

В. В. Інюшев¹, А. С. Колядюк¹, В. О. Посох¹, В. О. Дубковський²

¹ДП «Державний науково-інженерний центр систем контролю та аварійного реагування», просп. Героїв Сталінграда, 64/56, Київ, 04213, Україна

²Одеський національний політехнічний університет, просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

Аналіз існуючих підходів до розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації опорних елементів реактора

Ключові слова:

опорні елементи реактора, оцінка технічного стану, продовження строку експлуатації, розрахункове обґрунтування безпечної експлуатації, початкові та граничні умови.

Проведено аналіз матеріалів з розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації опорних елементів реактора (ОЕ), що представлені в проектно-конструкторській документації та у звітах з продовження строку експлуатації (ПСЕ) ОЕ на енергоблоках атомних електростанцій (АЕС) України, на відповідність вимогам чинної нормативної документації та коректності прийнятих початкових та граничних умов. Установлено, що проектні розрахунки на міцність мають типові відхилення від чинної нормативної документації, оскільки ОЕ були спроектовані відповідно до чинних у 70-х роках минулого століття норм та правил. Крім того, у проектних розрахунках на міцність враховані не всі силові фактори, що діють на ОЕ. Аналіз сучасних підходів до проведення розрахунків на міцність ОЕ, зокрема в рамках заходів з ПСЕ обладнання енергоблоків АЕС України, показав, що на практиці оцінка міцності ОЕ виконується в осесиметричній постановці. При цьому не враховується, що в такому випадку виникає складне несиметричне навантаження від патрубків головних циркуляційних трубопроводів, яке не дозволяє коректно розрахувати напружено-деформований стан ОЕ під час використання осесиметричної постановки задачі.

Вступ

Експлуатація реакторів ВВЕР-1000 у понадпроектний строк потребує реалізації організаційно-технічних заходів з підтвердження функціональних і надійнісних характеристик за результатами спеціального обстеження і оцінки технічного стану [1]. До таких заходів належить і розрахункове обґрунтування міцності і працездатності устаткування реакторних установок, зокрема опорних елементів реактора — ферми опорної, кільця опорного, кільця упорного, сильфона розділяючого.

У рамках проведення оцінки технічного стану елементів енергоблоків АЕС виконується аналіз на-

явних розрахункових обґрунтувань, що представлені в проектно-конструкторській документації та у звітних матеріалах з продовження строку експлуатації (ПСЕ) аналогічних елементів на інших енергоблоках АЕС з метою встановлення можливості використання цих даних для обґрунтування безпечної експлуатації елементів енергоблоків у понадпроектний строк.

Метою цієї статті є аналіз підходів, які використовувалися при виконанні розрахунків на міцність опорних елементів, що представлені в проектно-конструкторській документації та в матеріалах з ПСЕ енергоблоків АЕС України.

© В. В. Інюшев, А. С. Колядюк, В. О. Посох, В. О. Дубковський, 2019

Аналіз проектних розрахунків на міцність опорних елементів реактора

У частині аналізу проектно-конструкторської документації проведено аналіз заводського розрахунку міцності [2], у рамках якого визначався напружено-деформований стан та перевірка міцності кільця опорного, кільця упорного та основних закладних деталей шахти реактора за нормальних умов експлуатації, порушень нормальних умов експлуатації, аварійних ситуацій, а також в умовах сейсмічного впливу.

Аналіз на відповідність вимогам чинної нормативної документації. Опорні елементи реактора енергоблоків ВВЕР-1000 АЕС України були спроектовані та виготовлені відповідно до чинних у 70-х роках минулого століття норм та правил і, відповідно, проектні розрахунки на міцність були виконані відповідно до чинних у той період норм [3]. Таким чином, наявний проектний розрахунок на міцність [2] не враховує положення низки чинних нормативних документів, врахування яких необхідне для обґрунтування безпечної експлуатації у понадпроектний строк, зокрема:

методики [4] у частині перепризначення допустимої кількості циклів навантаження;

вимоги [5] у частині врахування окремих сполучень технологічних умов експлуатації і сейсмічних впливів;

методики [6] у частині визначення запасу граничної сейсмостійкості.

Крім того, детальний аналіз показав існування конфлікту термінів, що використовувалися у розрахунку на міцність [2] та використовуються у чинних вимогах [7]. Так, у документі [2] вжито такі терміни:

нормальні умови експлуатації — дія вагових характеристик, температурних полів, внутрішнього тиску в реакторі та зусиль самокомпенсації трубопроводів;

порушення нормальних умов експлуатації — на навантаження за нормальних умов експлуатації накладаються зусилля від проектного землетрусу;

аварійні режими — на навантаження за нормальних умов експлуатації накладаються зусилля від максимального землетрусу та зусилля, що виникають під час розриву головних циркуляційних трубопроводів (ГЦТ) по повному перетину.

При цьому відповідно до діючих вимог [7] під вищезгаданими термінами розуміється:

нормальна експлуатація (НЕ) — експлуатація атомної станції у визначених проектом експлуатаційних межах і умовах;

порушення нормальної експлуатації атомної станції (ПНЕ) — порушення в роботі АЕС, за якого сталося відхилення від установлених експлуатаційних меж і умов, яке не призвело до аварійної ситуації;

аварійна ситуація (АС) — стан атомної станції, що характеризується порушенням меж і/або умов безпечної експлуатації, що не перейшов в аварію.

Відповідно до технологічного регламенту безпечної експлуатації [8] під НЕ, ПНЕ та АС розуміється чітко встановлений перелік режимів експлуатації енергоблоку (14 режимів нормальної експлуатації, 13 режимів порушення нормальних умов експлуатації та 11 аварійних режимів та ситуацій). У прив'язці до елементів, що експлуатуються на енергоблоці, на практиці прийнято розуміти роботу елементів у цих режимах (НЕ, ПНЕ або АС). Для прикладу, під навантаженнями на опорні елементи реактора у разі порушення нормальної експлуатації розуміється навантаження від реактора під час роботи реакторної установки в режимах порушення нормальних умов експлуатації.

Аналіз коректності прийнятих початкових та граничних умов. У розрахунку на міцність [2] для визначення напружень від горизонтального зусилля R_b упорне кільце представлялось у вигляді стрижневої системи, що являє собою півкільце (прийнято півкільце, оскільки система має вісь симетрії відносно прикладеного навантаження R_b). Варто відзначити, що стрижні, за допомогою яких моделюється упорне кільце, мають відповідні характеристики жорсткості, що відповідають апроксимуючим ділянкам кільця упорного. Розрахункова схема кільця упорного від дії горизонтального зусилля R_b представлена на рис. 1 [2].

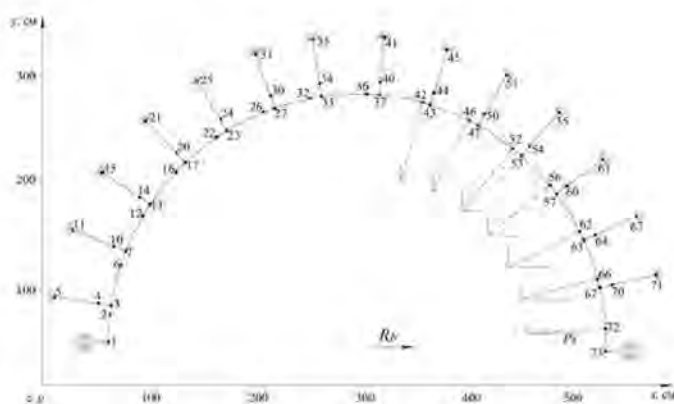


Рис. 1. Розрахункова схема кільця упорного для розрахунку напружень від горизонтальних зусиль R_b

Граничні умови стрижневої системи:
вузли 5, 11, 15, 21, 25, 31, 35, 41, 45, 51, 55, 61, 67, 71 — зафіксовані вузли (стрижні, що з'єднані з цими вузлами, мають відповідні характеристики);

стрижні 3–4, 7–10, 13–14, 17–20, 23–24, 27–30, 33–34, 37–40, 43–44, 47–50, 53–54, 57–60, 63–64, 67–70 мають значно більшу жорсткість, ніж стрижні апроксимуючих ділянок кільця упорного, та стрижні, що з'єднані із зафіксованими вузлами;

у вузлах 1 та 73 відсутні переміщення вздовж осі y та поворот відносно осі z .

Горизонтальне зусилля R_p , яке діє на кільце упорне зі сторони реактора, передається на кільце через систему клинів за рівнянням

$$0,5 \cdot R_p = \sum P_{xi} = \sum P \cdot \cos^2 \alpha_i, \quad (1)$$

де $P_{xi} = P \cdot \cos^2 \alpha_i$ — зусилля, що діють уздовж осі x .

Для кільця опорного оцінюються напруження від таких силових факторів: R_H — горизонтального зусилля; S_H — вертикального зусилля; M_3 — згинального моменту.

Для визначення напружень від горизонтальних зусиль R_H опорне кільце представлялось у вигляді стрижневої системи. Підхід схожий, як і у випадку з кільцем упорним. Розрахункова схема опорного кільця для розрахунку напружень від горизонтального зусилля R_H представлена на рис. 2 [2].

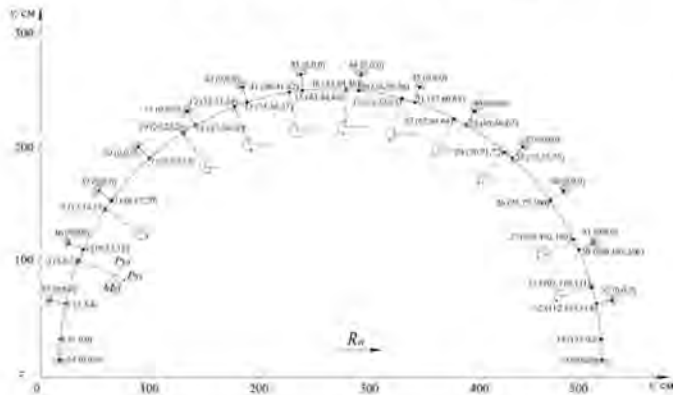


Рис. 2. Розрахункова схема опорного кільця для розрахунку напружень від горизонтальних зусиль R_H

Граничні умови стрижневої системи:

вузли 34–53 — зафіксовані вузли (стрижні, що з'єднані з вузлами 35–52, мають значно більшу згинальну жорсткість $E \times YZ_i$ та нульову жорсткість $E \times F$, а стрижні, що з'єднані з вузлами 34 та 53, мають значно більшу жорсткість $E \times F$ та нульову жорсткість $E \times YZ_i$);

у вузлах 1–33 відсутні переміщення вздовж осі y та поворот відносно осі z .

Горизонтальне зусилля R_{ip} яке діє на опорне кільце зі сторони реактора, передається на кільце через шпонки за рівнянням

$$0,5 \cdot R_H = \sum_i P_{xi} = P \cdot \sum_i \sin^2 \alpha_i, \quad (2)$$

де $P_{xi} = P \cdot \sin^2 \alpha_i$ — зусилля, що діють уздовж осі x .

Зусилля вздовж осі y та моменти відносно осі z , що діють на опорне кільце внаслідок взаємодії з корпусом реактора, визначаються як

$$P_{yi} = P \cdot \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i, \quad (3)$$

$$M_{zi} = P \cdot \sin \alpha_i \cdot l. \quad (4)$$

Для визначення напружень у кільці опорному від згинального моменту M_3 кільце опорне також представлялось у вигляді стрижневої системи (прийнято півкільце, оскільки система має вісь симетрії з розподілення навантажень — вузли 1, 53). Розрахункова схема кільця опорного від згинального моменту M_3 представлена на рис. 3 [2].

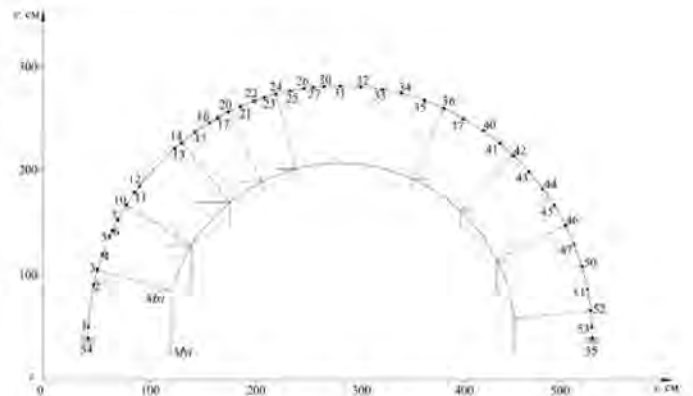


Рис. 3. Розрахункова схема опорного кільця для розрахунку напружень від згинального моменту M_3

Граничні умови стрижневої системи:

вузли 54–55 — зафіксовані вузли (стрижні, що з'єднані з цими вузлами, мають значно більшу жорсткість $E \times F$ та $E \times YZ_i$, усі інші жорсткості нульові);

у вузлах 1–53 відсутні переміщення вздовж осей x , y та поворот відносно осей x , z .

Зусилля, що розподілені на радіусі центра тяжіння середнього перерізу кільця, від дії згинального моменту M_3 визначалися як

$$P_i = P_{12} \cdot \cos^2 \alpha_i, \quad (5)$$

де $P_{1,2} = \frac{0,25 \cdot M_3}{R \cdot \sum_i \sin^2 \alpha_i}$ — максимальне зусилля, при-

кладене на радіусі центра тяжіння перерізу в лівій і правій половині кільця відповідно; α_i — кут, що визначає положення фіксаторів; R — радіус центра тяжіння середнього перерізу.

Момент відносно центра тяжіння перерізу визначався як

$$M_i = P_i \cdot l_{1,2}, \quad (6)$$

де $l_{1,2}$ — зусилля, що діють уздовж осі x .

Згинальні моменти, які діють навколо відповідних осей, визначаються за формулами

$$M_{xi} = M_i \cdot \sin \alpha_i, \quad (7)$$

$$M_{yi} = M_i \cdot \cos \alpha_i. \quad (8)$$

Основними недоліками вищенаведених підходів є врахування не всіх силових факторів, що діють на опорні елементи. Так, у розрахунку кільця упорного розглядаються напруження тільки від зусиль у радіальному напрямку та не розглядаються напруження від крутних моментів. У розрахунку кільця опорного не розглядались напруження від температурного поля та крутного моменту.

Аналіз сучасних підходів у розрахунках на міцність опорних елементів

Аналіз сучасних підходів до проведення розрахунків на міцність опорних елементів реактора, зокрема в рамках заходів із ПСЕ опорних елементів реактора енергоблоків № 1, 2 Южно-Української АЕС та № 1–3 Запорізької АЕС, показує, що на практиці використовується осесиметрична постановка задачі, яка полягає в моделюванні і розрахунку сектора опорних елементів (кільце опорне, кільце упорне, сильфон розділяючий). При цьому для кільця упорного та кільця опорного береться сектор 1/15 моделі. Варто відзначити, що осесиметричну постановку в задачах напружено-деформованого стану та визначення жорсткості опорних елементів можна використовувати тільки у разі наявності осесиметричної геометрії та осесиметричного навантаження (як наслідок, у такому випадку результати будуть мати осесиметричний вигляд). У випадку опорних елементів існує складне несиметричне навантаження від патрубків головних циркуляційних трубопроводів, яке не дає змогу

коректно розрахувати напружено-деформований стан опорних елементів під час використання осесиметричної постановки задачі.

Також варто відзначити, що існуючі підходи не повною мірою враховують взаємодію між окремими деталями конструкцій опорних елементів. Так, не повною мірою моделюється взаємодія кільця упорного і корпусу реактора через систему клинів. Таку взаємодію неможливо коректно врахувати в осесиметричній постановці, коли моделюється сектор 1/30 моделі.

Крім того, для кільця опорного одним з основних питань є коректність моделювання взаємодії між кільцем та фермою, оскільки взаємодія між кільцем опорним та фермою для різних силових факторів відбувається через різні конструктивні елементи. Ці аспекти можливо коректно оцінити лише за використання повної моделі (без використання умов симетрії) опорних елементів реактора.

Висновки

У роботі розглянуто основні підходи до розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації опорних елементів реактора на основі аналізу розрахунків на міцність, що представлені в проектно-конструкторській документації та в матеріалах з ПСЕ енергоблоків АЕС України.

Як видно з проектного розрахунку, напруження в опорних елементах аналізувалися не від усіх силових впливів. Для кільця упорного не розглядався вплив від крутного моменту. При цьому для кільця опорного не розглядались напруження від температурного поля та крутного моменту. Аналіз розрахункових матеріалів, які отримані в рамках ПСЕ діючих енергоблоків, показує, що врахування не всіх силових факторів впливають на результат. Водночас у матеріалах із ПСЕ для виконання розрахунків використовували осесиметричні моделі (1/15), що є спрощенням у разі врахування розглянутих силових факторів.

Таким чином, з метою розрахункового обґрунтування безпечної експлуатації опорних елементів, жорсткісні характеристики доцільно визначати у повній постановці (без використання умов симетрії). Використання таких даних під час розрахунку зусиль на опорні елементи дозволить врахувати всі силові фактори, що діють на опорні елементи, та умови взаємодії між окремими конструктивними елементами.

Список використаної літератури

1. НП 306.099–2004. Загальні вимоги до продовження експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектний строк за результатами здійснення періодичної переоцінки безпеки. [Прийнятий Наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 26.11.2004 р. № 181, чинний від 15.12.2004 р.]
2. 1162.01.02.100 РР. Кольцо опорное 1162.0.02.100. Расчет прочности / Атомэнергоэкспорт. — М. : 1980. — 70 с.
3. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. — М. : Металлургия, 1973. — 408 с.
4. МТ-Т. 0.03.155-14. Методика переназначения допустимого количества циклов нагружения и оценки технического состояния по прочности тепломеханического оборудования и трубопроводов при циклических нагрузках / НАЭК «Энергоатом». — Киев, 2014. — 30 с.
5. НП 306.2.208–2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій / Державна інспекція ядерного регулювання України // Офіційний вісник України. — 2016. — № 92. — 59 с.
6. МТ-Т. 0.03.326-13. Методика расчетного анализа сейсмостойкости элементов действующих АЭС в рамках метода граничной сейсмостойкости / НАЭК «Энергоатом». — Киев, 2013. — 51 с.
7. НП 306.2.141–2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. [Прийнятий Наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 19.11.2007 р. № 162, чинний від 01.04.2008 р.]
8. РГ-Б.0.03.179-13. Типовой технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000 / НАЭК «Энергоатом». — Київ, 2014. — 257 с.

Выполнен анализ материалов по расчетному обоснованию безопасной эксплуатации опорных элементов реактора, представленных в проектно-конструкторской документации и в отчетах по продлению срока эксплуатации опорных элементов на энергоблоках АЭС Украины на предмет соответствия требованиям действующей нормативной документации и корректности принятых начальных и граничных условий. Установлено, что проектные расчеты на прочность имеют типичные отклонения от действующей нормативной документации, поскольку были спроектированы и изготовлены в соответствии с действующими в 70-х годах прошлого столетия нормами и правилами. Кроме того, в проектных расчетах на прочность учтены не все силовые факторы, действующие на опорные элементы. Анализ современных подходов к проведению расчетов на прочность опорных элементов реактора, в частности в рамках мероприятий по продлению срока эксплуатации оборудования энергоблоков АЭС Украины, показал, что на практике оценка прочности опорных элементов реактора выполняется в осесимметричной постановке. При этом не учитывается, что в таком случае имеет место сложная несимметричная нагрузка от патрубков главных циркуляционных трубопроводов, что не позволяет корректно рассчитать напряженно-деформированное состояние опорных элементов при использовании осесимметричной постановки задачи.

Ключевые слова: опорные элементы реактора, оценка технического состояния, продление срока эксплуатации, расчетное обоснование безопасной эксплуатации, начальные и граничные условия.

В. В. Инюшев¹, А. С. Колядюк¹, В. О. Посох¹,
В. А. Дубковський²

¹ГП «Государственный научно-инженерный центр систем контроля и аварийного реагирования», просп. Героев Сталинграда, 64/56, Киев, 04213, Украина
²Одесский национальный политехнический университет (ОНПУ), просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина

Анализ существующих подходов к расчетному обоснованию безопасной эксплуатации опорных элементов реактора

V. V. Inyushev¹, A. S. Koliadiuk¹, V. O. Posokh¹,
V. O. Dubkovskiy²

¹SE "State Scientific Engineering Center for Control System and Emergency Response", 64/56, Heroiv Stalinhradu ave., Kyiv, 04213, Ukraine
²Odessa National Polytechnic University, 1, Shevchenko ave., Odesa, 65044, Ukraine

Analysis of Existing Approaches to the Calculated Substantiation of the Reactor Support Elements Safe Operation

The analysis of documentation for the calculated substantiation of the reactor support elements safe operation, which are presented in the design documents and in the reports on the lifetime extension of the reactor support elements at the Ukrainian NPPs, has been carried out to ensure compliance with the current regulatory requirements and the correctness of the applied initial conditions.

It is established that design strength calculations have typical deviations from the current regulatory requirements, since they were performed in accordance with the norms and rules, which were in force in the 1970s. In addition, the design strength calculations do not take into account all force factors acting on the reactor support elements. There is also a terminology conflict between terms used in the design documents and in the current regulatory requirements.

Analysis of current approaches to the strength calculations of the reactor support elements, in particular in the framework of the lifetime extension of the reactor support elements, showed that in practice, the strength assessment of the reactor support elements is performed in an axisymmetric formulation. Meanwhile, a complex asymmetrical load from the main circulation pipelines is not considered, which does not allow to calculate correctly the stress-strain state of the reactor support elements.

As a conclusion, for the calculated substantiation of the reactor support elements long term safe operation it is considered necessary to develop advanced approaches for solving the stress-strain state tasks taking into account all the force interactions and correct modeling of the interaction between the individual structural elements.

Keywords: reactor support elements, assessing the technical condition, lifetime extension, calculated substantiation, applied initial conditions.

References

1. NP 306.099–2004. *General requirements for the extension of the NPP units operation beyond the design lifetime based on the results of periodic safety review*. Approved by the Order of the State Committee for Nuclear Regulation of Ukraine on 26.11.2004 no. 181. (in Ukr.)
2. 1162.01.02.100 RR. *Support ring 1162.0.02.100. Strength analysis*. Moscow: Atomenergosexport, 1980, 70 p. (in Russ.)
3. *Standards for strength analysis of reactors elements, steam generators, vessels and pipelines of nuclear power plants, experimental and research nuclear reactors and installations*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 408 p. (in Russ.)
4. MT-T.0.03.155-14. *Methodology for reassigning the allowable number of loading cycles and assessing the technical condition based on strength analysis of thermomechanical equipment and pipelines under cyclic loads*. Kyiv, NNEGC “Energoatom”, 2014, 30 p. (in Russ.)
5. State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine (2016). NP 306.2.208–2016. Requirements for seismic-resistant design and seismic safety assessment of nuclear power plant units. *Official Bulletin of Ukraine*, vol. 92, p. 59. (in Ukr.)
6. MT-T.0.03.326-13. *Methodology for calculational seismic analysis of operating NPPs elements within the seismic margin assessment method*. Kyiv: NNEGC «Energoatom», 2013, 51 p. (in Russ.)
7. NP 306.2.141–2008. *General provisions for safety assurance of nuclear power plants*. Approved by the Order of the State Committee for Nuclear Regulation of Ukraine dated 19.11.2007 no. 162 (in Ukr.)
8. RG-B.0.03.179-13. *Typical technological regulation for safe operation of NPP units with WWER-1000 reactors*. Kyiv, NNEGC “Energoatom”, 2014, 257 p. (in Russ.)

Надійшла 09.10.2019

Received 09.10.2019