МОНИТОРИНГ НА НАПРЕГНАТАТА СТРОИТЕЛНА КОНСТРУКЦИЯ НА ЗАЩИТНАТА ЧЕРУПКА НА РЕАКТОР ВВЕР1000. ЧАСТ I

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 I на статията са разгледани визуалният, геодезичният и специалният контрол.

Ключови думи: напрегната стоманобетонна конструкция, мониторинг, напрегащи снопове.

1. УВОД

Реакторът е разположен в херметичен обем, за граница на който служи защитната черупка. Тя изпълнява функцията на бариера, непозволяваща изтичане на радиоактивни продукти при аварийни ситуации, и на сигурна защита при екстремални външни и вътрешни въздействия. От гледна точка на физическите бариери срещу разпространение на радиоактивни вещества и с концепцията за защита в дълбочина, строителната конструкция на херметичния обем се явява най-важният елемент. Това се дължи на факта, че при развитието на всички аварийни режими, проектни и надпроектни (в частност тежки аварии), компроментирането на отделни бариери в крайна сметка води до възлагане на задържането на радиоактивните вещества от последната бариера – защитната черупка.

В настоящото изследване са разгледани въпроси от контрола на конструкцията на защитната черупка на реактор ВВЕР 1000 – визуалният, геодезичният и специалният контрол.

Целта на статията е да се определят обемът, периодичността и критериите за контрол на защитната черупка на реактор ВВЕР 1000 на основание

DOI: 10.7546/EngSci.LV.18.02.05

на резултатите, получени в рамките на изследването, както и да се дефинират критериите за минимално допустимите стойности на напрегнатото състояние на сноповете.

2. ВИЗУАЛЕН КОНТРОЛ

Визуалният контрол има следните цели: (i) Заснемане на евентуално възникнали дефекти в конструкцията като обрушен бетон, нарушено бетонно покритие, корозия на армировката; (ii) Регистриране и картиране на пукнатини в стоманобетонните елементи; (iii) Регистриране на течове, оглед на хидроизолацията и отводняването.

2.1. Обект на визуалния контрол

Обект на визуалния контрол са следните елементи и детайли от защитната черупка:

- Защитен бетон на купола;
- Външната ламаринена обшивка на цилиндричната част на черупката;
- Защитните стоманени капаци и анкерването на напрегащите снопове;
- Отводняването на анкерните корита;
- Вътрешната ламаринена обшивка на черупката, осигуряваща херметичност.

2.2. Критерии за оценка и периодичност на визуалния контрол

Оценката на състоянието на защитния бетон се извършва въз основа на визуалния контрол, като се следи състоянието на фугите и повърхността на бетона. Изолационният материал на фугите старее бързо, защото работи при много тежки условия – слънчева радиация, големи температурни разлики. С течение на времето, на определени места, изолационният материал се разрушава и се изнася от фугите. В образувалите се кухини се събира прах и други замърсявания от въздуха, като се създават условия за поникване на растителност.

Контролът на повърхността на защитния бетон се състои в следене на общото състояние на бетона – наличие на малки каверни, обрушвания или локални повреди, вследствие на атмосферните условия или някакви допълнителни дейности – прокарване на кабели, инсталиране на уреди.

Целта на визуалния контрол на защитния бетон е своевременно откриване на евентуално възникнали дефекти, които биха довели до намаляване на изолиращата и защитна функция на бетона.

Периодичност на контрола – два пъти годишно. Препоръчителен период – през месеците април и октомври.

Критерии за оценка на състоянието на външната ламаринена обшивка на цилиндричната част на черупката са основно корозията и механичното разместване на листовите от проектното им положение, вследствие на атмосферните влияния. Обшивката трябва да изолира бетоновата повърхност на черупката от контакт с валежните води, което е важен фактор за ограничаване на карбонизацията на бетона.

Периодичност на контрола – два пъти годишно. Препоръчителен период – през месеците април и октомври.

Визуалният контрол за състоянието на защитните стоманени капаци и анкерването на напрегащите снопове следи за нормалното положение на защитните капаци (специално за куполните снопове) и възникнали нарушения в целостта на антикорозионното покритие, и корозия по стоманените капаци и анкерните плочи. Специално за анкерните корита на цилиндричните снопове трябва да се следи за възникване на корозия на стоманените облицовки по стените и дъната (за 5^{ти} блок).

Периодичност на контрола – веднъж годишно за цилиндричните снопове в началото на всеки планов годишен ремонт (ПГР) и три пъти годишно за куполните снопове.

Визуалният контрол за състоянието на отводняването на коритата следи да няма задържане на валежни води в анкерните корита, поради замърсяване на тръбите или недостатъчен наклон на дъната. След окончателното монтиране на новите защитни капаци, замърсяването на тръбите силно ще се ограничи.

Периодичност на контрола – веднъж годишно в началото на всеки ПГР.

Визуалният контрол за състоянието на вътрешната ламаринена обшивка на черупката, осигуряваща херметичност, следи за евентуално възникнали механични повреди по обшивката, в резултат на някакви манипулации в непосредствена близост.

Периодичност на контрола – веднъж годишно в началото на всеки ПГР.

3. ГЕОДЕЗИЧЕН КОНТРОЛ

За изследване на деформирането на черупката на реакторното отделение (РО) на 5 и 6 блок се провеждат геодезични измервания. Измерванията се извършват при всеки ПГР преди началото на ремонтните дейности и в техния край. Предмет на проверка са релсата на подкрановия път на полярният кран и едно хоризонтално сечение на конструкцията на сама-

Фиг. 1. Схема на реакторната черупка
Fig. 1. Scheme of the reactor shell

та черупка. Чрез прецизен електронен тахиметър (LEICA TCA2003 – 0,15 mmgon ъглова точност, 1 mm + 0,5 ppm дължинна точност) се определят плановите координати на контролираните точки (маркирани с постоянна боя) по черупката и известни точки от релсата в предварително развита локална координатна система. От координатите на контролираните точки и проектните координати на центровете на подкрановия път и обшивката се определят измерените действителни радиуси на релсовия път и черупката към момента на извършване на наблюденията. Получените действителни стойности за радиусите се сравняват с проектните стойности за определяне на евентуални измествания спрямо проектния номинал на радиусите. На *фигура 1* е показана схема на реакторната черупка и на разликите между проектния радиус и радиусите към контролираните точки в реакторното отделение.

Определените действителни радиуси от всички измервания са предмет на анализ за развитие на деформационни процеси във времето, като се сравняват всеки две последователни стойности на радиусите, установени при различните проведени наблюдения. Резултатите се документират чрез протоколи, в които се представят под формата на графики и таблици.

От анализа на данните от геодезичния мониторинг на защитните черупки може да се направи изводът, че, преди замяната на старата налягаща система, са съществували неравномерни деформации на защитната черупка, които са предизвикали затруднения при експлоатацията на полярния кран. След монтажа на новата налягаща система, разпределението на деформациите на защитната черупка е значително по-равномерно.

Обемът на провеждания геодезичен мониторинг – брой и разположение на съществуващите репери и честота на измерване, е достатъчен за целите на геодезичния контрол на защитната черупка, няма необходимост от неговото разширяване или изменение.

4. СПЕЦИАЛЕН КОНТРОЛ

4.1. Контрол на напрегнатото и деформирано състояние на защитната черупка

За контрол на напрегнатото и деформирано състояние (НДС) на защитните черупки, в процеса на тяхното изграждане по проект, е монтирана Система за автоматичен контрол на напрегнатото и деформирано състояние (САКНДС). Системата се състои от три вида датчици:

- ПСАС – преобразувател на сила в армировката, струнен, 80–110 броя датчици, монтирани на вертикални (меридианни) и хоризонтални (пръстеновидни, паралелни) армировъчни пръти, *фиг. 2*;
- ПЛДС – преобразувател на линейни деформации, струнен, 50 броя;
- ПТС – преобразувател на температура, струнен, 30 броя температурни датчици.

Преобразувателите са разположени в две сечения на защитната черупка, на три нива в цилиндричната част и в три радиуса в купола, групирани в тридесет и шест точки от външната и вътрешната страна на защитната черупка. На *фигура 3* е показана схемата на разположението на датчиците ПСАС и ПТС от САКНДС в защитната черупка

Данните от всички датчици се събират в измервателната станция на която –4,20 m в РО. Резултатите се обработват и анализират компютърно със

Фиг. 2. Графика на датчик тип ПСАС
Fig. 2. Diagram of the power transducer in reinforcement

специален софтуер. Документът, който регламентира обработката на данните е „Инструкция за мониторинг на състоянието на защитната обвивка на системата за доставка на ядрена пара по време на експлоатация“ [1].

Деформациите в бетона се оценяват както по непосредствени измервания чрез ПЛДС, така и с измерване на напреженията в ненапрегаемата армировка σ_a , измерени чрез ПСАС, съгласно [2]. Като краен резултат от обработката на данните от САКНДС се получава средната интегрална стойност на напреженията в защитната черупка.

Може да се направи заключението, че прилаганата методика за получаване и обработка на данните съответства на физическото състояние на САКНДС и не може да бъде подобрена, без съществени изменения в самата система.

4.2. Контрол на налягащата система

По отношение на контрола на налягащото усилие в сноповете, се прилагат няколко независими метода за контрол – директен метод (чрез отлепване) и контрол въз основа на данните от контролната система САКНДС и системата за автоматичен контрол на налягащата сила в сноповете (САКНСС).

Фиг. 3. Схема на разположението на датчиците
Fig. 3. Scheme of positioning of the transducers

4.2.1. Система за автоматичен контрол на напрегащата сила в сноповете

Системата за автоматичен контрол на напрегащата сила в сноповете е проектирана, изпитана, патентована и внедрена. САКНСС се въвежда успоредно със смяната на системата за предварително напрегане на защитната черупка. Със системата се постига директен контрол в реално време на шест въжета в десет напрегащи снопа тип 55ф15,2 от всяка защитна черупка – общо 60 въжета. Новата САКНСС е базирана на електросъпротивителни тензометрични датчици, групирани по четири броя в специал-

но разработени анкерни измервателни устройства, наречени „дозы-котви“.

На контрол подлежат десет броя напрегащи снопа от всяка защитна черупка – шест цилиндрични и четири куполни снопа. На всяко анкерно устройство са монтирани измервателни дози – на шест от 55^{те} напрегащи въжета, разположени ососиметрично във външните два кръга (пръстена) на блок-котвата.

Дозите са съвместен патент на ИМСТЦХ „Акад. Ангел Балеvски“ към БАН и АЕЦ „Козлодуй“. Датчиците са специално предназначени за измерване на сила и са от типа „самокомпенсиращи се в температурно отношение“, с коефициент на температурно разширение, съответстващ на стоманата. Датчиците имат специална конфигурация, която намалява ефекта от пълзенето на стоманата на дозата. Всяка доза след изработването ѝ получава уникален номер, преминава тариране и се придружава от сертификат, в който са записани нейните технически характеристики.

Дозите са свързани с кабелни връзки с централната измервателна станция, разположена на кота –4,20 m в РО. Системата разполага с подвижна измервателна станция. Данните от всички дози се записват, обработват, систематизират и интерпретират компютърно, с помощта на специално адаптиран за целта софтуер.

Като резултат се получава усредненото усилие в напрегащия сноп. Резултатите, получени за контролираните десет броя напрегащи снопа, се приемат за представителни за всичките 132 снопа в защитната черупка.

САКНСС дава възможност за контрол на напрегащото усилие по време на самото напрегане и след него, по време на експлоатацията на блока. Данните се обработват и резултатите се получават на практика веднага, в реално време. Системата дава възможност за систематизиране на данните от всички, проведени до момента, измервания и тяхната статистическа обработка. Недостатък на системата е невъзможността да се измери интегралното напрегащо усилие в снопа – в зоната на анкерирането, както и разпределението на напрегащата сила по дължината на снопа.

4.2.2. Директен метод

Всички напрегащи снопове в защитната черупка на блокове 5 и 6 на АЕЦ „Козлодуй“ се намират в свободни (неинжектирани) пластмасови канали. Това позволява усилието във всеки от 132^{та} напрегащи снопа да бъде контролирано директно, чрез отлепване на анкерната гайка от опорната плоскост.

Директният контрол на усилията в сноповете се извършва съгласно „Инструкция за поддръжка на системата за предварително напрегнатите

защитни заграждения на атомни електроцентрали с унифицирани мощности на ВВЕР-1000 тип В-320“ [3].

Директният контрол на усилието във всеки сноп започва още при неговото първоначално налягане – след монтажа на снопа. В хода на този процес се следи налягането в хидравличната система на налягащото оборудване и се измерва еластичното удължение – хода на анкерния винт, на снопа. За всеки от 132^{та} налягащи снопа се създава и поддържа (актуализира) база данни, в която се нанасят всички данни за дадения сноп. От паспортите на сноповете може да се добие представа за тяхното поведение през годините, за първоначалното налягащо усилие, данните от предишните контролни „отлепвания“ и загубата на налягаща сила във всеки един сноп. Преди поредния ПГР всички данни за налягащата система на защитната черупка се анализират и се определят налягащите снопове, на които да се извърши контрол и при необходимост – донналягане [4].

Директният контрол се извършва, като на двете анкерни устройства на снопа се монтира налягащо оборудване и се прилага усилие, докато гайката на анкерния винт се отлепи от опорната плоча. Следи се налягането в хидравличната система на криковете и същото се записва в момента, в който гайката се освободи и се завърти свободно около анкерния винт. По този начин се получава реалното усилие в контролирания сноп в дадения момент и този резултат се приема за най-достоверен и надежден.

В случай, че даден сноп е реализирал значителна загуба на налягащо усилие, но същият се намира в добро състояние и няма съществени дефекти, процесът на директен контрол чрез „отлепване“ завършва с донналягане на контролирания сноп. Всички данни от директния контрол и донналягането се нанасят в паспорта на снопа.

Предимства и недостатъци на метода:

- Директният метод е класически при предварително напрегнатите строителни конструкции. Може да се приложи на всеки един сноп и получените резултати са достатъчно точни, при това директно се измерва величината на налягащата сила за целия сноп. Директният контрол може да се съчетае с донналягане на сноп, ако се прецени, че има нужда от такова.
- Един много важен въпрос е следният – колко често и в какъв обем е целесъобразно да се провежда директният контрол. Основен недостатък на метода е потенциалната възможност за проява на скрити дефекти при изработката на анкерните детайли (винт, гайка, блок-котви и клинове). Методиката на директния контрол е такава, че неминуемо се стига до повишаване на напреженията във всички елементи на налягащата сис-

тема, което е неблагоприятно от гледна точка на стареенето ѝ, и може да доведе до дефектиране на даден сноп [5]. Ето защо трябва много внимателно да се преценява необходимостта от провеждането на директния контрол във всеки конкретен случай. Във всички случаи обаче, трябва да се избягва „кампания за масов контрол на сноповете“.

Принципно се препоръчва да се прилага следната концепция. Контролиране на усилията в дадена група снопове, след което следва интервал от време, в който сноповете не се изследват. Ако се приеме среден интервал от време осем години, то за един ППР би трябвало да се контролират по дванадесет цилиндрични и четири куполни снопа. Такава схема осигурява пълен контрол на всички снопове, но обемът на контрола е сравнително голям. От друга гледна точка, не може обосновано да се твърди, че действително има нужда от това, да се контролират всички снопове. Основната причина е недостатъчната информация за поведението на новите въжета във времето и по-специално загубите на напрежение от релаксация. Информация за това, как се държат сноповете във времето, може да се получи по два начина – от данните на САКНСС и от директния контрол.

REFERENCES

- [1] Instruction for Monitoring the State of the Protective Shell of the Nuclear Steam Supply System during the Operation, GOST 29075-91 (in Russian).
- [2] Methodical Recommendations on Field Observations of the Protective Shell of the Reactor Compartment, No NP-006-98, PNAE G-01-036-95 (in Russian).
- [3] 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).
- [4] Nuclear Containments: State-of-Art Report, Stuttgart, Fédération internationale du béton (2001) 1–117, ISBN 2-883-94-053-3.
- [5] R. A. DAMERON, R. S. DUNHAM, Y. R. RASHID AND H. T. TANG, Conclusions of the EPRI Concrete Containment Research Program, *Nuclear Engineering and Design* (1991) **25** 41–55.

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

RADOSLAV MERDZHANOV

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

Summary. 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 I of the paper the visual, geophysical and special controls are examined.

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

Received April 15, 2018