УДК 539.3 Doi: https://doi.org/10.32918/nrs.2020.4(88).03

Результати структурного аналізу поведінки захисної оболонки реакторів типу ВВЕР-1000/В-320 в умовах запроєктної аварії

■ **Ляшенко Лариса Анатоліївна**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9226-9941

■ **Панченко Анатолій Васильович**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5376-2760

■ **Шугайло Олексій Петрович**, канд. техн. наук
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0997-7830

■ **Коляда Маргарита Валентинівна**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки», м. Київ, Україна
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7052-7997

У межах цієї статті розглянуто особливості моделювання системи попереднього напруження захисної оболонки (ЗО) у складі залізобетонних конструкцій ЗО з урахуванням сейсмічних навантажень, а також за параметрів запроєктних аварій (ЗПА). Через складність конструкції ЗО для її розрахунку було застосовано детальну скінчено-елементу модель, що максимально наближено описує реальну роботу конструкції. Розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) ЗО виконаний сучасним програмним комплексом (ПК) «ЛІРА-САПР». На першому етапі проаналізовано результати розрахунку НДС ЗО ВВЕР-1000/В-320 в умовах сполучення навантажень від максимальної проєктної аварії (МПА) та максимального розрахункового землетрусу (МРЗ) й визначено мінімально допустимі зусилля (МДЗ) натягу арматурних канатів (АК). На другому етапі виконано аналіз параметрів ЗПА (тиск та температура), за яких ЗО може втратити свої захисні та локалізуючі функції, проаналізовано результати розрахунків та зроблено відповідні висновки щодо міцності, тримкості ЗО та забезпечення виконання передбачених проєктом її локалізуючих функцій.

Ключові слова: захисна оболонка, запроєктна аварія, важка аварія, розрахунок напружено-деформованого стану, арматурний канат, мінімально допустимі зусилля натягу, локалізуючі функції.

© Ляшенко Л. А., Панченко А. В., Шугайло О-й П., Коляда М. В., 2020

Вступ

Атомна енергетика посідає одне з провідних місць в економіці України та забезпечує важливий напрям національної безпеки – ядерно-енергетичний. На АЕС України експлуатуються установки, серед яких переважну більшість становлять реакторні установки (РУ) типу ВВЕР-1000/В-320, В-302, В-338, але ЗО цих РУ дещо

SSTC NRS ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

розрізняються. У цій статті проаналізовано ЗО для РУ В-320 (Рисунок 1) як найбільш поширену в Україні (11 енергоблоків).

Після аварії на АЕС «Фукусіма-1» за результатами додаткових досліджень сейсмічної небезпеки майданчиків розташування АЕС України встановлено, що фактичний рівень сейсмічного впливу від потенційно небезпечних джерел вдвічі перевищує той, що враховувався в раніше виконаних оцінках, що зафіксовано у технічних рішеннях [1] – [4]. Відповідно, актуальним стає питання переоцінки безпеки елементів і конструкцій із урахуванням нового рівня сейсмічності, і це, зокрема, стосується ЗО та оцінки впливу на поведінку ЗО сполучення навантажень: нормальна експлуатація (НЕ) + проєктна аварія (ПА) + МРЗ. Було виявлено, що це сполучення навантажень найбільш вагомо впливає на забезпечення цілісності ЗО та можливість збереження її захисних функцій і потребує впровадження певних кроків для оцінки цілісності ЗО.

Нещодавні оцінки поточного технічного стану ЗО реакторів типу ВВЕР-1000/В-320 на АЕС України в межах робіт із продовження строку їх експлуатації, виявили необхідність уточнення МДЗ натягу АК системи переднапруження ЗО (СПЗО) та аналізу поведінки ЗО з урахуванням нових отриманих сейсмічних даних і в умовах аварії, зокрема важкої. З визначенням нових значень МДЗ в АК актуальним стало також питання встановлення граничного значення надлишкового тиску та температури в умовах ЗПА, за яких ЗО втрачає свої захисні функції і отримання цього значення є необхідним для його врахування під час виконання імовірнісного аналізу безпеки другого рівня.

Розробка розрахункової моделі ЗО енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 типу В-320 здійснюється не вперше, проте в цій статті наведені результати створення моделі з урахуванням люків, проходок, шлюзів, неоднорідності структури бетону, фактичного

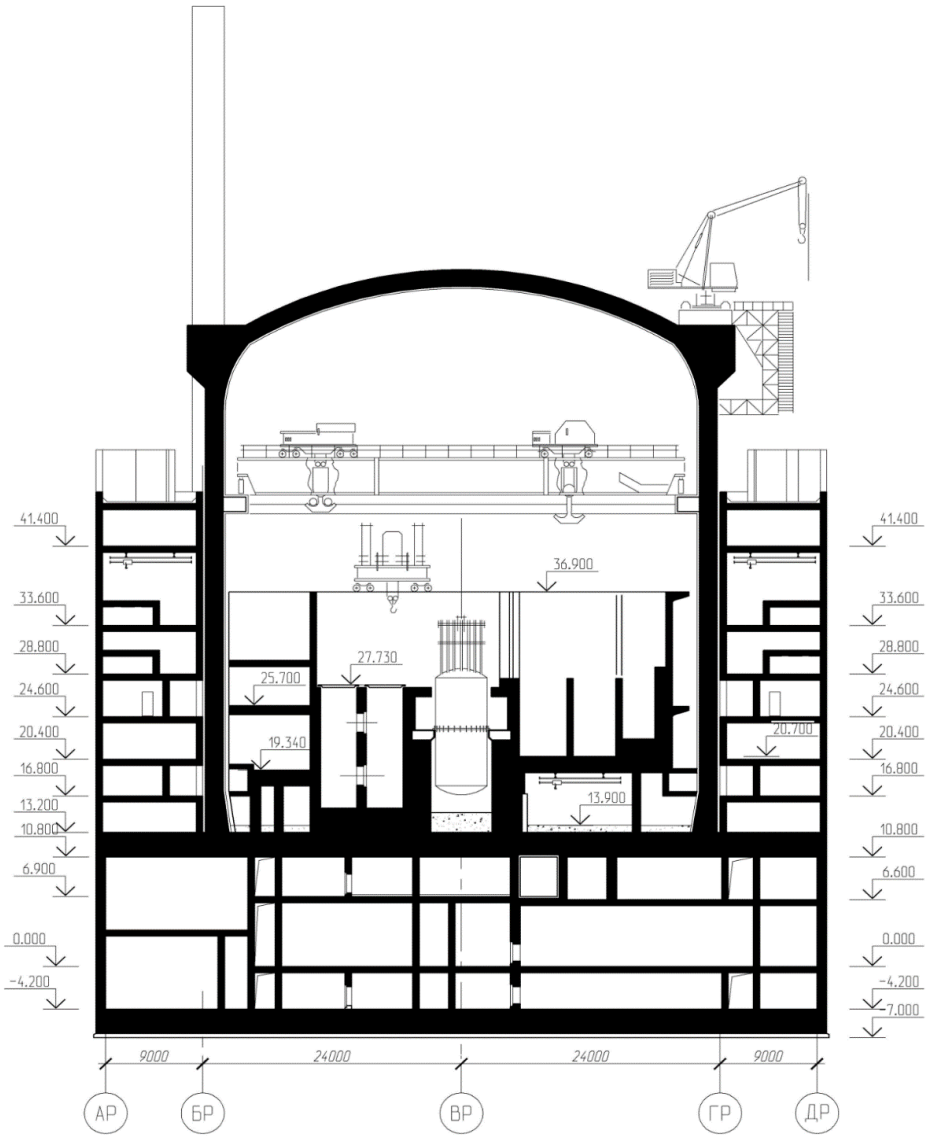

Рисунок 1 – Розріз ЗО по осям АР-ДР

розміщення та натягу АК, задання їх реальної траєкторії, а також врахування втрати зусиль у канатах по довжині. Створення такої моделі ЗО, максимально наближеної до реальної конструкції, є складною науково-технічною задачею. задачею. Необхідно зазначити, що принциповими відмінностями розрахункової моделі ДНТЦ ЯРБ порівняно з іншими розрахунковими моделями є те, що вказана розрахункова модель містить 6-вузлові і 8-вузлові призматичні об'ємні елементи, якими моделюються залізобетонних огороджуючих конструкцій (ЗОК) ЗО і складається з більшої кількості вузлів і скінченних елементів, а саме з 1373318 вузлів і 1970450 скінченних елементів. Розрахунок ЗО виконано сучасним програмним кодом з удосконаленим математичним апаратом розрахунку напружень та переміщень. За результатами верифікації похибка результатів з тестовими задачами становить 3-5 %. У минулих розрахунках ЗО використовувалась значно менша кількість скінченних елементів та давні версії програмних кодів, що давали похибку до 10-20 %. Детальне моделювання з погляду оцінки безпеки дало більш уточнені та коректні результати НДС ЗО.

Дослідження поведінки ЗО, наведене у цій статті, присвячене питанню визначення граничного тиску та температури, за яких можливою є втрата цілісності ЗО під час реалізації сценаріїв, що можуть бути визначені як ЗПА, з урахуванням уточнених значень натягу АК.

Дослідження поведінки ЗО, наведене у цій статті, присвячене питанню визначення граничного тиску та температури, за яких можливою є втрата цілісності ЗО під час реалізації сценаріїв, що можуть бути визначені як ЗПА, з урахуванням уточнених значень натягу АК.

Результати такого дослідження є актуальними для їх врахування під час ухвалення регулюючих рішень щодо можливості довгострокової експлуатації ЗО та забезпечення виконання передбачених проєктом її локалізуючих функцій. Ці складні задачі вирішувались Експлуатуючою організацією протягом останніх 10 років і до їх вирішення, як організація науково-технічної підтримки регулюючого органу з ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ), залучилося Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» (ДНТЦ ЯРБ). У цій статті наведені основні результати власних досліджень, які використані під час проведення державних експертиз ЯРБ на підтримку Державної інспекції ядерного регулювання України (Держатомрегулювання).

Основну увагу цієї статті зосереджено на:

особливостях побудови скінчено-елементної моделі ЗО;

розрахунку ЗО з визначення значень МДЗ в АК;

оцінці тримкості ЗО та визначенні параметрів (тиск та температура), за яких ЗО може втратити свої захисні та локалізуючі функції;

аналізі результатів розрахунків ЗО у разі важких аварій,

та сформовано висновки за вказаними аспектами.

1 Побудова скінчено-елементної моделі ЗО

Конструктивні особливості ЗО доволі докладно описані в таких роботах як [5], [6], [7] тощо, і тому в цій статті не наводяться. Загальний вигляд ЗО наведено на Рисунку 1. Попереднє напруження ЗОК забезпечується сукупністю забезпечується сукупністю АК СПЗО зі стабілізованого високоміцного дроту з гелікоїдально-петлевою траєкторією в циліндрі і ортогонально-петлевою в куполі.

Побудову тривимірної скінчено-елементної комп'ютерної моделі виконано за допомогою ПК «ЛІРА-САПР» [8], який є комп'ютерною системою для структурного аналізу та проєктування. ПК «ЛІРА-САПР» відповідно до СТП 0.41.076-2008 [9] входить до переліку програмних засобів, дозволених Державним підприємством «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» (ДП «НАЕК «Енергоатом») до застосування в аналізах безпеки [10].

Математичний апарат методу скінченних елементів (МСЕ) в межах цього розрахунку реалізований за класичними підходами [11], [12].

Вважається, що вся конструкція розділена на окремі частини. Кожна частина моделюється скінченними елементами (СЕ), а потім окремі частини збираються в одне ціле. Елементи зв'язані разом тільки спільними вузлами. Деформація всередині елемента визначена лінійними комбінаціями вузлових переміщень і передбачуваних функцій (функцій форми). Так, вся внутрішня енергія системи залежить тільки від незалежних вузлових параметрів. Вузлові переміщення утворюють для всієї форми конструкції загальний вектор невідомих Q. На основі відповідного варіаційного принципу можуть бути сформовані умови рівноваги. Це призводить до відомої форми системи рівнянь статичної рівноваги:

$$MQ'' + CQ' + KQ = F(t) - f(t,Q), \qquad (1)$$

де C – матриця демпфування;

M – матриця маси;

Q – переміщення (прирости або загальні переміщення);

Q' – швидкості (перші похідні за часом вектора Q);

Q'' – прискорення (другі похідні за часом вектора Q);

F (t) – вектор внутрішніх зусиль;

SSTC NRS ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

f (t, Q) – незбалансований вектор сил;

K – тангенціальна матриця жорсткості у формі суми елементів матриць

$$K = K_0 + K\sigma + K_{NL}, \quad (2)$$

де K_0 – початкова матриця жорсткості (незалежна від Q);

Kσ – матриця напружень (лінійно-залежна від ступеня стиснення);

K_{NL} – матриця інших компонентів, що залежать від Q.

Застосування МСЕ зводить задачу знаходження НДС елементів конструкції до задачі знаходження тензора напружень для рішень системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

З вузлового рішення системи в переміщеннях Q перебувають інші компоненти НДС.

Універсальні СЕ просторової задачі теорії пружності призначені для визначення НДС неперервних об'єктів і масивних просторових конструкцій з однорідного ізотропного лінійно-пружного матеріалу в постановці тривимірної задачі теорії пружності.

Функціонал Лагранжа за нульових граничних умов має вигляд:

$$\Pi = \frac{1}{2}\times$$
$$\times\int_V \left(\sigma_x\varepsilon_x + \sigma_y\varepsilon_y + \sigma_z\varepsilon_z + \tau_{xy}\varepsilon_{xy} + \tau_{yz}\varepsilon_{yz} + \tau_{zx}\varepsilon_{zx}\right)\times$$
$$\times dV - \int\left(P_xU + P_yV + P_zW\right)dS -$$
$$-\int\left(XU + YV + ZW\right)dV, \quad (3)$$

де $\sigma_{x(x,y,z)}$, $\sigma_{y(x,y,z)}$, $\sigma_{z(x,y,z)}$, $\tau_{xy(x,y,z)}$, $\tau_{yz(x,y,z)}$, $\tau_{zx(x,y,z)}$ – компоненти тензора напружень, які є неперервними функціями координат;

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z\right),$$
$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left(\sigma_y - \nu\sigma_x - \nu\sigma_z\right),$$
$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left(\sigma_z - \nu\sigma_x - \nu\sigma_y\right),$$
$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}, \varepsilon_{yz} = \frac{1}{G}\tau_{yz}, \varepsilon_{zx} = \frac{1}{G}\tau_{zx}, \quad (4)$$

де ε_x, ε_y, ε_z, ε_{xy}, ε_{yz}, ε_{zx} – відносні лінійні деформації і деформації зсуву;

U(x,y,z), V(x,y,z), W(x,y,z) – компоненти переміщень точок тіла, паралельні осям OX, OY, OZ загальної системи координат відповідно;

Px, Py, Pz – компоненти інтенсивності поверхневих сил, що діють у напрямку осей OX, OY, OZ відповідно;

X, Y, Z – компоненти інтенсивності об'ємних сил (на одиницю об'єму) в напрямку осей OX, OY, OZ відповідно.

Деформації та напруження зв'язані між собою залежностями:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\sigma_x - \nu\sigma_y - \nu\sigma_z\right),$$
$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}\left(\sigma_y - \nu\sigma_x - \nu\sigma_z\right),$$
$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}\left(\sigma_z - \nu\sigma_x - \nu\sigma_y\right),$$
$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}, \varepsilon_{yz} = \frac{1}{G}\tau_{yz}, \varepsilon_{zx} = \frac{1}{G}\tau_{zx}, \quad (5)$$

де E – модуль Юнга;

v – коефіцієнт Пуассона;

G – модуль зсуву.

У результаті вирішення низки тестових задач і різних варіантів моделювання фрагментів ЗО були взяті такі схеми дискретизації, розміри і конфігурація СЕ циліндра:

стінки циліндра розбиваються на 8 шарів бетону за товщиною (без врахування гермооблицювання). Шари нумеруються зсередини назовні й мають товщину: № 1 – 225 мм; № 2–7 – 125 мм кожен; № 8 – 225 мм (Рисунок 2);

шари № 1 і № 8 містять 8-вузлові об'ємні елементи. Висота елементів шарів № 1 і № 8 становить 270 мм. Шари № 2–7 містять 6-вузлові об'ємні елементи. Конфігурація СЕ шарів № 2–7 залежить від напрямку армоканатів (Рисунок 3);

між АК і СЕ, що моделюють залізобетон, вводяться об'ємні елементи зі зниженим модулем деформації. Змінюючи величину модуля деформації в цих елементах, можна врахувати сили тертя, які виникають у разі контакту АК і каналоутворювача;

як правило, АК мають загальні вузли тільки з шаром бетону зі зниженим модулем деформації, на який передаються зусилля стискання. Однак, на рівнях, де відбувається перетин канатів різних шарів, для передачі зусиль стискання з АК на бетон вводяться додаткові стрижневі елементи;

відсутні в'язі із зовнішнім шаром бетону (Рисунок 2);

потовщення стінок у місцях шлюзів, приопорне потовщення і карниз моделюється додатковими шарами СЕ (Рисунки 4, 5).

Під час моделювання купола взяті такі схема дискретизації, розміри і конфігурація СЕ:

стінки купола розбиваються на 4 шари бетону за товщиною (без урахування гермооблицювання). Шари нумеруються зсередини назовні і мають товщину:

№ 1 – 300 мм; № 2 і № 3 – 250 мм кожен; № 4 – 300 мм (Рисунок 6);

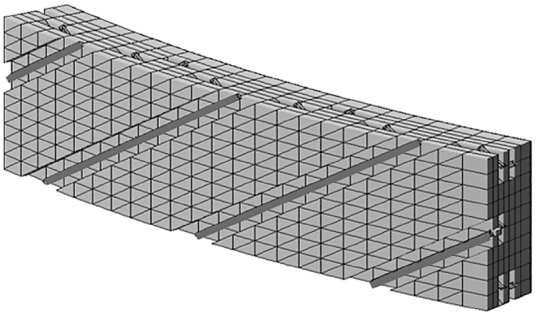

Рисунок 2 – Фрагмент моделі циліндра з канатами

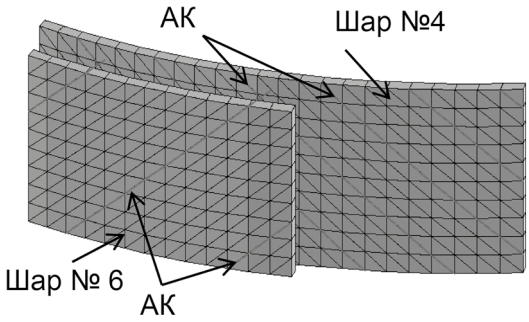

Рисунок 3 – Фрагменти моделі циліндра
(шар № 4 і шар № 6)

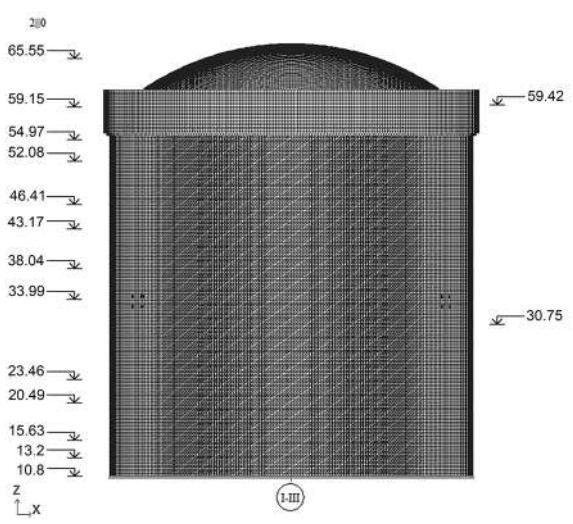

Рисунок 4 – Фрагменти частини циліндра з опорною плитою та куполом

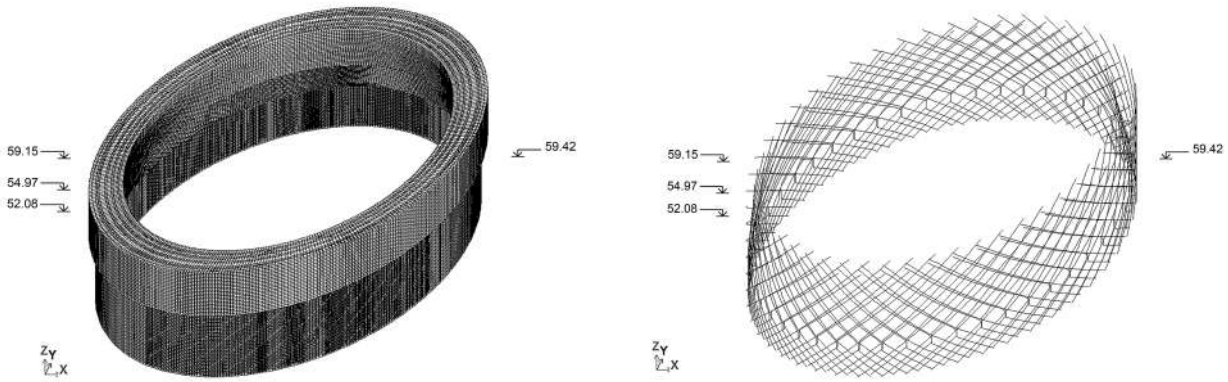

Рисунок 5 – Фрагмент верхньої частини циліндра

шари містять 8-вузлові об'ємні елементи. Розміри елементів змінні (приблизно 0,3 – 0,32 м) і залежать від номера шару;

АК моделюються стрижневими елементами загального виду і розташовуються всередині шарів № 2 і № 3 (Рисунки 5, 6);

для передачі зусиль обтискання з канатів на бетон вводяться додаткові стрижневі елементи. Розташування цих елементів показано на Рисунку 6;

в'язі із зовнішнім шаром бетону відсутні.

На Рисунках 4 – 5 показані фрагменти верхньої частини циліндра та загальний вигляд моделі з боку осі I зовні та з середини відповідно.

Розробка скінчено-елементної моделі та розрахунок ЗО виконано з урахуванням таких особливостей:

1 неоднорідної структури ЗО за товщиною (гермоблицювання з кріпленнями; залізобетон; залізобетон з каналоутворювачами СПЗО; залізобетон);

SSTC NRS ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

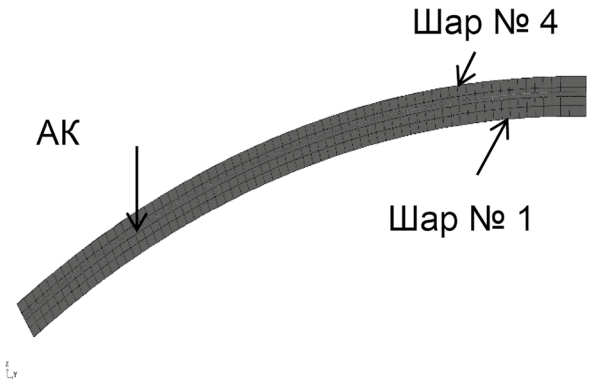

Рисунок 6 – Фрагмент частини купола з АК

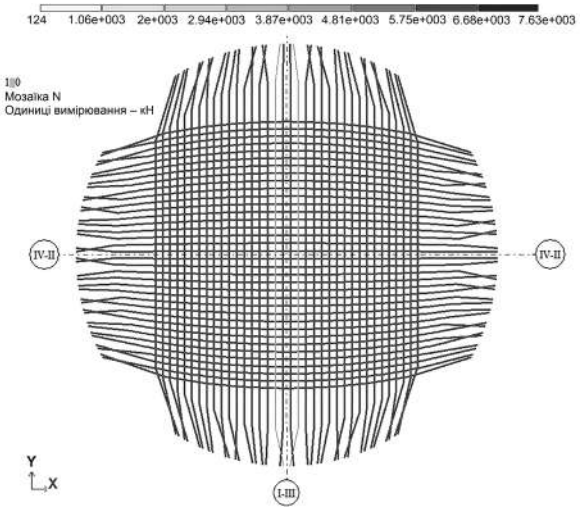

Рисунок 7 – АК купольної частини ЗО з відсутнім канатом

2 потовщення в зонах люків, проходок і реальної жорсткості самих люків, проходок;

3 складної геометрії анкерного карниза, підкранової балки, приопорного (пристилобатного) потовщення;

4 піддатливості опорної зони ЗО;

5 для СПЗО:

реальної траєкторії АК;

втрати зусиль в АК по довжині через тертя між АК і каналоутворювачем;

можливості відключення будь-яких АК;

можливості завдання будь-якої конфігурації зусиль у різних шарах АК;

6 можливості «вимкнути» бетон у разі виникнення в ньому розтягуючих напруг, а також тиску та температурного навантаження у разі МПА з найбільш неблагоприємними впливами на ЗО;

7 можливості перевірки міцності згідно ДБН та ПНАЕ:

залізобетонних перерізів;

гермооблицювання;

АК;

ненапруженої арматури тощо;

8 реалізації «пов'язаних» завдань/умов – обґрунтування достатньої густоти МСЕ-сітки для розрахунку ЗО (на тест-завданнях).

2 Визначення значень МДЗ в АК

Будь-який розрахунок починається з визначення навантажень і визначення МДЗ в АК та виконується на статичні навантаження, які моделюють силові дії від зосереджених або розподілених зусиль і моментів, температурного нагріву і переміщень окремих частин конструкцій.

Перевірку тримкості та стійкості конструкцій виконано відповідно до нормативних документів

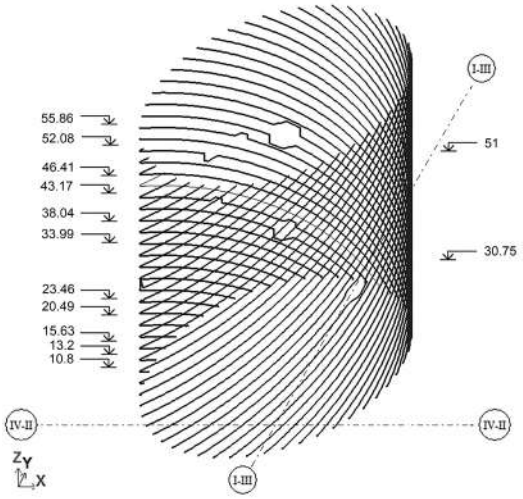

Рисунок 8 – АК циліндричної частини ЗО з відсутнім канатом

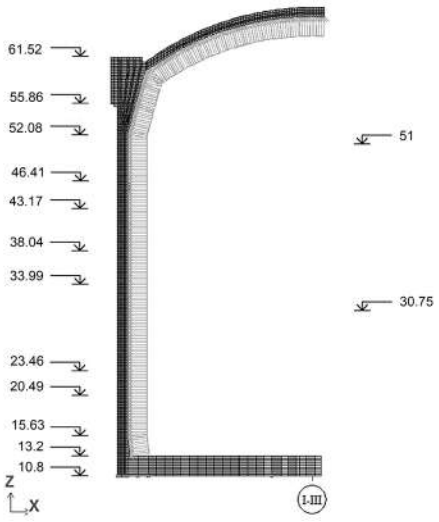

Рисунок 9 – Схема прикладання навантаження від внутрішнього тиску

ДБН В.2.6-98:2009 [13], ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [14], ДБН В.2.6-198:2014 [15]. Вихідні дані для побудови моделі прийнято для енергоблока № 1 ВП ЗАЕС з урахуванням специфіки цього енергоблока.

До розрахункової моделі ЗО прикладено такі завантаження.

Завантаження 1. Навантаження від власної ваги усіх конструктивних елементів, що обчислюються ПК автоматично залежно від перерізу та об'ємної ваги СЕ.

Завантаження 2, 8. Навантаження від натягу АК. Натяг моделюється за допомогою температурних деформацій і змінюється за довжиною канатів (Рисунки 7, 8).

Завантаження 3. Навантаження від надлишкового тиску в разі МПА величиною 0,4 МПа (Рисунок 9).

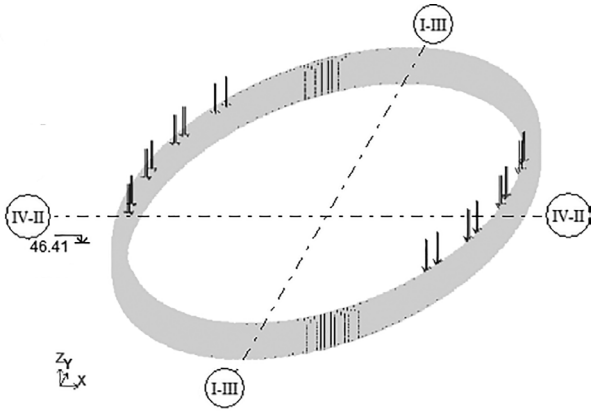

Рисунок 10 – Консолі циліндричної частини ЗО з навантаженнями від полярного крану

Завантаження 4. Навантаження від температури внутрішнього середовища для СЕ герметичного сталевого облицювання (ГСО). Температура ГСО складає 80°С.

Завантаження 5, 6. Навантаження від температури внутрішнього середовища через 15 секунд після початку аварії для СЕ всіх шарів ЗО. До кожного шару прикладено температуру, що відповідає середній температурі в цьому шарі.

Завантаження 7. Навантаження від крана величиною 606 тс (Рисунок 10).

Завантаження 9-13. Навантаження від натягу АК, розміщених у різних рядах циліндричної та купольної частин ЗО.

Завантаження 14, 15. Сейсмічні навантаження у вертикальному та горизонтальних напрямках (враховувались з урахуванням [16],[17]).

Визначення МДЗ. Аналіз НДС циліндричної частини ЗО показав, що основна концентрація напружень знаходиться в межах з позначеннями +42,000 м до +51,000 м. Мозаїка напружень N_y і N_z, які виникають у шарах ЗО, зображені на Рисунках 11, 12.

Аналізуючи НДС циліндричної частини ЗО в межах з позначками +42,000 м до +51,000 м виявилося, що в ЗО є дві зони концентрації напружень, які перевищують допустимі напруження по шарам. Перша зона – це зона де відсутній АК у зовнішньому ряду, друга – зона відсутності цього ж АК в середньому ряду.

Передбачається, що для першої зони напруження, що перевищують максимальні допустимі напруження в шарах 5, 6, 7, 8, передаються на середній ряд АК.

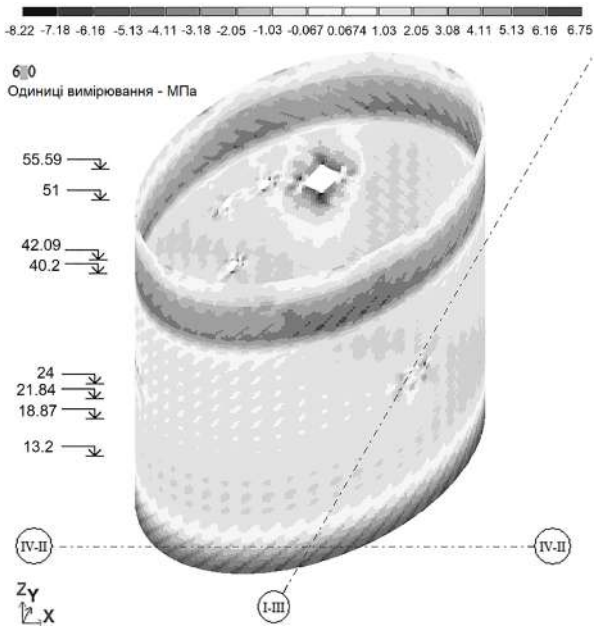

Рисунок 11 – Мозаїка напружень N_y у зовнішньому шарі циліндричної частини ЗО

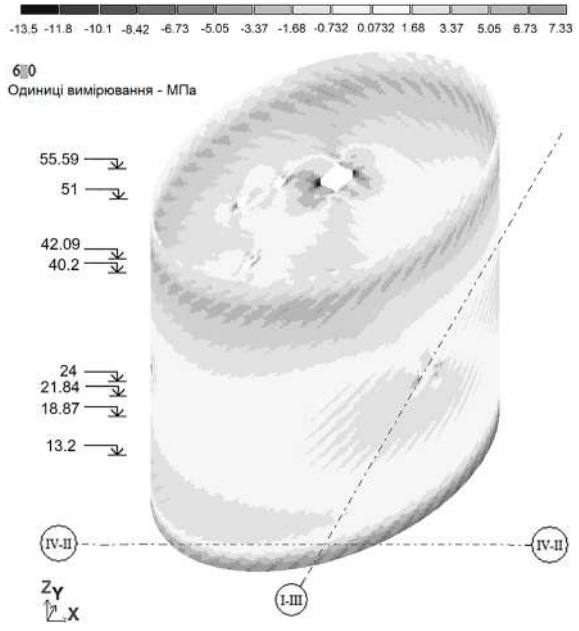

Рисунок 12 – Мозаїка напружень N_z у зовнішньому шарі циліндричної частини ЗО

SSTC NRS ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Для другої зони передбачається, що напруження, які перевищують максимальні допустимі напруження в шарах № 7 і 8, передаються на канати крайнього ряду, а напруження шару № 6 – на канати середнього ряду.

Під час обчислення напружень у СЕ, виявлено поодинокі елементи, в яких напруження значно перевищують напруження в сусідніх елементах (це зумовлено особливостями застосованого програмного засобу), тому взята умова – обчислення середньо-арифметичного значення напружень елементів, які перебувають в зоні концентрації напружень.

У шарах № 6 і № 7 виникають розтягуючі напруження в двох напрямках, які перевищують міцність бетону на розтяг.

Додаткові зусилля в канаті, які виникають унаслідок перевищення максимально допустимих напружень визначаються за формулами:

$$N=N_y \cdot t \cdot l/\cos\alpha; \quad (6)$$

$$N=N_z \cdot t \cdot l/\cos\alpha, \quad (7)$$

де кут α для у N_y дорівнює 35°25′, а для N_z дорівнює 54°75′.

t – товщина шара.

Аналізуючи НДС купольної частини ЗО виявилося, що напруження, які перевищують максимально допустимі значення для шару, є тільки в шарі № 3. Також з аналізу видно, що максимальна концентрація напружень відбувається в зоні відсутності АК. Мозаїка напружень N_x та N_y, які виникають в шарах купола ЗО, зображена на Рисунках 13, 14.

Передбачається, що розтягуючі радіальні зусилля, які виникають у шарі № 3, будуть передаватися на АК верхнього ряду, а тангенціальні – на АК нижнього ряду.

Максимальні напруження, які можуть бути сприйняті СЕ стисненого шару без тріщини, визначаються величиною міцності бетону на стиск:

$$\sigma_{Rd,max} = 17 \text{ МПа}. \quad (8)$$

Максимальні напруження стисненого шару, в якому від поперечних деформацій розкриваються тріщини, визначаються величиною:

$$\sigma_{Rd,max} = 9{,}3 \text{ МПа}. \quad (9)$$

Максимальні напруження, що можуть бути сприйняті АК розтягнутими умовними елементами, визначаються кількістю арматури за кожним напрямом.

Максимальні напруження в неармованих розтягнутих умовних елементах визначаються величиною граничного зусилля, що може сприйняти елемент перед утворенням тріщини:

$$\sigma_{max} = f_{ctk,005} = 1{,}8 \text{ МПа}, \quad (10)$$

де σ_{max} – максимальні напруження;

$f_{ctk,005}$ – характеристичне значення міцності бетону на осьовий розтяг.

Розрахункове значення опору розтягу АК визначається за формулою 3.20 ДСТУ Б В.2.6-156:2010 [14], а саме:

$$f_{pd}=\frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s}=\frac{1335}{1,0}=1335\text{МПа}, \quad (11)$$

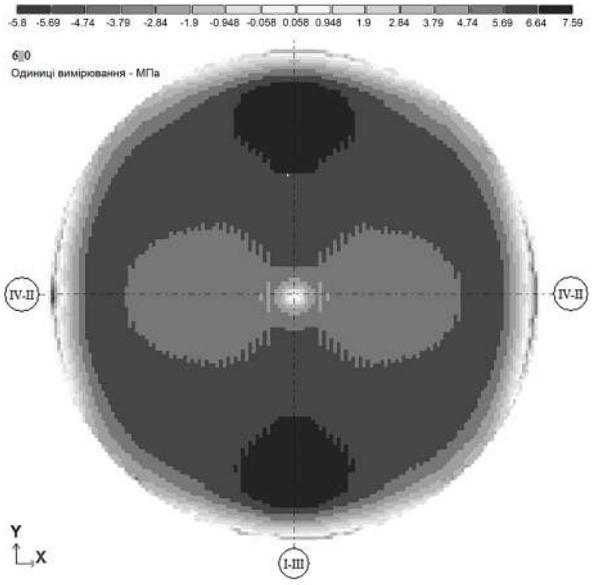

Рисунок 13 – Мозаїка радіальних напружень N_x у крайньому шарі купольної частини ЗО

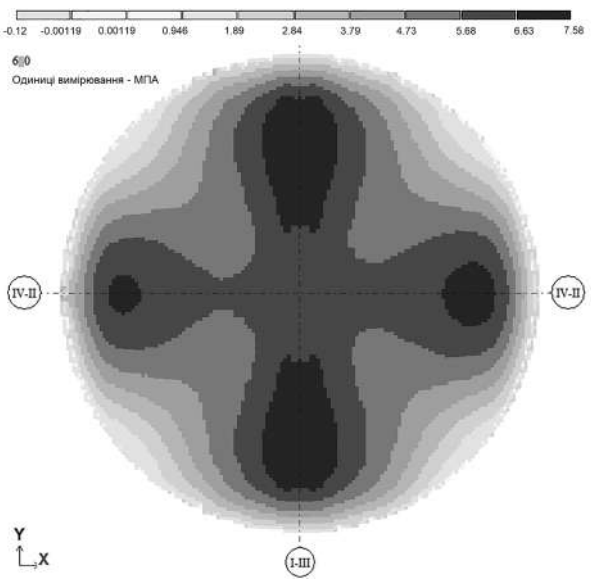

Рисунок 14 – Мозаїка тангенціальних напружень N_y у крайньому шарі купольної частини ЗО

де f_{pd} – розрахункове значення опору розтягу;

$f_{p0,1k}$ – характеристичне значення 0,1 % умовної границі плинності для попередньо напруженої арматури;

γ_s – коефіцієнт надійності для арматури прийнятий рівним 1,0.

Тоді тримкість одного АК буде дорівнювати:

$$N=f_{pd}\cdot A_p=1335\cdot 0{,}0089=11{,}881\text{МН}=11881\text{кН}, \quad (12)$$

де N – тримкість;

f_{pd} – розрахункове значення опору розтягу;

A_p – площа перерізу попередньо напруженої арматури.

Аналіз результатів розрахунку. Аналіз розрахунку ЗО виконувався порівнянням значень напружень, які виникають у скінчено-елементній моделі різних шарів циліндричної та купольної частин ЗО, обчислених за допомогою ПК «ЛІРА-САПР», із граничними значеннями напружень, що можуть бути сприйняті елементами.

Результати розрахунків свідчать про таке:

значення МДЗ в АК становлять 780 тс у циліндричній частині ЗО та 760 тс у купольній частині ЗО;

у куполі ЗО можуть виникати напруження, що перевищують максимально допустимі для бетону. В такому разі зусилля в АК з урахуванням приросту зусиль від навантажень (надлишкового тиску, температури та сейсмічних) менші за максимально допустимі. Очікується, що розтягуючі напруження, які виникають в арматурі, не перевищать граничні значення і арматура зовнішнього шару купола буде працювати в пружній стадії. Утворення тріщин у купольній частині ЗО не очікується;

основна концентрація напружень у циліндричній частині ЗО знаходиться в межах позначок +47,000 м до +51,000 м. У зовнішньому шарі ЗО виникають горизонтальні розтягуючі напруження, які призводять до плинності арматури шару ЗО. В такому разі очікується поява ненаскрізних тріщин глибиною до 0,5 м. Сумарні зусилля в канатах крайнього ряду, розташованих між позначками 47,0 – 51,0 м, за НЕ+ПА+МРЗ складають приблизно 1172 ... 1197 тс, що не перевищує несучу здатність АК 1200 тс. Проте запас міцності несучої здатності АК складає 0,25 %;

стискаючі напруження, які виникають у СЕ ГСО, перевищують критичні, що може призводити до втрати стійкості і розвитку деформацій плинності матеріалу листів ГСО, що зі свого боку може призвести до формозміни та можливих локальних розривів ГСО, і як наслідок, до втрати цілісності ГСО.

Маючи результати досліджень визначення мінімально допустимих значень зусиль в АК можна перейти до вирішення задачі визначення граничного тиску в середині ЗО, що може спричинити втрату її захисних та локалізуючих функцій.

3 Оцінка тримкості ЗО та визначення граничного тиску в середині ЗО для втрати її захисних і локалізуючих функцій

Метою розрахунків є перевірка тримкості системи герметичного огородження локалізуючої системи безпеки (ЛСБ) як функції внутрішнього тиску і температурного градієнта. Проведення таких досліджень спрямоване на дотримання рекомендацій МАГАТЕ, наведених у SSG-4 [18], SSG-53 [19].

Визначення граничного значення внутрішнього тиску і температури виконується на границях переходу між граничними станами ЗОК ЛСБ згідно з Таблицею 1. У цій таблиці термін «граничний стан для ЛСБ» аналогічний терміну «стадія НДС», який застосовується в теорії залізобетону.

Таблиця 1 – Граничні стани ЗОК ЛСБ

Граничний стан	Опис
Ia	Пружна робота залізобетону
IIa	Утворення та розкриття тріщини в бетонному перерізі
IIIa	Інтенсивне утворення тріщини в бетонному перерізі

Стан Ia (Пружна робота залізобетону) відповідає стадії I і розуміється як НДС елемента до утворення тріщини в розтягнутій зоні. Характеризується прямолінійною епюрою нормальних напружень у стисненій зоні перетину і криволінійною в розтягнутій. У разі збільшення навантаження завершення стадії I настає, коли деформації крайніх розтягнутих волокон досягнуть граничної величини. Ознакою визначення граничного значення внутрішнього тиску є зусилля тріщиноутворення.

Стан IIa (утворення та розкриття тріщини в бетонному перерізі) відповідає стадії II і розуміється як НДС елемента до розкриття тріщини обмеженої ширини. Характеризується викривленням епюри нормальних напружень у стисненій зоні перетину (непружні деформації) і значними непружними деформаціями в арматурі. Ознакою визначення граничного значення внутрішнього тиску та температури є зусилля, за якого ширина розкриття тріщини дорівнює 0,4 мм відповідно до пп. 2.2.2.3 ДБН В.2.6-98:2009 [13]. Глибина тріщин умовно бралася рівною висоті розтягнутої зони бетону.

Стан IIIa (інтенсивне утворення тріщини в бетонному перерізі) відповідає стадії III і розуміється як НДС елемента в момент руйнування. Характеризується яскраво вираженим викривленням епюри нормальних напружень у стисненій зоні перерізу (парабола кубічна або вищого ступеня), напруженням в арматурі, яке дорівнює границі плинності й граничним напруженням у перерізі бетону.

SSTC NRS ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Оскільки за результатами розрахунків із визначення значень МДЗ в АК було встановлено, що ГСО може втратити свою стійкість вже під час поєднання навантажень НЕ+МПА+МРЗ, то граничні стани ГСО в розрахунках ЗО на параметри ЗПА не враховувались. Розрахунки виконувались для ЗОК.

Розрахункова модель та завантаження брались майже аналогічними як для розрахунку із визначення МДЗ в АК СПЗО. У такий спосіб виконано розрахунки тримкості ЗО такі, як:

Розрахунок 1 – вихідні дані відповідають параметрам МПА;

Розрахунок 2 – вихідні дані відповідають стану за межами параметрів МПА в стадії перебігу важкої аварії.

Результати розрахунку тримкості циліндричної частини ЗО. Аналіз НДС циліндричної частини ЗО з позначки +21,930 м до позначки +51,100 м показав, що для середньої частини оболонки найбільш небезпечною зоною є смуга з позначки +47,000 м до +51,100 м.

Як видно з Таблиці 2, в шарах бетону виникають розтягуючі зусилля, які перевищують міцність бетону на розтяг і призводять до плинності арматури зовнішнього шару, тому приймаємо, що напруження, які виникають у шарах 7, 8, передаються на канати крайнього ряду, у шарах 5, 6 – на канати середнього ряду, у шарах 3, 4 – на канати внутрішнього ряду.

На цьому рівні зусилля в АК крайнього ряду складають приблизно 795 тс. Тоді сумарне зусилля в канаті крайнього ряду складе:

P = (3102+3464+1382+1474)/9,8+795=1756 тс.

P=1756тс > 1200тс.

Ця величина перевищує тримкість АК.

Додаткові зусилля від шарів 5, 6 в АК середнього ряду складають приблизно 796 тс. Тоді сумарне зусилля в канаті середнього ряду складе:

P = (1211+916+761)/9,8+796=1090 тс.

P=1090тс < 1200 тс.

Оскільки канати крайнього ряду втрачають свою тримкість, відбувається їх руйнування, навантаження, які сприймали АК крайнього ряду передаються на внутрішні шари ЗО за товщиною та на АК середнього ряду. Приймаємо, що зусилля із зруйнованого зовнішнього канату (відстань між канатами 1,87 м) передається на два канати середнього ряду (відстань між канатами 0,93 м). Отже, зусилля, яке виникає у канаті середнього ряду після руйнування каната крайнього ряду, складає:

P=1756/2+1090=1968 > 1200 тс.

Ця величина перевищує тримкість АК.

Додаткові зусилля в АК внутрішнього ряду складають приблизно 791 тс. Тоді сумарне зусилля в канаті середнього ряду складе:

P = (420 + 1313 + 925) / 9,8 + 791 = 1062 тс.

P=1062 тс < 1200 тс.

Оскільки АК крайнього та середнього ряду втрачають свою тримкість, відбувається їх руйнування, навантаження, що сприймали АК крайнього та середнього рядів передаються на внутрішні шари ЗО за товщиною та на АК внутрішнього ряду. Приймаємо, що зусилля із двох зруйнованих АК середнього ряду (відстань між канатами 0,93 м) передається на АК внутрішнього ряду (відстань між канатами 1,87 м). Отже, зусилля, яке виникає у АК внутрішнього ряду після руйнування АК крайнього ряду, складає:

P = 1968 · 2 + 1062 = 4998 > 1200 тс.

Ця величина перевищує тримкість АК.

З розрахунку напружень на позначках з +21,930 м до +51,100 м видно, що в усіх шарах оболонки виникають розтягуючі напруження, які призводять до плинності арматури, розриву канатів і руйнування бетону, в оболонці виникають наскрізні тріщини. Як видно з розрахунків очікується, що циліндрична частина ЗО втратить тримкість.

Результати розрахунку тримкості купольної частини ЗО. Розрахунок купольної частини ЗО є аналогічним за змістом для циліндричної частини і дозволяє стверджувати, що у шарі № 4 виникають розтягуючі напруження, які сприймає арматура верхнього шару. При чому напруження в арматурі не перевищують граничне значення.

У шарі № 3 виникають розтягуючі напруження, які перевищують міцність бетону на розтяг, проте їх величина не перевищує тримкість АК. Отже, тримкість купольної частини ЗО є достатньою.

Таблиця 2 – Результати перевірки тримкості елементів від позначки +21,930 м до позначки +51,100 м

Номер шару	N_y (МПа)		N_z (МПа)	
	Розрахункові напруження	Тримкість	Розрахункові напруження	Тримкість
1	+1,65/-3,9	+3,96/-9,3	+1,2/-7,6	+3,2/-9,3
2	+1,6/-2,15	+1,8/-9,3	+3,05/-2,97	+1,8/-9,3
3	+1,63/-1,13	+1,8/-9,3	+1,38/-1,05	+1,8/-9,3
4	+1,96/-1,18	+1,8/-9,3	+4,33/-0,87	+1,8/-9,3
5	+3,55/-0,39	+1,8/-9,3	+1,7/-0,47	+1,8/-9,3
6	+5,65	+1,8/-9,3	+3,02	+1,8/-9,3
7	+6,45	+1,8	+4,86	+1,8
8	+9,98	+3,96	+9,29	+4,54

4 Аналіз результатів розрахунків ЗО у разі важких аварій (ЗПА)

Вихідними даними для розрахунків міцності ЗО реакторів типу ВВЕР-1000/В-320 для навантаження НЕ + ЗПА були взяті значення температурних навантажень t=120°С, а значення внутрішнього тиску p від 0,4 та 0,6 МПа.

Розрахунок ЗО виконано з МДЗ натягу АК СПЗО: 780 тс у циліндричній частині ЗО та 760 тс у купольній частині ЗО.

Аналіз НДС циліндричної частини ЗО. Аналіз НДС циліндричної частини ЗО для параметрів ЗПА p = 0,6 МПа, $t_{ГСО}$ = 80°С показав, що основна концентрація напружень знаходиться в межах позначок з +21,930 м до +51,000 м.

З розрахунку напружень на позначках з +21,930 м до +51,100 м у всіх шарах ЗО виникають розтягуючі напруження, які призводять до плинності ненапруженої арматури, розриву АК і руйнування бетону, в ЗО виникають наскрізні тріщини. Конструкція ЗО втрачає тримкість.

Аналіз НДС купольної частини ЗО. Аналіз НДС купольної частини ЗО для параметрів ЗПА p = 0,6 МПа, $t_{ГСО}$ = 80°С показав, що напруження, які перевищують максимально допустимі значення для шару, є тільки в шарах № 3 та № 1 купольної частини ЗО.

Як показали результати розрахунку, для АК верхнього та нижнього рядів купольної частини ЗО максимальне зусилля в канатах складає 958 тс, що менше допустимого 1200 тс.

Аналізуючи зусилля в АК купольної частини ЗО можна зробити висновок, що зусилля в АК менші за максимально допустимі. Арматура зовнішнього шару купола працює в пружній стадії, арматура внутрішнього шару досягає границі плинності, проте надлишкові напруження передаються на АК нижнього ряду. Наскрізні тріщини в купольній частині ЗО не виникають.

Результати розрахунку свідчать про таке:

за вихідними параметрами тиску p = 0,4 МПа та температури ГСО t = 80°С (температура середовища в середині ЗО t = 120°С) встановлено граничний стан ЗОК ЛСБ – IIа, що характеризується утворенням та розкриттям тріщин в бетонному перерізі. ЗО виконує свої захисні та локалізуючі функції передбачені проєктом;

за вихідними параметрами тиску p = 0,6 МПа та температури ГСО t = 80°С (температура середовища в середині ЗО t = 120°С) встановлено граничний стан ЗОК ЛСБ – IIIа, що свідчить про інтенсивне утворення тріщин у бетонному перерізі, починається руйнування. ЗО не виконує свої захисні та локалізуючі функції, в ЗО виникають наскрізні тріщини та конструкція ЗО втрачає тримкість.

Отримані ДНТЦ ЯРБ розрахункові результати тримкості ЗО у разі важких ЗПА показали хорошу збіжність із результатами досліджень ДП «НАЕК «Енергоатом», зазначеними в звіті [20]. Дослідження ДНТЦ ЯРБ та ДП «НАЕК «Енергоатом» виконані із застосуванням різних розрахункових моделей (прийнята різна схема розбивки на скінченні елементи, їх тип та деталізація ділянок люків, підкранової балки, карниза), але виконувалися одним і тим самим ПК «Ліра-САПР» та під час розрахунків були прийняті тотожні вихідні дані до виконання розрахунків.

Це свідчить про те, що загальний підхід до вирішення задачі обраний обґрунтовано і дає достовірні результати. Водночас, залишається низка технічних питань, вирішення яких може дозволити уточнити отримані результати через більш детальне моделювання розподілу температури за товщиною стінки ЗО. Ця задача наразі вирішується в межах окремого дослідження.

Висновки

У межах цієї статті наведені результати структурного аналізу поведінки ЗО реакторів типу ВВЕР-1000/В-320 в умовах важких аварій (ЗПА). Під час створення розрахункової моделі ЗО враховано складну геометрію ЗО, неоднорідність структури ЗО, наявність усіх АК та врахування реальної траєкторії АК, передачу зусилля обтиснення з АК на ЗОК ЗО тощо.

Розрахунок ЗО проведено за допомогою ПК «ЛІРА-САПР», який входить до Переліку розрахункових кодів, дозволених ДП «НАЕК «Енергоатом» [10].

Результати оцінки тримкості ЗО реакторів типу ВВЕР-1000/В-320 у разі ЗПА (t = 120°С, p = 0,6 МПа) дають підстави стверджувати таке:

у купольній частині ЗО можуть виникати напруження, що перевищують максимально допустимі для бетону та арматури. За таких умов зусилля в АК з урахуванням приросту зусиль від навантажень (надлишкового тиску та температури) менші за максимально допустимі значення. Очікується, що розтягуючі напруження, які виникають у ненапруженій арматурі, не перевищать граничні значення й арматура зовнішнього шару купольної частини ЗО буде працювати в пружній стадії, арматура внутрішнього шару може сягати границі плинності, проте надлишкові напруження передаються на АК нижнього ряду купольної частини ЗО. Утворення наскрізних тріщин у купольній частині ЗО не очікується;

у циліндричній частині ЗО основна концентрація напружень перебуває у межах позначок з +21,930 м до +51,000 м. У цій зоні в усіх шарах ЗО виникають розтягуючі напруження, які призводять до плинності ненапруженої арматури, розриву та руйнування бетону ЗОК, у ЗО виникають наскрізні тріщини, конструкція ЗО втрачає тримкість.

SSTC NRS ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР З ЯДЕРНОЇ ТА РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Отже, міцність циліндричної частини ЗО у разі ЗПА не забезпечується вже за параметрів $t = 120°C$, $p = 0,6$ МПа.

Результати цього дослідження можуть бути використані Держатомрегулюванням під час аналізу обґрунтувань щодо визначення можливих відмов ЗО, зумовлених розвитком важких аварій, у межах виконання імовірнісного аналізу безпеки другого рівня для енергоблоків АЕС України.

Список використаної літератури

1. Концептуальное техническое решение № 0.ОБ.1678. ТР-ОZ «О порядке выполнения оценки сейсмостойкости оборудования, трубопроводов, зданий и сооружений энергоблоков № 1, № 2 ОП ХАЭС», погоджене Держатомрегулюванням 15.02.2013 листом № 15-29/1104.

2. Концептуальное техническое решение № 106-1-ТР-СЭЗиС «О порядке выполнения оценки сейсмостойкости оборудования, трубопроводов, зданий и сооружений энергоблоков № 1-4 ОП РАЭС», погоджене Держатомрегулюванням 15.02.2013 листом № 15-29/1104.

3. Концептуальное техническое решение «Об определении сейсмичности площадки ОП ЮУАЭС, сейсмостойкости зданий, оборудования и трубопроводов энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС с учетом инженерного запаса».

4. Технічне рішення 00.ЗС.00.ТР.11363 «О вводе в действие сейсмических характеристик площадки Запорожской АЭС в качестве исходных данных для оценки сейсмостойкости оборудования, трубопроводов, зданий и сооружений энергоблоков №№ 1–6 и ОСО», погоджене Держатомрегулюванням 30.07.2015 листом № 18-29/4-4832.

5. Крицкий В. Б., Карнаухов А. А. Подходы к прогнозированию уровня преднапряжения армоканатов СПЗО и информационно-экспертная система по накоплению и документированию данных об арматурных канатах СПЗО энергоблоков ВВЭР-1000 АЭС т оценке смостояния системы преднапряжения. *Ядерная и радиационная безопасность.* 1999, том 2, вып. 2. Киев: ГНТЦ ЯРБ. С. 88-99.

6. Крицкий В. Б., Марьенков Н. Г., Бабик К. Н., Недзведская О. Г., Нелинейная сейсмическая реакция защитной оболочки АЭС после проектной аварии. *Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць «Будівельні конструкції».* 2015, № 82. С. 619-636.

7. Звіт про виконання науково-дослідної роботи «Дослідження поведінки захисної оболонки та армоканатів для РУ ВВЕР-1000/В-320 в умовах проектної та запроектної аварії. Визначення мінімально допустимих зусиль натягу арматурних канатів в системі переднапруження захисної оболонки з урахуванням нового рівня сейсмічності при сполученні навантажень проектна аварія та проектний землетрус. (Завдання 24 Угоди 257586 від 29.03.2016, етап 1)». Київ, 2019. С. 126.

8. Ліцензія від 14.03.2019 № 1/3272-18 на передачу невиключного права на використання програмного комплексу ЛІРА-САПР 2018 PRO з системами Монтаж плюс, Динаміка в часі, Грунт, Метеор, Сапфір-ЗБК.

9. СТП 0.41.076-2008. Анализ и оценка безопасности. Порядок использования расчетных кодов для обоснования безопасности ядерных энергетических установок. Методические указания. ДП «НАЕК «Енергоатом».

10. Перечень разрешенных к использованию в ГП «НАЭК «Энергоатом» расчетных кодов для обоснования безопасности ядерных установок по состоянию на 01 февраля 2020 г. (розпорядження ДП «НАЕК «Енергоатом» від 17.02.2020 №157-р).

11. Batoz J. L. , Dhatt G. Modelisation des structures par elements finis. Paris: Hermes, 1990, 458 p.

12. Белов Н. Н. и др. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки. Томск: STT, 2004. 433 с.

13. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення.

14. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування.

15. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ : Мінрегіон України, 2014.

16. Шугайло А. П., Рыжов Д. И., Майборода Е. Е. Современные международные подходы к оценке/переоценке сейсмостойкости важных для безопасности систем и элементов ядерных установок. *Ядерная и радиационная безопасность*. Киев: ГНТЦ ЯРБ, №7, 2007. С. 62 – 68.

17. Рижов Д. І., Шугайло О-й П., Шугайло О-р П., Кендзера О. В., Мар'єнков М. Г., Шендерович В. Я., Буряк Р. Я. Про сучасні вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій України. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2017, № 2 (74). С. 9 – 13. doi: 10.32918/nrs.2017.2(74).02.

18. SSG-4. Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. IAEA, Vienna, 2010. 108 p.

19. SSG-53. Design of the Reactor Containment and Associated Systems for Nuclear Power Plants. IAEA, Vienna, 2019. 89 p.

20. ВП ЗАЕС «Отчет ОП «Запорожская АЭС». Определение предельного давления разрушения контайнмента для запроектных аварий для целей ВАБ. 75.189-00.01-01-18-ПР».

References

1. Conceptual Technical Solution No. 0.OB.1678.TP-OZ on the procedure for assessing the seismic resistance of equipment, pipelines, buildings and structures of KhNPP-1,2 approved by SNRIU letter No. 15-29/1104 dated 15 February 2013.

2. Conceptual Technical Solution No. 106-1-TP-SEZiS on the procedure for assessing the seismic resistance of equipment, pipelines, buildings and structures of RNPP-1-4 approved by SNRIU letter No. 15-29/1104 dated 15 February 2013.

3. Conceptual Technical Solution on determining seismicity of SUNPP site, seismic resistance of buildings, equipment and pipelines of SUNPP-1 taking into account the engineering reserve approved by SNRIU dated 17 October 2011.

4. Technical Solution 00.ZS.00.TP.11363 on commissioning of seismic characteristics of ZNPP site as input data for assessing the seismic resistance of equipment, pipelines, buildings and structures of ZNPP-1-6 and common unit facilities approved by SNRIU letter No. 18-29/4-4832 dated 30 July 2015.

5. Kritsky, V., Karnaukhov, A. (1999). The approaches to predicting the prestressing tension of tendons of the containment prestressing system, the information and expert system for accumulating and documenting data on tendons of the containment prestressing system for WWER-1000 NPPs and assessing containment prestressing system state. *Nuclear and Radiation Safety*, 2(2), 88-99.

6. Kritsky, V., Marienkov, N., Babik, K., Nedzvedskaya, O. (2015). Nonlinear seismic reaction of NPP containment after design basis accident. *Interdepartmental scientific and technical collection of scientific efforts Building Structures*, (82), 619-636.

7. Research and development report "Study of WWER-1000/320 containment and tendons under design basis and beyond design basis accidents. Determination of the minimum acceptable tension of tendons in the containment prestressing system taking into account the new level of seismicity in the combination of design basis accident and operating basis earthquake. (Task 24, Contract 257586 dated 29 March 2016, Stage 1)", 2019, 126.

8. License No. 1/3272-18 dated 14 March 2019 for non-exclusive right to use LIRA-SAPR 2018 PRO software package.

9. STP 0.41.076-2008. Safety analysis and assessment. Procedure for using software for safety justification of nuclear power plants. Methodological instructions, Energoatom.

10. List of software permitted for use by Energoatom for safety justification of nuclear facilities. Energoatom Order No. 157-r dated 17 February 2020.

11. Batoz, J., Dhatt, G. (1990). Modelisation des structures par elements finis, Hermes, Paris, 458.

12. Belov, N. (2004). Calculation of reinforced concrete structures for explosive and shock loads. Tomsk, 433.

13. DBN B.2.6-98: 2009. Concrete and reinforced concrete structures.

14. DSTU B V.2.6-156: 2010. Structures of houses and buildings. Concrete and reinforced concrete structures of heavy concrete. Design rules.

15. DBN B.2.6-198: 2014. Steel structures. Design standards.

16. Shugaylo, A., Ryzhov, D., Mayboroda, E. (2007). State-of-the-art international approaches to seismic safety evaluation and re-evaluation of existing nuclear installations. *Nuclear and Radiation Safety*. Kyiv, SSTC NRS, (7), 62-68.

17. Ryzhov, D., Shugailo, O-i, Shugailo, O-r, Kendzera, O., Marienkov, M., Shenderovich, V., Buriak, R. (2017). About modern requirements for seismic resistance design and evaluation of seismic safety of Ukrainian NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*. 2(74), 9-13.

18. SSG-4. Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, 2010.

19. SSG-53. Design of the Reactor Containment and Associated Systems for Nuclear Power Plants, 2019.

20. Report of Zaporizhzhya NPP. Determination of the threshold pressure of containment destruction for beyond design basis accident for PSA purposes. 75.189-00.01-01-18-PR.

Results of Structural Analysis of WWER-1000/320 Containment Behavior under Severe Accidents

Liashenko L., Panchenko A., Shugailo O-i, Koliada M.

State enterprise «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation safety», Kyiv, Ukraine

The paper presents the review and evaluation of the containment prestressing system within reinforced concrete structures under seismic loads and severe accidents. Given the complex design of the containment, the detailed finite element model has been developed and used to describe real containment behavior. Containment stress and strain state was calculated by modern LIRA software. The first stage analyzed the results of WWER-1000/320 containment stress and strain state calculation under a combination of loads caused by maximum design basis accident (MDBA) and safe shutdown earthquake (SSE) and defined minimum acceptable tension of tendons. The research determines the minimum acceptable tension of tendons in the containment prestressing system, and evaluates the strength and reliability of containment structures under a combination of loads in normal operation + design-basis accident + maximum design earthquake (NO + DBA + MDE). The verification calculations have been performed using tendon tension of 780 ton-force in the cylindrical part of the containment and 760 ton-force in the containment dome.

The second stage covered the analysis of severe accident parameters (pressure and temperature) and the results of calculation. Stress and strain state in ZNPP-1 containment has been calculated, parameters (pressure and temperature) under which the containment can loss its protective and isolation functions have been identified, calculation results have been analysed and conclusions of containment structural integrity and ensuring the implementation of the design confining functions have been made. Based on the calculation results, it can be concluded that strength of the containment cylindrical part during a beyond design-basis accident cannot be ensured under parameters t (temperature) = 120°C, p (pressure) = 0.6 MPa.

Keywords: containment, severe accident, maximum design basis accident, safe shutdown earthquake, calculation, modeling, structural integrity, tendon, confining functions.

Отримано 17.06.2020