МОНИТОРИНГ НА НАПРЕГНАТАТА СТРОИТЕЛНА КОНСТРУКЦИЯ НА ЗАЩИТНАТА ЧЕРУПКА НА РЕАКТОР ВВЕР 1000. ЧАСТ II

РАДОСЛАВ МЕРДЖАНОВ

*Институт по металознание, съоръжения и технологии
с Център по хидро- и аеродинамика „Акад. Ангел Балевски“,
Българска академия на науките,
бул. Шипченски проход № 67, 1574 София, България,
e-mail: radi@ims.bas.bg*

Резюме. Разгледани са различни методи за мониторинг на предварително напрегнатата стоманобетонна конструкция на защитната черупка на реактор ВВЕР 1000. Определени са обемът, периодичността и критериите за контрол на защитната черупка и минимално допустимите стойности на напрегането на сноповете. В Част II на статията са разгледани критериите за оценка на напрегащите сили както на куполните, така и на цилиндричните снопове. Предложен е нов подход за оценка на напрегащото усилие в сноповете, който дава възможност да се вземат под внимание следните фактори: дължина и геометрия на снопа, триене и величина на поддаване на анкерния детайл.
Ключови думи: напрегната стоманобетонна конструкция, мониторинг, напрегащи снопове.

1. УВОД

Предварително напрегнатата стоманобетонна защитна черупка на реактора изпълнява функцията на бариера, непозволяваща изтичане на радиоактивни продукти при аварийни ситуации, и на сигурна защита при екстремални външни и вътрешни въздействия. Средното усилие във всички напрегащи снопове на стоманобетонната конструкция на защитната черупка на реактора е прието за критерий при оценка на напрегащите сили в сноповете. Минималната допустима стойност на средното напрегащо усилие е 85% от проектната такава, или 850 т.с. При достигане на тази стойност се предприемат мерки за повишаване на средното напрегащо усилие, изразяващи се в донапрягане на част от сноповете.

В настоящото изследване са разгледани критериите за контрол на стоманобетонната конструкция на защитната черупка на реактор ВВЕР 1000 – 5^{ти} и 6^{ти} блок на АЕЦ „Козлодуй“.

DOI: 10.7546/EngSci.LV.18.04.01

Целта на статията е да се определят обемът, периодичността и критериите за контрол на защитната черупка на реактор ВВЕР 1000 на основание на резултатите, получени в рамките на изследването, както и да се дефинират критериите за минимално допустимите стойности на напрегнатото състояние на сноповете.

2. КРИТЕРИИ ЗА ОЦЕНКА НА НАПРЯГАЩИТЕ СИЛИ В СНОПОВЕТЕ

В резултат от проведените аналитични изследвания на стоманобетонната конструкция на защитната черупка на реактор ВВЕР 1000 са установени някои факти, които налагат преоценка и изменения в досегашната практика [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Те се изразяват в следното.

Средното усилие във всички напрегащи снопове на стоманобетонната конструкция на защитната черупка е прието за основен критерий при оценката на напрегащите сили. Проведените изследвания показват, че цилиндричните и куполните снопове трябва да се оценяват поотделно. Напрегнатото състояние на стоманобетонната конструкция на купола е много по-чувствително към промяната на напрегащите сили в сравнение с напрегнатото състояние на конструкцията на цилиндъра. Поради тази причина, критериите за куполните снопове трябва да са различни от критериите за цилиндричните снопове.

Всички оценки за състоянието на напрегащата система се извършват въз основа на получените данни за големината на напрегащата сила в края на снопа – в зоната на анкерирането. В резултат на проведените изследвания стана възможно аналитичното получаване на разпределението на напрегащото усилие по дължината на снопа. Това е много съществено, защото се отчитат загубите от триене, които при цилиндричните и куполните снопове са различни, поради разликата в тяхната дължина и геометрия. Получените резултати позволяват да се премине към една по-прецизна оценка на напрегащото усилие в сноповете, а именно, въз основа на полученото разпределение на напрегащата сила по дължината на снопа, да се изчисли една еквивалентна сила. Величината на тази сила може да се приеме като критерий за оценка на напрегащите сили в сноповете. Основното предимство на предлагания подход е възможността да се вземат под внимание следните фактори: дължина и геометрия на снопа, триене и величина на подаване на анкерния детайл.

3. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

Разпределението на напрегащата сила по дължината на произволно избран регулярен – далеч от отвори, и нерегулярен – около отвори, цилиндричен сноп преди отпускането на криковите е показано на *фиг. 1*, а непосредствено след отпускането на криковите и прието поддаване в анкерите 4, 8 и 12 mm – съответно на *фиг. 2*, 3 и 4. Напрегащата сила и удължението на снопа не са константни, а затихват с отдалечаване от мястото на анкерирание, поради натрупани загуби от триене. По същество тези загуби се състоят от два компонента – загуби от триене вследствие на кривината по траекторията на напрегащите снопове, както и загуби от триене вследствие на случайно отклонение от проектната кривина. От *фигури 1–4* се вижда, че загубите в криволинейните снопове са по-големи, поради по-големите кривини в траекториите им. Отпускането на хидравличните крикове и анкерирането на напрегащите снопове водят до нови

Фиг. 1. Разпределение на напрегащата сила в цилиндричен сноп:
(a) регулярен; (b) нерегулярен

Fig. 1. Distribution of the pre-stressing force in cylindrical tendon:
(a) regular; (b) irregular

Фиг. 2. Разпределение на напрегащата сила в цилиндричен сноп,
поддаване 4 mm: (a) регулярен; (b) нерегулярен

Fig. 2. Distribution of the pre-stressing force in cylindrical tendon,
length change 4 mm: (a) regular; (b) irregular

Фиг. 3. Разпределение на напрегащата сила в цилиндричен сноп, поддаване 8 mm: (a) регулярен; (b) нерегулярен

Fig. 3. Distribution of the pre-stressing force in cylindrical tendon, length change 8 mm: (a) regular; (b) irregular

Фиг. 4. Разпределение на напрегащата сила в цилиндричен сноп, поддаване 12 mm: (a) регулярен; (b) нерегулярен

Fig. 4. Distribution of the pre-stressing force in cylindrical tendon, length change 12 mm: (a) regular; (b) irregular

загуби в сноповете, поради скъсяване на сноповете вследствие поддаване в анкерните детайли, получено от обирването на различните технологични луфтове. Тези загуби се реализират в ограничен фрагмент от сноповете в близост до анкерирването, като дължината на снопа зависи от величината на поддаването в анкерите и коефициента на триене. Физическата причина за явлението е, че сноповете не се скъсяват равномерно по дължината си, поради наличие на триене между тях и каналобразувателите, и не се удължават равномерно при налягане и доналягане, също поради триене. Влиянието на поддаването в анкерите върху разпределението на напрегащата сила в цилиндричните снопове е показано на *фиг. 2, 3 и 4*. Разгледани са случаите с прието поддаване в анкерите 4, 8 и 12 mm, в резултат получената дължината на снопа, върху която се разпростират допълнителните загуби, е съответно 20, 26 и 32 метра.

Криволинейното разпределение на напрегащата сила в снопа може да се приравни до усредненото линейно такова, посредством разделяне на площта на диаграмата за разпределението на напрегащата сила върху дължината на снопа, съгласно формулата:

$$P_{\text{int}} = \frac{\int_0^l P_l \cdot dl}{l}, \quad (1)$$

където P_{int} е интегралната (средната) напрегаща сила в снопа – константна по цялата дължина, P_l е променливата напрегаща сила – виж *фиг. 1–4*, а l е дължината на снопа. В този случай очакваното удължение на снопа може да се пресметне по формулата [7]:

$$\Delta = \frac{P_{\text{int}} \cdot l}{A_{ps} \cdot E_p}, \quad (2)$$

където Δ е очакваното удължение на снопа, P_{int} и l са съгласно формула (1), A_{ps} е площта на напречното сечение на снопа и E_p е еластичният модул на снопа.

Разпределението на напрегащите сили в цилиндричните снопове, преди отпускане на криковете и поддаване в анкерния детайл 0 mm, е показано на *фиг. 5*, а след отпускане на криковете и поддаване в анкерния детайл 6 и 12 mm – на *фиг. 6* и *7*. Показаното разпределение на силата в анкера

Фиг. 5. Разпределение на напрегащата сила в анкера и интегралната сила в цилиндричен сноп, поддаване 0 mm

Fig. 5. Distribution of the pre-stressing force in the anchor and the integral force in the cylindrical tendon, length change 0 mm

Фиг. 6. Разпределение на напрягащата сила в анкера и интегралната сила в цилиндричен сноп, поддаване 6 mm

Fig. 6. Distribution of the pre-stressing force in the anchor and the integral force in the cylindrical tendon, length change 6 mm

Фиг. 7. Разпределение на напрягащата сила в анкера и интегралната сила в цилиндричен сноп, поддаване 12 mm

Fig. 7. Distribution of the pre-stressing force in the anchor and the integral force in the cylindrical tendon, length change 12 mm

е константно за всички снопове, а разпределението на интегралната сила, получена по формула (1), е за снопове от 1 до 96.

Усреднените стойности на напрягащите сили в анкера и интегралната сила са дадени в *табл. 1–2* и показани графично на *фиг. 8–9*, съответно, за регулярни и нерегулярни цилиндрични снопове при различни стойности на поддаване в анкерния детайл. От резултатите, дадени в *табл. 1* и *2* и показани на *фиг. 5–9*, можем да направим следните изводи:

- Средната интегрална сила за нерегулярните снопове е с 5% по-малка от тази в регулярните такива, независимо от приетото поддаване.
- Поддаването в анкерните устройства влияе по-съществено върху изменението на силата в мястото на анкерирание на сноповете в сравнение с интегралната сила. Силата в анкера намалява с 9% и 13% при прието поддаване, съответно, 6 и 12 mm, докато интегралната сила намалява с 1,3% и 2,6% независимо от вида на снопа – регулярен или нерегулярен.

Изчислените сили в куполните снопове – напрегащата сила в анкера и интегралната сила, преди отпускане на криковете са показани на *фиг. 10*, а след отпускане на криковете и поддаване 6 и 12 mm – на *фиг. 11* и *12*, съответно. Означенията по хоризонталната ос са следните: 0 – централен сноп, 4 и –4 – крайни снопове, 1, 2, 3 и –1, –2, –3 – междинни снопове.

ТАБЛИЦА 1. Напрегащата сила в регулярните снопове в зависимост от приетото поддаване

TABLE 1. Prestressing force in regular tendons depending on the accepted length change

Цилиндричен сноп (регулярен)			
Проектна напрегаща сила [т.с.]	1000		
Прието поддаване [mm]	0	6	12
Напрегаща сила в анкера (числен модел) [т.с.]	1001	917	883
Интегрална напрегаща сила по формула (1) [т.с.]	942	930	918

ТАБЛИЦА 2. Напрегащата сила в нерегулярните снопове в зависимост от приетото поддаване

TABLE 2. Prestressing force in irregular tendons depending on the accepted length change

Цилиндричен сноп (нерегулярен)			
Проектна напрегаща сила [т.с.]	1000		
Прието поддаване [mm]	0	6	12
Напрегаща сила в анкера (числен модел) [т.с.]	1000	917	883
Интегрална напрегаща сила по формула (1) [т.с.]	897	886	874

Усреднените стойности на напрегащата сила в анкера и интегралната сила за централен (0, 1, 2) и периферен (3 и 4) куполен сноп, при различни стойности на поддаването в анкерния детайл, са дадени в *табл. 3* и *4* и показани графично на *фиг. 13* и *14*. От резултатите, дадени в *табл. 3* и *4* и показани на *фиг. 10–14*, можем да направим следните изводи:

Фиг. 8. Изменение на напрягащата сила в анкера и интегралната сила в регулярните снопове

Fig. 8. Change of the pre-stressing force in the anchor and the integral force in the regular tendons

Фиг. 9. Изменение на напрягащата сила в анкера и интегралната сила в нерегулярните снопове

Fig. 9. Change of the pre-stressing force in the anchor and the integral force in the irregular tendons

Фиг. 10. Разпределение на напрягащата сила в анкера и интегралната сила в куполните снопове, поддаване 0 mm

Fig. 10. Distribution of pre-stressing force in the anchor and the integral force in the dome tendons, length change 0 mm

Фиг. 11. Разпределение на напрягащата сила в анкера и интегралната сила в куполните снопове, поддаване 6 mm

Fig. 11. Distribution of pre-stressing force in the anchor and the integral force in the dome tendons, length change 6 mm

Фиг. 12. Разпределение на напрягащата сила в анкера и интегралната сила в куполните снопове, поддаване 12 mm

Fig. 12. Distribution of pre-stressing force in the anchor and the integral force in the dome tendons, length change 12 mm

- Средната интегрална сила на периферните куполни снопове е с 1,3% по-малка от тази в централните снопове при прието поддаване от 12 mm. При по-малки поддавания разликата е по-малка и поради това незначителна.
- Поддаването в анкерните устройства влияе по-съществено върху изменението на силата в мястото на анкерирание на сноповете в сравнение с интегралната сила. Силата в анкера намалява с 8–8,5% и 13–14,5% при прието поддаване, съответно, 6 и 12 mm, докато интегралната сила намалява с 2–2,5% и 4–4,5% в зависимост от вида на куполния сноп – централен или периферен.

ТАБЛИЦА 3. Напрягащата сила в централните куполни снопове в зависимост от приетото поддаване

TABLE 3. Pre-stressing force in the central dome tendons depending on the accepted length change

Куполен сноп (централен)			
Проектна напрягаща сила [т.с.]	1000		
Прието поддаване [mm]	0	6	12
Напрягаща сила в анкера (числен модел) [т.с.]	1000	922	886
Интегрална напрягаща сила по формула (1) [т.с.]	952	932	913

ТАБЛИЦА 4. Напрягащата сила в периферните куполни снопове в зависимост от приетото поддаване

TABLE 4. Pre-stressing force in the peripheral dome tendons depending on the accepted length change

Куполен снап (периферен)			
Проектна напрягаща сила [т.с.]	1000		
Прието поддаване [mm]	0	6	12
Напрягаща сила в анкера (числен модел) [т.с.]	1000	921	873
Интегрална напрягаща сила по формула (1) [т.с.]	948	926	901

Фиг. 13. Изменение на средната напрягаща сила в централните куполни снопове

Fig. 13. Change of the average pre-stressing force in the central dome tendons

Освен загубите от триене и поддаване в анкерните детайли, които се реализират непосредствено след напрягането и монтирането на сноповете, напрягащата сила в сноповете се редуцира под въздействието на плавно развиващи се във времето загуби, породени от пълзене и съсъхване на стоманобетонната конструкция (може да се оприличи на геометрично свиване на черупка) и релаксация на стоманените въжета, изграждащи сноповете.

Загубите от съсъхване и пълзене са меродавни за новопостроени конструкции, затова в случая са пренебрегнати. Съгласно проектната документация на високоякостните въжета Ø15,2B7, релаксацията на напреженията за 1000 часа при напрягащо усилие $N_0 = 0,7N_{\text{разр.}}$ е максимално 2,5%. Следователно, за първите 40 дни се очакват допълнителни загуби

Фиг. 14. Изменение на средната напрягаща сила в периферните куполни снопове

Fig. 14. Change of the average pre-stressing force in the peripheral dome tendons

от порядъка на 10–25 тона в зависимост от вида на снопа (цилиндричен – регулярен, нерегулярен, или куполен – централен, периферен) и поддаването в анкера, които кореспондират с данните от САКНСС, предоставени от ЦЕХ „ХТС и СК“. С времето загубите от релаксация затихват. Загубите от релаксация са пропорционални на първоначалните напрежения и деформации в сноповете, в резултат на което напрягащата сила по дължината на сноповете клони към изравняване с тази в анкера, т.е. интегралната напрягаща сила в снопа е приблизително равна на тази в анкера.

От първостепенно значение за експлоатацията на конструкцията на защитната черупка, е въпросът за минимално допустимите стойности на напрягащите сили в сноповете. Всички изчисления за максималната якост на конструкцията са проведени при следните приети напрягащи сили: за цилиндъра – сила в анкера 877 т.с. и поддаване 8 mm, за купола – сила 903 т.с. и поддаване 8 mm. Тези стойности са получени след обработка на базата данни от дългогодишните измервания на силите в напрягащите снопове от старата и новата напрягаща система, извършени от цех „ХТС и СК“, верификация на числения модел с данните от САКНДС и консервативни приемания. В резултат интегралните напрягащи сили, изчислени по формула (1), са съответно:

- регулярни цилиндрични снопове – 809 т.с. на сноп;
- нерегулярни цилиндрични снопове – 771 т.с. на сноп;
- централни куполни снопове – 835 т.с. на сноп;
- периферни куполни снопове – 827 т.с. на сноп.

Общото налягане на стоманобетонната конструкция, прието в изчислителния модел, може да се приравни на 760/800 т.с. (5^{ти} /6^{ти} блок) на снап в цилиндъра и 830 т.с на снап в купола, като при това налягане, напрегнатото състояние в конструкцията удовлетворява изискванията на нормативните документи с известен коефициент на сигурност [9]. За максимална проектна авария, полученият коефициент на сигурност е 1,21, а за най-тежкия сценарий на надпроектна авария е 1,23 – изискванията за напрегнато състояние при проектна авария са по-строги. Ако разделим интензивността на налягане, използвана в изследването, на коефициента на сигурност се получава минималната налягаща сила, при която конструкцията продължава да изпълнява изискванията на нормативните документи – съответно 620 т.с. интегрална сила за цилиндричните снопове и 685 т.с. интегрална сила за куполните снопове.

От получените резултати можем да заключим, че, за да запазва експлоатационна годност, еквивалентното налягане в защитната черупка, представено като средна интегрална сила в цилиндъра и купола, съответно,

$$E_{cyl} = 96 \times F_{int}/96, \quad (3)$$

(93 за 5-ти блок) и

$$E_{dome} = 36 \times F_{int}/36, \quad (4)$$

не трябва да намалява под 620 т.с. за цилиндъра и 660 т.с. за купола.

За да се гарантира, че еквивалентното налягане в конструкцията на защитната черупка няма да достигне минимални стойности при експлоатационен режим на блоковете, налягащата сила в сноповете се контролира чрез САКНСС и директен контрол, като при необходимост трябва да се вземат мерки за доналягане по време на планов годишен ремонт (ПГР). Доналягането трябва да се извърши при констатиране на интегрални налягащи сили в сноповете по-ниски от следните стойности: 700 т.с. в цилиндъра и 750 т.с. в купола. За да се запази изградената през годините методика за контрол на налягащата сила в сноповете, базирана на измерване и интерпретация на налягащата сила в анкерното устройство, е необходимо препоръчаните гранични стойности за интегралната налягаща сила в сноповете да бъдат приравнени до граничните налягащи сили в анкерните устройства. За целта са проведени серия изследвания с вариране на интегралната налягаща сила и налягащата сила в анкерните устройства за регулярни и нерегулярни цилиндрични снопове, като резултатите са обобщени на *фиг. 15* и *16*, където по хоризонталната ос е нанесена интегралната налягаща сила за снап, а по вертикалната ос –

Фиг. 15. Зависимост между интегралната сила и силата в анкера за регулярни цилиндрични снопове

Fig. 15. Dependency between the integral force and the force in the anchor for regular cylindrical tendons

Фиг. 16. Зависимост между интегралната сила и силата в анкера за нерегулярни цилиндрични снопове

Fig. 16. Dependency between the integral force and the force in the anchor for irregular cylindrical tendons

напрягащата сила в анкера. Обобщените резултати за получените стойности за интегралната напрягаща сила и напрягащата сила в анкера за централни и периферни куполни снопове са показани на *фиг. 17* и *18*, съответно.

Фиг. 17. Зависимост между интегралната сила и силата в анкера за централни куполни снопове

Fig. 17. Dependency between the integral force and the force in the anchor for central dome tendons

Фиг. 18. Зависимост между интегралната сила и силата в анкера за периферни куполни снопове

Fig. 18. Dependency between the integral force and the force in the anchor for peripheral dome tendons

В заключение могат да се определят две нива на минимално допустими стойности на налягащите сили, измерени в анкерните устройства. Първото ниво служи за оценка на налягането в един сноп, посредством директен контрол или САКНСС. При констатиране, по време на контрол, на по-ниски от препоръчаните стойности, е необходимо да се извърши доналягане на конкретния сноп до проектните 1000 т.с. на хидравличната

система по прилаганата методика. Второто ниво служи за обща оценка на състоянието на налягащата система. Тази оценка се извършва посредством сравняване на изчислената средна налягаща сила (сумата от силите в анкерите, разделена на техния брой) за цилиндъра и купола. Второто ниво също дефинира една долна граница на налягане в сноповете на защитните черупки, под която не може да се гарантира основната защитна функция. Препоръчаните стойности на налягащите сили в сноповете са следните:

Ниво I – Необходимост от доналягане на налягащите снопове.

- За цилиндрични налягащи снопове – 690 т.с. за регулярни и 710 т.с. за нерегулярни снопове;
- За куполни налягащи снопове – 740 т.с. независимо от положението на налягащите снопове (по изчисления – 738 т.с. за централни и 737 т.с. за периферни налягащи снопове).

Ниво II – При по-нататъшно намаляване на налягащите сили в сноповете, експлоатационната годност на защитната черупка не е гарантирана.

- За цилиндрични налягащи снопове – 620 т.с;
- За куполни налягащи снопове – 655 т.с.

Въз основа на получените резултати може да се дефинират следните критерии за безопасна експлоатация по отношение на напълно отпаднали налягащи снопове.

За цилиндъра:

- При съседни отпаднали налягащи снопове: Два налягащи снопа за защитната черупката на 5-ти енергоблок и три налягащи снопа за защитната черупката на 6-ти енергоблок.
- При равномерно разпределени отпаднали налягащи снопове: 21 налягащи снопа за 5-ти енергоблок и 24 налягащи снопа за 6-ти енергоблок.

За купола:

- При налягащи снопове с успоредно направление: два централни (централна двойка срещуположно закотвени снопа) или четири периферни налягащи снопа (крайните две двойки срещуположно закотвени снопа).
- При налягащи снопове с перпендикулярно направление: четири налягащи снопа, като това са двете крайни двойки куполни снопа.

В случай на отпаднали налягащи снопове, поради поддаване на анкерните детайли или скъсване на въжетата, е необходимо сноповете да бъдат възстановени по време на първия планов годишен ремонт.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата статия са разгледани въпроси относно контрола на стоманобетонната конструкция на защитната черупка на реактор ВВЕР 1000 на АЕЦ „Козлодуй“. Дефинирани са обемът, периодичността и критериите за оценка на съответните детайли и елементи при визуален контрол. Особено внимание е обърнато на специалния контрол и конкретно на контрола на напрегащата система. На базата на получените аналитични резултати са ревизирани използваните критерии за оценка на напрегащите сили в сноповете. Предложена е нова методика за изчисляване на еквивалентната напрегаща сила за индивидуален сноп, поотделно за куполните и цилиндричните снопове, която отчита такива параметри като геометрия и дължина на снопа, триене и поддаване на анкерните детайли. Дефинирани са критерии за минимално допустими стойности на напрегането на сноповете на базата на изчислената еквивалентна напрегаща сила.

Проведените изследвания доказват, че строителните конструкции на цилиндъра и купола на защитната черупка на реактор ВВЕР 1000 нямат дефекти и могат да изпълняват функцията на херметични обвивки, да понесат проектни и екстремни външни и вътрешни въздействия, без да загубят носещата си способност.

REFERENCES

- [1] NPP Containment Pre-stress Loss, Nuclear Energy Agency, Committee on the Safety of Nuclear Installations, NEA/CSNI/R(99)11
- [2] MICHAEL F. HESSHEIMER AND ROBERT DAMERON, Predicting Hoop Tendon Behavior in Pre-stressed Concrete Containment Vessel, *Applied Mechanics and Materials* (2004) 1–2 251–259.
- [3] US NUREG 1.35, Inservice Inspection of UngROUTED Tendons in Prestressed Concrete Containment Structures
- [4] Instruction on Maintenance of the System of Pre-stressing of Protective Shells of Nuclear Power Plants with Unified Power Units of WWER-1000 type W-320, RD EO 0129-98 (in Russian).
- [5] Instruction for Monitoring the State of the Protective Shell of the Nuclear Steam Supply System during the Operation, GOST 29075-91 (in Russian).
- [6] Methodical Recommendations on Field Observations of the Protective Shell of the Reactor Compartment, No NP-006-98, PNAE G-01-036-95 (in Russian).
- [7] M. COLINS AND D. MITCHELL, *Pre-stressed Concrete Structures*, Response Publications, Toronto (1997).

- [8] European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants (2002).
- [9] Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants, Safety Guide, No. NS-G-1.10, IAEA, Vienna (2004).

MONITORING THE STRESSED BUILDING CONSTRUCTION OF THE REACTOR PWR 1000 PROTECTIVE SHELL. PART II

RADOSLAV MERDJANOV

*Institute of Metal Science, Equipment and Technologies,
with Hydro- and Aerodynamics Centre "Acad. A. Balevski",
Bulgarian Academy of Sciences,
67, Shipchenski Prohod Blvd, 1574 Sofia, Bulgaria,
e-mail: radi@ims.bas.bg*

Abstract. Different methods of monitoring the pre-stressed steel-concrete construction of the protective shell of the PWR 1000 reactor are described. The volume, the periodicity and criteria for control of the protective shell are defined, as well minimal permissible values of the pre-stressing tendons. In the Part II of the paper the criteria for assessing the pre-stressing forces of both dome and cylindrical tendons are examined. A new approach is proposed to assess the pre-stressing force in the tendons, which makes it possible to take into account the following factors: length and geometry of beam, friction, and length change.

Keywords: pre-stressed steel-concrete construction, monitoring, pre-stressing tendons.

Received April 15, 2018