

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 проєктна 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 опірної 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 вдосконалень 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 Pivdennoukrainska 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 m/s^2 to 22.7 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 сталевих 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.Підгасцький, 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., 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. *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, 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 непрямыми 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, квартиль Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank за 2020 рік. Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія).