

УДК 624.014, 621.039.58

РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНИХ ПРИНЦИПІВ ОЦІНКИ ВИТРИВАЛОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕНЕРГОБЛОКІВ АТОМНИХ СТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВИХ УМОВ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О.П. Шугайло¹,
д-р філософії

С.І. Білик²,
д-р техн. наук, професор

¹Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», Київ

²Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.45-55

Витривалість сталевих конструкцій енергоблоків атомних станцій визначає можливий строк їх безпечної експлуатації з погляду накопичення пошкоджень від втоми. Ці конструкції знаходяться в особливих умовах експлуатації, серед яких підвищена температура оточуючого середовища, а також епізодичні температурні навантаження із суттєвим градієнтом температур. Водночас, наразі аспекти розрахунків витривалості сталевих конструкцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації, а також ступеню їх відповідальності щодо забезпечення ядерної та радіаційної безпеки не розкриті в достатній мірі нормативно-методичним забезпеченням та науковими дослідженнями.

Ключові слова: сталеві конструкції, температурні навантаження, температурні напруження, епізодичні навантаження, міцність, втома, накопичене пошкодження, скінчено-елементні моделі.

Вступ. На енергоблоках атомних електричних станцій (АЕС) України широко застосовуються сталеві конструкції. Серед усього різноманіття цих сталевих конструкцій окреме місце займають опорні конструкції обладнання та трубопроводів енергоблоку АЕС (надалі – опорні конструкції). Для виготовлення опорних конструкцій застосовують стандартні швелери, кутики, профілі гнуті замкнені тощо. Приклади опорних конструкцій представлені на рис. 1. Ці конструкції знаходяться в особливих умовах експлуатації, серед яких підвищена температура оточуючого середовища, а також температурні навантаження з градієнтом температур, що може сягати близько 100°C впродовж декількох десятків секунд. До цих умов додаються також радіаційні умови.

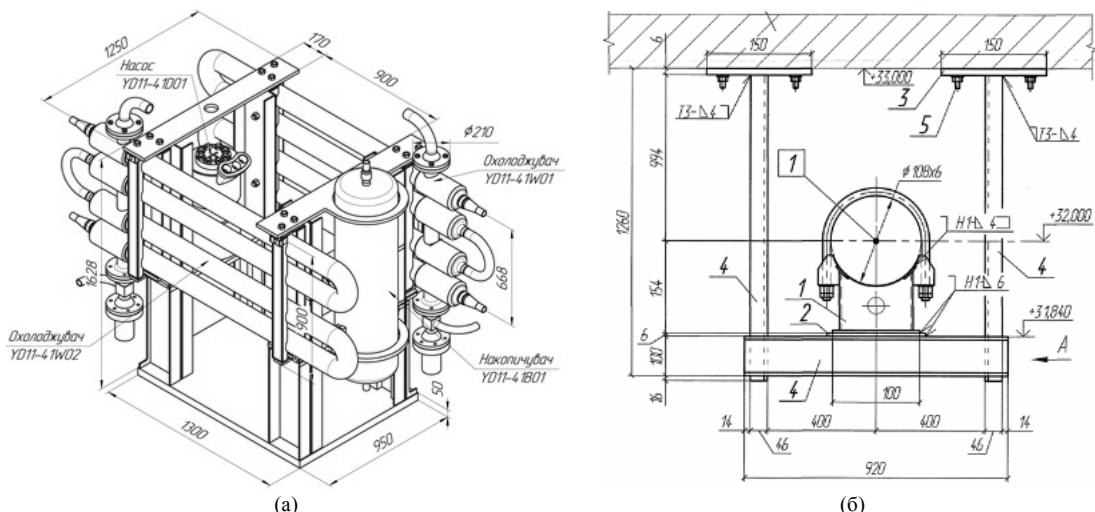


Рис. 1. Приклади опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків АЕС

Під час експлуатації опорні конструкції піддані циклічним навантаженням як з боку обладнання та трубопроводів, що на них встановлені, так і з боку оточуючого середовища. Отже, витривалість визначає можливий строк їх безпечної експлуатації з погляду накопичення пошкоджень від втоми. Даний аспект набуває особливої актуальності з урахуванням того, що наразі більшість енергоблоків АЕС України вже вичерпали свій проєктний строк експлуатації та знаходяться на етапі довгострокової експлуатації (ДСЕ). В межах підготовки енергоблоку АЕС до ДСЕ зазвичай постає питання щодо необхідності збільшення допустимої кількості циклів навантаження його конструкцій та елементів. Можливість такого збільшення обґрунтовується саме результатами розрахунків на витривалість з урахуванням прогнозованої (збільшеної) кількості циклів навантажень, які можуть відбутися протягом ДСЕ енергоблоку АЕС.

З одного боку, оцінка витривалості опорних конструкцій має здійснюватися у відповідності до державних будівельних норм (ДБН). Водночас, стосовно опорних конструкцій пряме використання підходів ДБН до розрахунків витривалості є недостатньо коректним та прийнятним, оскільки їх положення орієнтовані на традиційні сталеві конструкції, які піддані стандартним навантаженням і впливам та не враховують існуючі особливі умови експлуатації опорних конструкцій, а також ступень їх відповідальності щодо забезпечення ядерної та радіаційної безпеки.

З іншого боку, нормативно-правові акти з ядерної та радіаційної безпеки не містять технічних вимог до розрахунків витривалості опорних конструкцій. Такий підхід обумовлений сучасною концепцією розвитку нормативно-правової бази України щодо забезпечення безпеки АЕС, яка передбачає розробку та впровадження нормативно-правових актів, що містять загальні регулюючі вимоги.

Питанням розрахунків витривалості та вирішення температурних задач для конструкцій присвячена низка наукових досліджень та публікацій (див. наприклад: [1], [2], [3], [4]). Втім, існуючі дослідження загалом консолідує те, що вони орієнтовані на традиційні конструкції, які піддані стандартним навантаженням і впливам, а температурні задачі загалом вирішуються для випадку пожежі.

Отже, необхідно констатувати, що аспекти розрахунків витривалості опорних конструкцій з урахуванням особливих умов експлуатації, а також їх відповідальності щодо забезпечення ядерної та радіаційної безпеки не розкриті в достатній мірі як нормативно-методичним забезпеченням, так і науковими дослідженнями та публікаціями.

На підставі викладеного вище, необхідно відзначити, що актуальним постає дослідження дійсної роботи опорних конструкцій під час циклічних навантажень з урахуванням особливих умов їх експлуатації. В якості першого кроку цього дослідження вбачається доцільною розробка загальних принципів оцінки витривалості опорних конструкцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації, а також ступеню їх відповідальності щодо забезпечення ядерної та радіаційної безпеки.

Особливі умови експлуатації опорних конструкцій. Опорні конструкції працюють в усіх проєктних режимах експлуатації енергоблоку АЕС [5], зокрема: нормальна експлуатація (НЕ), порушення нормальної експлуатації (ПНЕ) та проєктна аварія (ПА). В [5] встановлені такі визначення цих понять: НЕ – експлуатація АЕС у визначених проєктом експлуатаційних межах і умовах; ПНЕ – подія в роботі АЕС, під час якої сталося відхилення від установлених експлуатаційних меж і умов, яке не призвело до аварійної ситуації; ПА – аварія, для якої проєктом АЕС визначені вихідні (початкові) події і кінцеві стани та передбачені системи безпеки, що забезпечують з урахуванням принципу одиначної відмови системи (каналу системи) безпеки або однієї додаткової незалежної від вихідної (початкової) події помилки, обмеження її наслідків установленими межами.

Важливим аспектом для визначення вимог до елементів енергоблоків АЕС (в тому числі до розглядуваних опорних конструкцій) є коректна оцінка ступеня їх відповідальності щодо забезпечення ядерної та радіаційної безпеки АЕС. Втім, не всі елементи енергоблоків АЕС в рівному ступеню важливі для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки. Тому не доцільно встановлювати для всіх елементів АЕС єдині вимоги до їх безпеки. З урахуванням викладеного, з погляду впливу на безпеку АЕС документом [5] її елементи поділяються на чотири класи

безпеки. При тому, до класів безпеки 1, 2 та 3 відносяться елементи, що впливають на безпеку АЕС, а до класу 4 – елементи, що не впливають на безпеку АЕС.

Під час експлуатації енергоблоку АЕС в будь-якому проєктному режимі на опорні конструкції передаються навантаження (постійні, змінні тривалі, змінні короточасні, епізодичні) від елементів, які на них встановлені. Параметри внутрішнього середовища обладнання та трубопроводів, які встановлені на опорних конструкціях, під час експлуатації енергоблоку АЕС можуть змінюватися у широкому діапазоні значень, наприклад:

- тиск може змінюється від атмосферного та гідростатичного до пари десятків мегапаскаль;
- температура – від «кімнатної» до декількох сотень градусів Цельсія;
- вагові навантаження від внутрішнього середовища – від значень, що відповідають вазі пари, до значень, що відповідають вазі води.

Номенклатура проєктних режимів експлуатації енергоблоку АЕС, а також їх допустима кількість встановлюються технологічним регламентом безпечної експлуатації[6]. При тому, не допускається експлуатація енергоблоку АЕС у випадку перевищення допустимої кількості циклів навантажень для будь-якого хоч одного проєктного режиму експлуатації.

Опорні конструкції розташовуються як в герметичній частині реакторного відділення енергоблоку АЕС, так і в не герметичній. Внутрішньоцехове середовище герметичної частини реакторного відділення характеризується такими основними параметрами: номінальна температура, температурний градієнт, абсолютний тиск, відносна вологість, об'ємна активність та потужність поглиненої дози. В різних режимах експлуатації енергоблоку АЕС вказані параметри можуть знаходитися в різних діапазонах, зокрема[7]:

- номінальна температура: від 15°C до 150°C;
- абсолютний тиск: від 0,083 МПа до 0,49 МПа;
- відносна вологість: від 90% до 100%;
- об'ємна активність: від $7,4 \cdot 10^7$ Бк/м³ до $4,68 \cdot 10^{13}$ Бк/м³;
- потужність поглиненої дози: до 10³ Гр/годину.

На результати оцінки витривалості суттєвий вплив буде мати температурний градієнт, який може виникати в герметичних та не герметичних приміщеннях, де розташовані опорні конструкції, в різних режимах експлуатації енергоблоку АЕС, оскільки температурний градієнт обумовлює появу додаткових температурних напружень в опорних конструкціях.

На рис. 2 згідно [8] представлені приклади можливих значень температур в різних герметичних та не герметичних приміщеннях енергоблоку АЕС в залежності від часу для вихідних подій «Двосторонній розрив головного циркуляційного трубопроводу» (рис. 2, а) та «Розрив паропроводу за межами герметичного об'єму» (рис. 2 б). Зазначені вихідні події відносяться до режиму експлуатації енергоблоку АЕС «Проектна аварія».

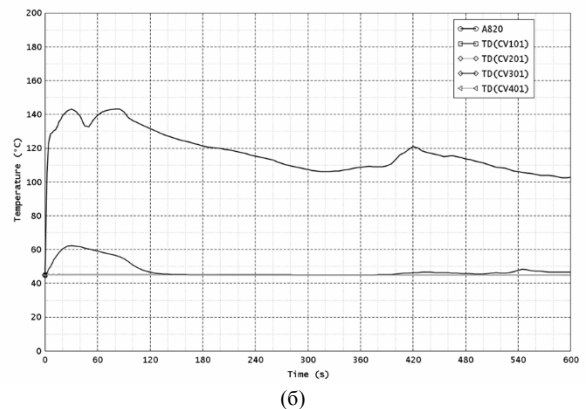
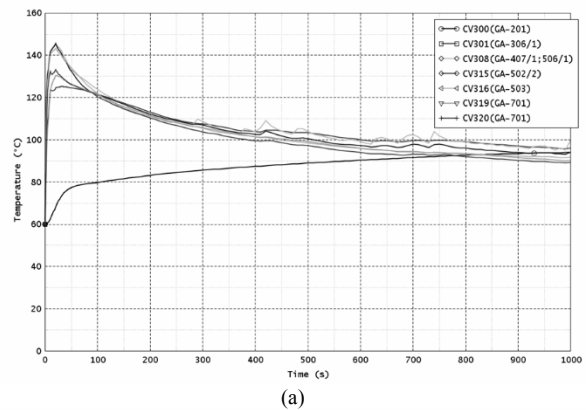


Рис. 2. Приклади значень температур в різних герметичних (а) та негерметичних (б) приміщеннях енергоблоку АЕС в залежності від часу вихідної події

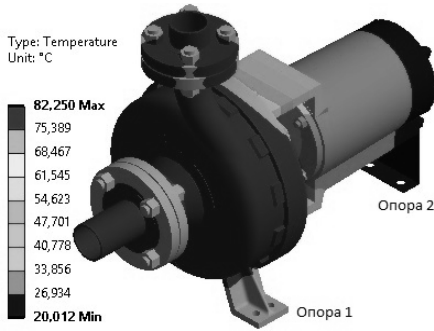


Рис. 3. Розподіл температурних полів елементів насосу борного концентрату під час НЕ

Як видно з рис. 3, під час НЕ:

– опора 1 працює в умовах неоднорідного розподілу температур на різних ділянках конструкції, а саме: одна частина опори піддана температурним навантаженням до близько 82°C, а інша частина – до близько 68°C;

– опора 2 працює в умовах однорідного розподілу температур, значення якої складає близько 27°C.

Отже, опорні конструкції одного елемента енергоблоку АЕС можуть працювати в різних умовах з погляду оцінки витривалості.

Існуючі підходи до оцінки витривалості сталевих конструкцій згідно національних та

європейських будівельних норм. Згідно ДБН В 2.6-198:2014 [10] сталеві конструкції та елементи, які сприймають багатократні змінні навантаження з кількістю циклів навантажень 10^5 і більше, необхідно перевіряти розрахунком на витривалість. До конструкцій такого типу ДБН В 2.6-198:2014 [10] відноситься: балки кранових колій, балки робочих майданчиків, елементи конструкцій бункерних і розвантажувальних естакад, конструкції, на яких встановлені двигуни, конструкції висотних споруд (антени, димові труби тощо), підйомно-транспортні споруди та інші конструкції, що сприймають змінні навантаження.

У випадку якщо сталева конструкція сприймає навантаження з кількістю циклів навантажень меншою 10^5 , ДБН В 2.6-198:2014 [10] встановлює лише загальну вимогу до її проектування, а саме: проектування необхідно здійснювати із застосуванням конструктивних рішень, що виключають значну концентрацію напружень.

Розрахунок сталевих конструкцій на витривалість виконують у формі оцінювання строку експлуатації (Т), за якого виконується така умова міцності:

$$\gamma_n \cdot a_T \leq 1, \quad (1)$$

де γ_n – коефіцієнт надійності за відповідальністю, a_T – накопичене пошкодження від утоми за строк експлуатації Т, яке визначається за формулою:

$$a_T = \sum_{i=1}^j \frac{n_i}{N_i}, \quad (2)$$

де j – кількість типових режимів, n_i – кількість циклів навантажень в групах типових режимів, N_i – гранично-допустима кількість циклів навантажень в групах типових режимів. В свою чергу N_i визначається за таким співвідношенням:

$$N_i = \frac{A_p \cdot 10^3}{\ln \left[\frac{2\sigma_{a,i}}{(1-\rho_i) \cdot R_{vi}} \right]} - B_p \cdot 10^3, \quad (3)$$

де A_p , B_p – параметри, що визначаються згідно з таблицею Т.2 ДБН В 2.6-198:2014 [1], R_{vi} – розрахункова межа витривалості розрахункового перерізу i -го типового проектного режиму навантаження, ρ_i – коефіцієнт асиметрії напружень.

Під час оцінки витривалості враховуються всі значення напружень з амплітудою $\sigma_{a,i}$, які відповідають нерівності $\frac{2\sigma_{a,i}}{(1-\rho_i)} > R_{vi}$.

В Європі для проектування та розрахунків сталевих конструкцій розроблена група кодів Єврокод 3 «Проектування сталевих конструкцій» до складу якої, серед інших, входить документ EN 1993-1-9 [11], що присвячений розрахункам на витривалість. EN 1993-1-9 [11] встановлює методи для оцінки витривалості елементів сталевих конструкцій, з'єднань і вузлів,

що піддаються впливу втомних навантажень на підставі оцінки витривалості за кривими витривалості $\Delta\sigma_R - N$. При тому, витривалість, що розглядається в EN 1993-1-9 [11] стосується сталевих конструкцій, які працюють, зокрема за нормальних атмосферних умов, та мікроструктурні пошкодження від високої температури (більше 150°C) не розглядаються.

EN 1993-1-9 [11] загалом визначає та встановлює:

- основні вимоги до оцінки витривалості;
- методи оцінки витривалості (метод працездатності з пошкодженнями, метод безпечного ресурсу);
- підходи до розрахунку напружень;
- підходи до визначення параметрів втомного навантаження та умови втомної міцності тощо.

Загалом необхідно відзначити, що EN 1993-1-9 [11] в порівнянні із ДБН В.2.6-198:2014 [10] містить більш деталізований опис підходів та вимог до оцінки витривалості сталевих конструкцій.

Узагальнюючи результати аналізу державних та європейських будівельних норм стосовно оцінки витривалості сталевих конструкцій необхідно відзначити, що регламентовані ними підходи не враховують особливі умови експлуатації та ступень відповідальності опорних конструкцій щодо забезпечення безпеки АЕС.

Основні передумови розробки загальних принципів оцінки витривалості. Загальні підходи до оцінки безпеки конструкцій енергоблоків АЕС з урахуванням особливих умов їх експлуатації запропоновані нами в [12], зокрема: в якості основних технічних прийомів та теоретичних засад доцільно прийняти положення ДБН В.2.6-198:2014 [10], ДБН В.1.2-2:2006 [13], ДБН В.1.2-14:2018 [14]. Врахування особливих умов експлуатації опорних конструкцій для оцінки їх витривалості здійснюватиметься шляхом:

- уточнення або розширення відповідних положень вказаних державних будівельних норм з урахуванням вимог норм і правил з ядерної та радіаційної безпеки;
- введення спеціальних коефіцієнтів стосовно значень навантажень і впливів, а також спеціальних вимог до складання послідовностей циклів навантажень, встановлення спеціальних критеріїв відповідних величин, введення додаткових коефіцієнтів запасу міцності тощо.

Під час оцінки витривалості опорних конструкцій необхідним є дотримання консервативного підходу, відповідно до якого для параметрів і характеристик опорних конструкцій приймаються значення і межі, які явно призводять до більш несприятливих результатів.

В атомній енергетиці для оцінки витривалості елементів конструкцій використовується лінійна гіпотеза накопичення пошкоджень Пальмгрена-Майнера. Отже, розробку загальних принципів оцінки витривалості доцільно будувати на підставі саме цієї гіпотези.

Вказані підходи забезпечують врахування апробованої багаторічної практики проектування та оцінки безпеки конструкцій енергоблоків АЕС, а також положень норм і правил з ядерної та радіаційної безпеки.

Загалом розглядуваний об'єкт уявляє собою єдину просторову систему «обладнання (трубопровід) + опорна конструкція», яка взаємопов'язано працює у всіх проектних режимах експлуатації енергоблоку АЕС. З урахуванням викладеного, вимоги до витривалості опорних конструкцій (номенклатура режимів експлуатації, їх кількість, моделі накопичення пошкоджуваності тощо) мають бути не менш жорсткими ніж вимоги до витривалості обладнання (трубопроводу).

Однією з особливостей процесу накопичення пошкоджень в матеріалі є те, що накопичення відбувається локально та неоднорідно по об'єму матеріалу [15]. Це обумовлює необхідність розрахунку пошкоджуваності безпосередньо в обраній точці перерізу опорної конструкції.

Як вже відзначено вище, наразі більшість енергоблоків АЕС України вже вичерпали свій проектний строк експлуатації та знаходяться на етапі ДСЕ. При тому, не допускається експлуатація енергоблоку АЕС у випадку перевищення допустимої кількості циклів навантажень для будь-якого хоч одного проектного режиму експлуатації. Для обґрунтування можливості збільшення допустимої кількості циклів навантажень на період ДСЕ виконуються розрахунки на витривалість конструкцій та елементів енергоблоків АЕС. Отже, під час розробки загальних принципів оцінки витривалості необхідно врахувати також цей аспект.

Під час оцінки витривалості опорних конструкцій перевагу слід надавати підходу, який забезпечує достатній рівень впевненості того, що опорна конструкція працюватиме весь встановлений термін без необхідності проведення регулярних інструментальних контролів стану металу з метою виявлення втомних пошкоджень. Необхідність використання цього підходу обумовлена тим, що утворення локальної тріщини в одній зоні опорної конструкції потенційно може привести до руйнування безпосередньо всієї опорної конструкції. Внаслідок цієї події обладнання або трубопровід, що встановлені на такій опорній конструкції, потенційно можуть не мати можливість виконати свої функції в повному обсязі, що в свою чергу негативно вплине на ядерну та радіаційну безпеку енергоблоку АЕС. Одним із шляхів досягнення мети вказаного підходу може бути введення додаткових коефіцієнтів запасів міцності за напруженнями та кількістю циклів навантажень стосовно кривої втоми.

Загальні принципи оцінки витривалості опорних конструкцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації. За результатами виконаних оглядів та аналізів можна сформулювати такі загальні принципи оцінки витривалості опорних конструкцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації:

1) з погляду потенційного негативного впливу відмови (невиконання своїх функцій в повному обсязі) опорних конструкцій на ядерну та радіаційну безпеку енергоблоку АЕС необхідно відносити їх до категорії відповідальності «А» та класу наслідків СС3;

2) загалом розрахунок на витривалість необхідно проводити для зон опорних конструкцій в яких виникають підвищені циклічні місцеві напруження внаслідок:

- концентраторів напружень (отвори, різка зміна геометрії тощо);
- прикладання зосереджених навантажень;
- крайового ефекту;
- з'єднання сталей з різними модулями пружності та коефіцієнтами температурного розширення;

- градієнту температур.

3) для розрахунку витривалості опорних конструкцій необхідно використовувати скінчено-елементні програмні комплекси. При тому, під час побудови скінчено-елементної моделі необхідно застосовувати об'ємні скінчені елементи з метою визначення пошкоджуваності безпосередньо в обраній точці розрахункового перерізу;

4) у розрахункових ситуаціях, в яких властивості матеріалів опорних конструкцій можуть змінюватися внаслідок впливу навколишнього середовища (зокрема, температури), їх розрахункове значення повинно встановлюватися з урахуванням таких змін;

5) під час оцінки витривалості опорних конструкцій мають бути враховані усі проєктні режими експлуатації енергоблоку АЕС, серед яких:

- НЕ (наприклад: плановий розігрів реакторної установки з «холодного» стану при значенні швидкості не більше 20°C/годину; гідравлічні випробування (ГВ); хибне спрацювання аварійного захисту реактора; включення головного циркуляційного насоса на петлі головного циркуляційного контуру, яка раніше не працювала; опробування пасивного вузла системи аварійного охолодження активної зони реактора; планове розхолодження до «холодного» стану при значенні швидкості розхолодження не більше 30°C/годину тощо [6]);

- ПНЕ (наприклад: повне знеструмлення АЕС; припинення подачі живильної води в парогенератор; режим течі парогенератора (розрив теплообмінної трубки); режим роботи при порушенні тепловідведення з герметичного об'єму тощо [6]);

- ПА (наприклад: розрив трубопроводів першого контуру діаметром Ду менше 100 мм; режим великої течі: розрив трубопроводу першого контуру діаметром Ду більше 100 мм, включаючи Ду 850; розрив паропроводу парогенератора; розрив трубопроводу живильної води парогенератора; розрив колектора паропроводів «гострої» пари тощо [6]);

6) до навантажень на опорні конструкції, що враховуються під час оцінки їх витривалості, загалом слід відносити:

- постійні: власна вага опорної конструкції;
- змінні тривалі: вага обладнання/трубопроводу, вага теплової ізоляції обладнання/трубопроводу, навантаження від середовища (пар, вода) обладнання/трубопроводу

під час НЕ, температурні навантаження в режимі НЕ від встановлених обладнання/трубопроводів;

– змінні короточасні: навантаження від середовища (пар, вода) обладнання/трубопроводу під час ПНЕ та ГВ, температурні навантаження в режимах ПНЕ та ГВ від встановлених обладнання/трубопроводів;

– епізодичні: навантаження від середовища (пар, вода, пароводяна суміш) обладнання/трубопроводу під час ПА, температурні навантаження в режимі ПА від встановлених обладнання/трубопроводів, температурні навантаження в режимі ПА від внутрішньоцехового середовища;

7) номенклатура вказаних постійних, змінних тривалих та короточасних, а також епізодичних навантажень в загальному випадку обумовлює необхідність врахування під час оцінки витривалості опорних конструкцій таких розрахункових напружень: напруження розтягу/стискання (σ_+ / σ_-), загальні згинні (σ_b), місцеві згинні (σ_{bloc}), загальні температурні (σ_T), місцеві температурні (σ_{Tloc}). Значення розрахункових напружень повинні визначатися з урахуванням концентрації напружень;

8) розрахунок на витривалість нових опорних конструкцій виконується у формі оцінювання довговічності T (строку експлуатації), за якої виконується умова міцності, записана у вигляді

$$a_T = \left(\gamma_{nHE} \sum_{i=1}^j a_{T_{HE_i}} + \gamma_{nPNE} \sum_{k=1}^m a_{T_{PNE_k}} + \gamma_{nPA} \sum_{r=1}^s a_{T_{PA_r}} \right) \leq 1, \quad (4)$$

де a_T – сумарне накопичене в опорній конструкції пошкодження від втоми за строк експлуатації T , γ_{nHE} , γ_{nPNE} , γ_{nPA} – коефіцієнти надійності за відповідальністю опорних

конструкцій в режимах НЕ, ПНЕ та ПА відповідно; $\sum_{i=1}^j a_{T_{HE_i}}$, $\sum_{k=1}^m a_{T_{PNE_k}}$, $\sum_{r=1}^s a_{T_{PA_r}}$ – накопичене пошкодження від втоми за строк експлуатації T в режимах НЕ, ПНЕ та ПА відповідно.

При тому, значення коефіцієнтів надійності за відповідальністю опорних конструкцій в режимах НЕ, ПНЕ та ПА мають бути різними, тобто $\gamma_{nHE} \neq \gamma_{nPNE} \neq \gamma_{nPA}$;

9) під час оцінки витривалості існуючих опорних конструкцій енергоблоків АЕС, що знаходяться на етапі ДСЕ, повинна бути врахована як фактична кількість циклів навантажень, яка вже відбулась за попереднього строку експлуатації, так і прогнозна кількість циклів навантажень на період ДСЕ енергоблоку АЕС. З урахуванням викладеного, умова міцності (4) набуває вигляду (5)

$$a_{T_{(факт+ДСЕ)}} = \left(\gamma_{nHE} \sum_{i=1}^j (a_{T_{HE_{(факт)_i}}} + a_{T_{HE_{(ДСЕ)_i}}}) + \gamma_{nPNE} \sum_{k=1}^m (a_{T_{PNE_{(факт)_k}}} + a_{T_{PNE_{(ДСЕ)_k}}}) + \gamma_{nPA} \sum_{r=1}^s (a_{T_{PA_{(факт)_r}}} + a_{T_{PA_{(ДСЕ)_r}}}) \right) \leq 1, \quad (5)$$

де $a_{T_{(факт+ДСЕ)}}$ – сумарне накопичене в опорній конструкції пошкодження від втоми за фактичний строк експлуатації та під час прогнозного терміну ДСЕ енергоблоку АЕС; $a_{T_{HE_{(факт)_i}}}$, $a_{T_{PNE_{(факт)_k}}}$, $a_{T_{PA_{(факт)_r}}}$ – накопичене пошкодження від втоми за фактичний строк експлуатації в режимах НЕ, ПНЕ та ПА відповідно; $a_{T_{HE_{(ДСЕ)_i}}}$, $a_{T_{PNE_{(ДСЕ)_k}}}$, $a_{T_{PA_{(ДСЕ)_r}}}$ – накопичене пошкодження від втоми за прогнозний термін ДСЕ енергоблоку АЕС в режимах НЕ, ПНЕ та ПА відповідно.

10) у випадку коли сумарна накопичена пошкоджуваність опорних конструкцій від навантажень без урахування сейсмічних впливів перевищує значення 0,8 в оцінках витривалості необхідно врахувати сполучення навантажень «НЕ + проектний землетрус» з кількістю циклів

рівною 50. Методика врахування сейсмічних впливів на опорні конструкції представлена нами в роботах [12], [16];

11) під час оцінки витривалості опорних конструкцій повинна бути врахована кількість циклів навантажень режимів НЕ, ПНЕ та ПА, яка є не меншою ніж кількість циклів навантажень, врахована при оцінці витривалості обладнання (трубопроводу), що розташоване на розглядуваних опорних конструкціях;

12) під час визначення допустимої кількості циклів навантажень пропонується стосовно кривої втоми використовувати додаткові коефіцієнти запасів міцності за напруженнями (γ_σ) та кількістю циклів навантажень (γ_N);

13) послідовність циклів навантажень, яка використовується під час оцінки витривалості опорних конструкцій, повинна враховувати дійсні умови їх роботи. При тому, під час складання послідовності пропонується дотримуватися таких правил:

– послідовність складається з використанням фізично можливих блоків навантажень в умовах експлуатації енергоблоку АЕС;

– необхідно прагнути до створення такої послідовності циклів навантажень, за якої зміна механічних та температурних навантажень викликає мінімальні та максимальні напруження в розглядуваній зоні опорної конструкції;

14) декілька експлуатаційних проектних режимів енергоблоку АЕС з кількістю циклів навантажень $n_1, n_2, n_3 \dots n_i$ можуть бути об'єднані в один розрахунковий режим із загальною кількістю циклів $n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_i$;

15) важливим фактором накопичення деградації сталі під час змінних навантажень є фактор значення асиметрії циклу і рівень пружно-пластичних деформацій. Це пов'язано насамперед із урахуванням ефекту Баушингера (зменшення міцності сталі під час розвитку обмежених пластичних деформацій). Цей підхід може бути реалізований при достатніх дослідженнях через уточнене значення коефіцієнта надійності моделі.

Перспективні напрями досліджень. Викладене вище вказує на те, що проблема оцінки витривалості опорних конструкцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації, а також ступеню їх відповідальності за ядерну та радіаційну безпеку енергоблоку АЕС наразі не є достатньо вирішеною та вивченою і вимагає подальших досліджень, зокрема у таких основних напрямках:

– дослідження дійсної роботи опорних конструкцій під час циклічних навантажень з урахуванням особливих умов їх експлуатації;

– розробка пропозицій та їх наукове обґрунтування щодо значень коефіцієнтів надійності за відповідальністю опорних конструкцій в режимах НЕ, ПНЕ та ПА ($\gamma_{н\text{НЕ}}$, $\gamma_{н\text{ПНЕ}}$ та $\gamma_{н\text{ПА}}$ відповідно) з урахуванням ступеню їх відповідальності за ядерну та радіаційну безпеку енергоблоку АЕС;

– розробка пропозицій та їх наукове обґрунтування щодо додаткових коефіцієнтів запасів міцності за напруженнями (γ_σ) та кількістю циклів навантажень (γ_N) стосовно кривої втоми під час оцінки витривалості опорних конструкцій;

– і наостанок розробка методики оцінки витривалості опорних конструкцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації, а також ступеню їх відповідальності за ядерну та радіаційну безпеку енергоблоку АЕС.

Висновок. На поточний момент аспекти розрахунків витривалості опорних конструкцій з урахуванням особливих умов експлуатації, а також ступеню їх відповідальності щодо забезпечення ядерної та радіаційної безпеки не розкриті в достатній мірі як нормативно-методичним забезпеченням, так і науковими дослідженнями. З огляду на зазначене актуальним постає дослідження дійсної роботи опорних конструкцій під час циклічних навантажень з урахуванням особливих умов їх експлуатації. В якості першого кроку на шляху вирішення виявленої проблеми розроблені та сформульовані загальні принципи оцінки витривалості опорних конструкцій з урахуванням окреслених аспектів. В доповнення до загальних принципів на підставі виконаних критичних оглядів та аналізів визначені перспективні основні напрями досліджень витривалості опорних конструкцій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Нужний В., Дауров М.* Розрахунок баштової споруди на витривалість з врахуванням вихрового збудження // Будівельні конструкції. Теорія і практика.–2024.–№ 14. – С. 102–113. Doi:10.32347/2522-4182.14.2024.102-113.
2. *Nuzhnyi, V., Bilyk, S.* Revealing the influence of wind vortex shedding on the stressed-strained state of steel tower structures with solid cross-section. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024.–3(1 (129)). P. 69–79. Doi: 10.15587/1729-4061.2024.306181.
3. *S. Bilyk, O. Bashynska, O. Bashynskiy.* Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2022. – № 108. – P. 182–202. Doi:10.32347/2410-2547.2022.108.189- 202.
4. *Барабаш М., Ковальов А., Ромашикіна М.* Розрахункове оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних будівельних конструкцій засобами ПК «ЛІРА-САПР» // Будівельні конструкції. Теорія і практика. – 2023. – № 12. – С. 53–64. Doi: 10.32347/2522-4182.12.2023.53-64.
5. НП 306.2.245-2024 Загальні положення безпеки атомних станцій. Затверджено наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 19 листопада 2007 року № 162 (в редакції наказу Державної інспекції ядерного регулювання України від 04 березня 2024 року № 195).
6. Типовий технологічний регламент безпечної експлуатації енергоблоків АЕС з реакторами ВВЕР-1000. ДП «НАЕК «Енергоатом», Київ: 2022. – 328 с.
7. *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.
8. Перелік вихідних подій, в результаті яких виникають «жорсткі» умови навколишнього середовища. Кваліфікація обладнання. Енергоблок № 3. Варш: 2024. – 141 с.
9. Оцінка технічного стану та продовження терміну експлуатації насосів РВ енергоблоку № 6 ВП ЗАЕС. Відокремлений підрозділ «Науково-технічний центр» ДП «НАЕК «Енергоатом». Київ: 2022. – 337 с.
10. ДБН В 2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною № 1 – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – Чинний від 01.01.2015.
11. EN 1993-1-9:2005/AC:2009. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue.
12. *Шугайло О.П., Білик С.І.* Оцінка безпеки сталевих конструкцій енергоблоків атомних станцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2023. – № 111. – С. 113-124. Doi: 10.32347/2410-2547.2023.111.113-124.
13. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – К.: Мінбуд України, 2006. – 60 с. – Чинний від 01.01.2007.
14. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. – К.: Мінрегіонбуд України, 2018. – 36 с. – Чинний від 01.01.2019.
15. Прочность материалов и конструкций / Редкол.: В.Т.Трошенко (отв. ред) и др. – К.: Академперіодика, 2005. – 1088 с.
16. *Шугайло О-р П., Білик С.І.* Розвиток методів оцінки безпеки сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів енергоблоків атомних станцій за сейсмічних навантажень // Ядерна та радіаційна безпека. – 2023. – № 1(97). – С. 20-29. Doi:10.32918/nrs.2023.1(97).03.

REFERENCES

1. *Nuzhnyi V., Daurov M., Rozrakhunok bashtovoi sporudy na vytryvalist z vrakhuvanniam vykhrovoho zbudzhennia (Analysis of tower structure for fatigue taking into account wind vortex shedding) // Building constructions. Theory and Practice. – 2024. – № 14. – P. 102–113. Doi:10.32347/2522-4182.14.2024.102-113. – Ukr.*
2. *Nuzhnyi, V., Bilyk, S.* Revealing the influence of wind vortex shedding on the stressed-strained state of steel tower structures with solid cross-section. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024.–3(1 (129)). P. 69–79. Doi: 10.15587/1729-4061.2024.306181.
3. *S. Bilyk, O. Bashynska, O. Bashynskiy.* Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2022. – № 108. – P. 182-202. Doi:10.32347/2410-2547.2022.108.189- 202.
4. *Barabash M., Kovaliov A., Romashkina M., Rozrakhunkove otsiniuvannia vohnestiiikosti vohnezakhyshchennykh zalizobetonnykh budivelnnykh konstruktstii zasobamy PK «LIRA-SAPR» (Calculated assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete building structures by PC LIRA-SAPR tools) // Building constructions. Theory and Practice. – 2023. – № 12. – P. 53-64. Doi: 10.32347/2522-4182.12.2023.53-64. – Ukr.*
5. NP 306.2.245-2024 Zahalni polozhennia bezpeky atomnykh stantsii (General Provisions of Safety of Nuclear Plants). Approved by order No. 162 of the State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine on 19.11.2007 (in editions by order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine No. 195 of 04.03.2024).
6. Typovyi tekhnolohichniy rehlement bezpechnoi ekspluatatsii enerhoblokov AES z reaktoramy VVER-1000 (Standard technological regulations for the safe operation of NPP power units with VVER-1000 reactors). SE «NNEGC «Energoatom», Kyiv, 2022. – 328 p.
7. *Shugaylo O-r P., Bilyk S. I.* Vplyv zminy tekhnolohichnykh umov ekspluatatsii stalevykh opornykh konstruktstii obladnannia ta truboprovodiv enerhoblokov atomnykh stantsii na yikh seismichnu mitsnist (Impact of changes in process conditions for operation of steel support structures of nuclear power plant equipment and piping on their seismic resistance) // Nuclear and Radiation Safety. – 2022. – № 1(93). – P. 62-70. Doi: 10.32918/nrs.2021.1(93).07. – Ukr.
8. Perelik vykhidnykh podii, vrezultatyakykhvnykaiut «zhorstki» umovynavkolyshnohoseredovyshcha. Kvalifikatsiia obladnannia. Enerhoblok № 3 (A list of initial events resulting in "harsh" environmental conditions. Equipment qualification. Unit No. 3.). Varash: 2024. – 141 p.
9. Otsinka tekhnichnoho stanu ta prodovzhennia terminu ekspluatatsii nasosiv RV enerhobloku № 6 VP ZAES (Technical condition assessment and extension term operation of the pumps of RB unit No. 6 ZNPP). Separate subdivision «Scientific

- and Technical Center» SE «NNEGС «Energoatom», Kyiv: 2022. – 337 p.
10. DBN V 2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannya. Zi zminoiu № 1 (Steel structures. Design standards). – K.: Minrehion Ukrainy, 2014. – 199 p. – Chynnyi vid 01.01.2015. – Ukr.
 11. EN 1993-1-9:2005/AC:2009. Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue.
 12. *Shugaylo O.P., Bilyk S.I.*, Otsinka bezpeky stalevykh konstruktsii enerhoblokov atomnykh stantsii z urakhuvanniam osoblyvykh umov yikh ekspluatatsii (Safety assessment of the steel structures of nuclear power plants units considering special operation conditions) // Strength of Materials and Theory of Structures – 2023. – № 111. – P. 113-124. Doi: 10.32347/2410-2547.2023.111.113-124. – Ukr.
 13. DBN V.1.2-2:2006. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'iektiv. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannya (The system for ensuring the reliability and safety of construction objects. Loads and hazards. Design standards.). – K.: Minbud Ukrainy, 2006. – 60 p. – Chynnyi vid 01.01.2007. – Ukr.
 14. DBN V.1.2-14:2018. Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnykh ob'iektiv. Zahalni pryntsyipy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktyvnoi bezpeky budivel i sporud (The system for ensuring the reliability and safety of construction objects. General principles of ensuring reliability and structural safety of buildings and structures). – K.: Minrehionbud Ukrainy, 2018. – 36 p. – Chynnyi vid 01.01.2019. – Ukr.
 15. Prochnost materyalov y konstruktsiyi (Strength of materials and constructions) / Ed.: V.T. Troshchenko (responsible editor) and other. – K.: Akademperryodyka, 2005. – 1088 p.
 16. *Shugaylo O-r P., Bilyk S. I.* Rozvytok metodiv otsinky bezpeky stalevykh opornykh konstruktsii obladnannia i truboprovodiv enerhoblokov atomnykh stantsii za seismichnykh navantazhen (Development of safety assessment methods for steel support structures of nuclear power plant equipment and piping under seismic loads) // Nuclear and Radiation Safety. – 2023. – № 1(97). – P. 20-29. Doi:10.32918/nrs.2023.1(97).03. – Ukr.

Стаття надійшла 01.10.2024

Шугайло О.П., Білик С.І.

РОЗРОБКА ЗАГАЛЬНИХ ПРИНЦИПІВ ОЦІНКИ ВИТРИВАЛОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕНЕРГОБЛОКІВ АТОМНИХ СТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВИХ УМОВ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Витривалість сталевих конструкцій енергоблоків атомних станцій визначає можливий строк їх безпечної експлуатації з погляду накопичення пошкоджень від втоми. Ці конструкції знаходяться в особливих умовах експлуатації, серед яких підвищена температура оточуючого середовища, епізодичні температурні навантаження із суттєвим градієнтом температур тощо. Достовірна оцінка витривалості сталевих конструкцій набуває особливої актуальності через те, що більшість енергоблоків атомних станцій України вже вичерпали свій проєктний строк експлуатації та знаходяться на етапі довгострокової експлуатації. Водночас, з погляду оцінки витривалості державні будівельні норми орієнтовані на традиційні сталеві конструкції, які піддані стандартним навантаженням і впливам, та не враховують вказані особливі умови експлуатації. Нормативно-правові акти з ядерної та радіаційної безпеки не містять технічних вимог до розрахунків витривалості сталевих конструкцій та встановлюють лише загальні регулюючі вимоги. У статті розроблені та сформульовані загальні принципи оцінки витривалості сталевих конструкцій енергоблоків атомних станцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації, а також ступеню їх відповідальності щодо забезпечення ядерної та радіаційної безпеки.

Ключові слова: сталеві конструкції, температурні навантаження, температурні напруження, епізодичні навантаження, міцність, втома, накопичене пошкодження, скінчено-елементні моделі.

Shugaylo O.P., Bilyk S.I.

DEVELOPMENT OF GENERAL PRINCIPLES OF FATIGUE STRENGTH ASSESSMENT STEEL STRUCTURES OF NUCLEAR POWER PLANTS UNITS CONSIDERING SPECIAL OPERATION CONDITIONS

The fatigue strength of the steel structures of nuclear power plants determines the possible period of their safe operation in terms of fatigue damage accumulation. These structures are located in special operation conditions, including elevated temperatures of environmental conditions, episodic temperature loads with a significant temperature gradient, etc. Reliable assessment of the fatigue strength of steel structures is of particular relevance because most units at Ukrainian nuclear power plants have already exhausted their design life and are at the stage of long-term operation. At the same time, in terms of fatigue strength assessment, state building codes are focused on traditional steel structures subjected to standard loads and impacts and do not take into account these special operating conditions. Nuclear and radiation safety regulations do not contain technical requirements for calculating the fatigue strength of steel structures and establish only general regulatory requirements. The article develops and formulates general principles of fatigue strength assessment of steel structures of nuclear power plants, taking into account the special operation conditions, as well as the degree of their responsibility for ensuring nuclear and radiation safety.

Keywords: steel structures, temperature loads, temperature stress, episodic loads, strength, fatigue, damage accumulation, finite element models.

УДК 624.014, 621.039.58

Шугайло О.П., Білик С.І. Розробка загальних принципів оцінки витривалості сталевих конструкцій енергоблоків атомних станцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 113. – С. 45-55.

У статті розроблені та сформульовані загальні принципи оцінки витривалості сталевих конструкцій енергоблоків атомних станцій з урахуванням особливих умов їх експлуатації, а також ступеню їх відповідальності щодо забезпечення ядерної та радіаційної безпеки.

Іл. 3. Бібліогр. 16 назв.

UDC 624.014, 621.039.58

Shugaylo O.P., Bilyk S.I. Development of general principles of fatigue strength assessment steel structures of nuclear power plants units considering special operation conditions // Strength of Materials and Theory of Structures. Scientific-and-technicalcollectedarticles. – К.: КНУБА, 2024. – Issue 113. – P. 45-55.

The article develops and formulates general principles of fatigue strength assessment steel structures of nuclear power plants, taking into account the special operation conditions, as well as the degree of their responsibility for ensuring nuclear and radiation safety.

Figs. 3. Refs. 16

Автор: доктор філософії, начальник відділу кваліфікації обладнання та сейсмостійкості ДП ДНТЦ ЯРБ ШУГАЙЛО Олександр Петрович

Адреса: 03142, Україна, м. Київ, вул. В. Стуса, 35-37, Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки»

Робочий тел.: +38 (044) 422-49-51

E-mail: op_shugaylo@sstc.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1044-0299>

Автор: доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металевих та дерев'яних конструкцій КНУБА БЛИК Сергій Іванович

Адреса: 03037, Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Робочий тел.: +38 (044) 241-54-89

E-mail: bilyk.si@knuba.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8783-5892>