

**ПЕРЕВІРКА НА ВІДПОВІДНІСТЬ
ПРОЕКТНИМ ОСНОВАМ ЗАЛІЗО-
БЕТОННИХ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУ-
ЖЕНИХ ЗАХИСНИХ ОБОЛОНОК
АЕС З УНІФІКОВАНИМИ ЕНЕРГО-
БЛОКАМИ № 2 ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ
І № 4 РІВНЕНСЬКОЇ АЕС**

*О.І. Пилипенко, к.т.н.,
В.Ф. Пуляєв, А.В. Герашенко*

Київ

Захисна оболонка уніфікованого енергоблока з реактором ВВЕР-1000 типу в-320 відноситься до локалізуючих систем безпеки¹ і призначена для запобігання або обмеження виділення або випромінювання у навколишнє середовище радіоактивних речовин при аваріях.

Така споруда зводиться з попередньо напруженого залізобетону і являє собою замкнений герметичний об'єм, що складається з вертикального циліндра, купольної частини і стилобата. Сполучення куполу з циліндром здійснюється через кільце опирання; циліндрична частина при сполученні з верхньою плитою стилобата має потовщення (вут).

Захисна оболонка уніфікованого енергоблока з реактором ВВЕР-1000 типу в-320 має такі геометричні розміри, мм :

- висота. 53350
- зовнішній діаметр циліндричної частини. . 47400
- внутрішній діаметр циліндричної частини . 45000
- товщина стінки циліндричної частини . . 1200
- внутрішній радіус сферичної поверхні купола 35000
- товщина купола 1100.

Попереднє напруження захисної оболонки забезпечується системою гелікоїдально-петлевого армування в циліндричній частині і ортогонально-петлевого – в купольній.

У якості арматури, яку напружують, служать сталеві канати із паралельно розташованих високоміцних дротів діаметром 5 мм у кількості 450-456 штук. Кожен з таких канатів проходить

через поліетиленові труби, які закладені всередині залізобетонної конструкції захисної оболонки. Анкерні пристрої для натягування і фіксування канатів розміщуються на опорному кільці.

Конструктивно система попереднього напруження призначена для обтискання захисної оболонки з метою забезпечення тріщиностійкості при аварійних навантаженнях. Ця система включає 96 армоканатів у циліндричній частині та 36 армоканатів у куполі, а також блоки анкерні купольні, блоки опорні нижні і устаткування, за допомогою якого здійснюється натягування канатів.

Арматура без попереднього напруження розташована біля внутрішньої і зовнішньої поверхні захисної оболонки в меридіональному і кільцевому напрямках. Таке армування виконано із стрижнів періодичного профілю класу А-III діаметром 20 ÷ 40 мм. Бетонування оболонки здійснено із застосуванням монолітного бетону класу В30, а всередині вона додатково облицьована листовою сталлю марки ВстЗсп5 за Держстандартом 380-71** завтовшки 8 мм. Подовжній розріз реакторного відділення з захисною оболонкою наведено на рис. 1.

Оскільки при проектуванні захисні оболонки розраховують на сприйняття найневигоднішої комбінації навантажень, яка можлива при проектній аварії, то перед пуском у експлуатацію такі споруди мають бути випробувані на міцність внутрішнім надлишковим тиском повітря до 0,46 МПа (4,6 кгс/см²). Проведення таких випробувань носить назву інтегральних.

Проведення інтегральних випробувань. Згідно з нормативно-технічною документацією, що діє для систем герметичних огорож, в яких можливе виникнення надлишкового тиску більше ніж 4,9 кПа, конструкція оболонки повинна передбачати технічні засоби для контролю та реєстрації під час випробувань і експлуатації її напружено-деформованого стану і температури, які мають бути закладені в оболонку на стадії її будівництва (рис.2). Крім того, захисна оболонка є складною інженерною спорудою із складним технологічним обладнанням, що потребує розроблення спеціальних детальних програм випробувань, у т.ч. і на проектні аварії², такі як, наприклад, розрив паропроводу.

1 Правила устроювання та експлуатації локалізуючих систем безпеки атомних станцій. ПНАЭ Г-10-021-90 – М.: 1991.
2 Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій. НП 306.1.02/1.034-2000. – К.: 2000.

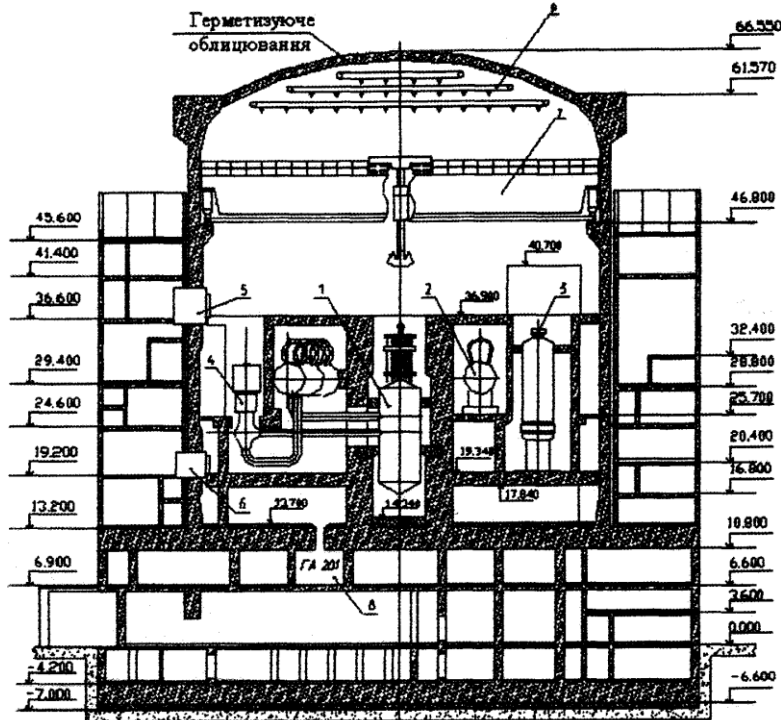


Рис. 1. Поздовжній розріз реакторного відділення із захисною оболонкою:

- 1 – реактор;
- 2 – парогенератор;
- 3 – компенсатор тиску;
- 4 – ГЦН;
- 5 – основний шлюз;
- 6 – аварійний шлюз;
- 7 – полярний кран;
- 8 – бак-прямок;
- 9 – спринклерна система.

Такі програми були розроблені для проведення інтегральних випробувань захисних оболонок Рівненської і Хмельницької АЕС, у якості контрольних виділені наступні параметри:

- напруження (приріст напружень) у стрижневій арматурі, яка не має попереднього напруження;
- відносні деформації (приріст відносних деформацій в бетоні);
- температура бетону;
- радіальні переміщення створів циліндричної частини;
- вертикальні переміщення створів куполу;
- величини розкриття тріщин в бетоні;
- величина надлишкового тиску в герметичному об'ємі;
- час витримки на різних ступенях завантаження надлишковим тиском і декретний час;
- температура і вологість повітря всередині та зовні захисної оболонки.

Вимірювання перелічених параметрів проводилось у місцях, які зазначені у робочій документації і у відповідності із програмою випробу-

вань. На етапі створення надлишкового тиску в 0,46 МПа (4,6 кгс/см²), який модулює навантаження при виникненні проектної аварії, критерії оцінки придатності споруди до експлуатації щодо напружено-деформованому стану були такими:

- ширина розкриття тріщин у бетоні не повинна перевищувати 0,4 мм;
- відносні фіброві деформації на розтягування в бетоні в безмоментних зонах не повинні перевищувати $11 \cdot 10^{-5}$;
- розмір розтягуючих напружень у стрижневій арматурі, що попередньо не напружується, не повинен перевищувати 80 % від розрахункової величини для граничного стану першої групи;
- радіальні і вертикальні переміщення створів залізобетонних конструкцій ЗО не повинні перевищувати розрахункових значень.

Для вимірювання відносних деформацій і температури в бетоні, а також переміщень створів оболонки і зусиль у стрижневій арматурі, яка не підлягає попередньому напруженню, було використано наступне обладнання:

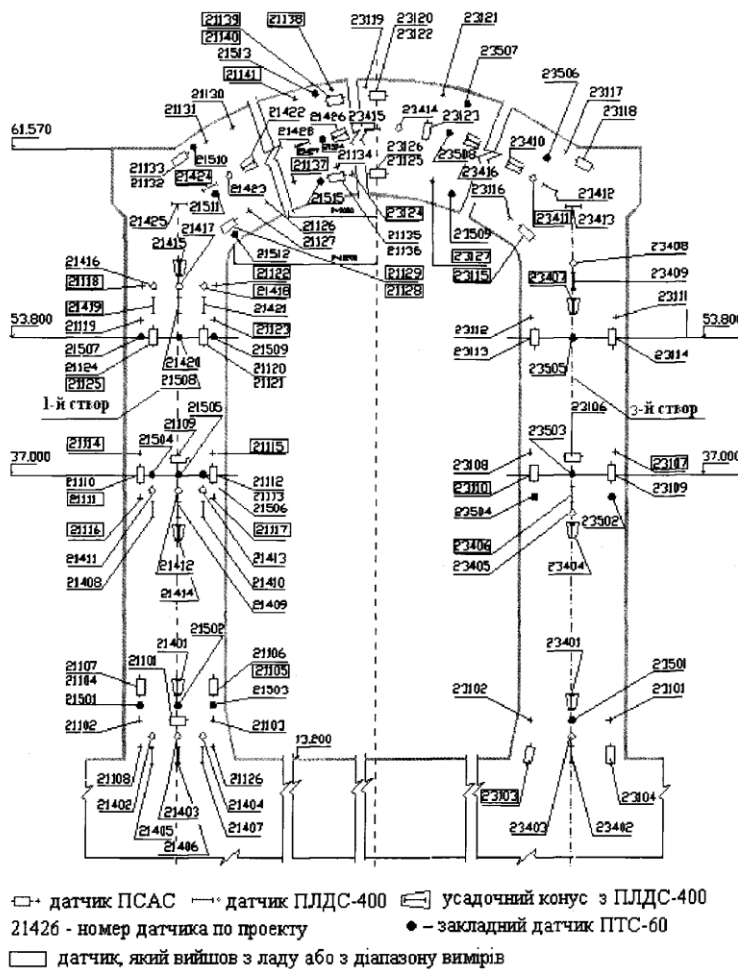


Рис. 2. Схема розташування закладних датчиків у першому і третьому створах 30 енергоблока № 2 Хмельницької АЕС.

- перетворювачі сили арматурні вимірювальні струнні модифіковані типів ПСАС-20с, ПСАС-28с і ПСАС-40с (паспорт 92.2.782.013 ПС) з межею значень допустимої похибки, яка приведена до діапазону вимірів – $\pm 2\%$;
- перетворювач лінійних деформацій вимірювальний струнний типу ПЛДС-400 (паспорт 2.782.000 ПС) для одержання інформації про відносні лінійні деформації бетону з межею значень похибки, яка приведена до діапазону вимірів – $\pm 2\%$;
- перетворювач лінійних деформацій вимірювальний струнного типу ПЛДС-420Н (паспорт 2.782.000 ПС) для одержання інформації про

фіброві відносні лінійні деформації бетону з допустимою межею значень основної похибки, яка приведена до діапазону вимірів $\pm 2\%$. ПЛДС-420Н застосовувався на зовнішній поверхні захисної оболонки енергоблока № 4 Рівненської АЕС;

- перетворювач температури вимірювальний струнного типу ПТС-60 (паспорт 2.828.800 ПС) з діапазоном виміру температури від мінус 20 °С до плюс 60 °С; допустима межа значень основної похибки, яка приведена до діапазону вимірів становить $\pm 2\%$;
- індикатори годинникового типу ИЧ-25 із діапазоном вимірів до 25 мм і ціною поділки 0,01 мм для реєстрації радіальних переміщень створів залізобетонних конструкцій циліндричної частини оболонки;
- високоточний прецизійний нівелір Н-1 (Держстандарт 10528-90) для виміру вертикальних переміщень створів купольної частини;
- рейка нівелірна інварна РН-05 (Держстандарт 10528-90) для високоточних нівелірів;
- теодоліт точний ТБ-1 (Держстандарт 10529-70).

Для струнних вимірювальних перетворювачів підприємство-виробник встановило, що вірогідність безвідмовної роботи приладу протягом 4000 год. є не меншою 0,97, тобто 15 років служби, починаючи з моменту його випуску і включаючи допустимий термін зберігання до 3-х років. Загалом тривалість терміну роботи приладу не залежить від того, чи проводилися відліки по них чи ні, тому що основними елементами перетворювачів є струнні системи, які постійно знаходяться в напруженому стані.

Фактично термін служби струнних вимірювальних перетворювачів у тілі захисних оболонок

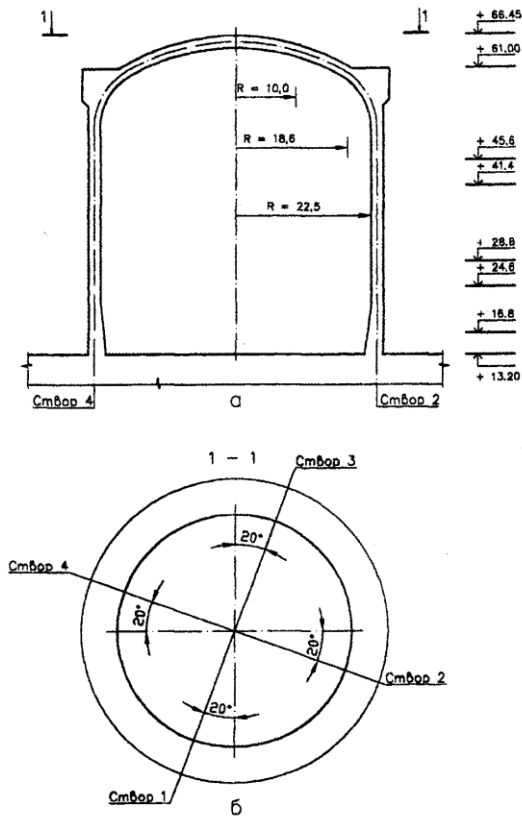


Рис. 3. Схема створів 30 з відмітками (13.200 ÷ 45.600 м) розташування приладів для вимірювання радіальних переміщень.

енергоблоків № 2 Хмельницької і № 4 Рівненської АЕС перевищив вказаний вище ліміт у 15 років у зв'язку із вимушеними призупинками їх будівництва. Тому достовірність показань таких датчиків потребувала додаткового підтвердження, яке може бути отримано будь-яким непрямым методом. Тому було прийняте рішення використовувати показання приладів під час інтегральних випробувань тільки для якісної оцінки напружено-деформованого стану оболонки. Кількісну сторону оцінки планувалось отримати шляхом порівняння натурних значень радіальних і вертикальних переміщень із величинами, які розраховувались чисельними методами.

На рис. 3 показано схему створів оболонки з відмітками розташування приладів

для виміру радіальних переміщень циліндричної частини.

На рис. 4 показана схема розміщення марок у купольній частині для геометричного нівелювання вертикальних переміщень.

Схема розташування закладних струнних вимірювальних перетворювачів у тілі захисної оболонки показана на рисунку 2.

Випробування захисної оболонки виконувалось поетапно. Спочатку внутрішній тиск збільшували за схемою $0 \Rightarrow 0,7 \Rightarrow 2,0 \Rightarrow 3,0 \Rightarrow 4,0 \Rightarrow 4,6$ кгс/см², а потім зменшували у зворотному порядку за аналогічною схемою, а саме $4,6 \Rightarrow 4,0 \Rightarrow 0,7 \Rightarrow 0$. Крім того, на етапах створення тиску 0,7 і 4 кгс/см² додатково проводились перевірки оболонки на герметичність.

На кожному з цих етапів знімалися виміри і будувались відповідні епюри, які потім порівнювались із аналогічними, отриманими чисельними методами з використанням програмних комплексів SCAD і ANSYS.

На рис. 5 представлені розрахункові і натурні епюри радіальних переміщень створів 1, 2, 3, 4 циліндричної частини захисної оболонки енергоблока № 2 Хмельницької АЕС.

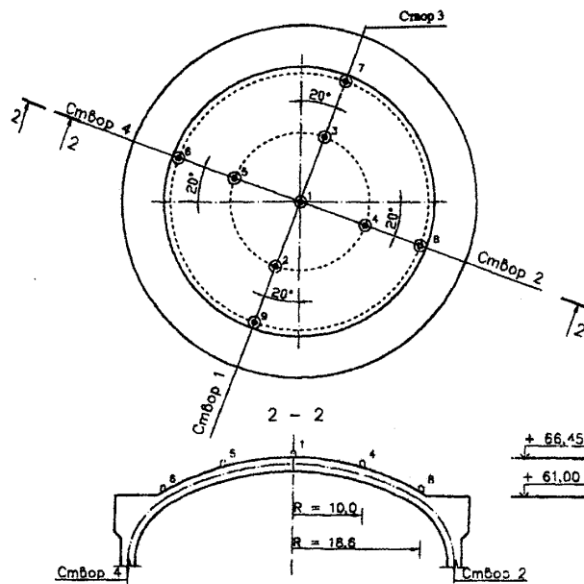


Рис. 4. Схема розміщення марок у купольній частині 30.

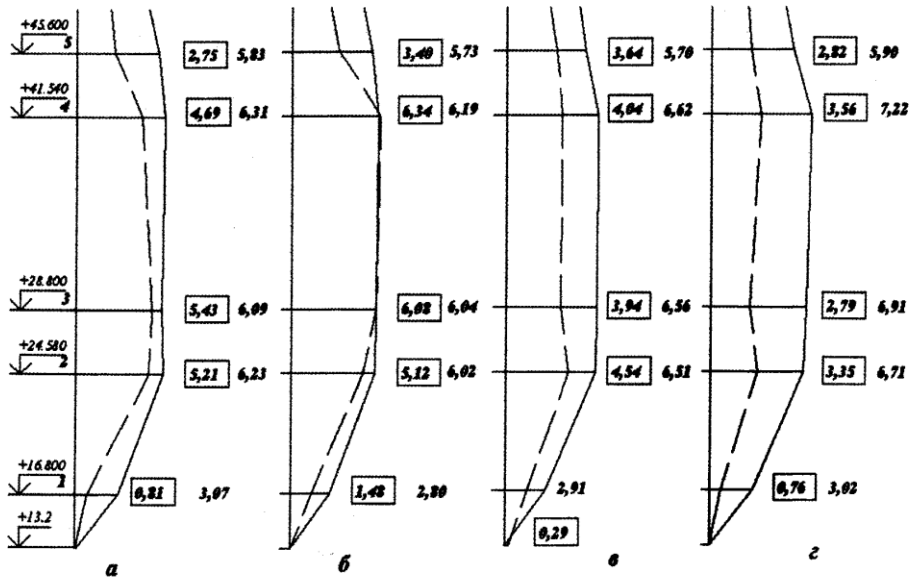


Рис. 5. Циліндрична частина ЗО Хмельницької АЕС.

Розрахункові і натурні епюри радіальних переміщень створів 1(а), 2 (б), 3(в) і 4(г) при $P_{\text{надл}} = 4,6 \text{ кгс/см}^2$. – натурні значення переміщень за замірами.

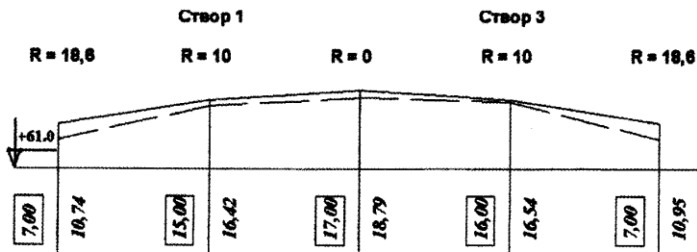


Рис. 6. Купольна частина ЗО блока № 2 Хмельницької АЕС.

Розрахункові і натурні епюри вертикальних переміщень створів 1, 3 ЗО при $P_{\text{надл}} = 4,6 \text{ кгс/см}^2$. – натурні значення переміщень.

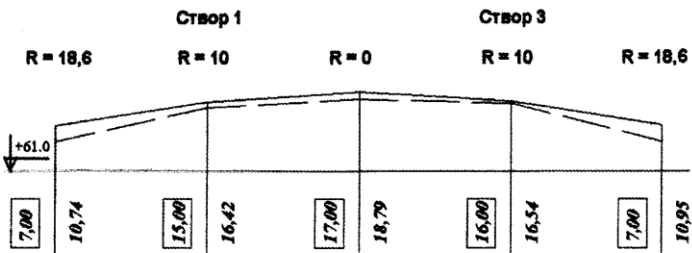


Рис. 7. Купольна частина блока № 2 Хмельницької АЕС.

Розрахункові і натурні епюри вертикальних переміщень створів 2, 4 ЗО при $P_{\text{надл}} = 4,6 \text{ кгс/см}^2$. – натурні значення переміщень.

На рисунках 6 і 7 показані розрахункові і натурні епюри вертикальних переміщень створів 1, 3, 2, 4 купольної частини ЗО.

З наведених вище графічних ілюстрацій випливає, що переміщення в контрольних точках не перевищують розрахункових значень, а робота конструкцій ЗО (бетону та арматури) відповідає пружному її характеру (рис. 8, 9, 10).

На підставі виконаних натурних вимірів параметрів напружено-деформованого стану ЗО від впливу надлишкового тиску $0,46 \text{ МПа}$ ($4,6 \text{ кгс/см}^2$) був зроблений висновок про те, що захисні оболонки енергоблоків № 2 Хмельницької і № 4 Рівненської АЕС витримали випробування на міцність і придатні для експлуатації:

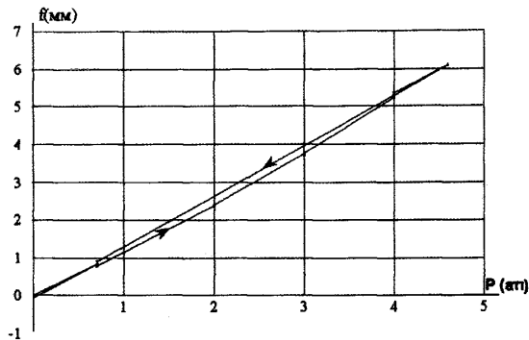


Рис. 8. Графік переміщень циліндричної частини ЗО на відмітці +28.800.

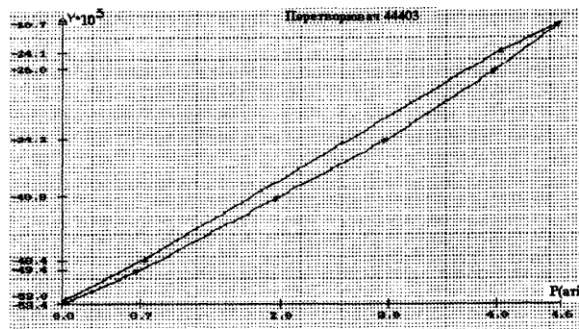


Рис. 9. Графік зміни відносних деформацій у бетоні серединної поверхні циліндричної ЗО РАЕС у кільцевому напрямку.

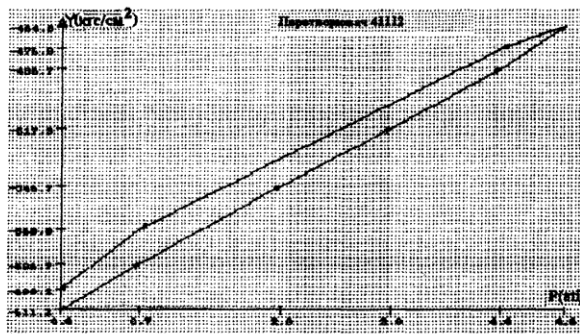


Рис. 10. Зміна напружень у стрижневій арматурі біля внутрішньої поверхні циліндричної частини ЗО РАЕС у меридіональному напрямку.

- у безмоментних зонах усі струнні вимірювальні перетворювачі зафіксували стискаючі відносні деформації і напруження;
- характер переміщень, відносних деформацій і напружень у безмоментних зонах відповідали лінійному закону на всіх етапах створення надлишкового тиску;
- залишкові переміщення в безмоментних зонах були незначними, що дозволяє вважати роботу залізобетонних конструкцій ЗО пружною;
- ширина нетривалого розкриття тріщин не перевищувала критеріальних значень.

Випробування захисних оболонок на міцність і отримані натурні параметри їх напружено-деформованого стану дозволяють ефективно протестувати струнні вимірювальні перетворювачі з метою оцінки їх показань, тому що навантаження від надлишкового внутрішнього тиску дає найбільш чітке уявлення про внутрішні зусилля в розрізах залізобетонних конструкцій ЗО. Останнє впливає з того, що створюваний внутрішній тиск є досить короткочасним і дозволяє уникнути впливу таких додаткових чинників, як повзучість бетону і температурні навантаження. Достовірність показань усіх датчиків оцінювалась на всіх етапах створення надлишкового тиску всередині ЗО, що надавало можливість виявити крім того всі працездатні і непрацездатні прилади.

Актуальність цієї роботи полягає в тому, що згідно з нормативно-технічною документацією, яка діє в атомній енергетиці, необхідно проводити щорічні контрольно-профілактичні роботи протягом перших чотирьох років з дня пуску в експлуатацію системи попереднього напруження захисної оболонки АЕС. Такі роботи виконуються з метою оцінки рівня обтиснення ЗО арматурними канатами шляхом аналізу показань струнних вимірювальних перетворювачів та результатів розрахунку НДС чисельними методами. Отримані оцінки повинні підтвердити здатність ЗО виконувати локалізуючі функції між контрольно-профілактичними роботами у випадку виникнення найнесприятливішої комбінації навантажень, включаючи проекту аварію.

- переміщення залізобетонних конструкцій ЗО не перевищили розрахункові значення;
- напруження у стрижневій арматурі, яка попередньо не напружується, не перевищували критеріальної величини;

