



AGEING MANAGEMENT IN NPP
EFFECTIVENESS OF THE METHODS FOR CONTROL, EXAMINATION AND
MONITORING TOWARD MECHANISMS OF DEGRADATION OF
MECHANICAL PROPERTIES

УПРАВЛЕНИЕ НА РЕСУРСА НА АЕЦ
ЕФЕКТИВНОСТ НА МЕТОДИТЕ НА ТЕХНИЧЕСКО ОБСЛУЖВАНЕ И РЕМОТ ЗА
МЕХАНИЗМИТЕ НА СТАРЕЕНЕ НА МЕТАЛА

Галя Тодорова Димова, e-mail: gdimova@npp.bg, ОКС-ИЦ ДиК, “АЕЦ Козлодуй” ЕАД, България

Abstract: This paper describes ageing management activities for Long Term Operation (LTO) of Components of Kozloduy NPP Plc, Units 5 and 6. The design lifetime for Unit 5 is 2017; for Unit 6 – 2019. The stages of LTO Project are:

Phase 1 - doing of Complex Assessment of the actual condition of the equipment and buildings (2010-2011);

Phase 2 - providing of a Complex Analysis (2011-2017);

Phase 3 – licensing of Plant Life Extension PLEX.

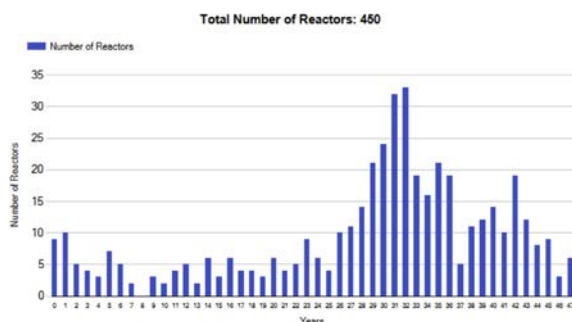
The main activities are (concerning to) assessment of actual condition of the equipment and building; review of methods for control (non-destructive), examination and monitoring; effectiveness of methods for control (non-destructive), examination and monitoring; necessity of additional control / examination/ service.

The paper describes some mechanisms of degradation of mechanical properties, methods for control, examination and monitoring of the equipment and criteria for their effectiveness. The paper consists 2 Tables and 9 Figures.

Keywords: Nuclear Power Plant NPP, Long Term Operation LTO, Plant Life Extension PLEX, ageing management

1. Въведение

Голяма част от ядрените централи в света са експлоатирани над 30 години. Към октомври 2016 г. от всичките 450 експлоатирани централи, 79 са експлоатирани повече от 40 години, а други 182 са експлоатирани повече от 30 години (<https://www.iaea.org/pris>). Проектният срок за експлоатация на централите е обикновено 30-40 години, [1].



Фиг. 1 - Брой на реактори / години на експлоатация

Възможностите за продължаване на срока на експлоатация (ПСЕ) на ядрените централи се демонстрират чрез анализи, изпитвания и управление на ресурса за очаквания допълнителен срок на експлоатация ДСЕ.

Изключително важно е да има оценяване и надграждане на мерките по безопасност при ДСЕ.

Темата на доклада е свързана с управление на ресурса и продължаване на сроковете на експлоатация ПСЕ на енергоблокове в атомна централа и по-конкретно произтича от реализираните и предстоящи задачи по ПСЕ за блокове 5 и 6 в “АЕЦ Козлодуй”. Проектният ресурс на 5 блок изтича през 2017 г., а на 6 блок – през 2019 г. От 2010 г. в Дружеството се изпълнява мащабен проект по комплексна оценка на оборудването и продължаване срока на експлоатация ПСЕ на блокове 5 и 6, [2]. Етапите на проекта ПСЕ са:

- Първи етап – извършване на комплексна оценка на актуалното състояние на оборудването и сградите (2010-2013г.), [3];
- Втори етап – извършване на комплексни анализи на оборудването (2011-2015г.);
- Трети етап – лицензиране от АЯР (2016 г. за 5 енергоблок).

За всеки енергоблок се предвижда допълнителен срок на експлоатация от 30 години. Стандартите и добрите практики на Международната агенция по атомна енергия изискват в АЕЦ да са предприети комплексни дейности по управление на стареенето на съоръженията и обектите, [4,5]. Процесът на управление на стареенето на компонентите започва още при вземане на решение за ДСЕ и продължава до края на експлоатацията на атомната централа. За новите централи се изисква да има управление

на стареенето още в началото на експлоатацията. Процесът по управление на стареенето обхваща следните етапи:

- Избират се компоненти, имащи съществено значение за безопасността, чийто остатъчен ресурс е необходимо да бъде оценен;
- Определят се доминантни механизми на стареене на избраните компоненти и се оценяват съществуващите (или се разработват) ефективни практически методи за мониторинг и за забавяне процеса на стареене;
- Управява се ресурса на определените компоненти чрез прилагане на ефективни практики и инициативи, свързани с правилни проектиране, производство, съхранение, монтаж, надзор, техническо обслужване и експлоатация.

В “АЕЦ Козлодуй” ЕАД има система за техническо обслужване и ремонт (ТОиР), чрез която се извършват планови годишни ремонти на оборудването и тръбопроводните системи, мероприятия по техническо обслужване, ремонти по техническо състояние и коригиращи (аварийни) ремонти, [6]. Чрез системата за ТОиР се поддържа и увеличава надеждността на оборудването, като се ограничава деградацията на функциониращите системи или системите се възстановяват до приемливо ниво за изпълнение на проектните им функции. Методите от системата за ТОиР трябва да осигуряват поддържане на предвидените проектни функции на съоръжението и съхраняване на работоспособността на съоръжението до края на предвидения срок на експлоатация. Оценяването дали методите на ТОиР са ефективни спрямо действащите механизми на деградация се реализира по начин, че да се поддържа/увеличава надеждността на оборудването, и е особено важно за отговорното решение за продължаване на срока на експлоатация на енергоблоковете.

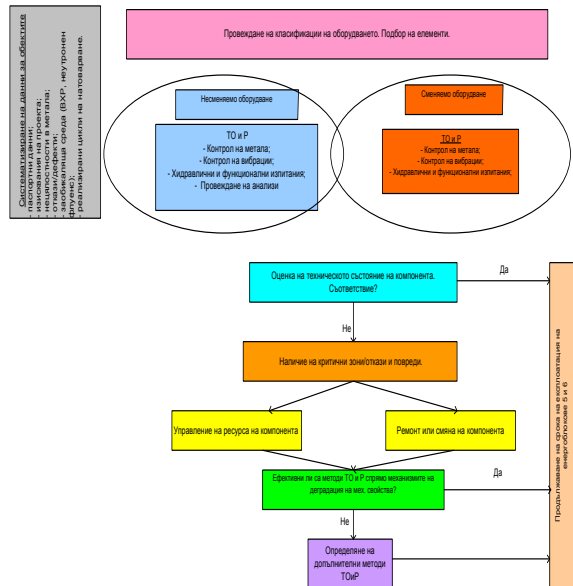
Целта на доклада е да се представят общо дейностите по ТОиР и как се оценява ефективността на методите на ТОиР. В изложението на доклада се описват (част от) механизмите на деградация (или физико-химичните процеси в материалите) под влияние на работните условия. Описва се по какъв начин и с какви методи на ТОиР периодично се следи за изменението на механичните свойства на материалите и за загуба на устойчивост на работещите системи. За атомните централи няма документирани критерии за ефективност на методите на ТОиР, но има много натрупан експлоатационен опит. Изложението в статията се отнася за механично оборудване на основни компоненти и системи по първи контур.

На Фигура 1 се представени дейности по ТОиР в контекста на продължаване на сроковете на експлоатация на енергоблокове 5 и 6, към момента преди ДСЕ.

2. Деградация на механични свойства, методи за ТОиР и оценка на ефективността им

2.1. Корозионно-ерозийни процеси

Корозионно-ерозийните процеси, характерни за АЕЦ са корозионно разрушаване на материалите и последващо ерозийно износване под действие на флуида, [7]. Влияещите фактори са състава, скоростта и температурата на флуида, материала на съоръженията, геометрията на обекта, действащите напрежения, режима на овлажняване /изсъхване на повърхността. Локалната корозия е характерна за парогенератори (ПГ) и уплътнителни повърхности на реактори, компенсатори на налягането (КО) и системи за аварийно охлаждане на зоната (САОЗ).



Фиг. 1. Дейности по ТОиР в контекста на продължаване на сроковете на експлоатация на енергоблокове 5 и 6 на “АЕЦ Козлодуй”.

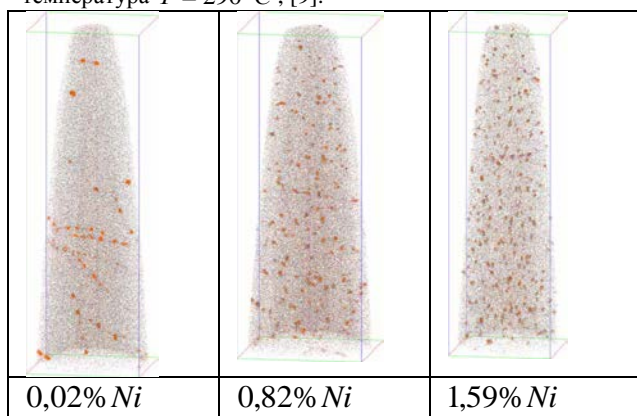
Междукристалната корозия е присъща за реактори и парогенератори; корозионната умора - за парогенератори и компенсатори; а корозия под напрежение – за реактори, топлообменни тръби на ПГ и тръбопроводи от система КО и САОЗ. Напреженията в зоната на колената водят до съществено изменение на електродния потенциал на метала. Напреженията на опън преместват електродния потенциал в отрицателната страна, а свиващите напрежения – в положителната страна. Разтегнатите участъци играят ролята на аноди по отношение на останалия метал и се разтварят най-интензивно. Загубата на работоспособност или промяната на проектни функции на оборудването се изразява чрез:

- Увеличава се вероятността за теч при разкъсване на тръбопроводите поради намаляване на дебелината на стената;
- Нараства честотата на отказите поради промяна на вътрешните напрежения в материалите на системите;
- Нарушават се нормалните условия на експлоатация (ННУЕ) поради неуплътняване;
- Настъпва ННУЕ на топлообменници поради разкъсване на топлообменни тръбички;
- Влошава се топлообмена при наличие на шлам /отлагания;
- Увеличава се радиоактивността поради активирането на продуктите на корозия. Дейностите по ТОиР са 1) провеждане и поддържане на водохимичния режим ВХР; 2) извършване на корозионни обследвания за наличие на шлам/отлагания; 3) провеждане на експлоатационен контрол по методите визуален, капиларен, вихровотоков, механични изпитвания, ултразвукова дебелиметрия на колената, на огънатите участъци или при външната образуваща на коляното. Ефективността на методите за ТОиР при корозионно-ерозионните повреди се изразяват в две направления: 1) провеждане на контрол на ВХР (измеряемите показатели на ВХР да съответстват на нормативите; всички отклонения от нормативите да се отстраняват в определените срокове; да няма нарушение на ВХР такова, че блока да бъде изведен от НУЕ; 2) провеждане на безразрушителен контрол, като своевременно се констатира и ремонтира: нецялостности в метала и заварените съединения, намаление на дебелината на

стената по начин, че да не се стига до отказ на елемента или до повлияване на неговите функции.

2.2. Неутронно окрежкостяване

Неутронното окрежкостяване на метала на корпуса на реактора възниква вследствие на интензивни неутронни потоци в условията на висока температура и високо налягане. При взаимодействието си с веществото неутроните могат да предадат своята енергия на атомите чрез еластични удари или да служат като източник за образуването на заредените частици, [8]. Тези процеси водят до нарушаване на правилното разположение на атомите в кристалната решетка на метала и до образуване на дефекти. Плътноста на радиационните дефекти зависи от вида на лъчението, от неговите параметри, а така също и от ядрено-физичните характеристики на материала. Образоващите се точкови дефекти – ваканции, междувъзлови атоми, внедрени атоми и др. при достатъчно високи температури могат да рекомбинират, да мигрират към обемни или повърхностни изтичания (дислокации, граници на зърната), да образуват натрупване от радиационни дефекти във вид на пори и дислокационни възли. Облъчването на метала с бързи неутрони води до образуването на микроскопични области със структурни увреждания и с висока концентрация на точкови дефекти. Неутронното окрежкостяване влияе на корпуса на реактора, на шахта и выгородка, на блок защитни тръби (БЗТ). Влияещите фактори са стойностите и направлението (посоката) на флуенса, и химичния състав на материалите. Повишеното съдържание на никел Ni и на манган Mn увеличават окрежкостяването поради образуването на Ni-Mn-Si кълъстери (дислокационни възли), а съдържанието на Si намалява окрежкостяването. На Фигура 2 са показани микроскопски снимки на проби с различно тегловно съдържание на Ni (състави на пробата $0,22Cu - xNi - 1,6Mn$), подложени на облъчване при температура $T = 290^{\circ}C$, [9].



Фиг. 2. Образуване на дислокации в проби с различно тегловно съдържание на Ni ($0,22Cu - xNi - 1,6Mn$) при температура $T = 290^{\circ}C$

Неутронното окрежкостяване на феритните стомани се изразява в нарастване ΔT_{kF} на стойността на критичната температура на радиационна крехкост T_k , [8,9]. Неутронно окрежкостяване увеличава вероятността за крехко разрушаване на металите, особено за заварените съединения на корпуса на реактора, разположени срещу активната зона на реактора; а също така се увеличава вероятността за формоизменение на компоненти (шахта и выгородка). Превантивните мерки обхващат:

➤ Използване на нискоутечкови схеми на зареждане на ядреното гориво в активната зона;

➤ Отчитане на стойностите на флуенса след всяка горивна кампания.

Производителят на реакторното оборудване е предвидил пределно допустима стойност на флуенса на неутроните от $5,7 \times 10^{22} n/m^2$ за метала на корпуса на реактора, и това е лимитиращ фактор за безопасната работа на съоръженията. Периодично се пресмята и анализира стойността на критичната температура на радиационна крехкост T_k и се изследват механични характеристики на образци-свидетели от корпусите на реакторите на енергоблокове 5/6. Провежда се експлоатационен контрол на метала по методите визуален, капиларен, ултразвуков, [10]. Периодично се извършват термохидравлични и якостни анализи за оценка на съпротивлението на разпространение на дефект. Изискванията на критериите за ефективност на методите за ТОиР е да се изключва вероятността за крехко разрушаване на метала на корпуса на реактора вследствие на радиационна крехкост или поради наличие на дефект. Изменението на критичната температура на радиационна крехкост ΔT_{kF} трябва да е в допустимите по проекта стойности. Необходимо е своевременно да се констатира и (ремонттира) нецялостности в метала и заварените съединения, по начин, че да не се стига до отказ на елемента или повлияване на неговите функции.

2.3. Циклична умора на металите

Разрушаването при циклично (уморно) натоварване протича под действие на променливи напрежения и деформации; постепенно се натрупват изменения в материала, които довеждат до промяна на свойствата, образуване на пукнатини, тяхното развитие и окончателно разрушаване на обекта. Уморните разрушавания, присъщи за метала на съоръженията в АЕЦ биват многоциклова (високоциклова) умора, малоциклова умора (нискоциклова) и термична умора, която протича в резултат на циклично променящо се температурно поле, Фигура 3.



Фиг. 3. Констатирани нецялостности на основен метал при визуален контрол в резултат на циклична умора

Цикличната умора влияе на реактора, парогенератори, компенсатори на обема, тръбопроводи от системата за компенсация на налягането; главни циркуляционни тръбопроводи, системи за аварийно охлаждане на зоната. Наблюдава се и корозионна умора, която влияе на парогенератори и на компенсатори на налягането. Влияещи фактори на умората са стойността и посоката на действащите напрежения и броя реализирани цикли спрямо проектите. С нарастването на броя цикли се увеличава вероятността за уморно разрушаване на металите. Превантивните мерки срещу цикличната умора се състоят от:

➤ За метала на корпуса на реактора - изследване на образци-свидетели, [11];

- Провеждане на експлоатационен контрол на метала по методите визуален, капиларен, ултразвуков, вихровотоков.
 - Провеждане на хидравлични изпитания.
- Критериите за ефективност на методите за ТОиР изискват:
- За всяко съоръжение да се регистрират и контролират циклите на натоварване в различните проектни режими, по начин, че да не се стига до отказ на елемента или до повлияване на неговите функции.
 - Да се провеждат якостни анализи.
 - Своевременно трябва да се констатира и ремонтна нецялостности в метала и заварените съединения.

2.4. Термично окрежкостяване

Механизмите на стареене на материалите са различни. За металните сплави стареенето се обуславя от процеси на разпадане на преситените твърди разтвори. Термичното окрежкостяване влияе на реактори, парогенератори, компенсатори на налягането, тръбопроводи от системата на компенсатора на налягането, главни циркуляционни тръбопроводи и тръбопроводи от САОЗ. Факторите, влияещи върху термичното окрежкостяване са стойностите на температурата и времето на експлоатация на обекта. Превантивните мерки обхващат:

- За метала на корпуса на реактора се изследват механичните свойства на образци-свидетели;
- Провежда се експлоатационен контрол на метала по методите визуален, радиографичен, металграфски;
- Провеждат се хидравлични изпитания.

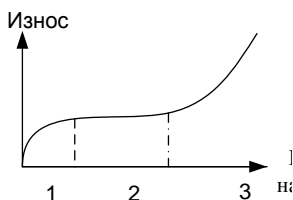
Термичното окрежкостяване увеличава вероятността за крехко разрушаване на обектите. Критериите за ефективност на методите за ТОиР изискват:

- Да се съхраняват механичните свойства на металите;
- Своевременно да се констатира и ремонтна нецялостности в метала и заварените съединения по начин, че да не се стига до отказ на елемента или до повлияване на неговите функции.

2.5. Износ

Многобройните изследвания показват, че процесът на постепенна загуба на работоспособност на работещите детайли може да се раздели на 3 периода: 1) период на наладка, 2) период на нормална работа и 3) износ, предизвикан от нарушение на нормалната работа на обектите, Фигура 4, [7].

В периода на наладката (1) става взаимно изменение на макро- и микрогеометриите на работните повърхности, образуват се продукти на износване и окисление. В този период работните повърхности се износват твърде интензивно. Постепенно износването се намалява, стабилизира се и настъпва период на нормален работен износ (2). Периодът от време по Фаза (2) съвпада с проектния ресурс на блока. След превишаването на някаква енергийна пределна граница, при която настъпва разпадане на преситените твърди разтвори, стойността на износването прогресивно нараства (3), работата на детайлите се влошава и възниква необходимост от ремонт. Фаза (3) е обикновено в края на проектния срок на експлоатация на обектите.

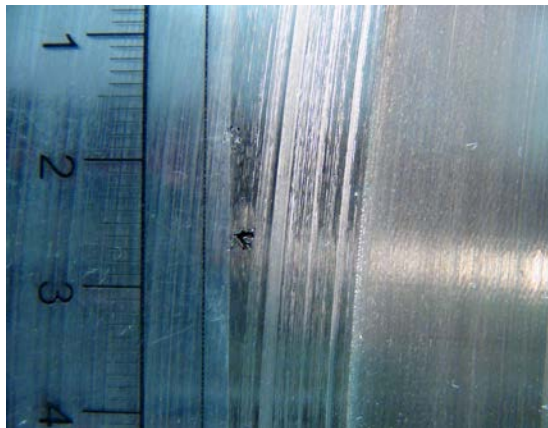


Фиг. 4. Етапи на износа в процеса на наработка на оборудването, Фаза (1) – износване в период на наладка, Фаза (2) - износване при нормална експлоатация, Фаза (3) – износване в края на експлоатационния срок на обекта.

Износът влияе на хидроамортизатори, уплътнителни повърхности, крепежни елементи, вътрешни части на цилиндрични съдове и тръбопроводи. Влияещи фактори върху степента на износване са:

- Съчетание на материалите на работните повърхности;
- Физически, химически и механични свойства на повърхностите, подложени на триене;
- Взаимодействие на работните повърхности със средата;
- Чистота на обработка на повърхностите на триене;
- Вид на триенето (сухо, гранично, полутечно и течно);
- Стойност на нормалното налягане и скорост на работните повърхности една спрямо друга.

От големия брой разнообразни видове на износ на работните повърхности на частите на машините преобладаващо значение има абразивния износ в присъствието на смазки, защото неизбежно възникващите при триене на детайлите на машините продукти на износ се окисляват и се превръщат в своего рода абразивни материали. В режим НУЕ за хидроамортизатори ХА на компонентите на ХА действат незначителни натоварвания и ХА може да спре да изпълнява своите функции. При деградация вследствие на износа, ХА не е способен да изпълнява защитни функции при силни вибрации и рязко преместване на оборудването при сеизмични натоварвания. В процеса на експлоатацията на износ са подложени шпилки (цилиндрична част) и шпилъчни гнезда. Деградацията на механични свойства предизвиква нарушение на крепежната функция и вероятност за неуплътняване на съоръжението. Превантивните мерки обхващат провеждането на визуален оглед при техническо обслужване и при ремонта, Фигура 5. Критерият за ефективност на методите за ТОиР при износването е да не се допускат процеси по износа до степен, която би повлияла на работоспособността на оборудването.

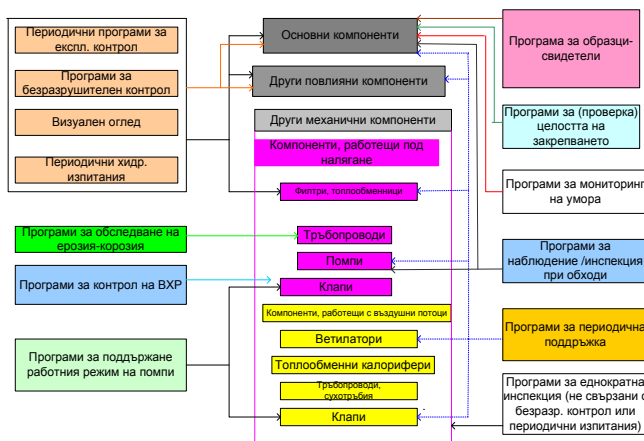


Фиг. 5. Нецялостност от триене и износ, констатирана при визуален контрол.

3. Програми за ТОиР на компоненти и системи в АЕЦ

Съоръженията и компонентите в АЕЦ са обхванати от програми за техническо обслужване и ремонт. Планирани са дейности за контрол, изпитване и мониторинг на оборудването; методите за контрол и мониторинг са насочени към превенция на последиците от присъщите механизми на деградация на механични свойства на метала. Програмите основно са разработени съгласно руските правила и норми за безопасна експлоатация на съоръжения и тръбопроводи в АЕЦ, [12].

С цел управление на стареенето на съоръжения и компоненти на енергоблокове 5 и 6 са разработени и се изпълняват програми за ТОиР, представени на Фигура 6.



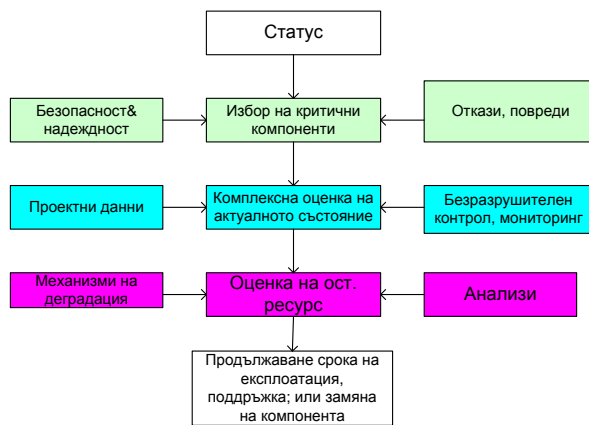
Фиг. 6. Програми за ТОиР на компоненти и оборудване на енергоблокове 5 и 6 в “АЕЦ Козлодуй” ЕАД

Резултатите от изпълнението на програмите по ТОиР служат за оценка на актуалното състояние на компонентите и оборудването и се използват в оперативен порядък - за допускане в експлоатация на обекта; и генерално – при изменение на проекта на обекта, модернизации и при продължаване срока на експлоатация. Незаменяемото оборудване и голяма част от заменяемото оборудване подлежат на оценка на техническото състояние и управление на стареенето при по-нататъшна експлоатация. При първия етап от проекта ПСЕ се извършва комплексна оценка на актуалното състояние на оборудването, [11]. В Таблица 1 са представени контролирани механизми на стареене и съответните параметри, определящи състоянието на метала. На база определящия параметър се установява критерий за оценка на състоянието на обекта.

Контролируем механизъм на стареене на метала	Определящ параметър за състоянието на метала
Изменение на механични свойства	Граница на якост, граница на пълзене, относително удължение, относително свиване, твърдост, KCV (ударна жилавост)
Изменение на структурата	Съдържание на фази, зърна и микропори
Напукване	Геометрични размери на нецялостностите
Ерозия	Повредена площ, дебелина на стената
Питинг	Брой повреждания на 1 ^{-ца} площ и тяхната дълбочина.

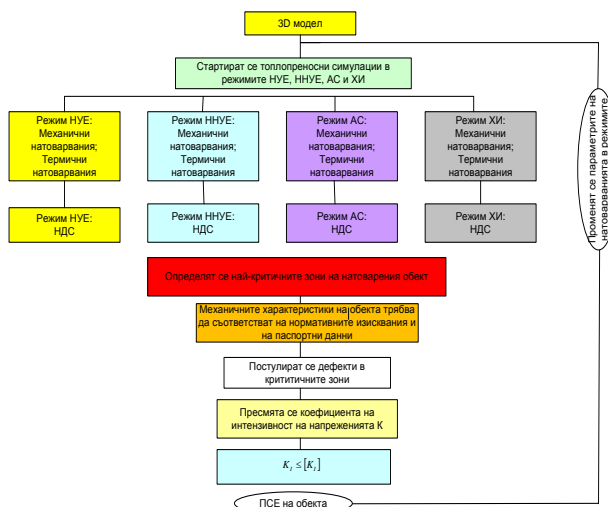
Таблица 1. Механизми на стареене на метала и параметри за състоянието му.

При първия етап от проекта ПСЕ за съоръженията на енергоблокове 5 и 6 се извършва оценка на ефективността на методите за ТОиР. Състоянието на метала беше оценено по съпротивлението на типичните за АЕЦ механизми на деградация на механични свойства. За оценка на изменението на механичните свойства на метала, обаче, се проведеха изпитвания в разширен обем, или с други методи, извън щатните такива, като изпитване на твърдост. При втория етап от проекта ПСЕ се проведеха анализи за конструкционна цялост на съоръженията, основани на комплексната оценка на актуалното състояние, или изходните данни от първия етап се използват за входни данни при втория етап, Фигура 7.



Фиг.7. Процеса на продължаване на срока на експлоатация ПСЕ на компоненти и съоръжения в АЕЦ.

Анализите трябва да съдържат достатъчно данни, за да могат да се дадат заключения за остатъчния ресурс на съответното съоръжение. На Фигура 8 е показан процеса за провеждане на якостни анализи. Софтуерно се конструира 3D модел на обекта, в компютърна среда се симулират механичните и термичните натоварвания в различните действащи режими НУЕ, ННУЕ, АС, ХИ. Механичните характеристики на метала трябва да удовлетворяват нормативните изисквания, [13]. Определят се най-критичните зони на обекта и там се постулира наличието на дефекти с най-неблагоприятен аспект на разположение и големина. Правят се разчети по механика на разрушаване.

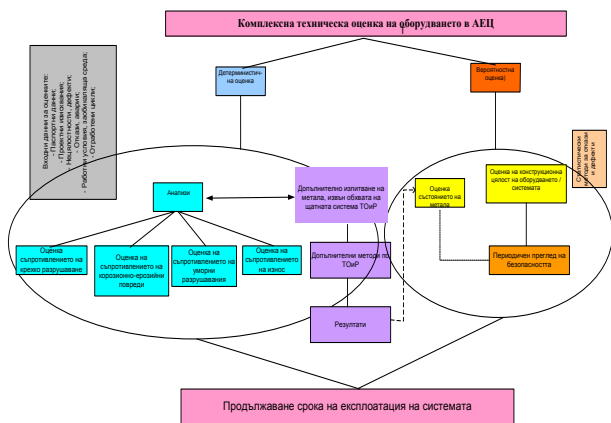


Фиг. 8. Процесът на провеждане на якостен анализ на съоръжение в АЕЦ.

За всички основни типове съоръжения е необходимо да се провеждат анализи, като се избира най-натоварения циркуляционен кръг, или съоръжение.

4. Комплексна техническа оценка на съоръженията

На Фигура 9 е показан пълния процес на комплексна техническа оценка на компоненти и оборудване на енергоблокове 5 и 6 в “АЕЦ Козлодуй” ЕАД. В качеството на входни данни за оценките се използват паспортни данни; проектни изисквания; данни за нецялостности, дефекти; данни за откази, аварии; работни условия, заобикаляща среда и отработени цикли. Изготвят се анализи за статична, динамична якост и сеизмоустойчивост.



Фиг. 9. Процесът на комплексна техническа оценка на компоненти и оборудване на енергоблокове 5 и 6 в “АЕЦ Козлодуй” ЕАД

На основание комплексните оценки за състоянието на обекта, изготвени при първия етап на ПСЕ и анализите при втория етап от ПСЕ се изготвят заключения за остатъчния ресурс и окончателни доклади за продължаване срока на експлоатация.

След анализите и преди окончателното решение за ПСЕ на блоковете, трябва да бъдат проведени оценки на безопасността при експлоатацията и да бъде актуализиран отчетът по ВАБ. Самооценките по факторите по безопасност се извършват в самата АЕЦ, а издаването на лицензията за ДСЕ е от АЯР.

5. Изводи

За енергоблок 5 в “АЕЦ Козлодуй” ЕАД са завършени първия и втория етап от проекта ПСЕ; а за енергоблок 6 в момента се изпълнява втория етап. Извършена е оценка на ефективността на методите по ТОиР. За почти цялото оборудване установения ред и обем на контрол, изпитване и мониторинг, позволява своевременно да се проявят и отстранят дефекти, водещи до отказ на елемент или до повлияване на неговата работоспособност. Необходимото ниво на надеждност и работоспособност на елементите се поддържа чрез системата за ТОиР. Преди ДСЕ, обаче, за някои компоненти се наложи да се проведе допълнително обследване (за вкопани тръбопроводи от система QF, пожарни тръбопроводи от система UJ, опори, хидроамортизатори, вентилационен комин, полярен кран, презареждаща машина на реактора и др.) За това оборудване, което не е включено в щатните програми по ТОиР се разработват допълнителни работни програми за еднократен контрол на състоянието на метала.

В документите от типа заключенията за състоянието на оборудването и окончателни доклади за ПСЕ, за някои компоненти се дават препоръки с цел бъдещата безопасна експлоатация на съоръжението за периода на ДСЕ. Планират се мерки от типа:

- Провеждане на регулярен периодичен контрол;
- Провеждане на еднократен контрол на механични характеристики, след например 10 години на експлоатация. Такава мярка се предвижда в случай, че в някой от натоварващи режими на експлоатация на обекта (ХИ, АС) напреженията достигат максимално допустимите.

6. Термини и съкращения

АЯР – Агенция по ядрено регулиране;
 АЕЦ – Атомна електроцентрала;
 АС – Аварийно състояние;
 БЗТ – Блок защитни тръби;

ВАБ – Вероятностен анализ на безопасността;
 ВХР – Водохимичен режим;
 ДСЕ – Допълнителен срок на експлоатация;
 НУЕ – Нормални условия за експлоатация;
 ННУЕ – Нарушение на нормалните условия за експлоатация;
 ПСЕ – Продължаване срока на експлоатация;
 ТОиР – Техническо обслужване и ремонт;
 ПГ – Парогенератори;
 КО – Компенсатор на налягането;
 САОЗ – Система за аварийно охлаждане на аварийната зона;
 ХА - хидроамортизатори
 ХИ – хидравлични изпитания;
 КСВ - ударна жилавост;
 T_k - критичната температура на радиационна крехкост,
 ΔT_{kF} - изменение на критичната температура.

7. Използвани документи

1. R. Crivanec, J. Fiedler Main corrective measures in an early phase of nuclear power plants preparation for safe long term operation, Nuclear Engineering and Design, 02.03.2017
2. Общий программой комплексного обследования фактического состояния и оценки остаточного ресурса КСК блока № 5 АЭС «Козлодуй» ПМ АТЭ.116/02-0807-2012
3. Отчет по результатам комплексного обследования фактического состояния и оценки остаточного ресурса оборудования и трубопроводов реакторной установки блока 5 АЭС «Козлодуй» в границах проектирования ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»; ОТЧ АТЭ.116/02-0836-2012; изд. Концерн РЭА – EdF
4. IAEA Safety Standards Series № NS-G-2.12, Виена, 2009 г.
5. Ageing Management for Nuclear Power Plant: International Generic Ageing Lessons Learned, IGALL, Safety Reports Series № 82, IAEA, Виена, 2015 г.
6. Дългосрочен график за превантивно техническо обслужване и ремонта КСК от СБ, СВБ для 5 и 6 блоков и ОСО»; № 08.30.ОСО.00.ГР.039/1, “АЕЦ КОЗЛОДУЙ”ЕАД
7. Острейковский В.А. Старение материалов ЯЕ
8. Младен Георгиев Пукнатиноустойчивост на металите при статично натоварване, София, 2005 г., стр. 179-194.
9. Akiyoshi Nomoto; Understanding on the Mechanisms of Irradiation Embrittlement of RPV Steels and Development of Embrittlement Correlation Method; Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) 2014 г.
10. Инструкция за експлоатационен контрол на основен метал, наварени повърхности и заварени съединения на оборудване и компоненти на блокове, тип ВВЕР 1000 в „АЕЦ Козлодуй“; с идентификационен № ЦДК.КД.ИН.084., стр. 3-10.
11. ОТЧЕТ по договор №292000008 "Изпитване и изследване на образци-свидетели от комплект 3л от корпуса на реактора на 5-ти блок и 2л от корпуса на реактора на 6-ти на блок на " АЕЦ Козлодуй" ЕАД.
12. НП-084-15 Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопровод и других элементов атомных станций, Москва, 2015, <https://www.seogan.ru/np-084-15-pravila-kontrolya-osnovnogo-metalla-svamiix-soedineniy-i-naplavlennix-poverxnostey-pri-ekspluatcii-oborudovaniya-truboprovodov-i-drugix-elementov-atomnix-stanciy.html>, раздел II
13. ПНАЭ Г-7-002-86 Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭС, Москва, 1989 г., <http://docs.cntd.ru/document/1200037730>, раздел 5.