

Т. І. Матченко, Т. Ю. Верюжська, Н. О. Сирота, Л. Б. Шаміс

АТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект»,
просп. Перемоги, 4, м. Київ, 01135, Україна

Аналіз міцності захисної оболонки реактора протягом зміни температури та тиску, спричинених аварією

Ключові слова:

захисна оболонка,
герметичне огороження,
локалізуючі системи безпеки,
максимальна проектна аварія,
арматурний канат.

Розроблено розрахункову модель реакторного відділення в цілому та його захисну оболонку з використанням оболонкових скінченних елементів на базі розрахункового комплексу SCAD, що дає змогу задавати будь-які зусилля в будь-якому з 36 арматурних канатів купола і в будь-якому з 96 арматурних канатів циліндра захисної оболонки. Розраховано зусилля в арматурних канатах, які забезпечують міцність і герметичність залізобетонних конструкцій захисної оболонки при максимальній проектній аварії для усіх комбінацій температур і надлишкових тисків протягом 10 год аварії.

Вступ

Для виконання функцій локалізуючих систем безпеки (ЛСБ) та систем герметичного огороження (СГО) реакторних відділень атомних електростанцій (АЕС) з реакторами ВВЕР-1000 застосовують захисну оболонку (ЗО), завдання якої полягає в недопущенні виходу радіоактивних речовин з реакторного відділення в зовнішній простір у випадку аварії реактора чи паропроводів (рис. 1).

Захисна оболонка складається з залізобетонних огорожувальних конструкцій (ЗОК), які забезпечують міцність і за можливості герметичність на випадок максимальної проектної аварії (МПА) і внутрішнього сталевого облицювання ЛСБ, яке забезпечує герметичність у випадку МПА. ЗО з опорною плитою на позначці 13,2 м є основним елементом СГО. Вона запроєктована з попередньо напруженого залізобетону у вигляді циліндра з внутрішнім діаметром 45 м і висотою 53,35 м, покритого пологим сферичним куполом. Циліндрична частина споруди на позначці 13,2 м спирається на залізобетонну плиту перекриття (опорну плиту оболонки). Попереднє напруження ЗОК забезпечується зусиллями натягнення 96 арматурних канатів (АК) у циліндричній частині ЗО і 36 АК у купольній частині.



Рис. 1. Загальний вигляд реакторного відділення ВВЕР-1000 Южно-Української АЕС із ЗО

© Т. І. Матченко, Т. Ю. Верюжська, Н. О. Сирота, Л. Б. Шаміс, 2019

У випадку МПА відбувається збільшення температури і тиску в реакторному відділенні. Цей процес триває 10 год, і ЗО повинна забезпечувати міцність і герметичність протягом усього періоду дії МПА для всіх реальних комбінацій тиску і температури.

Проблема полягає в тому, що в разі натягнення АК із зусиллям, яке створює напруження у дротах, що перевищує межу пропорційності сталі, відбувається релаксація напружень (втрата зусиль у канатах) протягом експлуатації, що створює необхідність періодичного підтягування канатів до проектних значень зусиль. У процесі підтягування відбувається збільшення довжини дротів канату, що зменшує їхній деформаційний ресурс. Коли деформаційний ресурс буде вичерпаний унаслідок декількох підтягувань АК, канат може розірватися, навіть якщо напруження у дротах не перевищили межу текучості сталі.

У випадку розриву АК може відбутися руйнування каналу і його забивання уламками. Це в свою чергу ускладнює заміну зруйнованого канату новим. У разі розриву декількох канатів, може створитися ситуація, коли інші канати з будь-якими зусиллями натягнення не зможуть забезпечити міцність та герметичність ЗО у випадку МПА.

Таким чином, актуальним є завдання розрахувати такі мінімальні зусилля в АК куполу і циліндричної частини ЗО реального реакторного відділення, що знаходиться в експлуатації, які забезпечать міцність і герметичність ЗО для всіх комбінацій температури і тиску протягом дії МПА з урахуванням накопичених пошкоджень у ЗОК і АК та сталевому облицюванні.

Навантаження протягом МПА

У разі МПА через 15 с після її початку температура середовища (повітря) підвищується до 150 °С, надлишковий тиск при цьому досягає 0,4 МПа. Після включення спринклерних систем параметри середовища (температура, тиск) змінюються залежно від часу проходження МПА. Час існування аварії приймається рівним 10 год. Розрахунок розподілення температур у стінках ЗОК ЗО в різні моменти проходження МПА був виконаний для умов нестационарної теплопровідності. Розподілення температур за товщиною стінки циліндричної частини ЗОК [1] наведено в табл. 1 і 2 за умови, що на зовнішній поверхні ЗОК температура становить –5 °С. Для часу 15 с або 0,004 год після початку аварії розподілення температур показано на рис. 2.

Таблиця 1. Значення температури для різного часу проходження МПА протягом перших 5 год після МПА, °С

Показник	через 0,004 год	через 1 год	через 2 год	через 3 год	через 4 год	через 5 год
t_6 – внутрішня поверхня	39,8	58	67	73	75	76,4
t_1	36,1	41,7	46,9	50,8	54,2	57,2
t_2	32,3	33,9	35,8	36,9	37,8	38,7
t_3	28,6	29,2	30,2	30,5	30,8	31,2
t_4	24,9	25,2	26,0	26,1	26,2	26,4
t_5	21,1	21,4	22,1	22,2	22,3	22,5
t_6	17,4	17,6	18,3	18,4	18,5	18,7
t_7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7
t_8	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9
t_9	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
t_{10}	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
t_{11}	–1,3	–1,3	–1,3	–1,3	–1,3	–1,3
t_n – зовнішня поверхня	–5,0	–5,0	–5,0	–5,0	–5,0	–5,0
Тиск середовища, атм	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5

Таблиця 2. Значення температури для різного часу проходження МПА протягом 5–10 год після МПА, °С

Показник	через 6 год	через 7 год	через 8 год	через 9 год	через 10 год
t_6	78	76	74	70	65
t_1	60,3	52,1	63,2	63,5	63,3
t_2	39,8	40,2	40,6	40,6	40,6
t_3	31,9	32,0	32,2	32,2	32,2
t_4	26,9	26,9	27,0	27,0	27,0
t_5	23,0	23,0	23,1	23,1	23,1
t_6	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3
t_7	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6
t_8	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9
t_9	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2
t_{10}	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
t_{11}	–1,3	–1,3	–1,3	–1,3	–1,3
t_n	–5,0	–5,0	–5,0	–5,0	–5,0
Тиск середовища, атм	2,1	1,68	1,45	1,30	1,20

Моделювання ЗО методом скінченних елементів

Розрахункова схема (модель 1) складається з об'ємних скінченних елементів (СЕ), що моделюють роботу залізобетонних конструкцій ЗО. При моде-

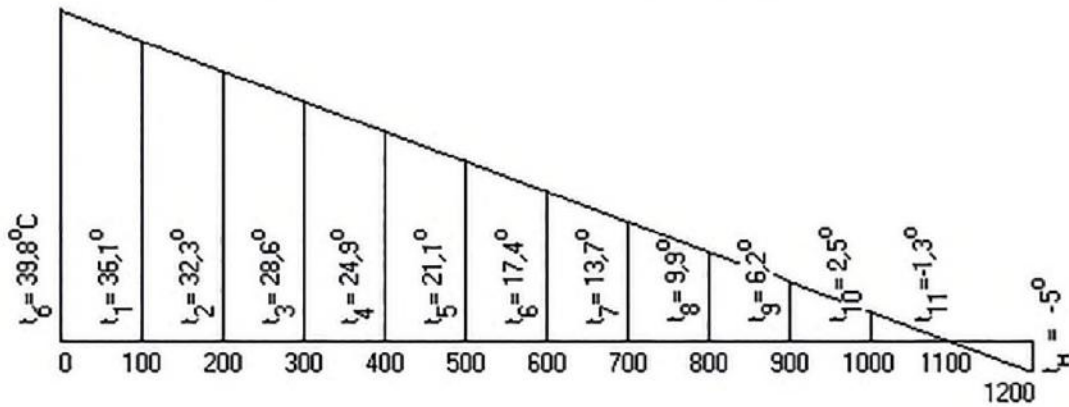


Рис. 2. Розподілення температури за товщиною в стінці циліндричної частини ЗОК (розмір за товщиною у мм) через 15 с після МПА

люванні стінка циліндра та купол поділяються на 4 основні шари бетону за товщиною без урахування сталевого облицювання, яке моделюється плоскими СЕ оболонки товщиною 8 мм.

Розрахункову модель, яка використовує об'ємні, оболонкові та стержньові елементи й дозволяє відобразити реальну геометрію та фізичні характеристики конструктивних елементів ЗО, показано на рис. 3.

Розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) виконано для умов дії на споруду навантажень: власної ваги конструкцій споруди; зусиль обтискання споруди АК системи переднапруги та зусилля в анкерах АК; аварійного тиску пароповітряної суміші від

0,2 до 0,4 МПа; температури на внутрішній поверхні оболонки, що змінюється в межах від +40 до +78 °C, і на зовнішній поверхні оболонки розрахункової температури -5 °C.

Арматурні канати моделюються стержневими елементами (рис. 4).

Канати циліндричної частини розташовані в три шари і огинають оболонку за спіральною траєкторією (а). Канати купольної частини розташовані в двох паралельних шарах із взаємною орієнтацією, близькою до ортогональної (б). АК мають спільні вузли тільки з шаром бетону, на який передаються зусилля обтиску.

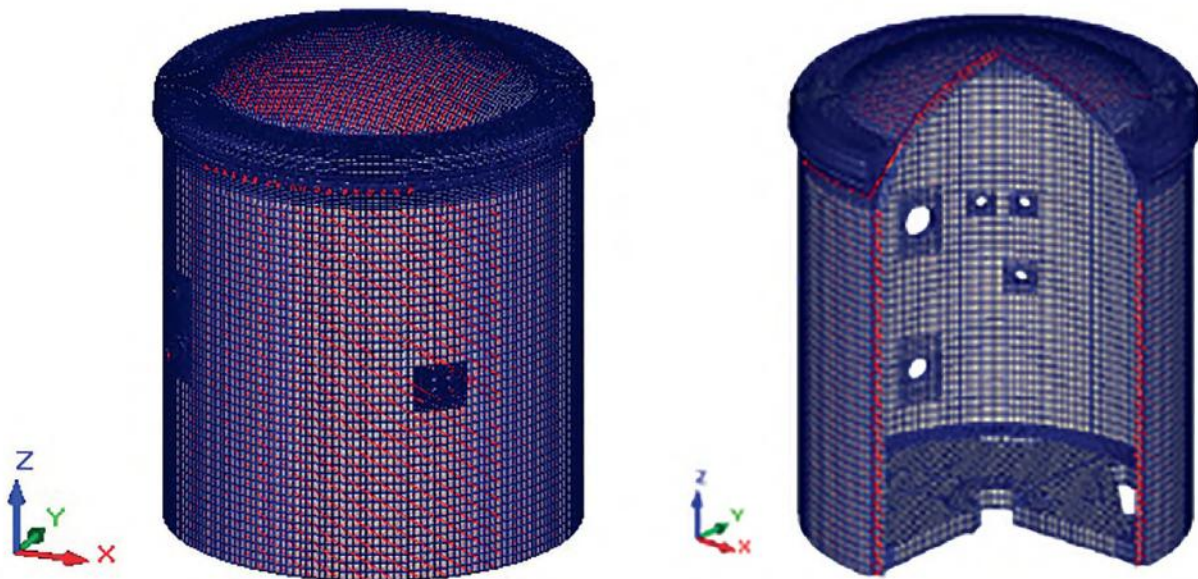


Рис. 3. Розрахункова модель ЗО реакторного відділення та ЛСБ СГО (модель 1)

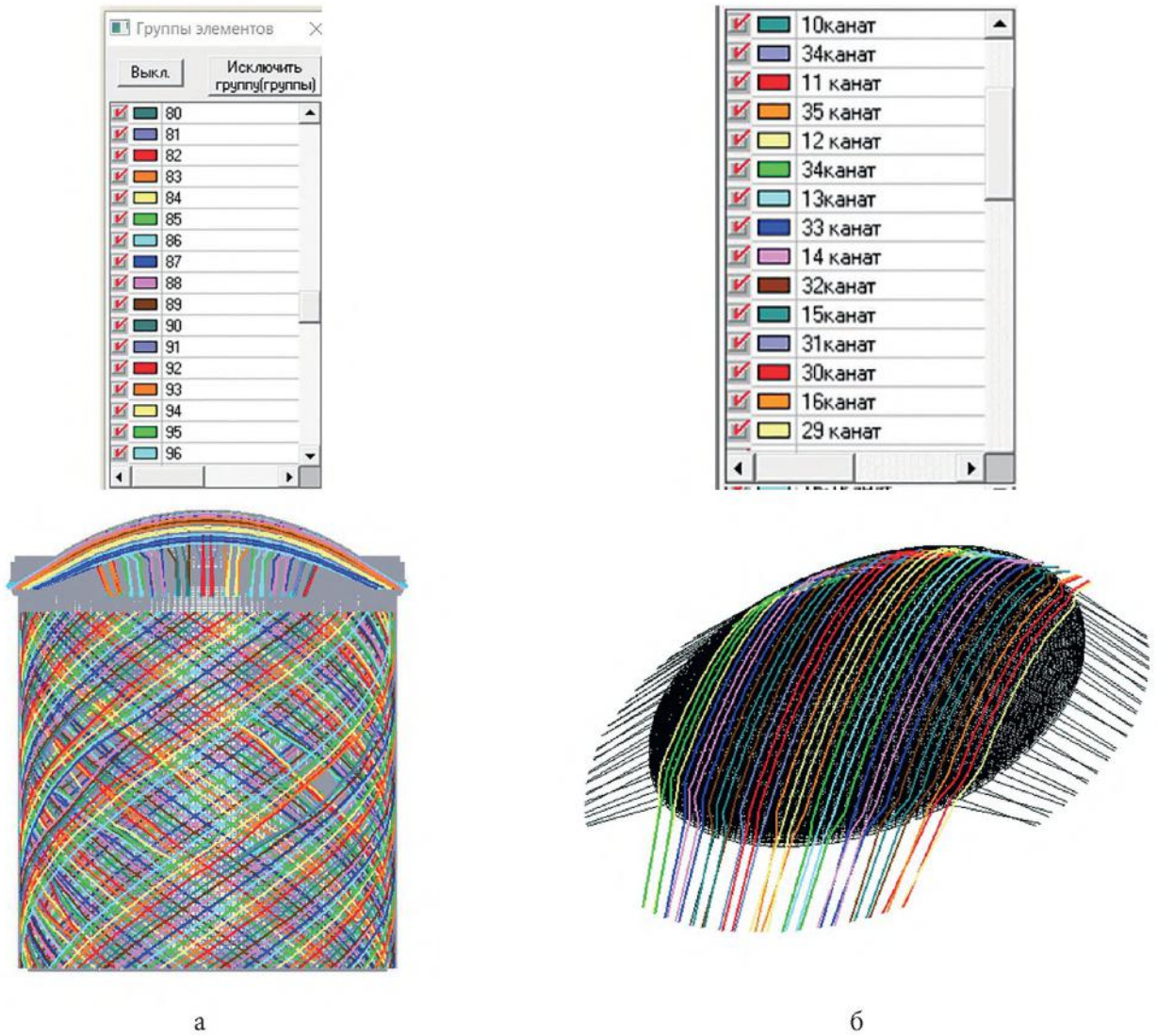


Рис. 4. Розрахункова модель 3О реакторного відділення (модель 1).

Різні відтінки зображення груп елементів, які відповідають номеру каната: а – моделювання АК циліндричної частини 3О стержневими СЕ; б – моделювання АК купола 3О стержневими СЕ

Процедура завдання навантаження на 3О від власної ваги конструкцій споруди прийнята стандартною для методу СЕ і тому тут не деталізується.

Моделювання силової дії на 3О від обтискання АК системою попереднього напруження захисної оболонки здійснювалося за методикою, що враховує реальні траєкторії проходження канатів системи переднапруги (див. рис. 4, а).

Значення зусилля натягнення АК у заданій точці його траєкторії визначається з урахуванням втрат зусилля по довжині АК через тертя між АК і поверхнею каналу.

Функція зміни зусилля натягнення АК по його довжині прийнята відповідно до залежності, наведеної в п. 3.3.5.6 ДСТУ Б В.2.6-156:2010.

$$\Delta P_{\mu}(x) = P_{max} \left(1 - \frac{1}{e^{\mu(\theta+kx)}} \right) = P_2 - P_1, \quad (1)$$

$$\Delta P = P_{netto} (e^{-(\omega x_1 + 0,089\theta_1)} - e^{-(\omega x_2 + 0,089\theta_2)}) \quad (2)$$

де x_1 і x_2 – місцева координата вузла вздовж осі АК в межах одного СЕ початку і кінця АК; θ – кут відхилення АК від своєї осі на ділянці, що розглядається між вузлами одного АК вздовж траєкторії АК, рад; P_1 і P_2 – зусилля в АК на виході і на вході у вузлах загальних – зі скінченими елементами оболонки в напрямку траєкторії АК; e – основа натурального логарифму; μ – узагальнений коефіцієнт тертя між АК і поверхнею каналу; k – випадкове

кутове переміщення від точки для внутрішньої арматури ($0,005 < k < 0,01$).

У моделі із застосуванням оболонкових СЕ обчислення оболонки АК і втрати на тертя каналів по бетону каналів моделюється набором сил, докладених у вузлах оболонкових СЕ по траєкторії АК.

У випадку проковзування АК відбувається розвантаження на ділянці ковзання. У такому випадку сили, що моделюють втрати на тертя, приймаються рівними нулю, і залишаються тільки сили, що моделюють обтиснення бетону.

Сила тиску АК на стінку каналу в межах одного СЕ між точками 1 і 2 (вузлами СК) за правилами паралелограму визначається за формулою

$$\Delta Q = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 - 2 \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot \cos[\pi - (\theta_1 - \theta_2)]}, \quad (3)$$

або за формулою

$$\Delta Q = N_0(1 - e^{-\delta\theta_2} + 1 - e^{-\delta\theta_1}) \cdot \sin(\theta_2 - \theta_1) = (N_2 + N_1) \cdot \sin(Q_2 - Q_1). \quad (4)$$

Отже, для кожного АК розрахункової моделі згідно з траєкторією його проходження було обчислено значення зусилля обтискування в спільних вузлах АК та об'ємного СЕ розрахункової моделі. Навантаження було визначено як вузлове в глобальній системі координат.

Моделювання розташування АК в різних шарах на циліндричну ЗО показано на рис. 5.

Якщо одним з навантажень є перепад температур за товщиною оболонки, тоді доцільно моделювання ЗО і реакторного відділення в цілому виконувати оболонковими СЕ.

У випадку застосування оболонкових СЕ для

моделювання конструкції ЗО і реакторного відділення в цілому розрахунковий комплекс (ПК) SCAD дозволяє визначити НДС для статичних і температурних впливів в одній комбінації, виходячи з умови забезпечення міцності, виникнення або обмеження розкриття тріщин визначеною величиною. Програма АРБАТ, яка входить до комплексу ПК SCAD, дозволяє виконати перевірку на міцність і виявити розкриття тріщин перерізів залізобетонних конструкцій з урахуванням реальних діаметрів арматурних стрижнів, їхнього кроку, класу арматури і бетону.

Таким чином, виникла необхідність побудови розрахункової моделі ЗО (модель 2) з використанням оболонкових елементів замість об'ємних. Навантаження обтиснення АК, які визначалися для моделі 1, переносяться на оболонкову модель 2 шарами разом з АК за допомогою режиму складання, який передбачений в ПК SCAD.

Моделювання передання зусиль від АК на циліндричну оболонку показано на рис. 6.

Моделювання зусиль від АК у розрахунковій моделі купольної частини ЗО показано на рис. 7.

Загальний вигляд розрахункової моделі ЗО реакторного відділення наведено на рис. 8.

Жорсткість основи у вертикальному напрямку під фундаментною плитою моделювалась двома параметричними коефіцієнтами жорсткості С1 і С2 з урахуванням інженерно-геологічних характеристик ґрунту під фундаментом, зокрема реакторного відділення № 4 Запорізької АЕС. У горизонтальних напрямках за осями Х і Y жорсткість основи моделювалась СЕ типу 56 (зв'язки кінцевої жорсткості), які прикладені до кожного вузла фундаментної плити.

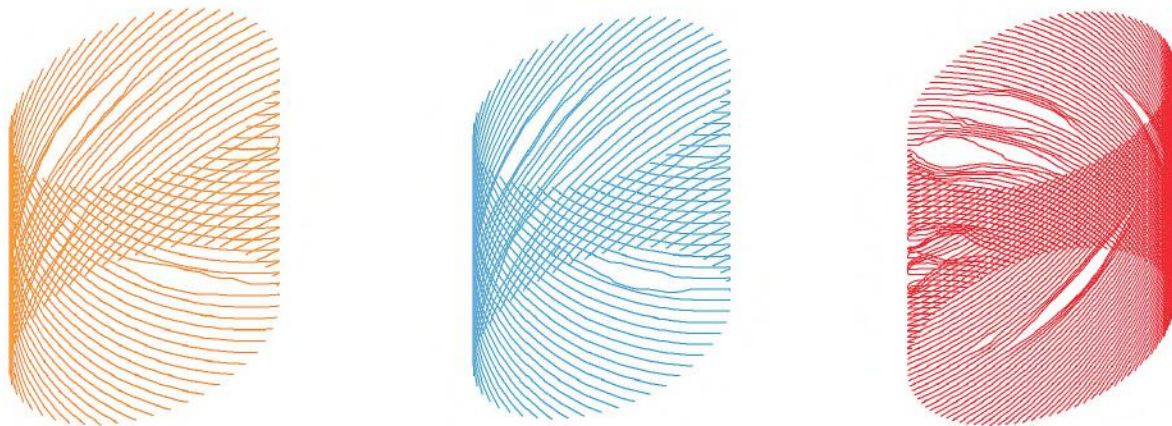


Рис. 5. Моделювання АК циліндричної частини ЗО представлено за шарами їх розташування

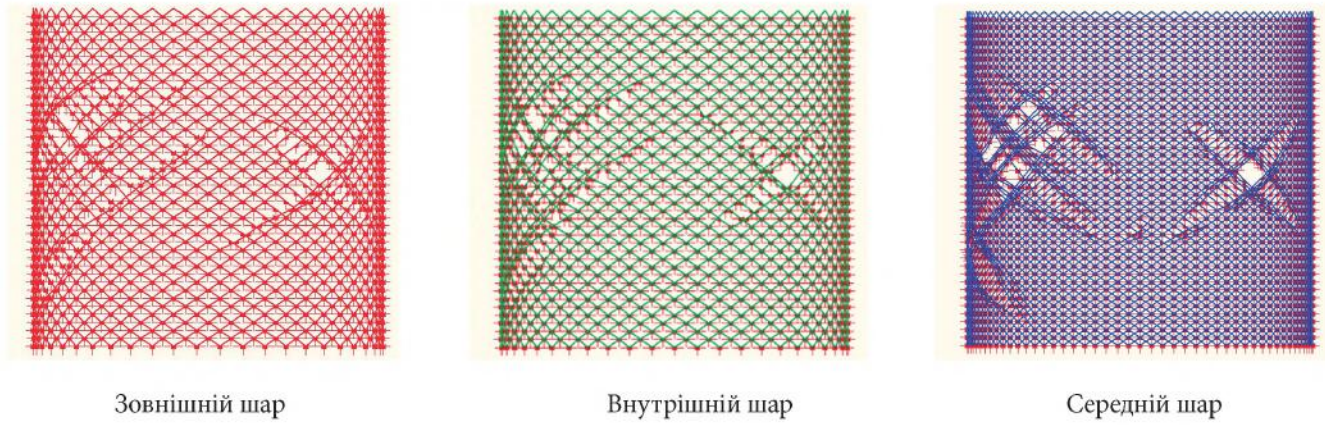


Рис. 6. Моделювання в розрахунковій моделі передання зусиль на циліндричну частину 3О від попереднього напруження в АК

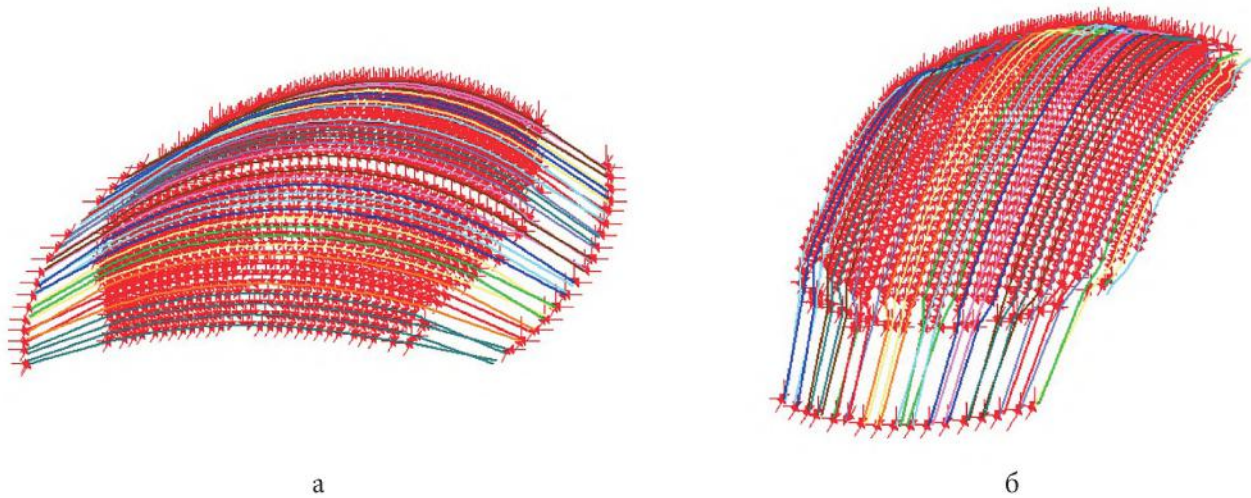


Рис. 7. Моделювання зусиль від АК у розрахунковій моделі купольної частини 3О:
а – моделювання зусиль від АК нижнього шару купольної частини 3О;
б – моделювання зусиль від АК верхнього шару купольної частини 3О

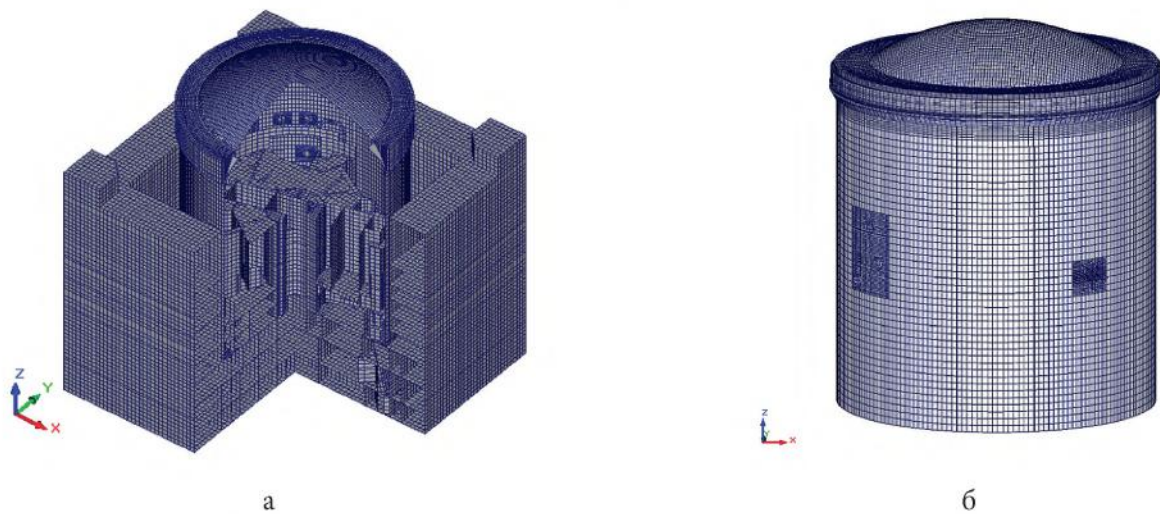


Рис. 8. Розрахункова модель реакторного відділення та 3О: а – загальний вигляд моделі;
б – фрагмент загальної моделі 3О

Критерії граничних станів ЗОК

Протягом зміни температури і тиску герметичність і міцність ЗОК оцінюється за такими граничними станами:

критерій 1 – перехід від суцільного стану бетону до початку утворення та розкриття тріщин у залізобетоні;

критерій 2 – перехід від стабільного до інтенсивного утворення тріщин у залізобетоні, втрата герметичності ЗОК;

критерій 3 – перехід від інтенсивного утворення тріщин до повного руйнування залізобетону.

Внутрішні зусилля в розрахункових перерізах елементів ЗОК визначалися відповідно до ПНАЭ Г-10-007-89.

Умови виконання критерію 3 (руйнування) визначалися відповідно до ПНАЭ Г-10-007-89. При цьому коефіцієнти надійності при визначенні навантажень, характеристик міцності і деформацій приймалися такими, що дорівнюють одиниці.

Умови виконання критерію 2 (перехід до інтенсивного утворення тріщин) у ДБН В.2.6-98:2009 та в ДСТУ Б В.2.6-156:2010 не визначено. У таблиці 5.1 ДСТУ Б В.2.6-156:2010 визначені обмеження на розкриття тріщин з огляду на умови довговічності та прийняттого вигляду. У [1] було визначено граничне розкриття тріщини в стінці товщиною 1,2 м циліндричної частини ЗОК з огляду на умови втрати герметичності ЗОК. Граничне розкриття тріщини 1,6 мм. Але для дотримання стандартних положень, викладених в ДБН і ДСТУ, критерієм 2 приймаються граничні розкриття тріщин, які дорівнюють

0,4 мм за тимчасовими навантаженнями, що відповідають МПА.

Умови виконання критерію 1 (початок утворення тріщин) визначені в п. 5.2.1 ДСТУ Б В.2.6-156:2010: «Напруження стиску в бетоні повинні обмежуватися для запобігання виникненню поздовжніх тріщин або високого рівня повзучості. Поздовжні тріщини можуть виникати, якщо рівень напружень при нормативному сполученні навантажень перевищує критичну величину. За відсутності інших заходів можливо обмежити напруження стиску до величини $k_{f_{ck}}$. За відсутності більш точних даних величину k_1 рекомендується приймати $k_1 = 0,6$ ».

Результати досліджень

Дослідження з визначення мінімальних зусиль в АК, які забезпечують міцність і герметичність залізобетонних конструкцій ЗО протягом 10 год МПА, були виконані разом з іншими заходами з перепризначення ресурсу ЗО реакторного відділення № 4 Запорізької АЕС [1, 2].

Дослідження граничних значень температури і надлишкового тиску, які відповідають граничній несучій здатності перерізів ЗОК для циліндричної частини ЗО за критеріями 1, 2, 3 за мінімальних зусиль в АК, які дорівнюють 7,8 МН для циліндра і 7,6 МН для купола, наведено в табл. 3–5.

Розрахункові та граничні значення зусиль у залізобетонних елементах ЛСБ визначено відповідно до процедури, викладеної в ПНАЭ Г-10-007-89 (рис. 9).

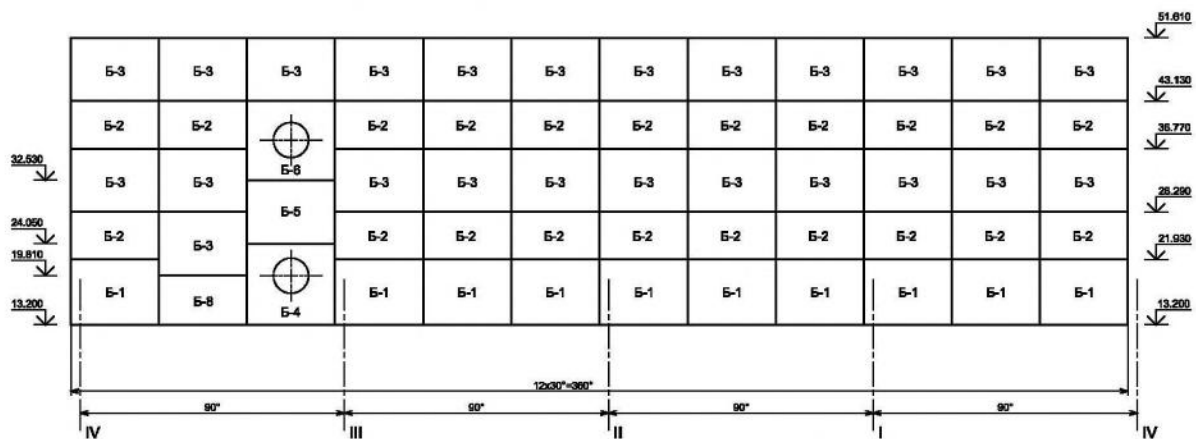


Рис. 9. Схема розкладки арматурних блоків циліндричної частини ЗОК

Аналіз граничних значень температури і надлишкового тиску, які відповідають граничній несучій здатності перерізів для циліндричної частини (арматурний блок № 1) для позначки 13,20–24,05 у

зоні перетину циліндра і опорної плити, наведено в табл. 3–5. Напівжирним шрифтом відзначені зусилля, що перевищують граничні значення за відповідними критеріями.

Таблиця 3. Для перерізів циліндричної частини (арматурний блок № 1) для позначки 13,20–24,05 за критерієм 1

P , тиск, МПа	0 °C	45 °C	65 °C	85 °C
0 МПа	0	$N_{\max} = -8,66$; $M_{\max} = 3,30$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C	$N_{\max} = -12,26$; $M_{\max} = 5,80$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C	$N_{\max} = -15,86$; $M_{\max} = 8,58$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C
0,3 МПа	$N_{\max} = 0,35$; $M_{\max} = -1,13$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C	$N_{\max} = -8,08$; $M_{\max} = 5,12$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C	$N_{\max} = -11,68$; $M_{\max} = 7,90$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C	$N_{\max} = -15,27$; $M_{\max} = 10,68$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C
0,4 МПа	$N_{\max} = 1,13$; $M_{\max} = -0,43$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C	$N_{\max} = -7,89$; $M_{\max} = 5,82$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C	$N_{\max} = -11,48$; $M_{\max} = 8,60$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C	$N_{\max} = -15,08$; $M_{\max} = 11,38$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C
0,5 МПа	$N_{\max} = 1,98$; $M_{\max} = 0,26$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C	$N_{\max} = -7,68$; $M_{\max} = 6,51$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C	$N_{\max} = -11,28$; $M_{\max} = 9,29$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C	$N_{\max} = -14,87$; $M_{\max} = 12,07$; [N_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 4,85 при 40–80 °C

Таблиця 4. Для перерізів циліндричної частини (арматурний блок № 1) для позначки 13,20–24,05 за критерієм 2

P , тиск, МПа	0 °C	45 °C	65 °C	85 °C
0 МПа	0	$N_{\max} = -8,66$; $M_{\max} = 3,30$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C	$N_{\max} = -12,26$; $M_{\max} = 5,80$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C	$N_{\max} = -15,86$; $M_{\max} = 8,58$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C
0,3 МПа	$N_{\max} = 0,35$; $M_{\max} = -1,13$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C	$N_{\max} = -8,08$; $M_{\max} = 5,12$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C	$N_{\max} = -11,68$; $M_{\max} = 7,90$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C	$N_{\max} = -15,27$; $M_{\max} = 10,68$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C
0,4 МПа	$N_{\max} = 1,13$; $M_{\max} = -0,43$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C	$N_{\max} = -7,89$; $M_{\max} = 5,82$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C	$N_{\max} = -11,48$; $M_{\max} = 8,60$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C	$N_{\max} = -15,08$; $M_{\max} = 11,38$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C
0,5 МПа	$N_{\max} = 1,98$; $M_{\max} = 0,26$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C	$N_{\max} = -7,68$; $M_{\max} = 6,51$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C	$N_{\max} = -11,28$; $M_{\max} = 9,29$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C	$N_{\max} = -14,87$; $M_{\max} = 12,07$; [N_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C; [M_{\max}] = 6,5 при 40–80 °C

Таблиця 5. Для перерізів циліндричної частини (арматурний блок № 1) для позначки 13,20–24,05 за критерієм 3

P , тиск, МПа	0 °C	45 °C	65 °C	85 °C
0 МПа	0	$N_{\max} = -8,66$; $M_{\max} = 3,30$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C	$N_{\max} = -12,26$; $M_{\max} = 5,80$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C	$N_{\max} = -15,86$; $M_{\max} = 8,58$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C
0,3 МПа	$N_{\max} = 0,35$; $M_{\max} = -1,13$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C	$N_{\max} = -8,08$; $M_{\max} = 5,12$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C	$N_{\max} = -11,68$; $M_{\max} = 7,90$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C	$N_{\max} = -15,27$; $M_{\max} = 10,68$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C
0,4 МПа	$N_{\max} = 1,13$; $M_{\max} = -0,43$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C	$N_{\max} = -7,89$; $M_{\max} = 5,82$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C	$N_{\max} = -11,48$; $M_{\max} = 8,60$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C	$N_{\max} = -15,08$; $M_{\max} = 11,38$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C
0,5 МПа	$N_{\max} = 1,98$; $M_{\max} = 0,26$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C	$N_{\max} = -7,68$; $M_{\max} = 6,51$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C	$N_{\max} = -11,28$; $M_{\max} = 9,29$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C	$N_{\max} = -14,87$; $M_{\max} = 12,07$; $[N_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C; $[M_{\max}] = 8,1$ при 40–80 °C

Висновки

Установлено, що мінімальні зусилля (нетто) в арматурних канатах циліндра захисної оболонки реактора становлять 7,8 МН, а в арматурних канатах купола – 7,6 МН, що необхідно для забезпечення міцності і герметичності залізобетонних конструкцій циліндричної частини захисної оболонки реактора ВВЕР-1000 для всіх можливих комбінацій температур і надлишкового тиску протягом 10 год максимальної проектної аварії.

Список використаної літератури

1. Выполнение расчетного обоснования надежности СГО ЛСБ энергоблока № 4 на соответствие требованиям действующих НД по определению допустимых усилий натяжения арматурных канатов СПЗО : отчет о НИР (этап 1, ред. 3) / КИЭП. – 181712.218.001РК00 ; Инв № 518-Р/1-518/3.
2. Выполнение расчетного обоснования надежности СГО ЛСБ энергоблока № 4 на соответствие требованиям действующих НД по определению допустимых усилий натяжения арматурных канатов СПЗО : отчет о НИР (этап 2, ред. 1) / КИЭП. – 181712.218.002РК00 ; Инв № 522-Р. – Киев, 2018.

Т. И. Матченко, Т. Ю. Верюжский, Н. А. Сирота,
Л. Б. Шамис

АО «Киевский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Энергопроект»»,
просп. Победы, 4, г. Киев, 01135, Украина

Анализ прочности защитной оболочки реактора при изменениях температуры и давления, вызванных аварией

Разработана расчетная модель защитной оболочки и реакторного отделения в целом с использованием оболочечных конечных элементов на базе расчетного комплекса SCAD, которая позволяет задавать любые усилия в любом из 36 арматурных канатов купола и в любом из 96 арматурных канатов цилиндра защитной оболочки. Определены расчетом усилия в арматурных канатах, которые обеспечивают прочность и герметичность железобетонных конструкций защитной оболочки при максимальной проектной аварии для всех комбинации температур и избыточных давлений в течение 10 ч аварии.

Ключевые слова: защитная оболочка, герметичное ограждение, локализирующие системы безопасности, максимальная проектная авария, арматурный канат.

**T. I. Matchenko, T. Yu. Veryuzhskaya, N. O. Sirota,
L. B. Shamis**

*JSC "Kyiv Research and Design Institute 'Energoproject'",
4, Peremohy av., Kyiv, 01135, Ukraine*

Analysis of the Strength of the Protective Shell of the Reactor with the Change of Temperature and Pressure Caused by the Accident

A containment shell (CS) is used in the localizing safety systems (LSS) and in the sealed enclosure (SE) of the NPP reactor buildings with VVER-1000 reactors to prevent the release of radioactive substances from the reactor building into the environment in the case of a reactor or steam line accident.

The reinforced concrete structures of the dome and the cylindrical part of the CS are prestressed with steel strands (PS) to provide the strength and tightness of the CS in the case of an accident.

When the strands are tensioned with a force creating stresses in the wires that exceed the low cycle fatigue strength of steel, stress relaxation occurs (loss of forces in the strands) during the operation, which makes it necessary to tension periodically the strands to the design values of the forces. The length of the strand wires increases during the tensioning, which reduces their deformation limit. When the deformation limit is exceeded due to the tensioning of the PS, they can rupture, even if the stress does not exceed the yield strength of steel.

The task is to calculate such minimum forces in the PS of the dome and the cylindrical part of the CS that will provide the strength and tightness of the CS in the case of a maximum design basis accident and to create stresses in the PS wires not exceeding the low cycle fatigue strength of steel, or, even better, not exceeding the high cycle fatigue strength of steel.

The design model of the protective shell and the reactor compartment in general with the use of shell finite elements on the basis of SCAD SC is developed, which allows you to set any effort in any of 36 reinforcing ropes dome and in any of

96 reinforcing ropes containment cylinder. The calculation of the effort in the reinforcing rope, which provides the strength and tightness of reinforced concrete structures with maximum design basis accident for all combinations of temperatures and excess pressure during 10 hours of the accident. The magnitudes of the forces in the reinforcing ropes, which ensure the strength of reinforced concrete structures in the event of a maximum design basis accident, are determined. It was established that the minimum forces (net) in the reinforcing ropes of the cylinder of the protective shell of the reactor are 7.8 MN, and in the AK dome are 7.6 MN., which provide the strength and tightness of the reinforced concrete structures of the cylindrical part of the protective shell of the reactor VVER-1000 for all possible combinations of temperatures and overpressure within 10 hours of maximum design basis accident.

Keywords: protective shell, hermetic fencing, localizing security systems, maximum design basis accident, reinforcing rope.

References

1. Research effort report "Implementation of the design justification of the reliability of sealed enclosure system – safety localization system of the power unit no. 4 for compliance with the requirements of the existing regulatory documents (to determine the allowable tension forces of reinforcing ropes containment preloading system)". Stage 1, rev. 3, 181712.218.001PK00, inv. no 518-P/1-518/3. Kyiv Research and Design Institute "Energoproject". (in Russ.)
2. Research effort report "Implementation of the design justification of the reliability of sealed enclosure system – safety localization system of the power unit no. 4 for compliance with the requirements of the existing regulatory documents (to determine the allowable tension forces of reinforcing ropes containment preloading system)". Stage 1, rev. 3, 181712.218.002PK00, inv. no 522-P. Kyiv Research and Design Institute "Energoproject". (in Russ.)

Надійшла 24.01.2019

Received 24.01.2019