

УДК 621.09.536.2-192

ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ПРИ ПЕРЕДАЧІ ЗУСИЛЬ З ДОМКРАТА НА АНКЕР В АРМАТУРНИХ КАНАТАХ ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ

У статті визначена розрахунком втрата зусиль в арматурних канатах при їх передачі з гідравлічного домкрата на анкер із врахуванням усадки внаслідок: стиснення бетону під гайкою анкера; деформації зубів різі гайки і гільзи анкера; вибірки проміжків між зубами гайки і гільзи анкера та внаслідок зміщення упора домкрата.

The article determines the calculation of the loss of effort in the AK when they are transferred from the hydraulic jack to the anchor. The following factors are taken into account: shrinkage due to compression of concrete under the anchor nut; shrinkage due to deformation of the thread of the nut thread and the anchor sleeve; shrinkage due to the selection of gaps between the teeth of the nut and the anchor bolt; shrinkage due to displacement of the jack stops.

Ключові слова: захисна оболонка, герметична огорожа, максимальна проектна аварія, арматурний канат, реакторне відділення, атомна станція.

Визначення розрахунком мінімальних зусиль в арматурних канатах (АК), які забезпечать міцність та герметичність захисної оболонки (ЗО) реакторного відділення (РВ) АЕС при максимальній проектній аварії, включає декілька задач. Зокрема визначення: міцності залізобетонних конструкцій ЗО з урахуванням пошкоджень для будь-якої комбінації зусиль в АК; герметичності сталевого облицювання для будь-якої комбінації надлишкового тиску і градієнта температури; втрат в АК при передачі зусиль з гідравлічного домкрата на анкерний пристрій залежно від розташування, технічного стану АК і каналу; визначення розрахунком реологічних змін в АК і в каналі протягом експлуатації. Експериментальні дослідження цієї задачі викладені в [4]. Але відсутні співвідношення, які дозволяють розрахунком визначати втрати зусиль при їх передачі з гідравлічного домкрата на анкерний вузол для АК купола і циліндра ЗО залежно від характеристик поверхонь арматури і каналу, від наявності іржі і уламків, від видовження і профілю арматури, траєкторії каналу, зусиль в АК.

Мета статті. Визначити розрахунком втрати при передачі зусиль з гідравлічних домкратів на анкерні пристрої АК для виявлення мінімальних зусиль у домкратах при натягненні АК.

Розташування анкерних пристроїв АК на ЗО реакторного відділення приведено на рис. 1.

При передачі зусиль з домкрата на анкерний пристрій відбувається усадка анкера (зменшення його довжини), місцева деформація бетону, вибірка зазорів у нарізних з'єднаннях тощо. Внаслідок цього довжина розтягнутого АК, а також деформації і напруження в їх дротах зменшуються і відбувається втрата зусиль в АК при їх передачі з гідравлічного домкрата на анкер.



Т.І. Матченко
провідний інженер
АТ «Київський науково-дослідний та
проектно-конструкторський інститут
«Енергопроект», к.т.н.

Загальний вигляд анкерних пристроїв приведений на рис. 2. Схема з'єднання гайки і гільзи анкерного пристрою АК приведена на рис. 3. Загальний вигляд гідравлічного домкрата, який застосовується на АЕС України, показаний на рис. 4.

Усадка анкера в абсолютних величинах (мм) включає: усадку u_1 – внаслідок стиснення бетону під гайкою анкера; усадку u_2 – внаслідок деформації зубів різі гайки і гільзи анкера; усадку u_3 – внаслідок вибірки проміжків між зубами гайки і гільзи анкера; усадку $u_4 = 2$ мм внаслідок зміщення упора домкрата.

В загальному вигляді

$$= u_1 + u_2 + u_3 + u_4$$


Рис. 1. Розташування анкерних пристроїв АК на ЗО реакторного відділення



Рис. 2. Загальний вигляд анкерних пристроїв:
а – без коуша; б – з коушом

Розрахунок переміщень під гайкою анкерного вузла δ_1 був виконаний методом скінченних елементів (СЕ) з використанням ПК SCAD для локального фрагмента ЗО. Напружено-деформований стан сталевих і бетонних елементів вузла моделювався з застосуванням об'ємних СЕ. Результати розрахунку переміщень для зусилля в АК, що дорівнює 760 тс (оптимальні для купола), приведені на рис. 5.

Очевидно, що для зусилля в АК, що дорівнює 760 тс, максимальні переміщення під гайкою становлять 0,72 мм. Виходячи з лінійної залежності між зусиллями в анкері (або в АК) і переміщеннями, величина δ_1 зусиль визначається за формулою

$$\delta_1 = \frac{P}{760} \cdot 0,72 \text{ мм.}$$

Розрахунок переміщень δ_2 внаслідок деформації зубів різі гайки і гільзи. У відповідності з маркуванням різі гайки з 360 16 45°, діаметр упорної силової гайки становить 360 мм, крок різі 16 мм, кут нахилу зубів 45° (рис. 6). При висоті гайки 140 мм і кроці різі 16 мм гайка має $n = 8$ зубів.

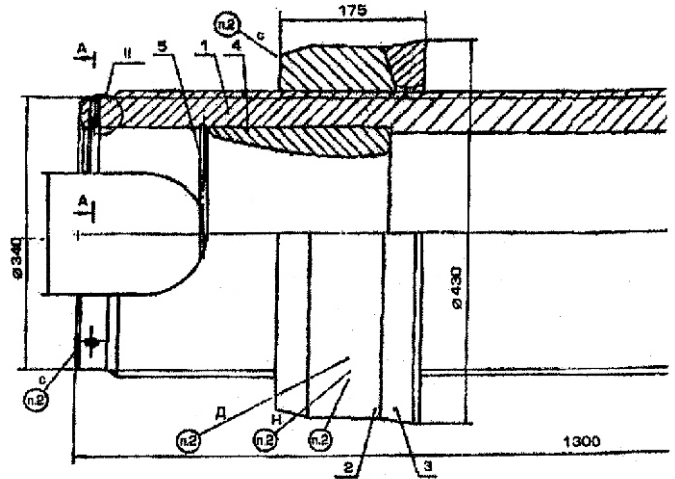


Рис. 3. Схема з'єднання гайки і гільзи анкерного пристрою АК:

1 – гільза; 2 – гайки; 3 – наплавлення для упору гайки на бетон; 4 – внутрішня гайка з конічним отвором; 5 – упор для внутрішньої гайки в гільзі



Рис. 4. Загальний вигляд гідравлічного домкрата, який застосовується на АЕС за ТУ У 29.2-34359707-012:2010

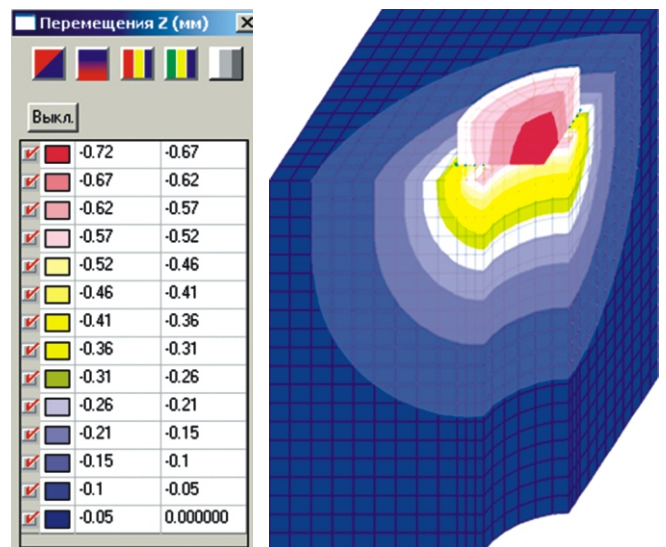


Рис. 5. Чверть розрахункової схеми МСЕ та значення переміщень вздовж осі АК (мм) під гайкою анкерного вузла для зусилля 760 тс

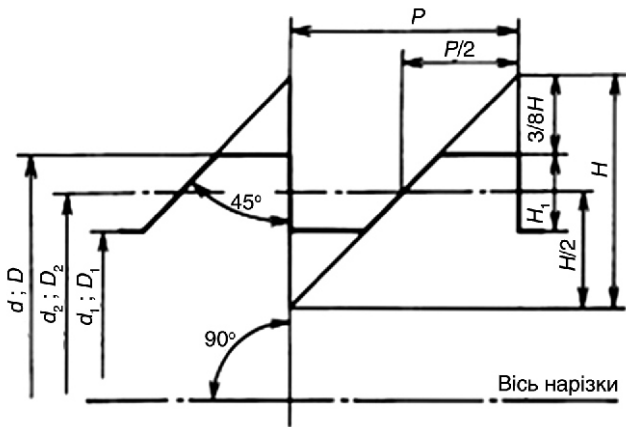


Рис. 6. Силова різь у відповідності з ГОСТ 13535-87

Розміри зубів різі приведені в таблиці 1.

Таблиця 1
(Таблиця 9 з ГОСТ 13535-87) в мм

Шаг P	H = P	$\frac{H}{2}$	$\frac{P}{2}$	$H_1 = 0,25P$
10	10	5	2,5	2,5
12	12	6	3,0	3,0
16	16	8	4,0	4,0
20	20	10	5,0	5,0
24	24	12	6,0	6,0
32	32	16	8,0	8,0
40	40	20	10,0	10,0
48	48	24	12,0	12,0
56	56	28	14,0	14,0
64	64	32	16,0	16,0
72	72	36	18,0	18,0
80	80	40	20,0	20,0

У першому приближенні приймаємо, що зусилля розподіляються рівномірно між усіма $n = 8$ зубами різі. Для різі з кроком 16 мм середня ширина одного зуба становить $P/2 = 8$ мм, висота $H_1 = 4$ мм.

Переміщення середньої за висотою точки зуба δ_2 від зусилля P визначається за формулою

$$\delta_2 = \frac{P(H_1)^3}{n \cdot 3EI}$$

де E – модуль пружності сталі, який дорівнює $2,06 \cdot 10^5$ МПа; I – момент інерції одного зуба різі, який визначається за формулою

$$I = \frac{BH_1^3}{12}$$

Для $D = 340$ мм, або $0,34$ м, $B = 0,008$ м; $H_1 = 0,004$ м, $I = 4,27 \cdot 10^{-11}$ м⁴. Для $P = 7,6$ МН

значення δ_2 дорівнює

$$\delta_2 = \frac{P(H_1)^3}{n \cdot 3EI} = \frac{7,6 \cdot 0,004^3}{8 \cdot 3 \cdot 2,06 \cdot 10^5 \cdot 4,27 \cdot 10^{-11}} = 0,002 \text{ м.}$$

Тоді для будь-якого зусилля в АК у МН величина δ_2 визначається за формулою

$$\delta_2 = \frac{P}{7,6} \cdot 0,002 \text{ м.}$$

Розрахунок переміщень δ_3 анкера внаслідок вибірки проміжків між зубами різі. У відповідності з рис. 4 та таблицею 5 ГОСТ 13535-87 проміжки між зубами різі визначаються за рис. 7.

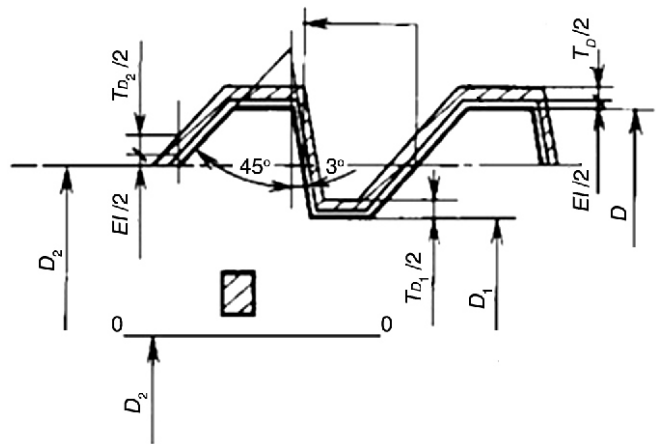


Рис. 7. Проміжки у різі

Згідно зі згаданою таблицею значення EI , T_D визначаються за ГОСТ 25346 і ГОСТ 25347. У відповідності з ГОСТ 25347 для $IT11(T_D) = 0,36$ мм; для $EI(D11) = 0,57$ мм. Проміжок для будь-яких зусиль в АК дорівнює

$$\delta_3 = \frac{EI}{2} \cdot \frac{T_D}{2} = \frac{0,36}{2} \cdot \frac{0,57}{2} = 0,46 \text{ мм.}$$

Сумарне переміщення анкерного вузла при передачі зусилля (МН) з домкрата на анкер визначається за формулою

$$\delta_3 = \frac{P}{7,6} \cdot 0,00072 + \frac{P}{7,6} \cdot 0,002 + 0,00046 = 0,002 \text{ м.}$$

Тоді для АК циліндра

$$\delta_3 = \frac{P}{7,6} \cdot 0,00072 + \frac{P}{7,6} \cdot 0,002 + 0,00046 = 0,002 \text{ м.}$$

Для АК купола

$$1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad \frac{7,6}{7,6} \quad 0,00072 \quad \frac{7,6}{7,6} \quad 0,002$$

$$+0,00046 + 0,002 = 0,00503 \text{ м.}$$

При натягненні АК завдовжки l зусиллям F , подовження кожного дроту визначається за формулою

$$\frac{Fl}{AE_S}; \quad A = nA_5,$$

де A_5 – площа перетину одного дроту 5 мм, m^2 ($A_5 = 0,00019625 \text{ m}^2$); n – кількість дротів в одному АК ($n = 456$ шт); E_S – модуль пружності сталі дротів.

$$E_S = 1,9 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad A = 0,00895 \text{ м}^2.$$

Втрати при передачі зусилля з гідравлічного домкрата на анкерний вузол визначають за формулою

$$F = \frac{AE_S}{l},$$

де Δl – зменшення довжини дротів АК внаслідок переміщень анкерного вузла на 5,1 мм для циліндра і на 5,03 мм для купола; F – втрати зусиль внаслідок їх передачі з гідравлічного домкрата на анкер.

Результати вимірювань втрат зусиль, отриманих за допомогою датчиків сили ПСІ-01 (рис. 8) на 4-му енергоблоці Калінінської АЕС, показали, що при передачі навантаження з домкрата на анкер відбуваються значні втрати зусиль в АК. Так в циліндрі 30 втрати зусиль в середньому становлять 11,7 %, а в куполі 14,15 % від зусилля в АК.

Вочевидь довжина каната l_a , на якому відбуваються втрати зусиль F , визначається з умови

$$F = P,$$

де P – величина втрат зусиль внаслідок тертя АК по стінках каналу та зміни кута траєкторії каната в ньому.

У свою чергу, згідно з п. 3.3.5.6 [5]

$$P = P_{netto} - P_{netto} (e^{(kl_2 \cdot \alpha)}),$$

де P_{netto} – зусилля на анкері АК; l_2 – довжина каната, яка дорівнює l_a ; α – кут відхилення осі АК в точці l_a в порівнянні з точкою АК в анкері; k – коефіцієнт втрат на тертя АК по каналу на 1 м; μ – коефіцієнт тертя між арматурою і каналом (для арматурних пучків з натягненням на упори змінюється від 0,25 до 0,089), що залежить від:

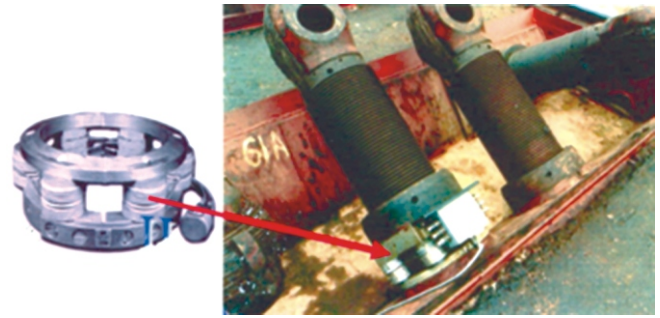


Рис. 8. Датчик сили ПСІ-01 для вимірювання втрат зусиль в АК

характеристик поверхонь арматури і каналу, наявності іржі і уламків, видовження арматури і профілю арматури.

Отже, для нових РВ, в яких АК і канали мають захисні покриття, що зменшують коефіцієнт тертя, $\mu = 0,089$, а для РВ, які експлуатуються понад 30 років, ці покриття кристалізуються, що збільшує коефіцієнт тертя. Виходячи з консервативних міркувань, слід приймати $\mu = 0,25$ для АК, що експлуатуються понад 30 років.

Нехтуючи kl_2 , отримаємо кут α відхилення траєкторії каната, який відповідає його довжині l_a , на якій відбуваються втрати зусиль в АК при їх передачі з домкрата на анкер,

$$\alpha = \ln \frac{P_{netto}}{P_{netto} - P}.$$

На підставі експериментальних досліджень [4] встановлено, що для АК, які експлуатуються понад 30 років, в середньому:

- для купола $\frac{P}{P_{netto}} = 0,1415$;

- для циліндра $\frac{P}{P_{netto}} = 0,117$.

Тоді

- для купола $\alpha = \ln \frac{1}{1 - 0,1415} = 0,6 \text{ рад};$

- для циліндра $\alpha = \ln \frac{1}{1 - 0,117} = 0,49 \text{ рад.}$

Для АК купола значна зміна кута повороту АК проявляє себе біля опорного кільця. До точки $\alpha_2 = 0,6$ рад значення $l_a = 9$ м. Тоді:

$$F_{\text{АНК}} = F \frac{0,00503 \cdot 0,00895 \cdot 190000}{9} = 0,95 \text{ МН.}$$

З рис. 9 видно, що для циліндричної частини зміна кута траєкторії АК різко відбувається на довжині 12 м.

Для циліндра до точки $\alpha_2 = 0,49$ рад значення $l_a = 12$ м. Тоді:

$$F_{\text{АНК}} = F \frac{0,0051 \cdot 0,00895 \cdot 190000}{12} = 0,722 \text{ МН.}$$

Зусилля, яке повинно бути в гідравлічному домкраті при черговому підтягуванні АК, визначається за формулою

$$F_{\text{ГД}} = F_{\text{АКnetto}} + F_{\text{ККД}} + F_{\text{АНК}} + F_{\text{РЕЛ}},$$

де $F_{\text{ГД}}$ – зусилля, якого необхідно досягти в гідравлічному домкраті при підтягуванні АК, виходячи з умови, що при черговому підтягуванні АК через 2 роки зусилля в АК не буде меншим ніж $F_{\text{АКnetto}}$;

$F_{\text{АКnetto}}$ – зусилля в АК, яке є «чистим» на час, коли повинно відбутися їх підтягування або контроль;

$F_{\text{ККД}}$ – втрати зусиль, які обумовлені коефіцієнтом корисної дії гідравлічного домкрата;

$F_{\text{АНК}}$ – втрати внаслідок передачі зусилля з гідравлічного домкрата на анкер;

$F_{\text{РЕЛ}}$ – втрати зусилля, які обумовлені релаксацією напружень в дротах АК і які можна визначити у відповідності з [1].

Згідно з п. 10.1 [2] значеннями $F_{\text{ККД}}$ можна знехтувати. В відповідності з [1] значення $F_{\text{РЕЛ}}$ становить 5 % від значення $F_{\text{АКnetto}}$ для АК, які експлуатуються більше 4 років, і 15 % для АК, які експлуатуються менше 2 років. Встановлено [2], що в канатах, що експлуатуються понад 30 років, значення $F_{\text{РЕЛ}}$ становить менше 1 % від значення $F_{\text{АКnetto}}$ протягом періоду між черговими підтягуваннями.

На підставі виконаних досліджень [2] встановлено, що мінімальні зусилля в АК забезпечують міцність і герметичність РВ при комбінації навантажень: максимальна проектна аварія плюс максимальний розрахунковий землетрус дорівнюють $F_{\text{АКnetto}} = 760$ тс для купола і $F_{\text{АКnetto}} = 780$ тс для циліндра.

При черговому (один раз на 2 роки) підтягуванні АК, які експлуатуються понад 30 років, необхідно досягти наступних зусиль у гідравлічних домкратах:

- для купола

$$F_{\text{РЕЛ}} = 7,6 \text{ тс;}$$

$$F_{\text{ГД}} = 760 + 95 + 7,6 = 862,6 \text{ тс;}$$

- для циліндра

$$F_{\text{РЕЛ}} = 7,8 \text{ тс;}$$

$$F_{\text{ГД}} = 780 + 72,2 + 7,8 = 860 \text{ тс.}$$

Відношення становлять:

- для купола

$$\frac{F}{F_{\text{netto}}} = \frac{95}{760} = 0,125;$$

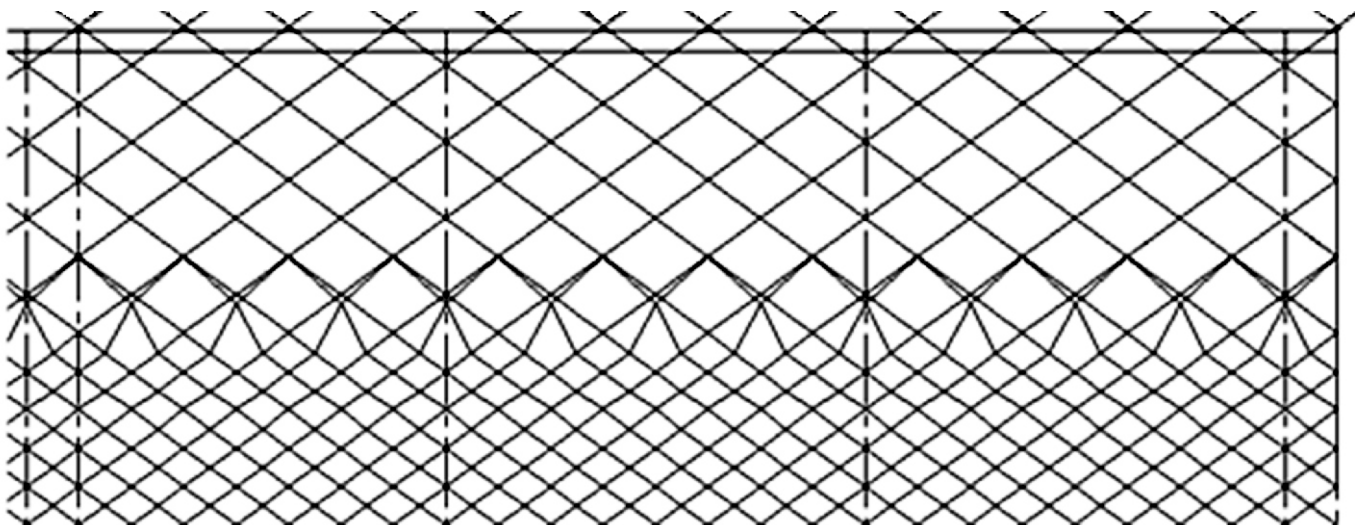


Рис. 9. Траєкторія АК у верхній частині циліндра 30

- для циліндра

$$\frac{F}{F_{netto}} = \frac{72,2}{780} = 0,092.$$

Отримані результати добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень [4].

Запропонована процедура була застосована при визначенні розрахунком втрати зусиль при їх передачі з гідравлічного домкрата на анкерний вузол для АК купола і циліндра ЗО енергоблока № 4 ЗАЕС [2, 3].

Слід зауважити, що багатократне підтягування АК призводить до вичерпання їх деформаційного ресурсу.

Розрахунок залишкового деформаційного ресурсу дротів АК. Під час підтягування арматурних канатів їх довжина збільшується, збільшуються також сумарні деформації повзучості. При цьому сумарна деформація будь-якого дроту каната, яка включає в себе деформацію повзучості і пружності, не повинна перевищувати значення n_{max} (див. табл. 2), інакше відбудеться розрив дроту. Коефіцієнт деформаційного запасу n дроту визначається за формулою

$$n = \frac{n_{max}}{n_{max}}$$

У випадку, коли $n = 0$ відбудеться розрив дроту. Для контролю залишкового деформацій-

ного ресурсу АК необхідно моніторити накопичені деформації повзучості протягом усієї експлуатації окремих АК.

Таблиця 2

Характеристичні значення механічних характеристик сталевих дротів АК на початку експлуатації ($t = 0$)

Марка сталі 65С2ВА у відповідності з ГОСТ 14959-76 та 60С2ХФА за ГОСТ 14959-79	Тимчасовий опір дроту R_b , Н/мм ² або МПа	Умовна межа текучості дроту $R_{p0,2}$, Н/мм ² або МПа	Відносне подовження до n_{max} і після розриву, А, дроту %
65С2ВА	1860	1650	3,5 і 5
60С2ХФА	1670	1470	4 і 6

Висновки.

1. Отримані співвідношення дозволяють розрахунком визначати втрати зусиль при їх передачі з гідравлічного домкрата на анкерний вузол для АК купола і циліндра ЗО залежно від характеристик поверхонь арматури і каналу, наявності іржі і уламків бетону, видовження арматури і профілю арматури, траєкторії каналу, зусиль в АК.

2. Визначені розрахунком втрати деформацій АК і зусиль при їх передачі з гідравлічного домкрата на анкерний вузол для АК купола і циліндра ЗО, які експлуатуються понад 30 років.

[1] ГНД 306.7.02/3.006 98 Методика прогноза зусиль в армоканатах системи преднапряження захитних оболонок енергоблоків ВВЭР 1000 АЭС. – Киев: «Минкобезопасности Украины – ГНТЦ ЯРБ», 1998.

[2] 181712.218.001РК00 ОП «Запорожская АЭС» Энергоблок № 4. Выполнение расчетного обоснования надежности СГО ЛСБ энергоблока № 4 на соответствие требованиям действующих НД (по определению допустимых усилий натяжения арматурных канатов СПЗО) Этап 1 181712.218.001.РК00, ред. 3 (Инв № 518-Р/1-518/3), КИЭП.

[3] 181712.218.002.РК00. ОП «Запорожская АЭС» Энергоблок № 4. Выполнение расчетного обоснования надежности СГО ЛСБ энергоблока № 4 на соответствие требованиям действующих НД (по определению допустимых усилий натяжения арматурных канатов СПЗО). Этап 2 ред.1 (Инв. № 522-Р), 2018, КИЭП.

[4] *Медведев В.Н., Ульянов А.Н.* Сравнительный анализ системы предварительного натяжения защитной оболочки АЭС / Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2008, – С. 99–105.

[5] ДСТУ Б В.2.6-156:2010 Залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Прийнято та надано чинності наказом Мінрегіонбуду України від 28 грудня 2010 р. № 566, чинний з 1 червня 2011 р.]

Надійшла 30.10.2018