

ОЦЕНКА НА ДЕЙНОСТИТЕ ПО БЕЗРАЗРУШИТЕЛНИ И РАЗРУШАВАЩИ МЕТОДИ НА КОНТРОЛ ЗА БЕЗОПАСНА ЕКСПЛОАТАЦИЯ НА АЕЦ

ОЦЕНКА ДЕЯТЕЛНОСТИ ПО БЕЗРАЗРУШИТЕЛНОМУ И РАЗРУШАЮЩЕМУ МЕТОДАМ КОНТРОЛЯ ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС

ASSESSMENT OF NON-DESTRUCTIVE AND DESTRUCTIVE METHODS AND ACTIVITIES FOR SAFETY NUCLEAR POWER PLANT OPERATION

Физ. Димова Г.Т.

ОКС-ИЦ Дик, "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, Козлодуй, България

Abstract: *This paper describes more significant NDT activities in Nuclear Power Plant, as well their assessment for safety NPP operation. The subject concerns ageing management activities for Long Term Operation (LTO) of the Components of Kozloduy NPP Plc, Units 5 and 6. There has a discussion about assessment of effectiveness of NDT methods from point of view resistance against the proper mechanisms of degradation and assessment of NPP's activities scoping safety operation.*

KEY WORDS: NUCLEAR POWER PLANT, MECHANISM OF DEGRADATION, LONG TERM OPERATION.

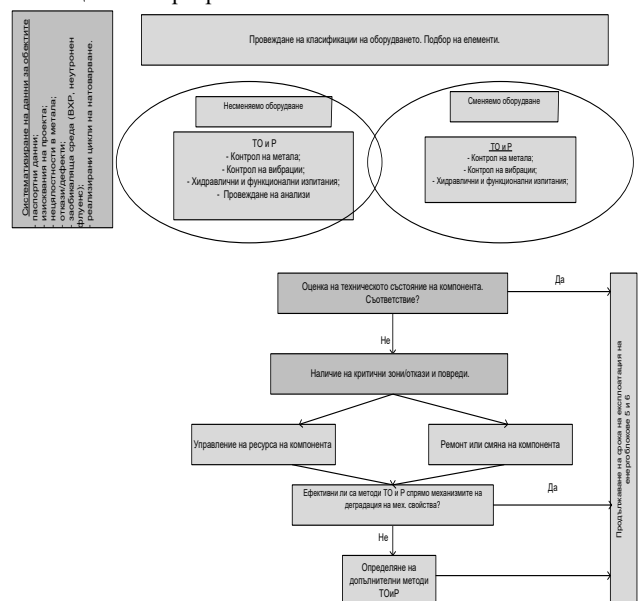
1. Въведение

Целта на настоящия доклад е да обхване по-значимите мероприятия в областта на контрола в ядрената енергетика през последните години, както и оценка на значението им при експлоатацията на АЕЦ, тип ВВЕР. Темата на доклада произтича от проекта за продължаване на сроковете на експлоатация (ПСЕ) на блокове 5 и 6 в "АЕЦ Козлодуй". Реализиране на проекта ПСЕ е от важно значение за политиката по енергийно развитие на страната. Проектният ресурс на 5 блок изтича през 2017 г., а на 6 блок – през 2019 г. Процесът на управление на стареенето се състои от три основни типа мероприятия: 1) Избор на компоненти, имащи съществено значение за безопасността, чийто остатъчен ресурс е необходимо да бъде оценен; 2) Определяне на доминантни механизми на стареене на избраните компоненти и идентификация, или разработка на ефективни практически методи за мониторинг и забавяне процеса на стареене; 3) Управление на 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" има система за техническо обслужване и ремонт (ТОиР), по която се извършват планови годишни ремонти на оборудването и тръбопроводните системи, мероприятия по техническо обслужване, ремонти по техническо състояние и коригиращи (аварийни) ремонти. Мероприятията за прилагане и развитие на методите за безразрушителен и разрушаващ контрол са част от системата ТОиР. Целта на ТОиР е да 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. Оценяването дали методите на контрол спрямо действащите механизми на деградация са ефективни по начин, че да се поддържа/увеличава надеждността на оборудването, е особено важно за отговорното решение за ПСЕ на енергоблоковете. Тези оценки за ефективност на методите на контрол са многопланини и включват (първоначално) дейности по оценка на техническото състояние на компоненти и съоръжения. На основание тази оценка се правят анализи дали всички компоненти, важни за безопасната експлоатация на АЕЦ, са обхванати от системата на ТОиР, и в частност – провежда ли се регулярен безразрушителен контрол. За ПСЕ на компонентите над проектния срок трябва да има техническо заключение, че прилаганите методи на контрол са ефективни по отношение на действащите механизми на деградация.

За атомните централи няма документирани критерии за ефективност на методите на ТОиР, но има много натрупан

експлоатационен опит, който се изучава и прилага. Изложението в доклада обхваща механично оборудване на основни компоненти и системи по първи контур. На Фигура 1 са показани основните стъпки за оценка на техническото състояние на компоненти и съоръжения (първи етап от проекта ПСЕ). Във всяка действаща АЕЦ има огромен брой компоненти, възли и детайли. Не е целесъобразно да се оценява състоянието на всеки отделен детайл, затова се провеждат класификации за подбор на съоръжения и елементи от системите за безопасност и от системите, важни за безопасността. Друг тип класификация е по отношение сменяемо-несменяемо оборудване. Оформят се списъци на компоненти, за които е важно да бъде оценено техническото им състояние. За тези избрани вече компоненти се систематизират данни от експлоатационната им история (паспортни и нормативни изисквания, брой отработени цикли на натоварване, функционални откази, дефекти в метала), а също и методите на ТОиР. Изготвят се листове от обследване на всяко съоръжение. Описват се критичните зони в метала, при необходимост се взема решение за смяна на компонента, а за несменяемо оборудване - за допълнително обследване, извън щатните програми по ТОиР.



Фиг. 1: Дейности по ТОиР в контекста на продължаване на сроковете на експлоатация на блокове 5 и 6.

2. Методи и обеми на контрол в АЕЦ

Руските документи [1,2] регламентират обхвата на съоръженията и компонентите, които трябва регулярно да се контролират, обемите на контрола, а също методите на контрола и периодичността за прилагането им. По съоръженията се контролират външна и вътрешни повърхности (основен метал и заварени съединения), заварени съединения на прилежащите щупери/тръбопроводи, уплътнителни повърхности и крепежни елементи. По тръбопроводите се контролират заварени съединения, колена, тройници и арматура. Работните програми за експлоатационен контрол на метала предвиждат периодичност на контрола през 4 години (или 30 000 часа) за съоръжения от системите за безопасност на АЕЦ, или от системите, важни за безопасността. За тръбопроводните системи от втори контур периодичността на контрола се увеличава. Принципите при провеждане на експлоатационен контрол на метала на съоръжения и тръбопроводи в “АЕЦ Козлодуй” са: 1) Строго се спазват изискванията на нормативните документи; 2) Прилага се консервативен подход: интервалите се намаляват при установени при експлоатацията критични зони; 3) Оборудването в АЕЦ е класифицирано по степен на важност за безопасната работа на съоръженията; 4) Прилаганите методи на контрол са съобразени с референтните механизми на деградация на механични свойства на метала в работната среда.

Работните програми за ТОиР, обаче, се изготвят на основание руските нормативни документи. При изпълнение на проекта за ПСЕ на блокове 5 и 6 става ясно, че в програмите не е включен контрола на някои важни за безопасността системи на АЕЦ. Причината за това е, че не е имало такова изискване в руските нормативни документи, изготвени през 90-те на миналия век. Специално за АЕЦ, тип ВВЕР, типичните програми не изискват мерки за контрол на механични свойства на опори, (на корпуси на реактори, на парогенератори), на полярен кран и презареждаща машина за ядреното гориво, на хидроамортизатори на парогенератори; на пожарни тръбопроводи и сухотръбия, на вътрешно-корпусни устройства и арматура. На тези обекти се налага да се прилага допълнително, извън щатните програми, визуален и капиларен контрол. Ултразвуков контрол се прилага основно за превенция на корозионните повреди и опасност от изтъняване на стените на тръбопроводи и арматура. Особеностите при контрола на вътрешно-корпусните устройства са свързани с оценка на изменението на геометричните размери на вътрешно-корпусната шахта, поради очаквано раздуване (набухване) в условията на радиация. С цел отчитане на уякчаването в условията на радиация, е наложително допълнително преди ПСЕ на съоръженията, да се прилага метода за контрол на твърдост. За оценка на евентуални фазови трансформации се извършва металографски контрол. С увеличаване на експлоатационния срок на ядрените мощности поради естествените процеси на стареене на метлите, се увеличават дефектите. Това предполага развитие на дейностите по контрола на метала в следните направления: 1) Прилагане на методи на контрол, които са свързани с установяване на критични зони с повишена концентрация на напреженията; 2) Използване на диагностичните системи, монтирани на съоръжения в АЕЦ. Тенденцията е обхвата на методите да се определят от установените и потенциално възможни механизми на деградация на механични свойства, (Таблица 1).

Таблица 1. Оборудване и методи на контрол

№	Оборудване	Механизми на деградация	Методи по работните програми
1.	Корпус на реактора, КР	Термично окрежкостяване, неутронно окрежкостяване умора	VT, PT, ET, UT
2	Парогенератор, ПГ	Корозия, умора, термично стареене	VT, PT, ET, UT
3.	Главен	Термично	VT, PT, UT

	циркуляционен тръбопроводи, ГЦТ Компенсатор на обема, КО	стареене, корозия, умора	
4.	Главна циркуляционна помпа, ГЦП	Термично стареене, корозия, износване	VT, PT, UT
5.	Помпено оборудване	Умора, корозия, износване	VT, PT, UT
6.	Турбини	Умора, ерозия-корозия	VT, PT, UT

Към настоящия момент на експлоатация на АЕЦ - в края на проектния ресурс на ядрените съоръжения, обхвата на методите за контрол и обема на контролираните съоръжения се основават на изискванията на нормите, включват обратна връзка от експлоатационния опит, обратна връзка от анализите на якост, умора и изискванията на програмите за продължаване на срока на експлоатация.

Оценката на методите съобразно целите на ПСЕ са: 1) Методите обхващат ли всички системи за безопасност; 2) Ефективни ли са методите спрямо действащите механизми; 3) Необходими ли са допълнителни методи на контрол/изпитване.

3. Ефективност на методите на контрол

3.1. Корозия-ерозия

Корозията на оборудването в АЕЦ е разрушаване на металите вследствие на електрохимически взаимодействия на метала с околната среда. Причината за корозията е термодинамичната неустойчивост на системата, състояща се от метал и компоненти на околната среда, [6]. Ерозията има уморен характер. Корозионно-ерозионните процеси, характерни за АЕЦ са корозионно разрушаване на материалите и последващо ерозионно износване под действие на скоростта на флуида. Влияещи фактори са състава, скоростта и температурата на флуида, материала на съоръженията, геометрията на обекта, действащите напрежения, режима на овлажняване/изсъхване на повърхността. Локалната корозия засяга ПГ и уплътнителни повърхности на КР, КО и системи за аварийно охлаждане на зоната (САОЗ). Междукристалната корозия се отнася за КР и за ПГ; корозионната умора - за ПГ и КО; а корозия под напрежение - за КР, ПГ (топлообменни тръби), тръбопроводи от система КО и система САОЗ. Напреженията в колелата на тръбопроводите водят до съществено изменение на електродния потенциал на метала. Разтягащите напрежения 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. Корозионно-ерозионните процеси водят до загуба на работоспособност или промяна на проектни функции на оборудването: 1) Вероятност за теч при разкъсване на тръбопроводите поради намаляване на дебелината на стената на тръбопроводите; 2) Нарастване честотата на отказите поради промяна на вътрешните напрежения в материалите на системите; 3) Нарушение на нормалните условия на експлоатация (ННУЕ) поради неуплътняване; 4) ННУЕ на теплообменници поради разкъсване на теплообменни тръбички; 5) Влошаване на теплообмена при наличие на шлам/отлагания; 6) Увеличаване на радиоактивността поради активирането на продуктите на корозия.

Методите на контрол на корозионно-ерозионните процеси са: 1) Анализирани, поддържани и подобрявани на водо-химичния режим (ВХР); 2) Корозионно обследване за наличие на шлам/отлагания; 3) Провеждане на експлоатационен контрол на метала (визуален, капиларен, вихровотоков, механични изпитвания); 4) Измервателен контрол, дебелиметрия на стени и колена. Прилага се ултразвукова дебелиметрия на разтегнатите участъци или външната образуваща на коляното. За заварените съединения се контролира околешевната зона; 5) За превенция от локална корозия се прилагат визуален контрол и химичен анализ на

отлаганията; 6) За превенция от междукристална корозия се прилага визуален контрол, изследване на образци-свидетели, капиларен и ултразвуков контрол, хидравлични изпитвания; 7) За превенция от корозионна умора се прилага визуален, капиларен и ултразвуков контрол, хидравлични изпитвания.

Ефективността на методите се оценява чрез:

1) Измеряемите показатели на водо-химичния режим ВХР да съответстват на нормативите; 2) Всички отклонения от нормативите да се отстраняват в определените срокове; 3) Да няма нарушение на ВХР такова, че блока да бъде изведен от НУЕ; 4) Своевременно да се констатират и ремонтират нецялостности в метала и заварените съединения, по начин, че да не се стига до отказ на елемента или повлияване на неговите функции.

3.2. Неутронно окрежкостяване

Работните условия на метала на корпуса на реактора се характеризират с 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, [7]. 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 също и от ядрено-физичните характеристики на материала. Образуваните 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, [7]. Неутронното окрежкостяване на феритните стомани се изразява в нарастване на стойността на критичната температура на радиационна крехкост T_{kf} (ΔT_{kf}).

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 на неутрони и химичния състав на материалите. Повишеното съдържание на никел Ni и на манган Mn увеличават окрежкостяването поради формиране на клъстери в радиационна среда, а съдържанието на Si намалява окрежкостяването. Нарастването на критичната температура на радиационна крехкост ΔT_{kf} се изразява чрез:

$\Delta T_{kf} = A_f \cdot (F/F_0)^m$; където A_f - химичен коефициент;

F - неутронен флуенс, m - коефициент, отчитащ вида на материала (основен метал/заварен метал), [8]. Неутронното окрежкостяване води до вероятност за крехко разрушаване на материалите, особено за заварените съединения на корпуса на реактора разположени срещу активната зона на реактора и последваща вероятност за тежка авария в АЕЦ.

Методите за контрол на неутронното окрежкостяване се изразяват чрез: 1) Отчитане на стойностите на флуенса след всяка горивна кампания. Производителят на оборудването е заложил пределно допустима стойност на флуенса на неутроните $5,7 \times 10^{19}$ неутр./ cm^2 в корпуса на реактора, който се явява лимитиращ фактор за безопасната работа на съоръженията; 2) Пресмятане и анализиране на стойността на критичната температура на радиационна крехкост T_{kf} ; 3) Провеждане на експлоатационен контрол на метала - визуален, капиларен, ултразвуков (и вихровотоков за корпуса на реактора); 4) Провеждане на термохидравлични анализи; 5) Провеждане на якостни анализи за оценка на съпротивлението на разпространение на дефект.

Ефективността на методите се оценява чрез:

1) Изменението критичната температура на радиационна крехкост да бъде в допустимите по проекта стойности; 2) Своевременно да бъдат констатирани и ремонтирани нецялостности в метала и заварените съединения, по начин че

да не се стига до отказ на елемента или повлияване на неговите функции.

3.3. Циклична умора

Разрушаване при циклично (уморно) натоварване протича под действие на циклично натоварване, при което под влияние 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 материала, [6]. Уморните разрушавания се причиняват от многоциклова (високоциклова) умора, малоциклова умора (нискоциклова) и термична умора. Цикличната умора влияе на КР, ПГ, КО, тръбопроводи от системата на КО; главни циркуляционни тръбопроводи ГЦТ, САОЗ. Корозионната умора влияе на ПГ и на КО. Влияещите фактори са стойности и посока на действащите напрежения; брой реализирани цикли спрямо проектните. Цикличната умора предизвиква уморно разрушаване на материалите и последващо изменение на носещата способност на конструкциите.

Методите за контрол на умората са: 1) Изследване на образци-свидетели; 2) Провеждане на експлоатационен контрол на метала (визуален, капиларен, ултразвуков, вихровотоков); 3) Провеждане на хидравлични изпитвания; 4) Регистриране и контрол на циклите на натоварване в различните проектни режими; 5) Провеждане на якостни анализи.

Ефективността на методите се оценява чрез своевременно констатиране и (ремонтiranje) на нецялостностите в метала и заварените съединения, по начин, че да не се стига до отказ на елемента или повлияване на неговите функции.

3.4. Термично стареене

Механизмите на стареене на материалите са различни. За метални сплави стареенето се обуславя от процеси на разпадане на преситените твърди разтвори, [6]. В основата на стареенето лежи енергетичната концепция - процесите на интензивно изменение на свойствата на материалите започват от момента, когато енергията на процеса превиши определено енергетично ниво. Термичното стареене влияе на КР, ПГ, КО, тръбопроводи от системата на КО; ГЦТ, САОЗ. Влияещите фактори са стойностите на температурата и времето (периода) на експлоатация. При термичното стареене има вероятност за крехко разрушаване на материалите и последващо изменение на носещата способност на конструкциите. Методите за контрол на умората са: 1) Изследване на образци-свидетели; 2) Провеждане на експлоатационен контрол на метала (визуален, радиографичен, металографски); 3) Провеждане на хидравлични изпитвания.

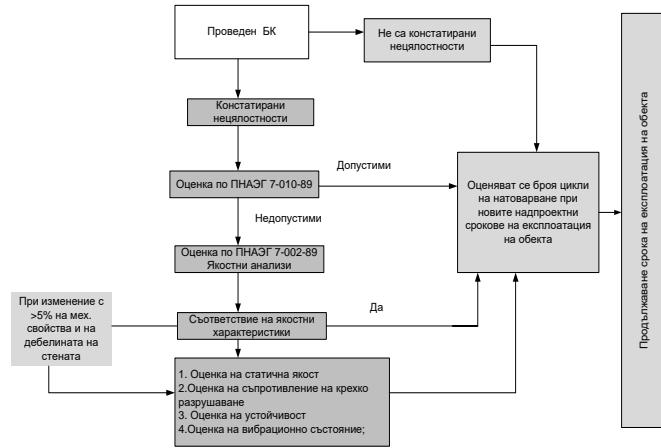
3.5. Износ

Многобройните изследвания показват, че процесът на постепенна загуба на работоспособност на работещите детайли може да се раздели на 3 периода: период на наладка, период на нормална работа и износ, предизвикан от нарушение на нормалната работа на обектите, [6]. Износът влияе на гидроамортизатори, уплътнителни повърхности, крепежни елементи, вътрешни части на цилиндрични съдове и тръбопроводи. Влияещите фактори при износа са: 1) Физическите, химическите и механичните свойства на повърхността, подложена на триене; 2) Съчетанието на материалите на работните повърхности; 3) Взаимодействието на работните повърхности със средата; 4) Чистотата на обработка на повърхностите на триене; 5) Вида на триенето (сухо, гранично, полутечно и течно); 6) Стойността на нормалното налягане и скорост на работните повърхности една спрямо друга. Характерни случаи на износа има при носещи и крепежни елементи. В условията на нормална експлоатация на компонентите на гидроамортизатори ХА действат незначителни натоварвания и ХА може 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. При износа на шпилки

(цилиндрична част) и шпилъчни гнезда има нарушение на крепежната функция и вероятност за неуплътняване. Извършва се визуален оглед при техническо обслужване и при ремонт.

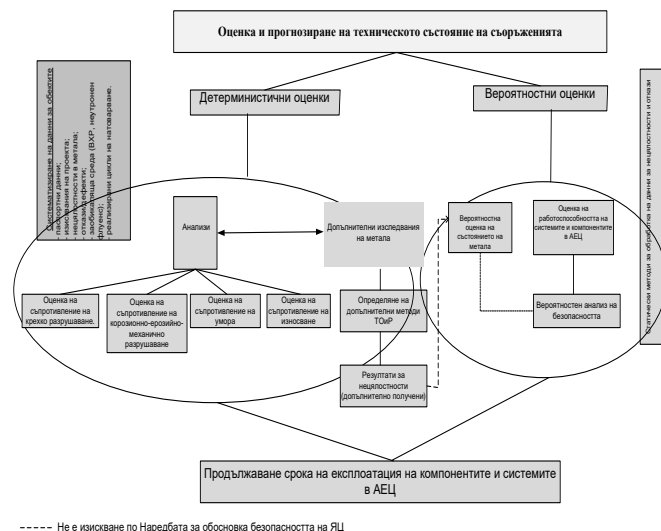
4. Техническа диагностика

При съоръжения с констатирани дефекти при тяхната експлоатация има две съществени оценки преди решението за ПСЕ: 1) Оценка за допустимост на дефекта по нормативните изисквания за допустимост на нецялостности и якостни норми [1,8] и 2) последващ анализ за съхранение работоспособността на оборудването преди ПСЕ, Фигура 2.



Фиг. 2: Схема за оценка работоспособността на съоръжения (несменяеми) с констатирани дефекти при тяхната експлоатация.

Техническата диагностика на оборудване и компоненти е част от комплексното обследване на актуалното състояние на компонентите и оборудването. Оценката и прогнозирането на техническото състояние на съоръженията, извършвани на основата на резултати от контрола на метала, могат да бъдат направени в детерминистичен и във вероятностен аспекти, както е показано на Фигура 3.



Фиг. 3. Оценка и прогнозиране на състоянието на съоръженията

5. Заключение

С увеличаване периода на експлоатация на съоръженията, нарастват отказите на оборудването поради процесите на стареене на метала. За местата с констатирани дефекти скоростта на нарастването им се увеличава. За безопасната експлоатация на АЕЦ е необходимо да се увеличива обема на контрола в критичните зони (местата с констатирани или очаквани нецялостности). Очевидни са недостатъците на нормативната база в това направление.

Развитието на мероприятията при контрола е в направлянията:

- Местата за контрола да се определят, освен на основание нормативните изисквания, също и на база оценка на деформационно-напрегнато състояние на обектите. Тази оценка може да бъде направена на базата на анализи на якост, умора и чрез безразрушителни методи на изпитване.

- На база тази оценка, в установените критични зони да се прилагат on-line измервания / изпитвания чрез диагностични системи/. Също така следва да се прилагат безразрушителни методи за оценка на механични характеристики.

- Да се използват приемливи статистически методи за оценка на състоянието на съоръженията.

6. Литература

1. ПНАЭГ 7-010-89- Оборудование и трубопроводов атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля.
2. АТПЭ-9-03 Типовая программа эксплуатационного контроля за состоянием основного металла и сварных соединений оборудования и трубопроводов атомных электростанций с ВВЭР-1000.
3. Общей программой комплексного обследования фактического состояния и оценки остаточного ресурса КСК блока № 5 АЭС «Козлодуй» ПМ АТЭ.116/02-0807-2012.
4. 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.
5. Дългосрочен график за превантивно техническо обслужване и ремонта КСК от СБ, СВБ для 5 и 6 блоков и ОСО»;
6. Острейковский В.А. - Старение материалов ЯЕ
7. Младен Георгиев – Пукнатинуостойчивост на металите при статично натоварване
8. ПНАЭГ 7-002-86- Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трьбопроводов АЭС.