21. Earthquake Experience and Seismic Qualification by Indirect Methods in Nuclear Installations. IAEA-Tecdoc-1333. Vienna : IAEA. 2003. 108 p.
22. DITI 300/376-RU/R.2 Методологія оцінки сейсмостійкості обладнання для цілей кваліфікації на сейсмічні впливи, погоджена листом Держатомрегулювання від 23.12.2009 № 15-31/5-7281.
23. Щодо вимог до сполучень навантажень під час оцінки сейсмостійкості конструкцій, систем та елементів непрямыми методами / О-р П. Шугайло та ін. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 1(85). С. 56-61. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2020.1\(85\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2020.1(85).06).
24. Впровадження в Україні сучасних підходів до оцінки пошкоджуваності елементів енергоблоків АЕС від сейсмічних впливів / О. В. Сахно, Д. І. Рижов, О-р П. Шугайло та ін. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. № 2(94). С. 17-25. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2\(94\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.2(94).02).
25. Electric power research institute, A Methodology for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1), Rep. EPRI-NP-6041-SL, Palo Alto, CA, 1991.
26. Seismic Evaluation of Existing Nuclear Power Plants. IAEA Safety Reports Series № 28. Vienna: IAEA, 2003.

27. МТ-Т.0.03.326-13. Методика расчетного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в рамках метода граничной сейсмостойкости, зі зміною № 3, погодженою листом Держатомрегулювання від 04.10.2017 № 15-33/1-6126.

28. Application peculiarities of the SMA method in the estimation of NPP structures, systems and elements by means of computational complexes / M. A. Mustafin, D. I. Ryzhov, O-r P. Shuhailo et al. *Journal of Mechanical Engineering*. 2020. No. 1 (23). pp. 46-52. URL: <https://doi.org/10.15407/pmach2020.01.046>.

29. 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.

30. Тороп В. М., Перепичай А. А. Оценка граничной сейсмостойкости гермопроходок энергоблока № 2 Ровенской АЭС. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2015. № 4. С. 49–52. URL: <https://doi.org/10.15407/tdnk2015.04.07>.

31. Єгупов В. К. Методи оцінки сейсмостійкості будівель і споруд : дис. ...канд. техн. наук : 05.23.01. Одеса, 2018. 195 с.

32. Писаревський Б. Ю. Чисельне моделювання конструкцій багатоповерхових будівель при динамічних впливах : дис. ... д-ра філософії в галузі знань 19 Архітектура, будівництво : спец. 192. Одеса 2021. 159 с.

33. Мурашко О. В. Каркасні будівлі в сейсмічних районах, комплексне оцінювання сейсмостійкості : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Одеса 2021. 42 с.

34. Кошевий О. О. Багатокритеріальна параметрична оптимізація оболонок обертання при сейсмічних впливах. : дис. ... д-ра філософії в галузі знань 19 Архітектура та будівництво : спец. 192. Київ 2020. 242 с.

35. Якушев Д. І. Розрахункові моделі конструкцій будівель та споруд при динамічних впливах. : дис. ...канд. техн. наук : 05.23.01. Одеса 2020. 200 с.

36. Єгупов К. В. Сейсмостійкість каркасних будівель та споруд : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Одеса 2012. 34 с.
37. Бенрадї І. Сейсмостійкість будівель з безригельним каркасом з урахуванням впливу ненесучого заповнення : дис. ...канд. техн. наук : 05.23.01. Одеса 2020. 195 с.
38. Матвієнко А. О. Удосконалення методики розрахунку сейсмостійкості гребель із ґрунтових матеріалів на основі хвильової теорії : дис. ...канд. техн. наук : 05.23.01. Харків 2016. 235 с.
39. Романенко К. М. Підвищення сейсмічної безпеки протяжних промислових споруд : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Київ 2013. 20 с.
40. Мар'єнков М. Г. Експериментально-теоретичні методи оцінки сейсмостійкості будівель : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Одеса 2013. 250 с.
41. Раджабзадег М. Динамічна взаємодія каркасних будівель з ґрунтовим масивом при сейсмічних впливах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Харків 2015. 21 с.
42. Немчинов Ю. И. Сейсмостойкость высотных зданий и сооружений : монографія. КиевГос. предприятие «Гос. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций (ГП НИИСК)», 2015. 583 с.
43. Єгупов К. В., Єгупов В. К., Дорофєєв В. С. Методи оцінки сейсмостійкості будівель та споруд : монографія. Одеса : Одес. нац. мор. ун-т, 2019. 164 с.
44. Бендерский Е. Б. Строительство в сейсмоопасных районах : монографія. Кривой Рог : Минерал, 2012. 46 с.
45. Барабаш М. С., Максименко В. П., Башинський Я. Науковий супровід об'єкту незавершеного будівництва з несучими стінами на граничні сейсмічні навантаження в м. Одеса. *Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво)*. 2015. Вип. 82. С. 156–165.
46. Барабаш М. С., Максименко В. П., Филинский Л. В. Анализ проблем безопасности строительных объектов в районах высокой сейсмичности. *Будівельні конструкції*. 2012. Вип. 76. С. 222–229.



47. Барабаш М. С., Дармороз Т. Л. Особливості конструктивних рішень, які можуть застосовуватися до споруд каркасного типу для будівництва в сейсмічних районах. *Вісник НАУ*. 2008. № 3. С. 160–162.

48. 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: Видавництво Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 2020. С. 45.

49. Daurov M. K., Bilyk A. S. Investigation of changes in steel frames stress state in fire and influence on its vitality. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2022. No. 108. P. 325-336. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.325-336>.

50. Bilyk S. I., Bashynska O. Y., Bashynskyi O. V. Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2022. No. 108. P. 189-202. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.189-202>.

51. Buckling of the steel frames with the I-shaped cross-section columns of variable web height / Bilyk S. I. et al. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2018. No. 100. P. 140-154.

52. Bilyk S., Tonkacheiev V. Determining sloped-load limits inside von Mises truss with elastic support. *Materiali in tehnologije*. 2018. Vol. 52, no. 2. P. 105-109. URL: <https://doi.org/10.17222/mit.2016.083>.

53. Shugaylo O. P. The problem of specialists' training to assess the strength of steel structures under special operating conditions. *Modern European trends in the development of engineering education: Scientific and pedagogical internship*, Wloclawek, the Republic of Poland, May 16 – June 26, 2022. P. 71 – 75.

54. Юрченко В.В. Удосконалення конструктивної форми легких каркасів будівель із холодногнутих профілів на базі рішення задачі оптимального проектування : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Київ 2019. 44 с.

55. Перельмутер А., Юрченко В. Про доцільність та формулювання задач пошуку оптимальних проектних рішень стержневих конструкцій із

холодногнутих профілів. 2021. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. Випуск 6. С. 140–152. URL: <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.6.18>.

56. S.I. Bilyk, V.V. Yurchenko. Size optimization of single edge folds for coldformed structural members. 2020. *Strength of Materials and Theory of Structures*. № 105. P. 73-86. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.73-86>.

57. A.V. Perelmuter, V. V. Yurchenko, I. D. Peleshko. Optimization of cross-sectional dimensions for coldformed steel lipped channel columns. 2022. *Strength of Materials and Theory of Structures*. № 108. P. 156–170. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.156-170>.

58. V. Volkova. Dynamic Smoothing Effect in Non-Linear Dynamic System under Polyharmonic External Excitation. In *Materials Science Forum* (Vol. 968, pp. 421–426). 2019. Trans Tech Publications, Ltd. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.421>.

59. V. Volkova, L. Gaile and L. Pakrastins. Parametric identification of multy-storey building model based on oscillation testing results. 2019. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Volume 660. 4th International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2019), 25–27 September 2019, Riga, Latvia. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012061>.

60. V. Volkova, L. Gaile and L. Pakrastins. Experimental qualitative identification of damping and stiffness characteristics of lattice towers. 2017. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Volume 251. 3rd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies (IMST 2017), 27–29 September 2017, Riga, Latvia. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012108>.

61. V.E. Volkova. Monitoring Technical Conditions of Engineering Structures Using the Non-Linear Approach. 2015. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Volume 96. 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies 30 September to 2 October 2015, Riga, Latvia. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/96/1/012072>.

62. V. Volkova and I.Smolii. Natural Oscillations of Welded Steel Beams in the Span Structures of Conveyor Galleries. 2015. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 96. 2nd International Conference on Innovative Materials, Structures and Technologies 30 September to 2 October 2015, Riga, Latvia URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/96/1/012071>.
63. V. Volkova. Development of Methods for Nonparametric Identification of Models of Mechanical Systems. 2013. Procedia Engineering. Volume 57. Pages 1230-1235 URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.155>.
64. Vabishevich M., Dedov O., Glitin O. Experimental determination of the spectrum of structure vibrations under the influence of technological load. *Technology Audit and Production Reserves*. 2019. Vol. 4, No. 1(48). P. 39–42. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.179138>.
65. Vabishevich M., Dedov O., Glitin, O. Numerical-experimental research of technological equipment foundations in dynamic impact conditions. 2019. *Technology Audit and Production Reserves*. Vol. 5, № 1(49). P. 32–35. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.183264>.
66. Солодей І.І. Скінченноелементні моделі просторових тіл в задачах динаміки з урахуванням великих пластичних деформацій / І.І. Солодей, М.О. Вабіщевич, Р.Л. Стригун // Управління розвитком складних систем. – 2019. – №39. – С. 87 – 94. URL: [dx.doi.org\10.6084/m9.figshare.11340665](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11340665).
67. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ : Мінрегіон України, 2014, 199 с.
68. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ : Мінрегіон України, 2018, 30 с.
69. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ : Мінбуд України, 2006, 75 с.
70. Клименко В. З. Трансформация метода расчета конструкций по предельным состояниям. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2015. № 3. С. 33-38.

71. Металеві конструкції / Нілов О. О. та ін. Київ : видавництво «Сталь», 2010. 869 с.
72. Металеві конструкції: Том 2. Конструкції металевих каркасів промислових будівель: Підручник для вищих навчальних закладів / С. І. Білик та ін. Кам'янець-Подільський: ТОВ «Друкарня «Рута», 2021. 448 с.
73. EN 1990:2002+A1. Eurocode – Basis of structural design. Brussels : European committee for standardization, 2005. 116 p.
74. EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels : European committee for standardization, 2005. 91 p.
75. Хмельницькая АЭС. Блок 1. РО. НЧ. Техническое переоснащение. Обследование обратных клапанов на трубопроводах острого пара с целью определения остаточного ресурса и их замены по результатам обследования. Главные паропроводы II контура  $P_p > 22$  кгс/см. Опорные конструкции под неподвижные опоры. Расчет прочности и устойчивости. ХАС-113-31-КМ.Р. Київ, 2019.
76. Ривненская АЭС. Энергоблок № 4. Техническое переоснащение. Разработка и внедрение мероприятий по снижению концентрации водорода в ГО для запроектных аварий. Главный корпус. Реакторное отделение. Расчет опорных металлоконструкций под ПАРВ. 381646.218.001.РК00. Київ, 2019.
77. ОП «Южно-Украинская АЭС». Выполнение оценки сейсмостойкости оборудования энергоблока № 3 с целью завершения работ по мероприятию КСППБ 18101. Этап 3. Оценка сейсмической прочности и сейсмостойкости оборудования и трубопроводов. Расчет опорных конструкций кабельных трас. 191701.212.003.РР00. Київ, 2018.
78. ОП ЗАЭС, г. Энергодар, Промышленная, 133. Энергоблок 1. Реакторное отделение. Герметичная часть. Техническое переоснащение. Выполнение монтажа опорно-подвесной системы. Трубопроводы на байпасе клапанов TQ22S07(11) с арматурой TQ22S08,09 (12,13). 003-62-307-ТМ : Кресленик. Харків, 2020.

79. ОП ЗАЭС, г. Энергодар, Промышленная, 133. Энергоблок 2. РО. ГЧ. Техническое переоснащение. Выполнение монтажа опорно-подвесной системы. Трубопроводы отвода переливов, отбора воды БВ на очистку с граничной арматурой TG21S08. 003-62-319-ТМ : Кресленик. Харків, 2020.

80. ОП ЗАЭС, г. Энергодар, Промышленная, 133. Энергоблок 2. Реакторное отделение. Герметичная часть. Техническое переоснащение. Выполнение монтажа опорно-подвесной системы. Трубопроводы коллектора планового расхолаживания от врезки в I контур до арматуры TQ41(42,43)S01 и TQ40S06(10). 003-62-317-ТМ : Кресленик. Харків, 2020.

81. ОП ЗАЭС, г. Энергодар, Промышленная, 133. Энергоблок 1. Реакторное отделение. Герметичная часть. Техническое переоснащение. Выполнение монтажа опорно-подвесной системы. Трубопроводы аварийной питательной воды  $P_p > 22 \text{ кгс/см}^2$ . 003-62-310-ТМ : Кресленик. Харків, 2020.

82. Звіт. Розрахункове обґрунтування запасу сейсмостійкості обладнання з формуванням переліку компенсуючих заходів. Том 1. Оцінка сейсмостійкості та визначення запасу сейсмостійкості обладнання РДЕС енергоблоку № 6 та ЗРДЕС ВП ЗАЕС. ЗВ-Т.41.16.032.01-21 : Энергодар, 2021.

83. Звіт. Розрахункове обґрунтування запасу сейсмостійкості обладнання з формуванням переліку компенсуючих заходів. Том 2. Оцінка сейсмостійкості та визначення запасу сейсмостійкості обладнання РВ енергоблоку №6 ВП ЗАЕС. ЗВ-Т.41.16.032.02-21 : Энергодар, 2021.

84. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. Затверджено наказом Держатомрегулювання від 19.11.2007 № 162, зареєстровано у М-ві юстиції України 25.01.2008 за № 56/14747. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-08#Text> (дата звернення: 10.06.2022).

85. ДСТУ 8539:2015. Прокат для будівельних сталевих конструкцій. Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016, 20 с.

86. ДСТУ 4484:2005/ГОСТ535-2005. Прокат сортовий і фасонний із сталі вуглецевої звичайної якості. Загальні технічні умови. Київ : ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ України, 2006, 14 с.

87. ДСТУ-Н Б.В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Київ : Мінрегіон України, 2016, 147 с.

88. Установка реакторная В-320. Техническое описание. 320.00.00.00.000ТО. Подольск, 1982.

89. Отчет по периодической переоценке безопасности энергоблоков № 1, 2 ОП ЗАЭС. Фактор безопасности № 5. Детерминистический анализ безопасности энергоблока № 1 ЗАЭС. Анализ нарушений нормальной эксплуатации и проектных аварий при работе энергоблока на мощности. 21.1.59.ОППБ.05.01.1. Энергодар, 2014.

90. 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. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1\(93\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1(93).07).

91. 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. Энергодар, 2014.

92. 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 СББ энергоблоков №№ 3, 4 Запорожской АЭС. Анализ динамического взаимодействия грунт-конструкция. 75.107-00.01.01-06-15-ПР. Энергодар 2016.

93. 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 СББ энергоблоков №№ 5, 6

Запорожской АЭС. Анализ динамического взаимодействия грунт-конструкция. 75.111-00.01.01-09-17-ПР. Энергодар 2017.

94. 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. Южноукраїнськ, 2011.

95. 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. Южноукраїнськ, 2011.

96. Хмельницкая АЭС. Энергоблок № 2. Окончательный отчет по анализу безопасности. Том 2. Глава 2. Характеристика района и площадки АЭС. 43-923.203.254.ОБ.02. Нетішин, 2005.

97. Ровенская АЭС. Энергоблок № 4. Отчет по анализу безопасности. Том 2. Глава 2. Характеристика района и площадки АЭС. 38-223.203.003.ОБ.02. Кузнецовськ, 2005.

98. Оцінка сейсмостійкості енергоблоків АЕС України із застосуванням положень НП 306.2.208-2016 / Р. Я. Буряк, Д. І. Рижов, О. В. Городніченко, О-р П. Шугайло та ін. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 2(86), С. 13-19. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2020.2\(86\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2020.2(86).02).

99. Науково-технічний звіт. Побудова швидкісної моделі, розрахунок частотних характеристик ґрунтової товщі проммайданчика ВП РАЕС, розробка розрахункових акселерограм і спектрів відгуку на ґрунті для проектного та максимального розрахункового землетрусів за даними інструментальних

спостережень. Етап 2. Розробка розрахункових акселерограм і спектрів відгуку на ґрунті для проектного землетрусу (МРЗ) з метою визначення дійсних сейсмічних характеристик промайданчика ВП РАЕС на підставі даних інструментальних спостережень системи сейсмомоніторингу ВП РАЕС з врахуванням вимог МАГАТЕ за період її експлуатації з кінцевим терміном – грудень 2019 року з врахуванням результатів робіт по етапу 1. Дніпро: ТОВ «Фундаментсроймакс». 2020. 123 с.

100. Підсумковий технічний звіт з результатами сейсмічного дообстеження майданчика ВП ХАЕС та кількісними показниками «Експлуатація системи сейсмічного моніторингу (ССМ), збір, обробка та аналіз результатів спостереження, складання висновку про результати сейсмічного дообстеження майданчика ВП ХАЕС». Дніпро: Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. 2021. 98 с.

101. Об определении сейсмичности площадки ОП ЮУАЭС, сейсмостойкости зданий, оборудования и трубопроводов энергоблока №1 ОП ЮУАЭС с учетом инженерного запаса. Концептуальное техническое решение, погоджене Держатомрегулюванням 17.10.2011 р.

102. О вводе в действие сейсмических характеристик площадки Запорожской АЭС в качестве исходных данных для оценки сейсмостойкости оборудования, трубопроводов, зданий и сооружений энергоблоков №№ 1–6 и ОСО. 00.3С.00.ТР.11363 Техническое решение, погоджене листом Держатомрегулювання від 30.07.2015 № 18-29/4-4832.

103. Справочный материал. Поэтажные спектры на отметках РО РАЭС, ХАЕС и ЧАЭС. 218.036.МС00. Киев, 2002.

104. 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. Энергодар 2015.

105. 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 2. Результаты расчета поэтажных спектров ответа здания РО-3. 75.107-00.03.02-10-15-ПР. Энергодар 2016.

106. 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. Энергодар 2016.

107. 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. Энергодар 2018.

108. Стан справ з реалізацією на АЕС України нормативних вимог щодо оцінки сейсмостійкості конструкцій, систем та елементів / Д. І. Рижов, О-р П. Шугайло та ін. *Геофізичні технології і геопросторове моделювання в задачах геотехніки, інженерної геології, сейсмології та будівництва : науково-технічна конференція*. Дніпро, 24-27 червня 2019. С. 22-23.

109. Типовой технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000. РГ-Б.0.03.179-17. Киев : ГП «НАЭК «Энергоатом», 2017. 278 с.

110. Методологічні підходи до визначення необхідності врахування різних технологічних умов експлуатації елементів енергоблоків АЕС під час оцінки їх сейсмостійкості відповідно до нормативних вимог / О-р П. Шугайло та ін. *Ядерна та радіаційна безпека*. № 3(91). С. 5-10. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3\(91\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.3(91).01).

111. ANSYS Mechanical. Theory reference. Release 2022 R1. January 2022.
112. ANSYS Mechanical. Element reference. Release 2022 R1. January 2022.
113. Стали и сплавы. Марочник. Под редакцией В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева, Москва, «Интермет Инжиниринг», 2001, 608 с.
114. Марочник сталей и сплавов. Под общей редакцией А. С. Зубченко. Москва: «Издательство «Машиностроение», 2003. 784 с.
115. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 454 с.
116. РД 24.035.04-89. Нормы расчета на сейсмостойкость подъемно-транспортного оборудования атомных станций. Часть 1. Москва, 1990.
117. О.П. Шугайло «Розвиток методу граничних станів по відношенню до сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС України». *IV Міжнародна конференція «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику»*, Київ, 30 вересня 2022. С. 49–50.
118. ANSYS Mechanical. Mechanical User's Guide. Release 2022 R1. January 2022.
119. Оценка сейсмостойкости электротехнического оборудования и кабельных трасс специального электрического мостового крана кругового действия грузоподъемностью 320+160+2x70 тонн энергоблока № 2. 1821341.213.1100-3Т. Киев, 2022.
120. Звіт про виконання державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки звітних матеріалів з розрахункового обґрунтування запасу сейсмостійкості арматури енергоблока № 6 та ЗРДЕС ВП ЗАЕС з формуванням переліку компенсуючих заходів, (реєстраційний № 22-09-14476/2). Київ : ДНТЦ ЯРБ, 2022.
121. НП 306.2.162-2010. Вимоги до оцінки безпеки атомних станцій. Затверджено наказом Держатомрегулювання від 22.09.2010 № 124, зареєстровано в М-ві юстиції України 21.10.2010 за № 964/18259.

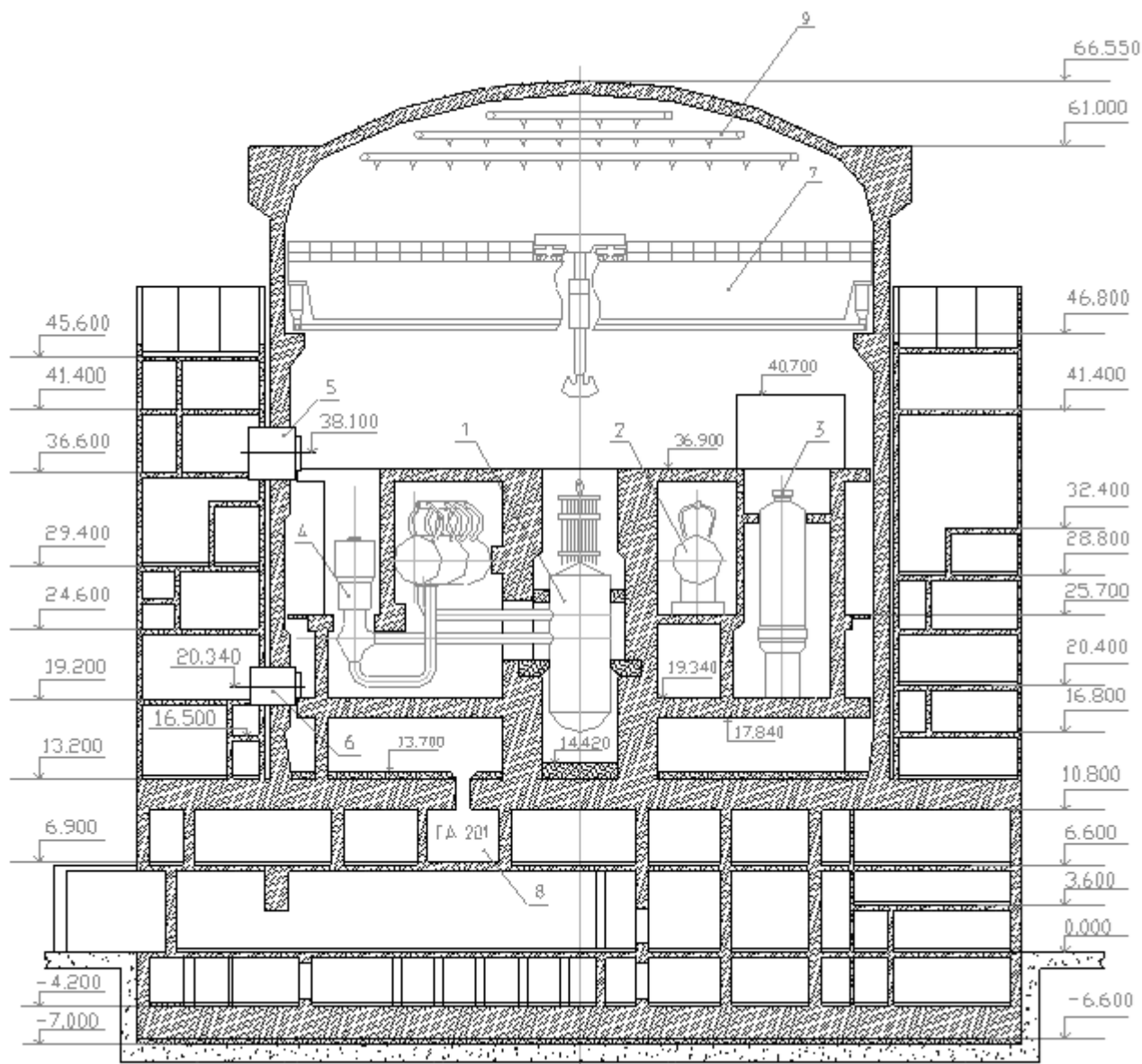
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0964-10#Text> (дата звернення: 26.08.2022).

122. 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*. № 4(92). С. 4-11. doi: 10.32918/nrs.2021.4(92).01.

123. Шугайло О-р П., Рижов Д. І. Особливості оцінки сейсмостійкості сталевих конструкцій елементів енергоблоків атомних станцій у відповідності до сучасних нормативних вимог». *XII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Будівництво в сейсмічних районах України»*, Одеса, 23-25 вересня 2021. С. 48-49.

124. ОП ЗАЭС, г. Энергодар, Промышленная, 133. Энергоблок № 2. Главный корпус. Реакторное отделение. Герметичная зона. Трубопроводы байпасов обратных клапанов УТ11 (12,13,14)S03, S04 с арматурой УТ11 (12,13,14)S05,S06,S07,S08. Трубопроводы от запорной арматуры TQ22S04 до подачи раствора борной кислоты под и на активную зону реактора. Расчет на прочность и сейсмостойкость. 003-62-810-ТМ.Р.

## ДОДАТОК А



- |                                  |                         |
|----------------------------------|-------------------------|
| 1 – Реактор                      | 6 – Аварійний шлюз      |
| 2 – Парогенератор                | 7 – Полярний кран       |
| 3 – Компенсатор тиску            | 8 – Бак-прямок          |
| 4 – Головний циркуляційний насос | 9 – Спринклерна система |
| 5 – Основний шлюз                |                         |

Рисунок А.1. Ескіз реакторного відділення енергоблоку з реакторною установкою ВВЕР-1000/В-320

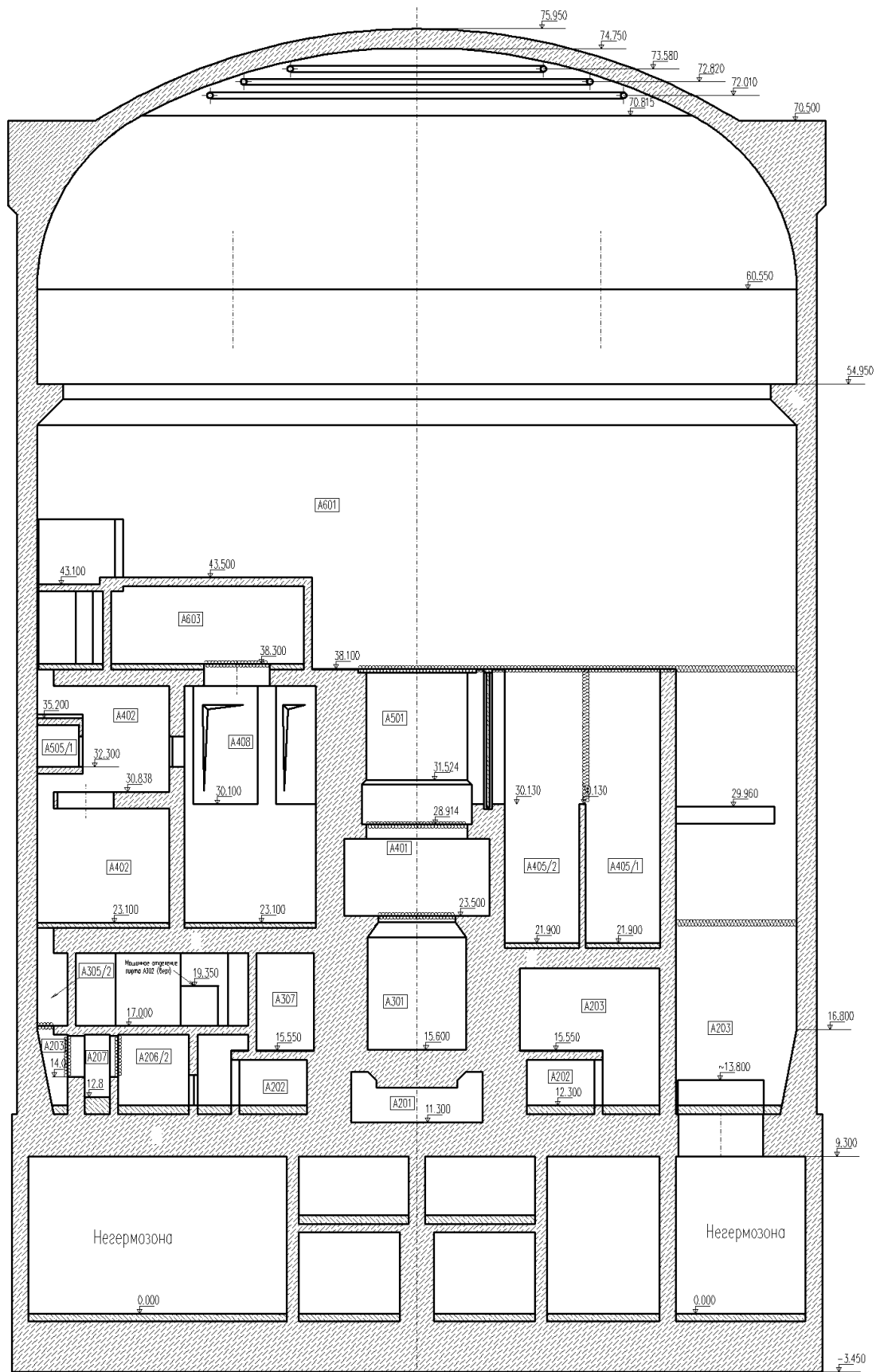


Рисунок А.2. Ескіз реакторного відділення енергоблоку з реакторними установками ВВЕР-1000/В-302, В-338

## ДОДАТОК Б

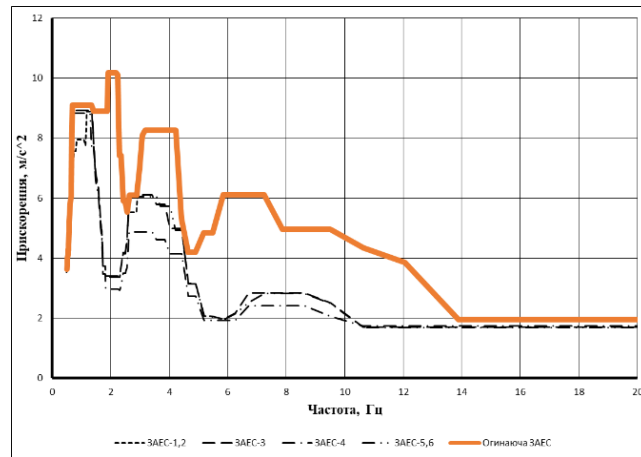


Рисунок Б.1. Огиначаючий поверховий спектр відгуку на нижніх відмітках РВ енергоблоків ЗАЕС для горизонтального напрямку  $A_x$  та 2 % демпфування

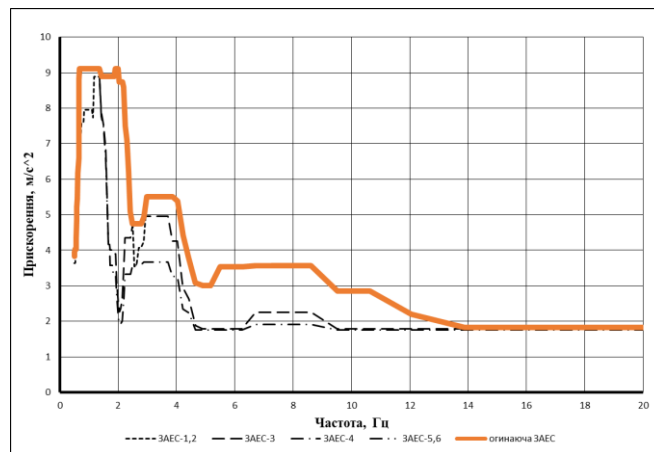


Рисунок Б.2. Огиначаючий поверховий спектр відгуку на нижніх відмітках РВ енергоблоків ЗАЕС для горизонтального напрямку  $A_y$  та 2 % демпфування

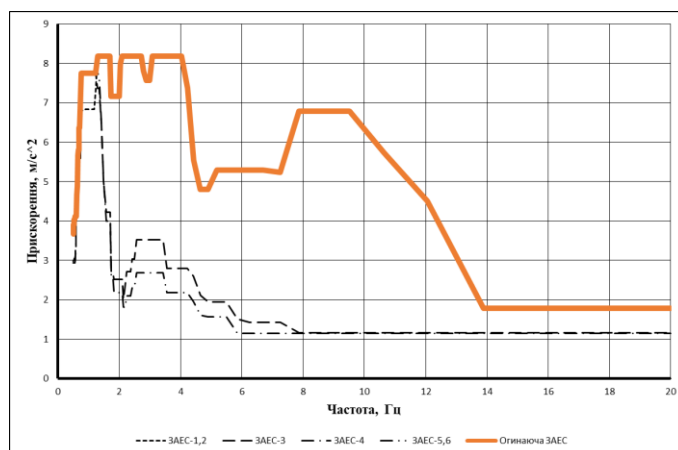


Рисунок Б.3. Огиначаючий поверховий спектр відгуку на нижніх відмітках РВ енергоблоків ЗАЕС для вертикального напрямку  $A_z$  та 2 % демпфування

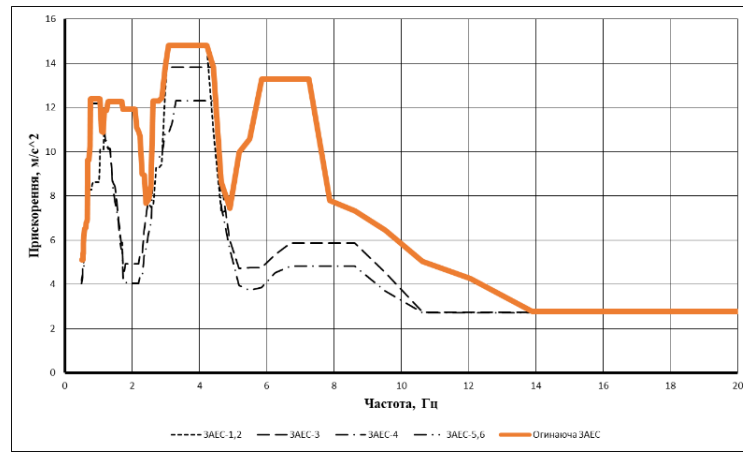


Рисунок Б.4. Огибающий поверхностный спектр відгуку на верхніх відмітках РВ енергоблоків ЗАЕС для горизонтального напрямку  $A_x$  та 2 % демпфування

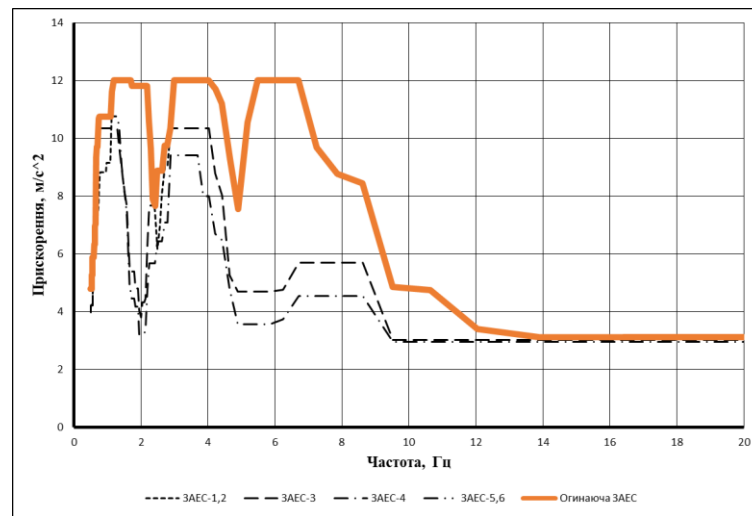


Рисунок Б.5. Огибающий поверхностный спектр відгуку на верхніх відмітках РВ енергоблоків ЗАЕС для горизонтального напрямку  $A_y$  та 2 % демпфування

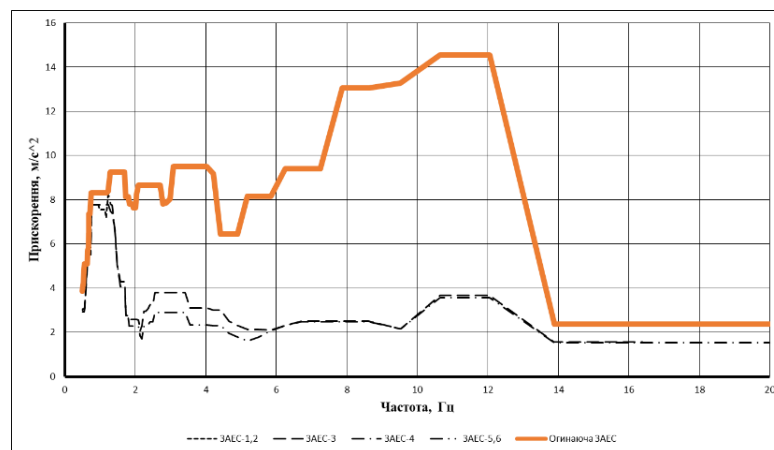


Рисунок Б.6. Огибающий поверхностный спектр відгуку на верхніх відмітках РВ енергоблоків ЗАЕС для вертикального напрямку  $A_z$  та 2 % демпфування

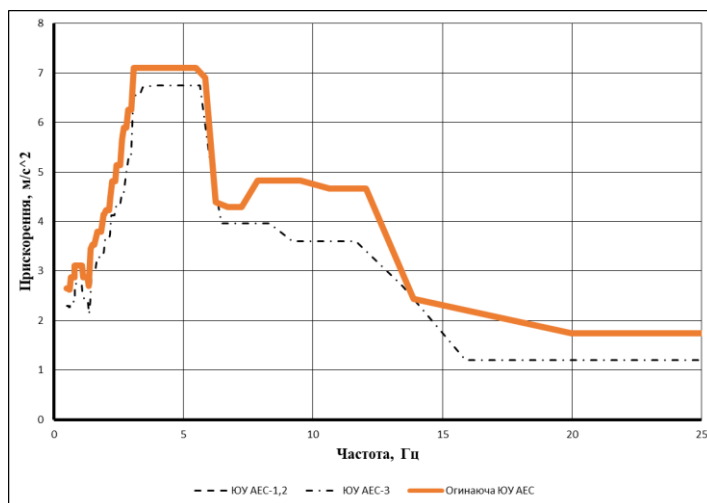


Рисунок Б.7. Огиначаючий поверховий спектр відгуку на нижніх відмітках РВ енергоблоків ПАЕС для горизонтального напрямку Ах та 2 % демпфування

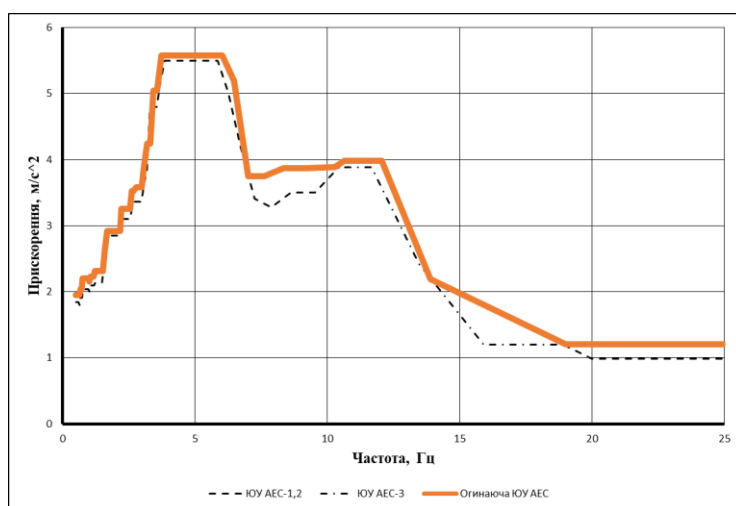


Рисунок Б.8. Огиначаючий поверховий спектр відгуку на нижніх відмітках РВ енергоблоків ПАЕС для горизонтального напрямку Ау та 2 % демпфування

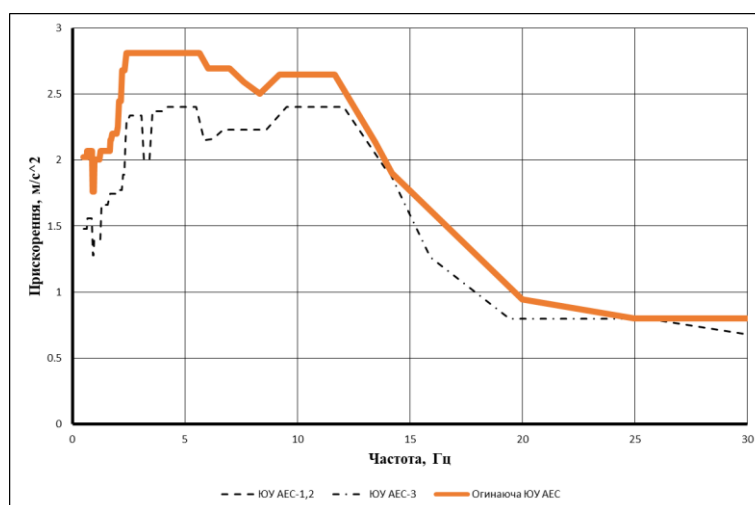


Рисунок Б.9. Огиначаючий поверховий спектр відгуку на нижніх відмітках РВ енергоблоків ПАЕС для вертикального напрямку Аz та 2 % демпфування



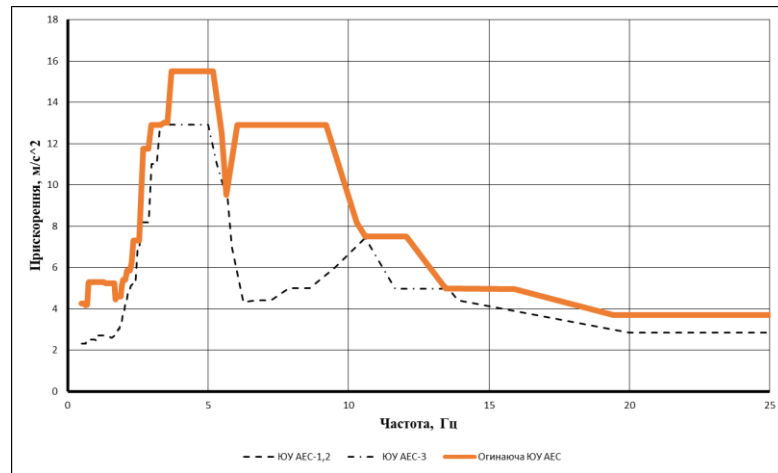


Рисунок Б.10. Огибающий поперховий спектр відгуку на верхніх відмітках РВ енергоблоків ПАЕС для горизонтального напрямку Ах та 2 % демпфування

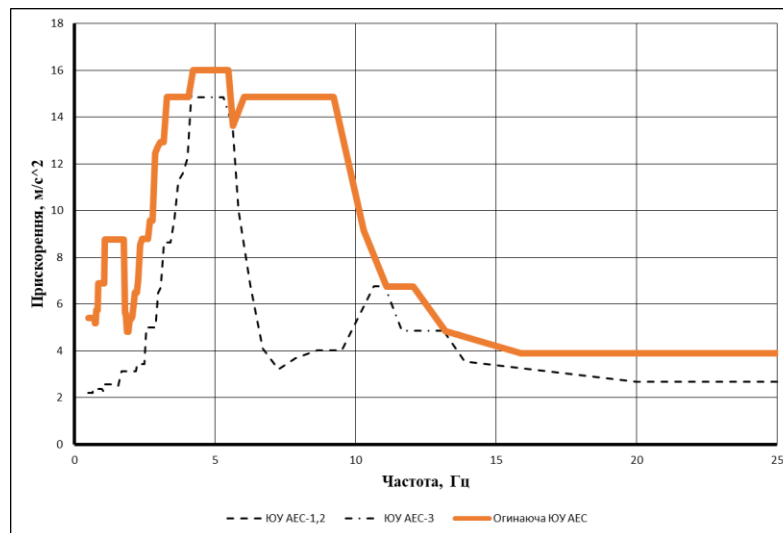


Рисунок Б.11. Огибающий поперховий спектр відгуку на верхніх відмітках РВ енергоблоків ПАЕС для горизонтального напрямку Ау та 2 % демпфування

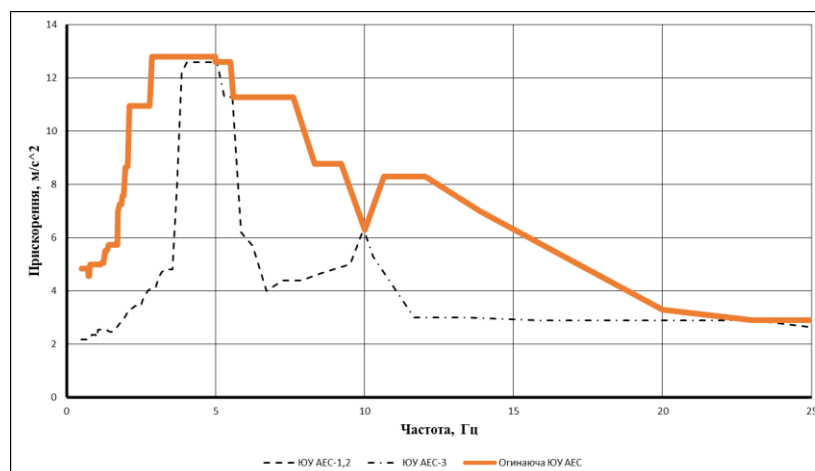


Рисунок Б.12. Огибающий поперховий спектр відгуку на верхніх відмітках РВ енергоблоків ПАЕС для вертикального напрямку Аz та 2 % демпфування

## ДОДАТОК В

Використані підходи до визначення навантажень на сталеві опорні конструкції від розташованих на них трубопроводів та обладнання

Для розрахунків трубопроводів АЕС на міцність широко використовується розрахунковий комплекс АСТРА-АЕС, який призначений для автоматизованих розрахунків низько та високотемпературних трубопровідних систем, зокрема на статичну міцність, сейсмічні впливи та неусталені динамічні процеси. Приклади розрахункової схеми трубопроводу в розрахунковому комплексі АСТРА-АЕС наведені на рисунках В.1 та В.2.

За результатами розрахунків міцності та сейсмостійкості трубопроводів в розрахунковому комплексі АСТРА-АЕС на апаратному рівні розраховуються та виводяться відомості щодо числових значень навантажень на всі сталеві опорні конструкції трубопроводу.

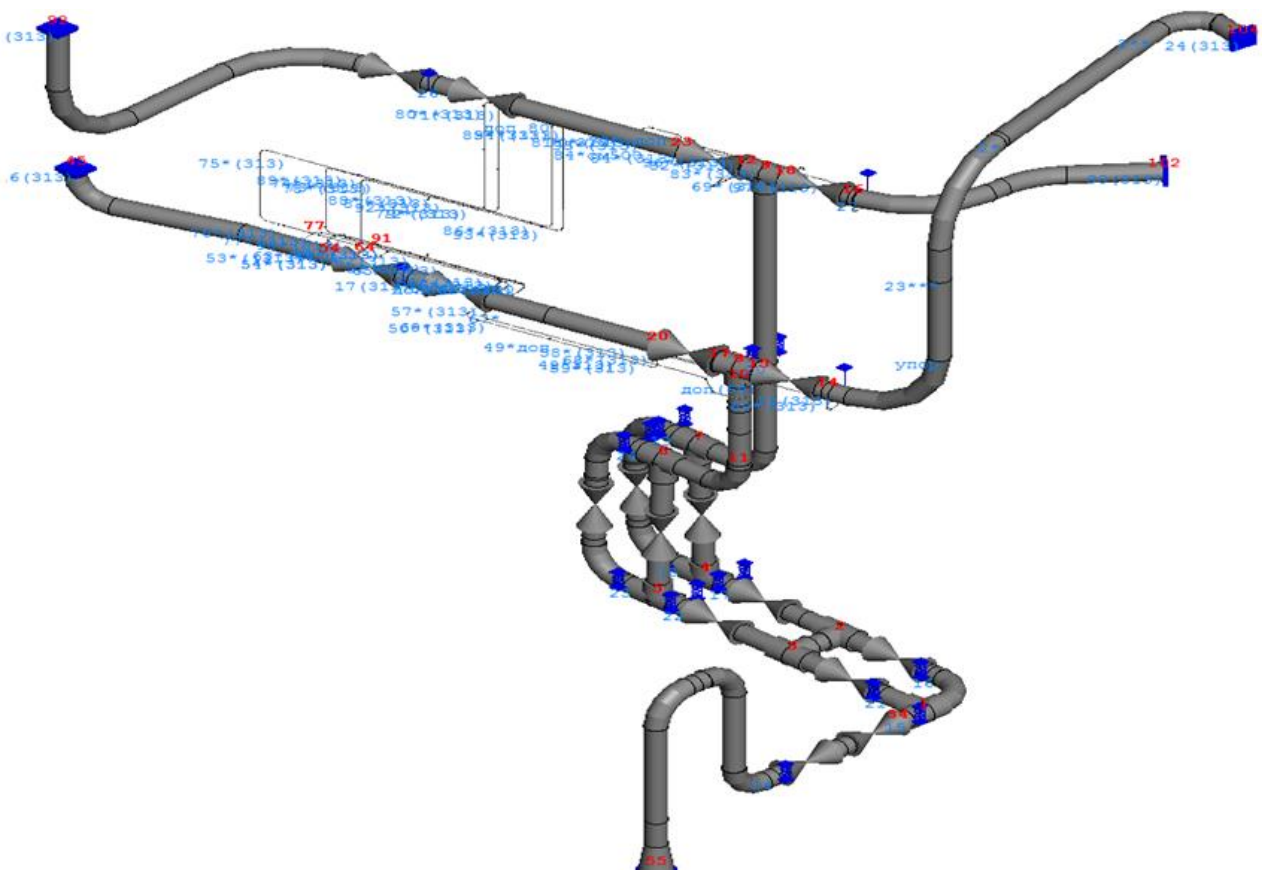


Рисунок В.1. Приклад розрахункової схеми трубопроводу в АСТРА-АЕС (джерело [124]).

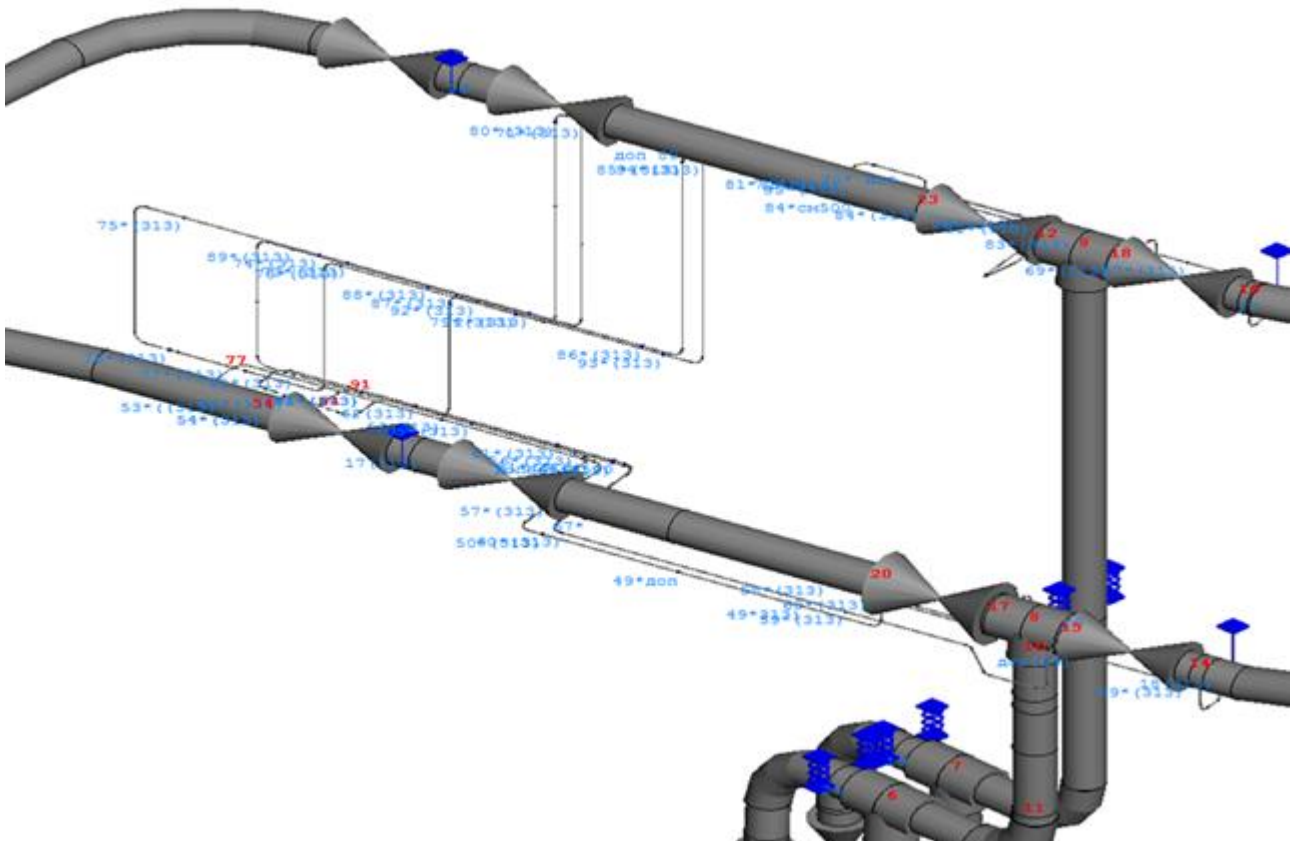


Рисунок В.2. Приклад фрагменту розрахункової схеми трубопроводу в АСТРА-АЕС (джерело [124]).

Визначення та врахування навантажень на сталеві опорні конструкції від обладнання здійснюється шляхом прямого моделювання обладнання в ліцензійному розрахунковому комплексі ANSYS з усіма його параметрами:

- геометричні характеристики обладнання;
- фізико-механічні властивості матеріалу обладнання;
- кінематичні граничні умови обладнання з урахуванням приєднаних до нього трубопроводів;
- власна вага обладнання та його внутрішнього середовища (вода, пар, пароводяна суміш), параметри теплоізоляції;
- параметри (тиск та температура) внутрішнього середовища обладнання;
- зусилля затяжки болтів обладнання;
- сейсмічні навантаження на обладнання від приєднаних трубопроводів;
- переміщення обладнання внаслідок дії всіх врахованих навантажень.

Розрахункова схема обладнання в розрахунковому комплексі ANSYS при оцінці міцності його сталевих опорних конструкцій наведено на рисунку В.3.

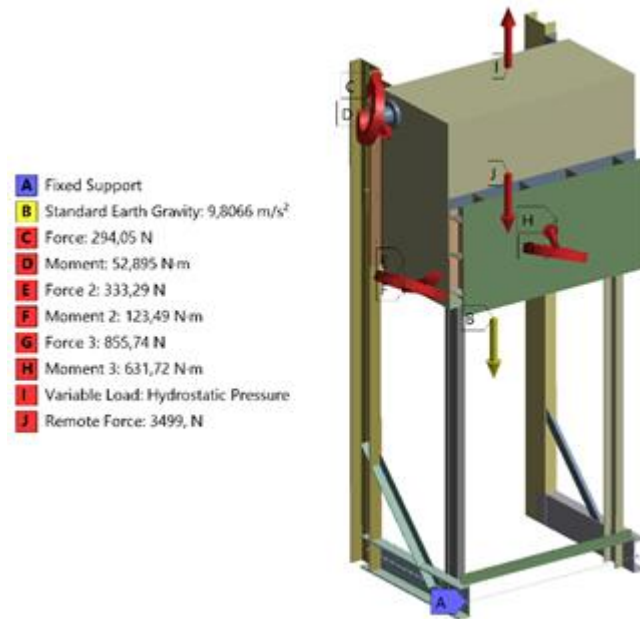


Рисунок В.3. Розрахункова схема обладнання в ANSYS при оцінці міцності його сталевих опорних конструкцій.

## ДОДАТОК Г

Довідки про впровадження результатів



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
«НАЦІОНАЛЬНА АТОМНА  
ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧА  
КОМПАНІЯ «ЕНЕРГОАТОМ»

Відокремлений підрозділ  
«НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР»

№ д.317/41-16 від д.0.10. 202д р.

на № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 202 \_\_\_\_\_ р.

вул. Гоголівська, 22-24, м. Київ,  
01054, Україна  
телефон/факс: +38 (044) 206-97-21  
e-mail: office@ntc.atom.gov.ua

## ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Шугайла Олександра Петровича

на тему

### «Робота сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів атомних станцій при сейсмічних навантаженнях»

Результати дисертаційної роботи Шугайла Олександра Петровича використані в межах розробки розрахункових обґрунтувань сейсмостійкості сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС України під час реалізації «Комплексної (зведеної) програми підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних електростанцій», затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 07.12.2011 № 1270.

Використання основних частин методики, що представлена в дисертаційній роботі, під час розробки компенсуючих заходів з підвищення сейсмостійкості елементів енергоблоків АЕС України до встановленого рівня дало змогу:

- обґрунтовано обрати раціональні сталеві опорні конструкції обладнання та трубопроводів для кращого сприйняття сейсмічних навантажень;
- врахувати особливі умови експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС України, а також ступень їх відповідальності щодо забезпечення безпеки АЕС під час та після сейсмічних впливів.

Директор



Микола ВЛАСЕНКО





ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ  
ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ  
БЕЗПЕКИ

ДЕРЖАВНА ІНСПЕКЦІЯ  
ЯДЕРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ  
УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНА  
АКАДЕМІЯ НАУК  
УКРАЇНИ

Державне підприємство  
"Державний науково-технічний центр  
з ядерної та радіаційної безпеки"

Вул. Василя Стуса, 35-37  
м. Київ, 03142, Україна, а/с 124  
тел.: (044) 450-05-00, факс: (044) 452-89-90

e-mail: nrs@sstc.ua  
www.sstc.ua

19. 10. 2022 № 230/1915 На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

### ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Шугайла Олександра Петровича

на тему

### «Робота сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів атомних станцій при сейсмічних навантаженнях»

Результати дисертаційної роботи Шугайла Олександра Петровича використані під час проведення Державних експертиз ядерної та радіаційної безпеки розрахункових обґрунтувань сейсмостійкості сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів (СОКОіТ) енергоблоків АЕС України.

Визначені в дисертаційній роботі закономірності динамічних характеристик та напружено-деформованого стану СОКОіТ енергоблоків АЕС в залежності від типової конструктивної форми, умов закріплення на конструктивній основі, а також особливих умов експлуатації використані при оцінці обґрунтованості, коректності та прийнятності розрахункових обґрунтувань сейсмостійкості СОКОіТ енергоблоків АЕС України.

Положення методики, що представлена в дисертаційній роботі, використані також під час виконання експертних перевірочних розрахунків сейсмостійкості СОКОіТ енергоблоків АЕС України.

Автор дисертаційної роботи був відповідальним виконавцем значної кількості Державних експертиз ядерної та радіаційної безпеки розрахункових обґрунтувань сейсмостійкості СОКОіТ енергоблоків АЕС України.

В.о. директора



Вячеслав Бойчук



ETSON

EUROPEAN  
TECHNICAL SAFETY  
ORGANIZATIONS  
NETWORK

## ДОДАТОК Д

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань України категорії «А», яке цитується у реферативній базі Scopus

1. 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. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. С. 15-26. [https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3\(95\).02](https://doi.org/10.32918/nrs.2022.3(95).02). (квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2021 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).
2. 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. doi: 10.32918/nrs.2021.1(93).07 (квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2021 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).
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. doi: 10.32918/nrs.2021.4(92).01 (квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2021 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).
4. 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. doi: 10.32918/nrs.2020.2(86).02 (квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2020 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).



Статті у науковому виданні, включеному до переліку наукових фахових видань  
України категорії «Б»

5. Oleksandr P. Shugaylo, Serhii I. Bilyk «The specifics of the compilation of the calculated load combinations in the assessment of seismic resistance of steel supporting structures of nuclear power plant equipment and piping». *Journal of Mechanical Engineering – Problemy mashynobuduvannia*, 2022, vol. 25, № 3. P. 6–15. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.006>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. О.П. Шугайло «Розвиток методу граничних станів по відношенню до сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС України». *IV Міжнародна конференція «Перспективи впровадження інновацій у атомну енергетику»*, Київ, 30 вересня 2022. С. 49–50.

7. Shugaylo O.P. «The problem of specialists' training to assess the strength of steel structures under special operating conditions». *Scientific and pedagogical internship «Modern European trends in the development of engineering education»*, Wloclawek, the Republic of Poland, May 16 – June 26, 2022. P. 71 – 75.

8. О-р П.Шугайло, Д.І.Рижов «Особливості оцінки сейсмостійкості сталевих конструкцій елементів енергоблоків атомних станцій у відповідності до сучасних нормативних вимог». *XII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Будівництво в сейсмічних районах України»*, Одеса, 23-25 вересня 2021. С. 48-49.

9. Д.І.Рижов, О-р.П.Шугайло, О-й.П.Шугайло, Р.Я.Буряк, М.А.Мустафін, Т.В.Підгаєцький, Я.Д.Круглій «Стан справ з реалізацією на АЕС України нормативних вимог щодо оцінки сейсмостійкості конструкцій, систем та елементів». *Науково-технічна конференція «Геофізичні технології і геопросторове моделювання в задачах геотехніки, інженерної геології, сейсмології та будівництва»*, Дніпро, 24-27 червня 2019. С. 22-23.

Монографія та статті, які додатково відображають наукові результати дисертації

10. Оцінка сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій : монографія / Д. Рижов, О-р Шугайло, О. Сахно та ін. ; ред. Д. Рижов. Київ : ДНТЦ ЯРБ, 2022. 144 с.

11. Шугайло О-р П., Рижов Д. І., Жабін О. І., Данильчук Є. Л., Трусів І. О., Посох В. О., Куров В. О. Методологічні підходи до визначення необхідності врахування різних технологічних умов експлуатації елементів енергоблоків АЕС під час оцінки їх сейсмостійкості відповідно до нормативних вимог. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2021. № 3(91). С. 5-10. doi: 10.32918/nrs.2021.3(91).01 (видання проіндексовано у базі даних Scopus, квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2021 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).

12. 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 непрямими методами. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 1(85). С. 56-61. doi: 10.32918/nrs.2020.1(85).06 (видання проіндексовано у базі даних Scopus, квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2020 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).