



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

ЕНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ

Катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“

МАГ. ФИЗ. ГАЛЯ ТОДОРОВА ДИМОВА

**ОЦЕНКА НА РЕСУРСНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
НА МЕХАНИЧНОТО ОБОРУДВАНЕ
В ЯЕЦ С РЕАКТОРИ ОТ ТИПА ВВЕР**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.4. Енергетика

докторска програма: Ядрени реактори

Научен ръководител: Доц. д-р Калин Филипов

СОФИЯ, 2024 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“ към Факултет Енергомашиностроителен на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 23.01.2024 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 26.03.2024 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед №ОЖ-5.4-02 от 02.02.2024 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р инж. Силвия Василева Бойчева – председател, ТУ – София, Енергомашиностроителен факултет
2. Доц. д-р физ. Младен Раденков Митев – научен секретар, ТУ – София, Енергомашиностроителен факултет
3. Проф. дн инж. Павлин Петков Грудев, ИЯИЯЕ, БАН
4. Проф. д-р инж. Лилиана Зашкова Стоянова – ХТМУ - София
5. Проф. д-р физ. Димитър Василев Тонев– ИЯИЯЕ, БАН

Рецензенти:

1. Проф. дн инж. Павлин Петков Грудев, – ИЯИЯЕ, БАН
2. Доц. д-р физ. Младен Раденков Митев, ТУ – София, Енергомашиностроителен факултет

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Енергомашиностроителен факултет на ТУ-София, блок 2, кабинет № 2244.

Дисертантът е докторант в свободна форма към катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“ на Енергомашиностроителен факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. физ. Галя Димова

Заглавие: „Оценка на ресурсни характеристики на механичното оборудване в ЯЕЦ с реактори от типа ВВЕР“

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В дисертационния труд се разглежда методология за провеждане на оценки на механично оборудване на блокове в ЯЕЦ от тип ВВЕР, като се прилагат детерминистични и вероятностни методи. Подходите за оценка са обобщени в методики за оценка на ресурсни характеристики на корпус на реактор, парогенератори и компенсатори на налягането. Проблемите с провеждане на оценки на основното оборудване в АЕЦ произтичат от липсата на развита нормативна и методологична база в областта. Но същевременно оценките на ресурсните характеристики на оборудването трябва да се провеждат, поради изтичане на проектния експлоатационен срок на ЯЕЦ, както в нашата страна, така и в други ЯЕЦ. По данни на Международната агенция по атомна енергия МААЕ от общо 413 реактори в експлоатация по света, 282 работят над 30 години [100]. В края на 2021 г. в Европейския съюз се поставя въпроса дали ядрената енергия да бъде включена в „Директивата за зелена енергия“ на човечеството. Независимо от разбирането на ползите за добиване на евтина електрическа енергия, отново се дискутира безопасността на ядрените централи и дали те трябва да продължават да се експлоатират. В края на 2023 г. в рамките на Световната конференция за климата в Дубай над 20 държави от четири континента, сред които и България, приеха декларация за тройно увеличаване дела на ядрената енергия.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Основната цел на дисертационния труд е да представи методология за оценка на надеждност и ресурсни характеристики на механично оборудване в ядрени електроцентрали, тип ВВЕР. Друга цел е да се проведат оценки на надеждност и ресурсни характеристики на корпуси на реактори, парогенератори и компенсатори на налягането.

Първата задача е да се напише и да се обоснове методология за оценка на надеждност и ресурсни характеристики на обекти в ядрени електроцентрали.

Другите задачи са да се изготвят методики за оценка на надеждност и ресурсни характеристики на корпус на реактора, парогенератори и компенсатори на налягането – съответно втора, трета и четвърта задача. В рамките на дисертационното изследване методиките трябва да се представят чрез практическо прилагане, като се съберат входни данни, необходими за оценките на ресурсните характеристики, приложат се описаните модели за оценка и се проведат реални оценки.

Методите за изпълнение на поставените задачи са чрез изучаване на приложимите изисквания, документи на Международната агенция по атомна енергия и натрупаните знания и опита на ЯЕЦ. Оценката на ресурсните характеристики се постига чрез прилагане на детерминистични и на вероятностни методи.

Научна новост

Обект на настоящето изследване е оценката на надеждността и на ресурсните характеристики на механичното оборудване в ядрени електроцентрали с реактори от типа ВВЕР 1000. Целта на проведеното изследване е да се създаде завършен модел за оценяване на състоянието на оборудването в ядрените електроцентрали. Представеният модел е полезно средство за провеждане на анализи в края на проектния период на експлоатация на ядрения блок и при оценка на пригодността и сроковете на допълнителна експлоатация. Конкретните обекти на изследването са корпуси на реактори, парогенератори, компенсатори на налягане и др.

Приносите в дисертацията могат да бъдат определени като приложни и научно-приложни:

1. Разработена е научнообоснована методология за провеждане на оценки на надеждност на механично оборудване на ядрени блокове с реактори с вода под налягане, от типа ВВЕР.
2. Създадена е методика за провеждане на контрола и оценките на ресурса от гледна точка на комплексните въздействия на различните механизми на деградация на механични свойства на материалите.
3. Разработени са вероятностни методи за проследяване на тенденциите на показателите, свързани с процесите на стареене.
4. Извършена е систематизация и е изградена база данни, в която са включени всички дефекти на оборудването на блокове №5 и №6 на „АЕЦ Козлодуй“ за период от първите 30 години на експлоатация.

Практическа приложимост

Практическата полезност на резултатите от дисертационния труд се изразява с факта, че изготвената методология за оценка на ресурсни характеристики на оборудване в ЯЕЦ обобщава наличните към момента изисквания за преглед на стареенето и за оценка на ефектите. Подходът към съдържанието на методологията е основан на много фактологични данни от реална експлоатация на ЯЕЦ у нас и в други страни. Изследванията обхващат големи периоди от експлоатация на блокове. Използваните методи за оценки са детерминистични и вероятностни.

На основание методологията са изготвени методики за оценка на ресурса на корпуси на реактори, на парогенератори и на компенсатори на налягането. На база методиките са извършени оценки на надеждност и ресурсни характеристики на реактори, парогенератори и компенсатори на налягане. Входните данни за моделите за оценка представляват реални данни, взети от експлоатацията и контрола на ЯЕЦ, за период от около 30 години. Към настоящия момент данните са достатъчно стари и не отразяват реалното състояние на обектите.

Методологията предлага модели за оценки на ресурсни характеристики и може да бъде усвоена и въведена в практиката като контролиран документ на ЯЕЦ. Изпълнението на оценките не изисква значими финансови средства. Ползите са насочени към предовратяване и минимизиране на ефектите на стареенето, което води до подобряване на безопасността на експлоатацията в ЯЕЦ, повишаване на икономическите показатели и продължаване на срока на експлоатация на блоковете.

Апробация

Детерминистичните методи за оценка на ресурсни характеристики са основани на методични и нормативните изисквания за ЯЕЦ - якостни норми [8], стандарти и методики за провеждане на контрол [19÷32] и технически документи на МААЕ [3, 42÷47]. Резултатите, получени чрез детерминистични методи са верифицирани.

Вероятностните методи се основават на резултати, получени по детерминистични начини. Обработени са голям брой данни, взети като извадка за дълги периоди от време, което позволява да се приложи статистическа обработка. Получените резултати от оценките чрез вероятностни методи са удовлетворяващи и смислени по отношение на реалното състояние на обектите (Глава 5 от автореферата).

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 5 научни публикации, от които 4 самостоятелни.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **157** страници, като включва увод, **6** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **103** литературни източници, като **24** са на латиница и **75** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **48** фигури и **11** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1.

Съгласно технологията в проектирането на реакторни установки, ресурсът за експлоатация е обоснован с необходимия запас на якостни характеристики за определен експлоатационен период. В края на този период са неизбежни въпросите дали и как да се продължава експлоатацията на блока. Ръководствата на ядрените централи трябва да вземат решения за бъдещето на енергийните блокове, които управляват. Всяко решение следва да е съобразено с икономически разчети, технологични възможности, политически и обществени нагласи. От едната страна на дилемата са безспорните икономически ползи от производството на електрическа енергия, от използване на неизразходваните ресурсни характеристики, а достигнатото ниво на култура на безопасност на персонала би гарантирало сигурна и безопасна експлоатация на енергийния блок. От другата страна на решението е неизвестността относно надеждността на остарялото вече технологично оборудване, недостатъчната обезпеченост откъм научни изследвания или казано накратко - страха от ядрени и радиационни аварии.

През целия проектен срок на експлоатация във всяка централата се провежда комплекс от изпитвания, като резултатите се сравняват с нормативните изисквания; така се оценява състоянието на съоръженията. Нормативната база обаче, е изготвена преди повече от няколко десетилетия и е базирана на тогавашните опит и знания. Но какви изследвания трябва да се проведат след 40 години експлоатация на ядрения блок и преди продължаване срока на експлоатация (ПСЕ), така, че да са проверени параметрите на ресурсните характеристики? Как да се докаже надеждността на вече остарялото оборудване, отработило в някаква степен своя ресурс? Възможностите за ПСЕ на ядрените централи се демонстрират чрез изпитвания и анализи, и последващо управление на ресурса за очаквания ДСЕ.

Задълбоченото разбиране на процесите на деградация, присъщи и естествени за ЯЕЦ, които водят до откази на оборудването, е от особена важност за осигуряване на надеждна експлоатация на централите и за продължаване на срока на експлоатация. Бързото увеличение на интензивността на постепенните откази след определен период на експлоатация е свързано преди всичко с интензивните процеси на деградация на механични свойства на конструкционните материали на оборудването в ЯЕЦ. Отказите се явяват случайна величина и първоначално са разглеждани като статистически данни. Но с течение на натрупания експлоатационен опит фокусът на изследванията се отмества от статистиката

на отказите към причините за тях. Справките от данните в ЯЕЦ показват, че отказите на елементите, както и дефектите в материалите са причинени от физико-химични процеси, намаляващи носещата способност на конструкциите и компонентите. Процесите на разрушаване на конструкционните материали в ЯЕЦ протичат на субмикроскопично, микроскопично и макроскопично ниво.

Причините за отказите и дефектите се оказват изменените механични свойства на метала на механично оборудване след години на експлоатация. За да е ефективна дейността по оценка и управление на ресурса на съоръженията, е важно да бъдат определени механизмите на деградация на механичните свойства [3]. На практика при експлоатирана ядрена установка са налице резултатите от контрола на метала с разрушаващи и неразрушаващи методи, резултати от контрола на корозионното състояние, има якостни анализи, както и обмен на експлоатационен опит с други ЯЕЦ. Събирането на информация за откази, дефекти и повреждания на елементи на оборудването в ЯЕЦ подпомага процеса по изясняване на деградацията на компонентите. В днешно време въпросите за стареенето на металите са особено актуални, защото оборудването в ядрените централи е вече „остаряло“, а заедно с натрупаните знания по въпросите за стареенето, става ясно, че има все още много неизследвани области. Типичните механизми на деградация на механични свойства на металите се определят от натоварванията и работната среда, характерни за отделните типове реакторни установки. За централи от типа ВВЕР, механизмите на деградация на механични свойства са корозия, ерозия, износ, умора, неутронно окрежкостяване и термично (температурно) стареене [3, 4]. Проявлението на тези механизми е различно за различните централи.

Всяка ЯЕЦ старее по свои си начини. Процесите на инициране и прогресиране на деградацията на механични свойства на метала на оборудването зависят от състава на конструкционните материали, водохимичния режим, измененията в проекта, историята на натоварванията, провеждането на навременни и адекватни мерки по техническо обслужване и ремонт, провеждане на якостни анализи. Прилагането на съвременни методи за контрола на метала чрез безразрушаващи и разрушителни методи гарантира достоверност на резултатите, откриване на нецялостности на трудно достъпни за контрола места, проследяване на тенденцията на развитие. Високата култура на безопасност на персонала е важен фактор за постигане на надеждност при експлоатацията.

Оценката на физическото състояние се прави на база сравнението на данните от контрола и мониторинга на компонентите и системите, данни за откази, дефекти, изменения в проекта и модернизации, налични якостни

анализи и др. с нормативните изисквания. А проявлението на ефектите на стареене е различно за отделните централи, различно за отделни съоръжения от една и съща група оборудване, експлоатирани при еднакви условия (например – групата на парогенераторите).

Във всяка ЯЕЦ с изтичащ срок на експлоатация се изготвят програми за управление на ресурса. В програмите се описват основни дейности и отговорности за откриване на ефектите на стареене чрез методите на ТОиР, предотвратяване или минимизиране на последствията от стареенето. Моят богат опит от наблюдения на ЯЕЦ в Европа и Канада показва, че в програмите липсват дейности, насочени към конкретни оценки на ресурсни характеристики, който да могат да се направят веднага, след приключване на плановия годишен ремонт на блока, когато има свежи постъпили данни за текущото състояние на обектите. Така се загубва пряката причинно-следствена връзка за изясняване на състоянието на обекта, причините за евентуални откази и дефекти, провеждане на стойностна техническа диагностика на оборудване и определяне на тенденцията на стареене. Единствено в централи в САЩ може да се наблюдава обстойно разглеждане на експлоатационния опит и обратна връзка от проявените тенденции на стареене на метала. В областта на оценка на ресурсни характеристики на метала на основно механично оборудване решените задачи са:

- Известни са механизми на деградация на механични свойства на метала на оборудване в ЯЕЦ от типа ВВЕР. Но проявленията на механизмите на стареене са различни.
- Има натрупан фактологически материал от проведени изпитвания по Технологичния регламент на блока, история на натоварванията, извършени якостни анализи, данни от изпитвания на образци-свидетели, данни от контрола на метала, експлоатационен обмен по линия на WANO (World Association of Nuclear Operators).
- Към днешно време има отделни технически документи за оценка на ресурса на база референтен механизъм на деградация на механични свойства (с препоръчителен характер), с подробности – по-долу в точка 2.
- Проблемите при оценка на ресурсни характеристики са липса на:
 - Нормативна база (в това число и българска), която би поставила регулируеми рамки на процеса по оценките на ресурсни характеристики;
 - Методология (генерална методика) за техническа оценка на оборудването, която да определи най-важните реперни елементи за оценките, етапите на оценка, класификации, подбора на елементи, механизма за деградация на оборудването и др.
 - Методика за комплексна оценка на работоспособното състояние на обект, подложен на много видове механизми.
 - Методики за оценка на ресурсни характеристики на конкретни обекти в АЕЦ, тип ВВЕР, които да определят на какви методи ще се основават оценките, входните и изходните данни, честота на вземане и обработване на данните и др.
 - Нормативен документ, който да определя реда за оценка на ресурсни характеристики, както и критериите за приемливост.

Липсата на нормативна база за оценка и прогнозиране на ресурса по-конкретно се изразява в проблемите:

- Не са разработени математически модели за зависимостта на ресурса на оборудването от факторите на стареене (механизми и ефекти на стареене).
- Механизмите на деградация на механични свойства са изучени поотделно, (с някои изключения) и в лабораторни условия, а материалите в ЯЕЦ са подложени на комплексно въздействие от натоварващи фактори. Предлагащите методики за оценяване на якост, като правило, са основани на независимо протичане на процесите на корозия, умора и пълзене, неутронно окрежкостяване, независимо, че на практика тези процеси протичат едновременно в различни съчетания.
- Липсва методология, необходима за оценяване на деградацията на механични свойства на материалите, особено в частта, свързана с неутронно окрежкостяване; има отделни методики за оценка на ресурса на база референтен механизъм на деградация на механични свойства, но няма методика за комплексна оценка на работоспособното състояние на обекта, подложен на много видове механизми.
- Няма аналитични зависимости на ефектите на стареене на оборудването от комплексното въздействие на работната среда – налягане, температура, термохидравлични и топлинни удари, вибрации, динамични натоварвания, изменения на режими, пренасяне и натрупване на продукти на корозията, примеси и др.
- Практически отсъстват зависимости, свързващи стойността на ресурса с периодичността и обема на техническото обслужване, контрола и инспекциите.
- Критериите за пределното състояние на метала, изисквани от ръководните документи (пукнатиноустойчивост, пределно допустимо изтъняване на стените поради корозия, граница на износване при умора, граница на удължаване при пълзене и др.) са основани на резултати от лабораторни изследвания на образци, които не отразяват фактическото състояние на оборудването.
- Няма разработени критерии за пределното състояние на метала, които да са основани на приложението на вероятностни методи за оценка на ресурсни характеристики; методите все още не са развити и не се прилагат, няма и нормативна база, няма класификация на методите, няма определяне какви данни да се подберат за статистически извадки, нито критерий за приемливост на състоянието.
- Не се отчита изменението на структурата на метала;
- За провеждане на техническа диагностика на съоръжения и компоненти в ЯЕЦ засега няма действащи стандарти, нито общоприета единна методология или научно обезпечаване.
- За оценка на състоянието се използват нормативни документи, които определят крайните гранични състояния на компонентите.
- Липсват методологии и нормативни документи, които да определят ресурсните характеристики на компонентите чрез прилагане на вероятностни методи на контрол.
- Оценките на състоянието на металите трябва да са актуални към момента (етапа на ПСЕ).
- Комплексната оценка на надеждност на ЯЕЦ да е актуално към момента на ПСЕ.
- Няма каквато и да е нормативна база за определяне на причинно-следствена връзка за състоянието.
- Основната цел на дисертационния труд е да представи методология за оценка на надеждност и ресурсни характеристики на механично оборудване в ядрени електроцентрали, тип ВВЕР. Задачите са да се изготвят методики и да се проведат оценки на ресурсни характеристики на корпуси на реактори, на парогенератори и на компенсатори на налягане.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ НА ОБЗОРА И ИЗГОТВЯНЕ НА КЛАСИФИКАЦИЯ

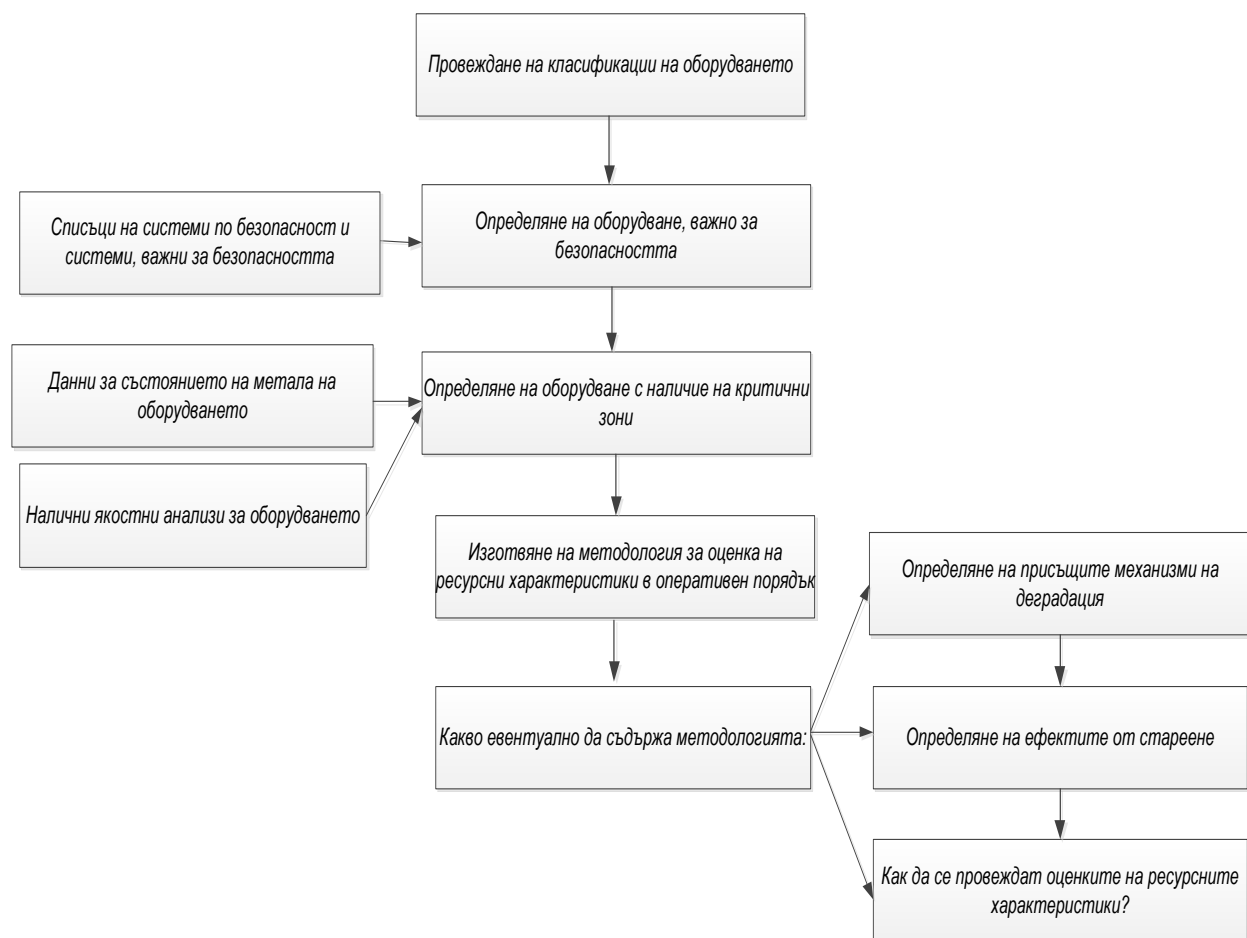
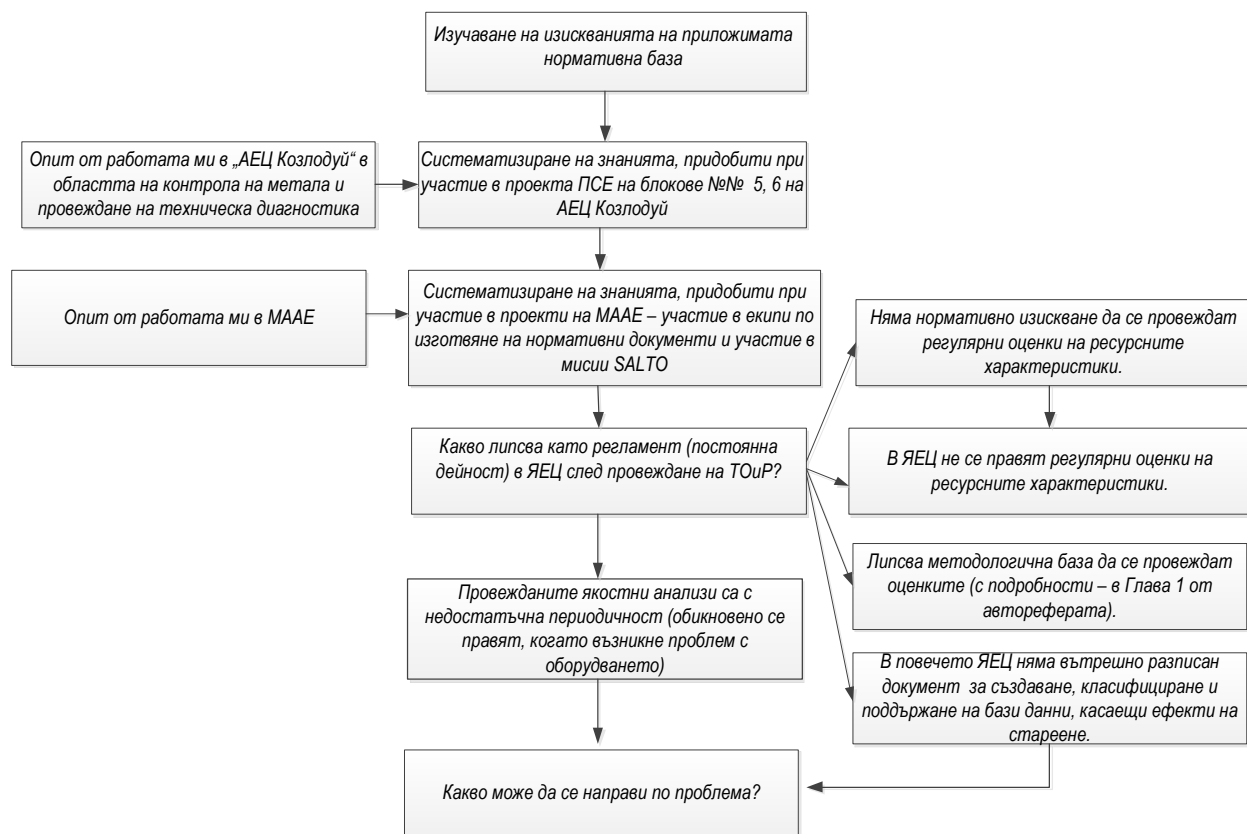
Направен е обзор на наличните нормативни изисквания, представени в литературата. В серията документи на МААЕ (Тип технически документи) са налични два документа, които поставят рамките на дейностите по оценка на ресурсни характеристики на оборудването.

- В техническите документи на МААЕ [4, 45] се определя същността на Програмите за управление на стареенето на оборудването в ЯЕЦ, както и основните изисквания към тях. В документите се постановява подхода към съдържанието на програмите; те трябва да са насочени към разбиране на процеса на стареене на обектите, да включват превантивни мерки за процеса на стареене и за ефектите на стареене, коригиращи дейности и др. В тези документи се дават насоки какво би трябвало да съдържа интегрирана програма за управление на стареенето, както и оценка на ефективността на мерките за управление на стареенето. Самооценката от страна на самата ЯЕЦ на мерките за управление на стареенето трябва да включва: 1) провеждане на всички вътрешни мероприятия за оценка на безопасността – като периодичното провеждане на ВАБ; 2) провеждане на външен контрол на национално ниво - от страна на регулиращия орган, както и на международно ниво; 3) провеждане на периодични сравнения на дейностите по управление на стареенето с тези в другите ЯЕЦ. Към документа [4] са изготвени таблици, съдържащи за всеки материал в ЯЕЦ и за всеки тип компоненти присъщите механизми на деградация и ефекти на стареенето.
- Документите [4, 45] определят насоките за провеждане на оценки на състоянието на оборудването в ЯЕЦ и в никакъв случай не са нормативни документи, в които да са зададени критерии за оценка. IGALL е разработен с цел да се удовлетворят страните с изтичащ срок на експлоатация на ядрените централи.
- Унифицираната процедура [45] осигурява методология за
 - Оценка на ресурса и целостта на компоненти и тръбопроводи в ЯЕЦ с ВВЕР тип реактори по време на тяхната експлоатация от гледна точка на дефекти, причинени от пластични и непластични разрушавания, умора и механично-корозионни повреди вследствие на експлоатацията им;
 - Оценка на индикациите, открити по време на експлоатационния контрол в компоненти и тръби;
 - Подготовка на отчетите за периодична оценка на безопасността при експлоатация на ЯЕЦ, в частта, свързана с остатъчния ресурс на оборудването;
 - Управление или модификация на остатъчния ресурс на оборудване на ЯЕЦ.

Процедурата е изготвена преди 20 години, не отговаря на днешното ниво на разбиране на деградацията на металите на основно оборудване.

- Известните методики за оценка на якост, използвани при оценката на ресурса, може условно да се разделят на четири групи, съгласно Гетман А.Ф. [50]: Методики за оценка на умора на метала; Методики за оценка на якост по пукнатиноустойчивост на метала; Методики за оценка на якост по скорост на корозия на метала; Методики за оценка възлите на оборудването, работещи в условията на пълзене.

Абстрактно описание на подхода към разработката на дисертационния труд е дадено в следните две схеми:



Набелязаните следващи етапи при разработката са дейности относно:

Нормативни изисквания

- 1) Да се изучат, опишат и систематизират наличните нормативни изисквания, вкл. по технологичния регламент на "АЕЦ Козлодуй" – методични изисквания и норми за оценка.

Бази данни

- 2) Да се създаде база данни с резултатите от контрола на метала, в която да се включва с какви методи е извършен контрола, с каква чувствителност, през коя година от експлоатацията на оборудването, подробности по параметри на констатираните индикации, дължина или еквивалентна площ на нецялостности, методики за контрола.
- 3) Да се създаде база данни с отказите на оборудването по причина деградация на механични свойства на метала.
- 4) Да се изучат резултатите от контрола на образци-свидетели.

Международен опит

- 5) Да се проучи международния опит в дейностите по систематизиране и описване на нецялостностите в метала и отказите на оборудването.

Механизми на деградация и загуба на носеща способност

- 6) Да се изучат механизмите на деградация на оборудването в ЯЕЦ, тяхното проявление чрез ефекти на стареене.
- 7) Да се изучи подробно процеса:
Носещата способност на оборудването→работоспособност→констатирани нецялостности, откази→степен на загуба на работоспособност→степен на загуба на носеща способност.

Методи за контрол

- 8) Да се изучат детерминистичните методи за контрола на метала.
- 9) Да се изучат вероятностните методи и начини за евентуално приложение към статистически масиви от данни за нецялостности.

ПСЕ и мисии SALTO

- 10) Да се систематизират препоръките за последващи дейности по контрола и експлоатацията на оборудването по блокове №5 и №6 на "АЕЦ Козлодуй".
- 11) Да се проучат препоръките от мисия SALTO, проведени на блокове №5 и №6 на "АЕЦ Козлодуй".
- 12) Да се прегледат препоръките от мисии SALTO, проведени в други ЯЕЦ, в които съм участвала.

ГЛАВА 3.

Изготвена е методологията за оценка на надеждност и ресурсни характеристики, която определя генерално подхода и общите позиции, които следва да се съблюдават при провеждане на оценките на оборудването, тип ВВЕР в ЯЕЦ. Методологията е подходяща за приложение на етапа подготовка за ПСЕ на ЯЕЦ, както и при управление на стареенето на КСК. Методологията включва следните съставни части:

- провеждане на класификации на оборудването;
- определяне на основните механизми на деградация на механични свойства на материалите;

- определяне на ефектите от деградация на механични свойства на материалите;
- определяне на методи за контрол на ефектите на деградация на механични свойства на материалите;
- разписване на методиките за оценка на ефектите;
- назначаване на мерки (програми) по управление на стареенето на оборудването в ЯЕЦ;
- оценка на ефективността на мерките (програмите) за управление на стареенето.
- оценка на ефективността на методи (методиките) за контрол.

Накратко подробностите по гореописаните съставни части на методологията са:

- 1) Провеждат се три типа класификации на оборудването. Първата класификация се прави на основание икономическите последици при замяна или ремонт на оборудването. Втората класификация на оборудването е по критерий – важност на оборудването за осигуряване на безопасността при работата в ЯЕЦ. Механичното оборудване се разделя на: оборудване от системи за безопасност; оборудване от системи, важни за безопасността; друго оборудване. Третата класификация се прави по отношение на текущото физическо състояние на оборудването. С цел определяне на елементите на оборудването, критични по отношение на влиянието им върху безопасността, за които е важно да се пресмята ресурса, се провежда обобщаване на откази, дефекти и повреждания на елементи на оборудването в ЯЕЦ, последвано от анализ на статистическите данни за откази, предизвикани от деградацията на металите. В Таблица 3.1. са дадени входните и изходните данни за провеждане на класификации. След провеждане на тези 3 типа класификации на механичното оборудване логически е ясно кои компоненти и системи ще се включат в обхвата на оценките на надеждност и ресурсни характеристики.
- 2) Определяне на основните механизми на деградация на механични свойства на материалите. Резултатите от контрола на метала са своего рода входни данни за определяне на механизмите на деградация. Събирането на информация за откази, дефекти и повреждания на елементи на оборудването в ЯЕЦ, естествено води до разкритие на механизма на повреждане на метала, а също и до необходимостта от изграждане на база данни. Взема се извадка от данните, представителна за целите на последващите анализи. Типичните механизми на деградация на механични свойства на металите се определят от натоварванията и работната среда, характерни за отделните типове реакторни установки. За централи от типа ВВЕР, генерално се определят механизмите на деградация на механични свойства - корозия, ерозия, износ, умора, неутронно окрежкостяване и термично (температурно) стареене [2, 3]. Но за всяка централа проявлението на тези механизми е различно, зависи от състава на флуида, материалите, експлоатацията, техническата поддръжка и др. По-подробно описание на механизмите на деградация на механични свойства е: умора на метала; корозия (питингова корозия, корозия под напрежение, корозионна умора, радиационно асистирана корозия); корозия-ерозия; нарастване на уморни пукнатини вследствие на циклично натоварване; окрежкостяване и уякчаване от неутронния флуенс, термично окрежкостяване, изменение на размери от радиацията, фазови трансформации и износване.

- 3) Определяне на ефектите от деградация на механични свойства на материалите. Крайните ефекти от деградацията на механичните свойства на оборудването (ефекти на стареенето) са загуба на работоспособност на компонентите и системите. В Таблица 3.3. са дадени механизми на деградация и последващи ефекти на деградация, присъщи за оборудването в ЯЕЦ.
- 4) Определяне на методи за контрол на ефектите на деградация на механични свойства на материалите. В точка 3.4. от дисертационния труд са дадени описания на приложимите методи на контрол – детерминистични и вероятностни. Механизмите на деградация се проявяват чрез ефектите на деградация, които могат да бъдат констатирани чрез методите на безразрушителен контрол, както следва:
- Корозия, ерозия / VT, PT, MT, ET, UT, RT, металография;
 - Износване / VT, ET, UT, металография;
 - Умора / VT, UT, PT, металография;
 - Термично стареене / VT, PT, UT, металография;
 - Радиационно окрежкостяване / механични изпитания, металография.
- 5) Разписване на методиките за оценка на ефектите. Съдържанието на методики за оценка включва: обект на оценката, място и период на провеждане на оценките; методична част, резултати и изводи. Описват се конкретните методики като физико-математически модел, апаратурата, начина на изпитване/измерване, входните данни, периодичността на събирането им и др. Методичната част е насочена към конкретния механизъм на деградация, разяснява се ефекта на стареенето и се посочва метода на контрол, чрез който се констатира (улавя) този ефект – или с други думи метода, с който се измерва показателя на стареенето и се дава оценка. В Таблица 3.4. са дадени входни и изходни данни за изготвяне на методики за контрола на оборудването
- 6) Назначаване на мерки (програми) по управление на стареенето на оборудването в ЯЕЦ. Експерименталните и експлоатационните изследвания по оценка влиянието на деградацията на механични свойства върху безопасната експлоатация на блока се провеждат основно вследствие изискванията на технологичния регламент при експлоатация на ЯЕЦ. Това включва провеждане на:
- Периодичен експлоатационен контрол на основен метал, наварени повърхности и заварени съединения на оборудване и тръбопроводи [22, 80];
 - Периодичен контрол на корозионното състояние на компоненти и системи;
 - Изследване на метала на образци-свидетели от корпуса на реактора;
 - Якостни изследвания.
- 7) Оценка на ефективността на мерките за управление на стареенето. Оценката на ефективността на мерките за управление на стареенето включват:
- Определяне на критични зони в оборудването;
 - Превантивни мерки за минимизиране и контролиране на стареенето;
 - Мониторинг и проследяване на ефекта на стареене;
 - Дейности за намаляване на ефектите на стареене;
 - Критерии за приемане и коригиращи дейности;
 - Обратна връзка от експлоатационния опит;
 - Оценка ефективността на методите за контрол.

ГЛАВА 4.

Глава 4 от дисертацията обхваща оценка на надеждност и ресурсни характеристики на корпус на реактора – изготвяне на методика и провеждане на оценките. Металът на корпуса е подложен на комплекс от натоварващи фактори – неутронно и термично стареене от неутронния поток, корозионно-ерозийно износване от флуида по първи контур, окрежкостяване на метала вследствие натоварващите работни условия и наличието на дефекти, умора поради цикличното температурно и хидравлично натоварване.

В методичните части се включват детерминистични и вероятностни методи за оценка на ресурсни характеристики.

Детерминистичните методи се прилагат за оценки на ресурсните характеристики на:

- Съпротивлението на метала на неутронно окрежкостяване и термично стареене;
- Съпротивлението на метала на корозионно-ерозийно износване;
- Съпротивление на развитие на нецялостност (дефект, пукнатина);
- Съпротивлението на уморно разрушаване на метала и на корпуса на реактора.

Вероятностните методи се прилагат за оценки по критерия съпротивление на развитие на нецялостност в метала на корпуса на реактора. Използвани са вероятностните методи за оценка:

- Вероятностен метод по нормирани еквивалентни площи на констатирани индикации на нецялостности;
- Вероятностен метод за оценка на ресурса на корпуса на реактора по модела на Вейбулово разпределение на дължини на индикации на нецялостности.

По-долу следва накратко описание на горецитираните методи.

- 1) Съпротивлението на метала на неутронно окрежкостяване и термично стареене. Обекти на изследването са металите на заварени съединения на корпусите на два реактора (условно наречени “а” и b”). Мотивировката за този подбор на обектите е, че на това място в корпуса се определят зони с потенциал за разрушаване, което произтича от фактите:
 - Заварените зони имат различна метална структура (зона на основен метал, зона на термично влияние и зона на заварен метал); нееднородността в структурите е една от генералните причини за инициране на нецялостности;
 - Действащите напрежения, създадени от експлоатационните условия, са нееднакви за биметалните зони, което води до нарастване на нецялостностите;
 - Заварените съединения, намиращи се срещу активната зона на реактора, са подложени на окрежкостяващото въздействие на неутронен флуенс с високи стойности;
 - Констатирант се нецялостности в местата на заваряване и тяхното развитие се проследява през годините на експлоатация на реактора.

Неутронното окрежкостяване и термичното стареене на метала на корпуса се изразяват чрез преместването (the shifting) на температурата на студена крехкост $\Delta T_K(F, t)$ в посока към по-високите стойности на температурите. В методичната част се определят числовите модели за пресмятанията на стойностите на $\Delta T_K(F, t)$ - по формули (2.19) и (2.20). Входните данни за оценките се вземат от: паспортни данни за състава на реакторните корпуси [82], данни за показанията на флуенси на корпусите на реакторите за всяка горивна кампания [83, 84], данни от регистрите в ЯЕЦ за брой отработени часа за всяка горивна кампания [85], данни от изпитвания на образците-свидетели [86÷87].

- 2) Съпротивлението на метала на корозионно-ерозийно износване. Металът на корпусите, по вътрешната повърхност на съда се контролира чрез сканиране с дистанционна система за визуален контрол; периода на контрола е веднъж на 4 години, по технологичен регламент. Чрез визуален метод на контрол се откриват и диагностицират повърхностни нецялостности на вътрешната повърхност на корпуса на реактора; а параметрите, които се следят са вид, размери и местоположение на нецялостностите. При наличие на група от нецялостности се проследява тяхното взаимно разположение и се измерват отстоянията. В Таблица 4.4. са дадени входни данни за нецялостностите и тяхното значение за оценка на ресурса.
- 3) Съпротивление на развитие на нецялостност (дефект, пукнатина). Металът от вътрешната повърхност на корпуса на реактора се изпитва (контролира) веднъж на 4 години (по нормативни изисквания), а при наличие на дефекти или на индикации на дефекти, този период се съкращава. Прилагат се методите за контрол – визуален, капилярен и ултразвуков, като се използват сканиращи технически средства, дистанционно управляеми. Чрез методите на безразрушителен контрол се констатира наличието на нецялостности (дефекти, пукнатини) и се изследват техните параметри – местоположение, вид, размери и ориентация. В местоположението на констатираните нецялостности се изследва кои са натоварващите фактори от околната среда и се оценява тяхното влияние. Работните условия за метала от вътрешната повърхност на корпуса се характеризират с интензивни неутронни потоци с енергия на неутроните над 1,5 MeV; високи стойности на налягане (до 17,5 МПа) и температури на флуида по първи контур (323 °C). Провеждат се оценки на съпротивление на развитие на нецялостностите. Данните за индикации на нецялостностите обхващат: местоположение, вид, размери (a, l), отстояние (b) от вътрешната повърхност на корпуса на реактора. Данните за дефектите и за индикациите на дефектите постъпват като резултати от методите на безразрушителен контрол. Други данни, които се използват в оценките са данни за стойностите на флуенса и за действащите напрежения в местата на нецялостностите. Изчислителната част включва да се пресметне коефициента на интензивност на напреженията K_i .
- 4) Съпротивлението на уморно разрушаване на метала и на корпуса на реактора. Умората на метала се причинява от термохидравличните натоварвания при работата на ядрените съоръжения. При режимите от типа НУЕ налягането в първи контур на реакторна установка, тип ВВЕР 1000 е 15,7 МПа, а температура

на водата на вход/изход в реакторната установка е 289/330 °C. Характерът на действащите напрежения е термичен и механичен. Причините за умората на метала са променящите се по стойност и знак напрежения, причинени от флуида. Режимите НУЕ са тези, които най-често се реализират при експлоатацията на ЯЕЦ, техния брой е най-голям, съответно техния принос за уморното стареене е най-значим. За изследването се използват два типа входни данни: 1) Резултати от контрола на метала, проведен с безразрушителни методи; 2) Брой отработени цикли от съоръжението за периода на изследване. При уморно натоварване на метала може да настъпи разрушаване поради: 1) уморно разкъсване; 2) разкъсване вследствие на нецялостност, породена от умора на метала. Най-често и на практика разрушаването протича при комбинирането на двата вида. След дълъг инкубационен период се заражда пукнатина на умора, която първоначално е трудно различима за приложимите методи на безразрушителен контрол. Пукнатината може да достигне до критичен размер и да доведе до внезапно пълно разрушение на конструкцията. Опасността от такива разрушения особено нараства при големи срокове на експлоатация. В реалните условия на корпуса на реактора не може да се разграничат всичките действащи механизми на деградация. В зависимост от местоположението на пукнатината, нарастването ѝ може да е повлияно от неутронното и термично въздействие, а също и от механично-температурните въздействия на флуида. При метода на изследване – съпротивление на уморно разрушаване могат да се определят две величини, свързани с ресурса на съоръжението. Първата величина е натрупаното уморно повреждане „а“ остатъчният ресурс до момента на възникване на пукнатина (дефект), причинен от умора на материала, формула (2.2). Втората величина е останалото време на експлоатация на компонента до момента на възникване на пукнатина от умора. Определя се най-натоварената зона на метала (критична зона), която има потенциал за разрушаване.

- 5) Вероятностен метод по нормирани еквивалентни площи на констатирани индикации на нецялостности. Извършено е систематизиране на индикациите на нецялостностите, които са констатирани при ултразвуков безразрушителен контрол на външна и на вътрешна повърхности на корпусите на реакторите. В изчислителната част на методиката се обработват данните за всяка индикация, като стойността на еквивалентната площ $S_{\text{екв.}}$ на индикацията на нецялостността се разделя на максимално допустимата площ на нецялостностите за това съоръжение, по нормативи [22]. В графичната част на методиката се използват координатна мрежи; като по абсцисата се нанася периода на експлоатация на корпусите на реактора [години], а по ординатата – стойностите на $S_{\text{норм.}}$. Нагледно може да се наблюдава дали има развитие на индикациите през периода на експлоатация на съоръженията. При достигане на крайната гранична линия може да се счита, че ресурсът на метала е изчерпан, по критерий съпротивление на развитие на нецялостност.
- 6) Вероятностен метод за оценка на ресурса на корпуса на реактора по модела на Вейбулово разпределение на дължини на индикации на нецялостности.
- 7) На основание съвкупността от нецялостности и чрез представяне на размерите им във вероятностни мрежи, може да се оцени момента от време, когато една или повече нецялостности ще достигнат критични размери и ще последва отказ

на съоръжението. Този момент от време на практика определя лимита на ресурса на съоръжението. Хипотетично избираме като подходящ физичен модел за оценка на отказите Вейбуловото разпределение.

ГЛАВА 5.

Глава 5 от дисертацията обхваща оценка на надеждност и ресурсни характеристики на парогенератор – изготвяне на методика и провеждане на оценките. Определени са механизми на деградация на механични свойства на метала – корозионно-механично износване вследствие на преминаването на флуида, окрежкостяване на метала и умора поради циклите на натоварване (напрежения и температури).

Обектът на оценка е метала на парогенератори, тип ПГВ 1000 М, както и корпусите на парогенераторите. Изследвани са два блока, блок „а” и блок „b”, тип ВВЕР 1000; всеки блок има по 4 хоризонтално разположени парогенератори. Чрез детерминистични методи са оценени ресурсните характеристики:

- Съпротивление на корозионно разрушаване на метала (корозионно-механично разрушаване);
- Съпротивление на крехко разрушаване на метала;
- Съпротивление на уморно разрушаване на метала и на корпуса на ПГ.
- Чрез вероятностни методи са оценени ресурсни характеристики за съпротивление на развитие на нецялостности. Приложени са методите:
- Вероятностен метод по нормирани дължини на констатирани индикации на нецялостности;
- Вероятностен метод за оценка на ресурса на парогенератори по модела на Вейбулово разпределение на дължини на индикации на нецялостности.
- По-долу следва накратко описание на горесцитираните методи.

- 1) Съпротивление на корозионно разрушаване на метала (корозионно-механично разрушаване). Проведено е изследване на състоянието на метала на заварени съединения на колекторите на парогенераторите към корпусите им. Мотивът за подбора на тези заварени съединения е факта, че се наблюдават нецялостности в метала и това се докладва от други ЯЕЦ с технология ВВЕР 1000. Заварените съединения на колекторите към корпусите на ПГ се оказват критично място за ПГ с потенциал за разрушаване. В няколко централи се потвърждава, че в тези заварени съединения на ПГ с колекторите Ду 1200 възникват и се развиват дефекти в метала (Нововоронеж ЯЕЦ). Това е верифицирано от информационния обмен по линия на Световната организация на ядрените оператори (WANO). Причина за нецялостностите е специфичната геометрична форма на заварените съединения (като „джоб”) и корозия под напрежение. Обектите на изследването са металите на челни заварени съединения на щуцери Ду 1200 към колектори по първи контур на парогенератори ПГВ 1000М. В методичната част се дефинира прилагане на методи на безразрушителен контрол, с които са констатирани нецялостности в заварените съединения и са определени техния вид, размери и местоположение. Предвиждат се графични

методи за представяне тенденцията на развитие на нецялостностите. Като входни данни се вземат вида, размерите и местоположението на нецялостностите. Данните са от проведени визуален, капилярен и ултразвуков методи на безразрушителен контрол на метала.

- 2) Съпротивление на крехко разрушаване на метала. Обектите на изследване са индикации за нецялостности, а също и действащите напрежения в местоположението на констатираните нецялостности. Тази оценка трябва да покаже дали коефициентите на интензивност на напреженията K_i за нецялостностите са по-малки от максимално допустимите стойности. Входните данни за оценките включват параметри на индикации за нецялостности и действащи напрежения.
- 3) Съпротивление на уморно разрушаване на метала и на корпуса на ПГ. Обектите на изследване са парогенераторите ПГВ 1000 М на два блока – общо 8 броя. Разследваните параметри за тези обекти са:
 - Реализирани режими на работа при НУЕ, ННУЕ, АС, ХИ - тип, както и брой отработени цикли за всеки режим;
 - Проектни режими на работа - тип и брой проектни цикли;
 - Данни за индикации за нецялостности – вид, големина, местоположение и причини за възникване (диагностика).
- 4) Вероятностен метод по нормирани дължини на констатирани индикации на нецялостности. Изследваните параметри за тези обекти са нецялостности в заварените съединения на щуцери Ду 1200 на колекторите към корпуса на парогенераторите. Подборът именно на тези обекти е мотивиран от факта, че на тези места са констатирани множество нецялостности при безразрушителен контрол и има достатъчно данни да се направи статистическа извадка. В измервателната част на методиката се определя заварените съединения на щуцерите към парогенераторите да се изследват чрез ултразвуков метод. С цел да се проследи динамиката на развитието на констатираните нецялостности, са събрани следните входни данни:
 - Индикации от ултразвуков контрол на нецялостности на метала на съоръжението – проследявани са параметрите на нецялостностите: размер a_i на i -та нецялостност, местоположението и взаимното разположение спрямо други нецялостности.
 - Стойности за критични размери $[a]$ на нецялостности на съответния сегмент на съоръжението – вземат се от паспортите или от нормативния документ [18].
 - Периодът t_i на експлоатацията на съоръженията – взема се от експлоатационната документация.

Целта е да се проведе анализ на развитието на индикациите и тенденциите за достигане на критичното състояние. Входните данни за дадено съоръжение се представят в графичен вид, в координатна мрежа. За колкото повече периоди от време има данни за дадена индикация, толкова по-ясно ще се изрази тенденцията на развитието.

- 5) Вероятностен метод за оценка на ресурса на парогенератори по модела на Вейбулово разпределение на дължини на индикации на нецялостности. При така приложения вероятностен метод се оценява събитието y_i да се получи

разрушаване (разкъсване) на метала на обекта поради нецялостност (дефект). Това събитие ще се реализира в случай, че размерът на нецялостността достигне критични стойности. С цел да се проследи динамиката на развитието на констатираните дефекти са събрани входни данни, както при предходната точка 4). Целта е да се проведе анализ на развитието на индикациите и тенденциите за достигане на критичното състояние. Използва се вейбулова вероятностна мрежа за графично представяне на резултатите и тенденциите.

ГЛАВА 6.

Глава 6 от дисертацията обхваща оценка на надеждност и ресурсни характеристики на компенсатори на налягането – изготвяне на методика и провеждане на оценките. Основните механизми на деградация на механични свойства на елементите на КН са следните [95]:

- Температурна умора, дължаща се на три основни процеса - температурна стратификация (изменение на температурата на флуида по височината в съда на КН), страйпинг (неравномерно износване на вътрешната повърхност на съда поради турбуленция на флуида) и температурен шок;
- Вибрационна умора – от механизми на възбуждане според работата на помпите, промяна в налягането на флуида поради колапсиране на парни джобове и разширяване на водата;
- Температурно стареене;
- Корозионно напукване под напрежение;
- Корозия от борна киселина;
- Корозия от въздушната среда.

Предмет на изследването са ресурсните характеристики на метала на КН, на корпуса на КН и на дихателен тръбопровод, както и щуцери от системата на КН след повече от 30 години експлоатация. Събрани са и са систематизирани данни от безразрушителен контрол на метала, записи в паспорта на КН, данни от обследване корозионното състояние на КН, брой отработени цикли на натоварване, отчети от оценка на ресурса и от модернизация, както и от типа, обемите на ремонта на КН. Обектите са изследвани чрез прилагане на детерминистични методи, изследва се:

- Оценка на съпротивлението на метала на корозионно разрушаване (корозионно-механично разрушаване);
- Оценка на съпротивлението на метала на заварените съединения на крехко разрушаване;
- Оценка на съпротивлението на метала на КН и на КН на уморно разрушаване.
- По-долу следва накратко описание на горесцитираните методи.

- 1) Оценка на съпротивлението на метала на корозионно разрушаване (корозионно-механично разрушаване). Обектите на изследването са металите на вътрешна повърхност на корпуса на КН и на дихателен тръбопровод. Тези обекти са подбрани за оценка на ресурсни характеристики, поради характерните работни режими на непрекъснато обмокряне от флуида и изсушаване, температурна умора и температурно стареене, както и поради

наличието на дефекти в заварените съединения на корпуса на КН. Металът на вътрешната повърхност на корпуса и на дихателния тръбопровод се изследва чрез повърхностни и обемни методи. Контролът на метала на КН се извършва веднъж на 4 години [80] чрез методите визуален, капиларен и ултразвуков контрол, с които са констатирани нецялостности в заварените съединения и са определени техния вид, размери и местоположение. Входните данни за оценките представляват вида, размерите и местоположението на нецялостностите, годините на регистрация, паспортните данни, действащите напрежения. Данните се вземат от документите за проведен безразрушителен контрол. Резултатите се представят графично и се интерпретират.

- 2) Оценка на съпротивлението на метала на заварените съединения на крехко разрушаване. Обектите на изследване са биметални заварени съединения в тръбопроводите на КН:
 - щуцер от 4ГЦК към КН - Ду350, Ø426x40;
 - щуцер за впръск на 1ГЦК към КН - Ду200, Ø219x19.

В зоните на тези заварени съединения има потенциален риск от разрушаване поради различните топлофизични характеристики на различните материали, което води до увеличаване на вътрешните термо-хидравлични напрежения при работата на съоръжението. Реалните тръбопроводни системи се апроксимират във вида на общ пространствено-прътов изчислителен модел, който съдържа участъци от прави и криволинейни тръби, тройници, конзолни краища, оборудване и др. Изчислителните сечения на суперелементите се намират в местата на разполагане на: щуцери, начални, средни и крайни сечения на колена, зони с максимални напрежения в тройниците, а също в зоните на монтажни заварени съединения.

Избраните за анализ сечения на щуцерите се изследват, като се използват резултатите от симулации върху пространствено-прътови тръбопроводни модели, с помощта на които се провеждат редица изчисления за натоварващите фактори; симулират се термо-хидравличните натоварвания в различните режими на работа на ядрения блок. Статичните и сеизмичните изчисления са извършени с помощта на програмния комплекс "АСТРА-АЭС", базиран на нормативния документ [8], който е лицензиран за извършване на анализи в ядрени централи. Изчислителните премествания и усилия в сеченията на суперелементните модели, а също и натоварванията върху опорите и щуцерите на оборудването се определят в резултат на решаването на системата линейни уравнения по метода на Холецки, които описват равновесието на тръбопроводните системи. Отчитането на сеизмичните въздействия по линейно-спектралната теория налагат предварително определяне на количеството на значимите собствени честоти и форми, посредством метода SUBSPACE ITERATION.

В обектите за изследване - щуцери от тръбопроводните системи на КН - се постулира наличието на дефекти (симулативно в компютърната програма), проследява се тяхното нарастване под влияние на въздействащите натоварвания през периода на експлоатация на КН. В края на допълнителния срок на експлоатация ДСЕ на съоръжението, крайните размери на дефектите не трябва да надвишават съответните нормативни изисквания. Задачата на анализите е да се определят в бъдещите години на експлоатация какви ще са размерите на дефектите, така че в края на срока на експлоатация на обекта тези дефекти да са с допустими размери по якостни критерии [22]. За провеждане на оценките се събират и се систематизират входни данни за:

- Щуцерите от тръбопроводните системи на КН на блокове „а“ и „б“ с наличие на биметални заварени зони;
- Определяне на натоварващите параметри при работа на енергоблоковете;
- Определяне на режимите на РУ, релевантни към обема на изследването;
- Определяне на конкретните задачи на изследването;
- Дефиниране на якостните критерии за оценка на напреженията в критичните зони;
- Дефиниране на якостните критерии за оценка на нарастването на дефектите;
- Чертежи, характерни сечения, конструктивни схеми на тръбопроводите;
- Параметри на натоварване в отделните режими;
- Материали на обектите и техните механични и физични характеристики;
- Ориентировъчни размери на постулирани дефекти;
- Схематизация на дефектите, необходима за компютърни модели;
- Определяне на минималните размери на дефектите.

3) Оценка на съпротивлението на метала на КН и на КН на уморно разрушаване. Остатъчният ресурс на оборудването и тръбопроводите по критерия зараждане на пукнатина на умора (до момента на зараждане на пукнатина) се пресмята по формула (2.3). Обектите на изследване са компенсатори на налягането КН на двата блока – общо 2 броя. Разследваните параметри за тези обекти са:

- Реализирани режими на работа при НУЕ, ННУЕ, АС, ХИ - тип, както и брой отработени цикли за всеки режим;
- Проектни режими на работа - типа и брой проектни цикли;
- Данни за индикации за нецялостности – вид, големина, местоположение и причини за възникване (диагностика);
- Данни от якостни анализи.

В измервателната част от методиката се определя измерване на броя на отработените цикли на натоварване от компенсаторите на налягането КН в режими НУЕ, ННУЕ, АС и ХИ. Индикациите на нецялостностите в метала на заварените съединения се откриват и оразмеряват чрез прилагане на методите на безразрушителен контрол. Събират се и се систематизират данни за броя на отработените цикли на натоварване от КН на блок “а” и на блок “б” в режими НУЕ, ННУЕ, АС и ХИ. От всички тези режими се разглеждат

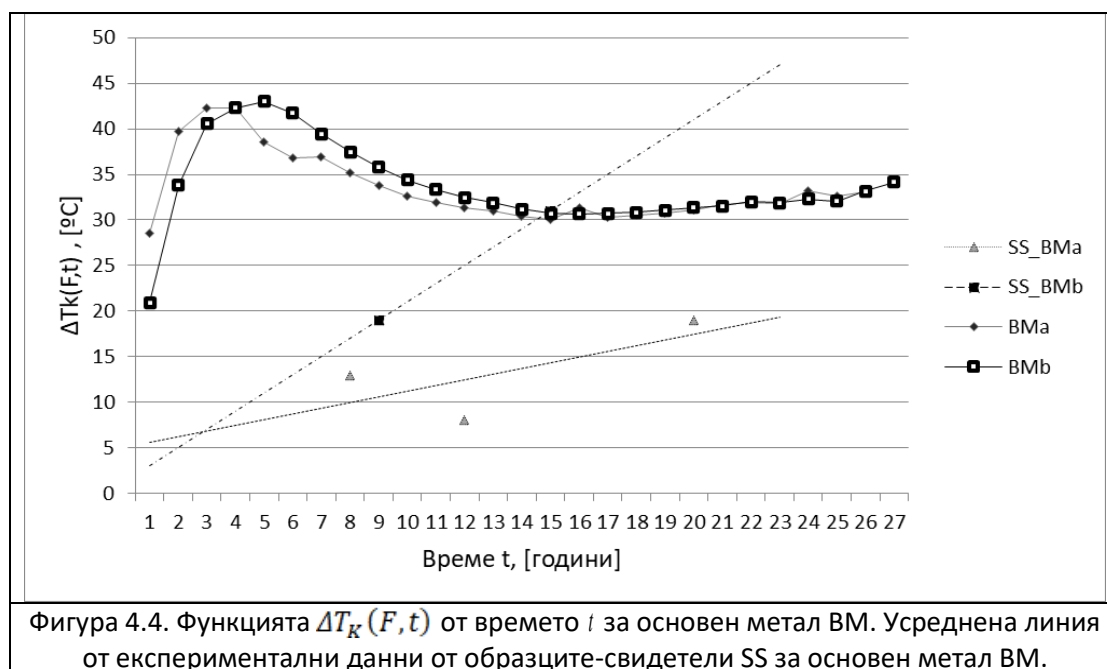
само тези, които имат (евентуално) отношение към температурната умора на материалите на КН.

ПОЛУЧЕНИ РЕЗУЛТАТИ

Обектът на оценката е метала на **корпуси на реактори**, както и корпусите на реакторите, тип ВВЕР 1000 – В 320. Чрез прилагане на детерминистични методи са оценени ресурсните характеристики по 4 механизма на стареене, а посредством вероятностни методи са определени тенденциите на развитие на параметри на индикации на нецялостности в метала. В настоящата глава от автореферата се дават някои резултати от оценките на ресурсни характеристики.

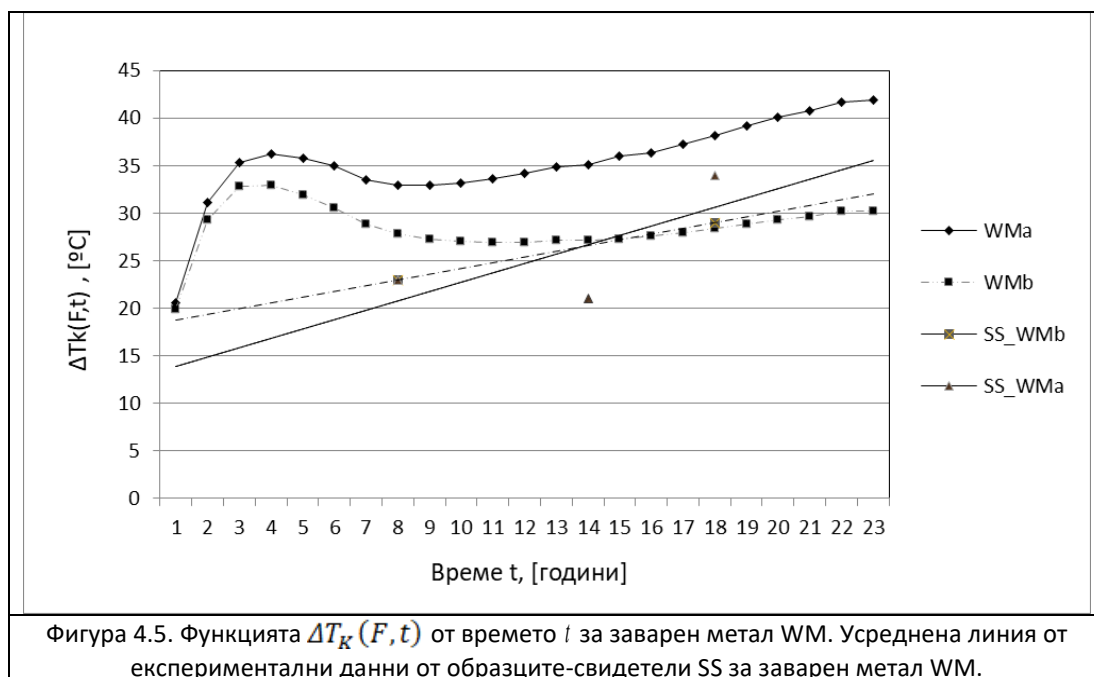
Оценка съпротивлението на неутронно окрежкостяване и на термично стареене на материала на корпуса.

Обработени са входни данни, необходими за оценките. Данните са представени графично като функция на преместването на температурата $\Delta T_K(F,t)$, [°C] от периода на експлоатация на енергийния блок, t [години] и са представени в дисертацията на Фигури 4.1. до 4.5. По-долу в текста са дадени две фигури, при които се наблюдава добра корелация между изчислените данни и експерименталните такива, получени при изпитванията на образци-свидетели. За темповете на неутронно окрежкостяване и термично стареене за основен метал се получава добро съвпадение на изчислените данни за блок “а” и за блок “б, Фигура 4.4. Експерименталните данни от изпитванията на образците-свидетели показват по-малки стойности на ресурсната характеристика $\Delta T_K(F,t)$, в сравнение с изчислените стойности. Това доказва консервативност при изчисленията, което е добра практика и гарантира превенцията при процесите на окрежкостяването.



Фигура 4.4. Функцията $\Delta T_K(F,t)$ от времето t за основен метал ВМ. Усреднена линия от експериментални данни от образците-свидетели SS за основен метал ВМ.

За темповете на неутронно окрежкостяване и термично стареене за основен метал се наблюдава корелация между данните за стойности на ресурсната характеристика $\Delta T_K(F, t)$ от изчислени данни и експериментални данни за образците-свидетели, Фигура 4.5.



Оценка на съпротивлението на корозионно-ерозийно (стареене) износване на метала

Наблюдават се нецялостности на вътрешната повърхност на метала, Фигура 4.6. След 15-17 години експлоатация на блока биват констатирани първите нецялостности, които могат да се индикират чрез методите на контрола. Оценката на ресурсните характеристики е изцяло по изискванията на якостните норми ПНАЭ Г – 7 - 002-86 , [8].

Оценка на съпротивление на развитие на нецялостност (дефект, пукнатина).

В Таблица 4.5. са представени данни на индикации на дефекти от ултразвуков контрол на блок „а“ и Периодът на изследване обхваща: 1993 г. – 2014 г., а индикациите са констатирани през 2010 г. и 2014 г. Алгоритъмът за получаване на резултати е описан в точка 4.2.3.5., а в Таблица 4.8. са дадени числови модели за пресмятане на коефициенти на интензивност на напреженията K_I . Пресмятанията на коефициентите K_I и $[K_I]$ са проведени за най-голямата по дължина индикация. В режим „Голям теч от първи контур“, за индикация № “I” на заварено съединение № “Y” се получават стойности на коефициенти на интензивност, съответно $60,21 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ в

първите десетина минути от режима; $43,27 \text{ MPa}\cdot\sqrt{m}$ към двайсетата минута от режима и $32,14 \text{ MPa}\cdot\sqrt{m}$ след първия половин час от режима. За да се оцени риска от крехко разрушване на метала, е необходимо тези стойности на коефициентите на интензивност на напреженията да се сравнят с граничните стойности на коефициентите.

Получава се сравнително добра корелация на резултати за пресметнатите по два числови модела, [8] и [45], [65] гранични стойности на коефициента на интензивност на напреженията $[K_I]$ при АС, в режим на „Голям теч от първи контур“, за индикация № “I” на заварено съединение № „Y“; пресмятанията са дадени в Таблица 4.11.

Обект	[T]	$[K_I]$, по ПНАЕГ– 7 - 002-86 [8] :	$[K_I]$, Verlife [45] и РД..[65]
Заварено съединение № “Y”, Индикация № “I”	70 [°C]	$108 \text{ MPa}\cdot\sqrt{m}$	$123 \text{ MPa}\cdot\sqrt{m}$

Оценка на съпротивление на умора

Оценката е проведена за най-натоварената зона с потенциал за разрушаване, а именно заварените съединения № “Y” и № “Z” на корпуса на реактора (намират се срещу активната зона на корпуса). За тази зона е разгледан и е оценен приноса от реализирани (отработени) блокови режими (в изчисленията не се вземат предвид транзитните режими). Пресметнати са две ресурсни характеристики – сумарно повреждане от умора a_Σ и остатъчният ресурс τ_{occ} до момента на възникване на пукнатина (дефект), причинен от умора, точка 4.2.4.5.

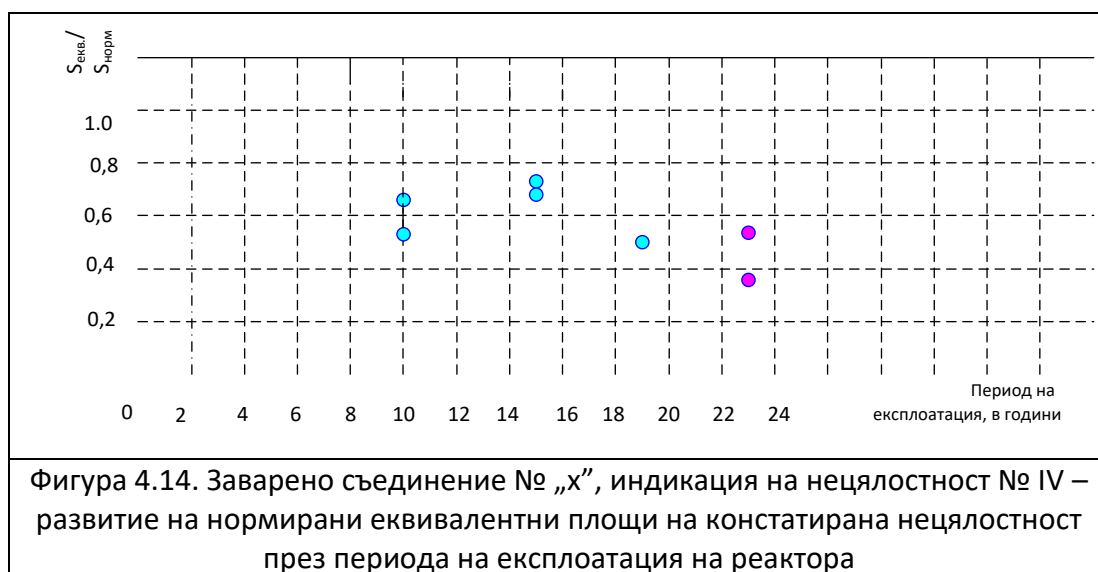
- $a_\Sigma = \frac{N_{зап\lambda\text{ване}}}{N_{пр\lambda\text{ване}}} = \frac{29}{60} = 0,48;$
- $\tau_{occ} = \tau_{пр.} \cdot \left\{ 1 - \max \frac{N_{\Phi i}}{N_{пр i}} \right\} = 40 \cdot (1 - 0,48) = 40 \cdot 0,52 = 20,8 \text{ години}$

Оценките на сумарно повреждане от умора a_Σ и остатъчният ресурс τ_{occ} са напълно приемливи от гледна точка на целия ресурсен период на корпуса, изминалия експлоатационен срок и съответно - оставащия проектен срок.

Оценка чрез вероятностен метод по нормирани еквивалентни площи на констатираните индикации на нецялостности

Развитието на индикации на нецялостности в заварени съединения на корпуса на реактора по модела на нормирани еквивалентни площи са представени графично, Фигури 4.13÷4.17. На всички фигури се наблюдава корелация между резултатите, което потвърждава, че данните от контрола на нецялостностите са достоверни и възпроизводими, и то за дълги периоди

на провеждане на контрола. Конкретно за Фигура 4.14, периода на наблюдение е от началото на експлоатация на корпуса на реактора до 24 години.



Оценка чрез вероятностен метод по модела на Вейбулово разпределение на дължини на индикации на нецялостности на корпуса на реактора

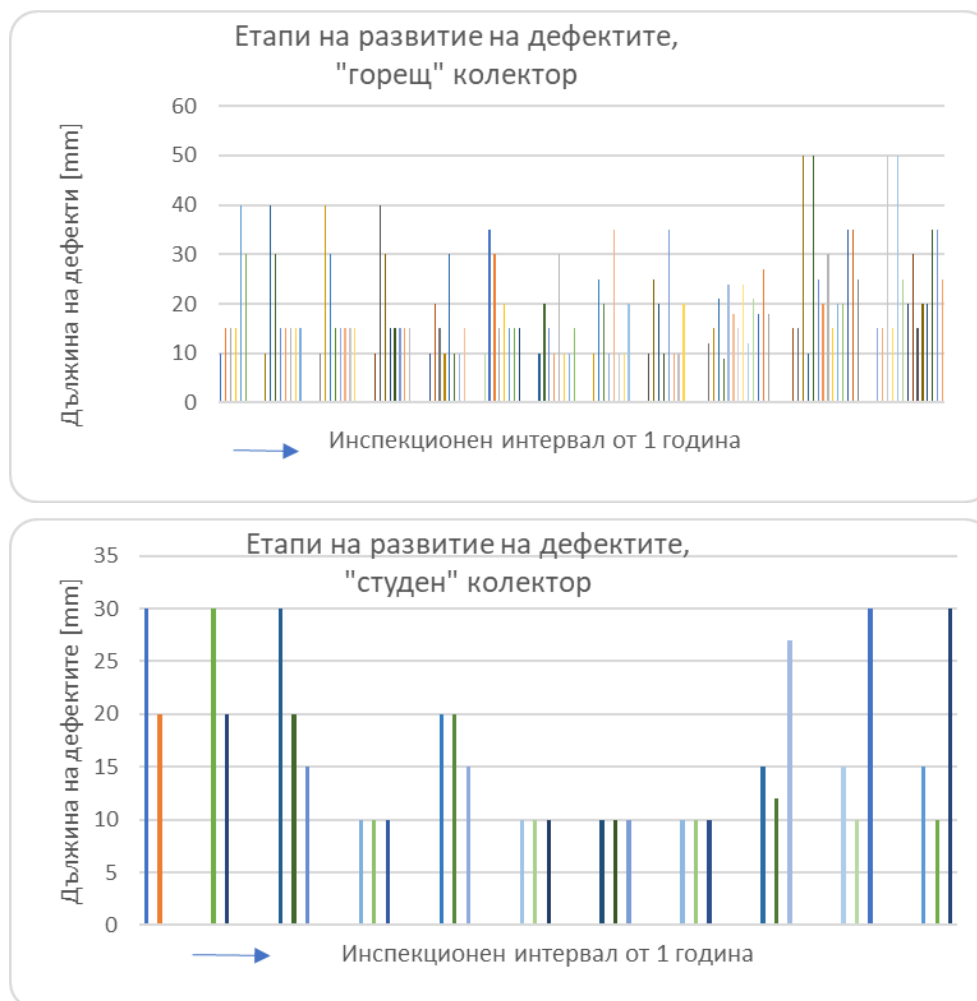
Данните от контрола на метала са ранжирани и представени в Таблицы 4.13÷4.16. Също така те са обработени статистически, като са определени параметрите на разпределението. Данните са нанесени във вероятностни мрежи. За почти всички графики може да се каже, че се наблюдава линейност на данните в мрежата, което потвърждава вече направения извод, че данните от контрола на нецялостностите са достоверни и възпроизводими, както и че избраното (първоначално хипотетично) Вейбулово разпределение е подходящо за прилагане като статистически метод за оценка на дължини на индикации и за прогнозиране на ресурса.

Обектът на оценка е **метала на парогенератори**, тип ПГВ 1000 М, както и корпусите на парогенераторите. Чрез прилагане на детерминистични методи са оценени ресурсните характеристики по 3 механизма на стареене, а посредством вероятностни методи са определени тенденциите на развитие на параметри на индикации на нецялостности в метала.

Оценка съпротивлението на метала на корозионно разрушаване (корозионно-механично разрушаване)

Обработени са експериментални данни от провеждания ултразвуков контрол на заварените съединения между колектори на парогенератори и щуцери Ду 1200 на главни циркуляционни тръбопроводи. Първият стадий на

зараждане на дефектите в корена на шева и в околошевната зона е вследствие на корозия под напрежение. По-нататъшното развитие на дефекта на дълбочина до 2÷3 mm е по линия на радиусния преход на обекта – условно наричаме втори стадий на развитие на дефектите. Механизмите на разрушаване на метала при втория стадий са корозионно напукване под напрежение и корозионна умора на метала. Резултатите са дадени на Фигура 5.7-а и 5.7-б. Наблюдава се повторемост на данните, добра възпроизводимост и достоверност за период от 12 години (за „горещ“ колектор) и за период 11 години (за „студен“ колектор), Фигура 5.7-б.

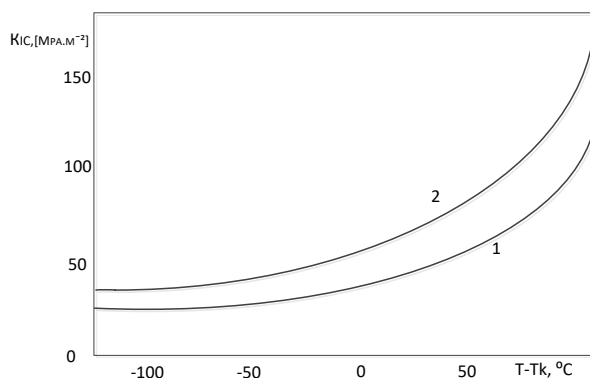


Фигура 5.7-б. Етапи на развитие на дефекти в заварените съединения между колектори на два парогенератори (А и В) и щуцери Ду 1200 – Парогенератор В – „горещ“ и „студен“ колектори.

Оценка на съпротивление на метала на заварените съединения на крехко разрушаване

Извършени са оценки на коефициента на интензивност на напреженията K за всяка индикация на нецялостност, констатирана при контрола, Таблица 5.8. Получените числени стойности $[K_{IC}] = 84$ МПа съответстват на данните от

Фигура 5.9. за стойности на $[K_{IC}]$ в зависимост от приведената температура $T - T_K$ по нормативните изисквания [9].

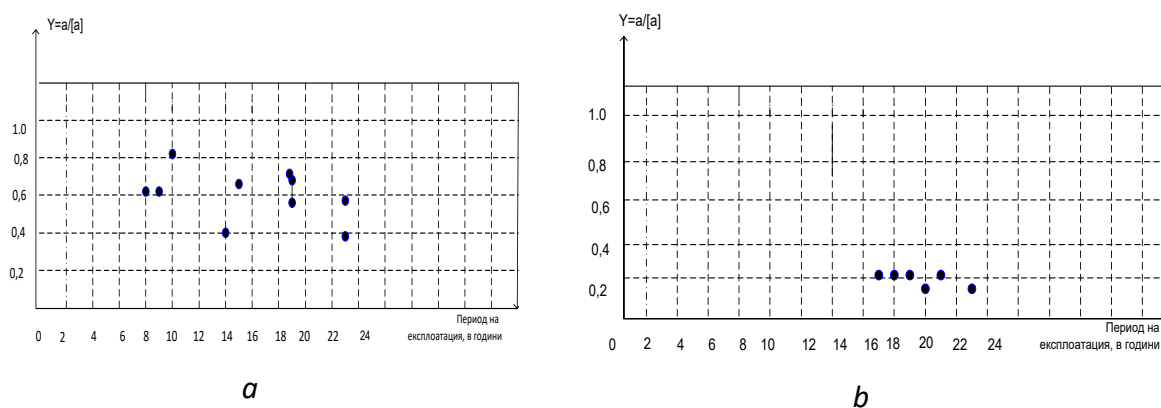


Фигура 5.9. Стойности на $[K_{IC}]$ в зависимост от приведената температура $T - T_K$.

Крива 1 – за НУЕ; крива 2 – за предполагаеми ННУЕ и ХИ, [9] .

Оценка чрез вероятностен метод по нормирани еквивалентни площи на констатиранни индикации на нецялостности

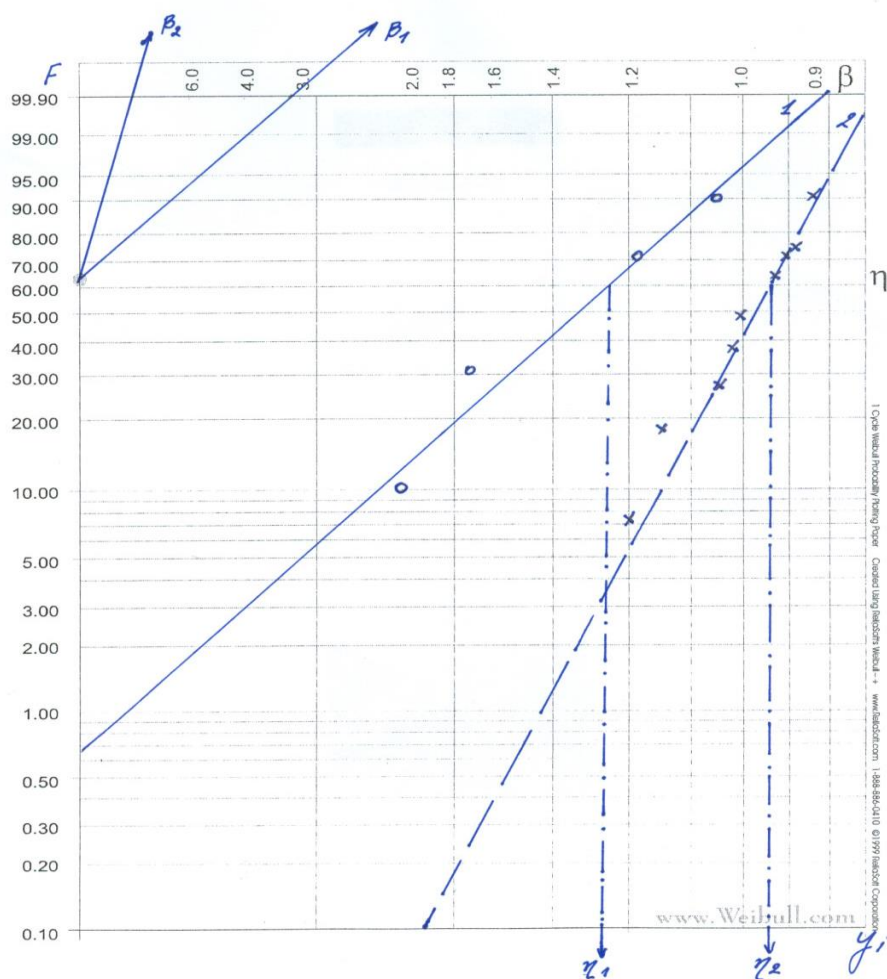
Развитията на индикации на нецялостности в метала на парогенератора по модела на нормирани еквивалентни площи са представени графично, Фигури 5.12÷5.14. На всички фигури се наблюдава корелация между резултатите, което потвърждава, че данните от контрола на нецялостностите са достоверни и възпроизводими, и то за дълги периоди на провеждане на контрола. Периодът на наблюдение на развитие на нецялостностите е от началото на експлоатация до 24 години, Фигура 5.12.



Фигура 5.12. Развитие на нецялостности на метала по резултати от контрола: първа група от нецялостности – стабилно поведение през годините на експлоатация на ПГ.

Вероятностен метод за оценка на ресурса на парогенератори по модела на Вейбулово разпределение на дължини на индикации на нецялостности

Данните от проведения контрол на метала са ранжирани и обхванати в Таблица 5.9. В Таблицата се съдържат и изчислените параметри на Вейбулово разпределение. Данните са нанесени във вероятностна мрежа, Фигура 5.15.



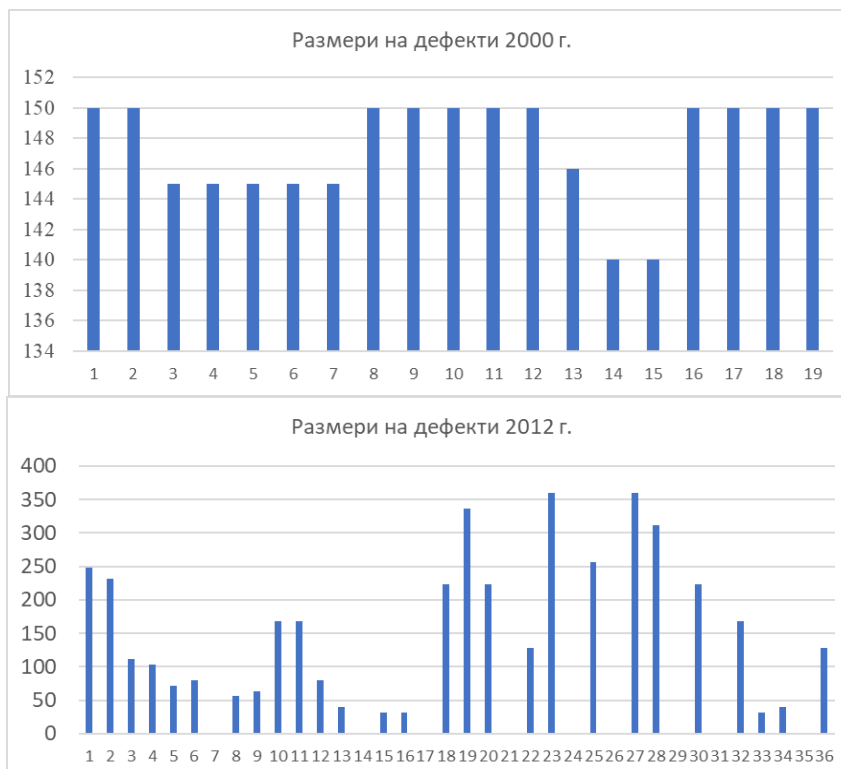
Фигура 5.15. Двупараметрично вейбулово разпределение на стойностите за y_i :
1 – след 10 години експлоатация, $\beta_1 = 3.1; \eta_1 = 0.46$; 2 – след 18 години експлоатация ,
 $\beta_2 = 7.1; \eta_2 = 0.75$

Експерименталните статистически данни могат да се екстраполират чрез права линия, което потвърждава вече направения извод, че данните от контрола на нецялостностите са достоверни и възпроизводими, както и че избраното (първоначално хипотетично) Вейбулово разпределение е подходящо за прилагане като статистически метод за оценка на дължини на индикации и за прогнозиране на ресурса.

Компенсатори на налягане

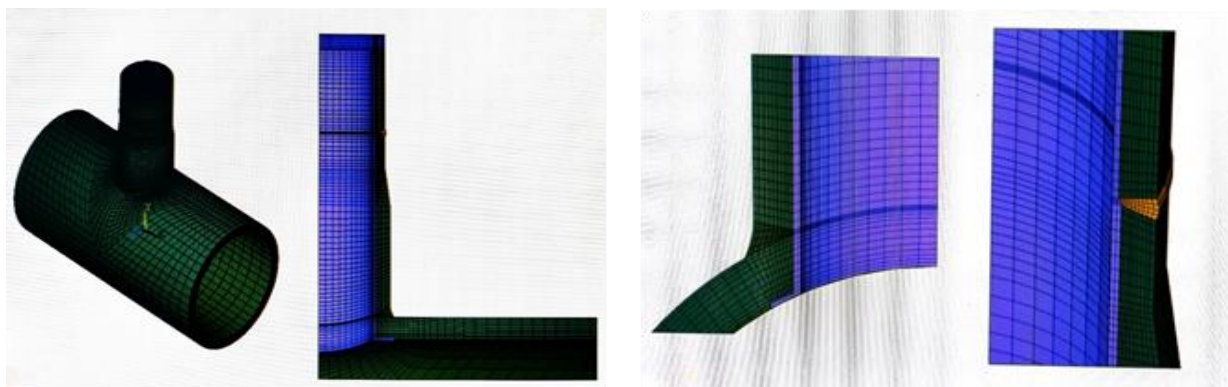
Оценка съпротивлението на метала на корозионно разрушаване (корозионно-механично разрушаване)

Резултатите от проведения безразрушителен контрол се оформят графично, Фигура 6.1. Може да се проследи увеличението на броя и размера на дефектите, а по местоположението им се правят изводи за действащите механизми на деградация. Наблюдава се корелация на данните за период от 12 години между двата проведени контрола.



Фигура 6.1. Сравнителен анализ на развитие на нецялостностите в метала на заварено съединение „XX” на КН.

Оценка на съпротивление на материала на заварените съединения на крехко разрушаване. Изготвени са крайно-елементни модели на обектите, които обхващат част от ГЦТ, щуцер на КН и част от тръбопровода на КН, Фигура 6.2. и 6.3.



Фигура 6.2. Модел на щуцер на „дихателния“ тръбопровод YP10B01 - Ду350.

Резултатите за възникващите напрежения в избраните сечения на изследваните щуцери при провеждане на статико-сеизмичните анализи с програмния продукт "АСТРА-АЭС" са представени в Таблицы 6.1 и 6.2. Програмният продукт е сертифициран, софтуерно са заложили якостните норми [8]. Якостните критерии са проверени за всички изследвани сечения на анализирания щуцери и са удовлетворени – за режими НУЕ, ННУЕ, ХИ и за товарна комбинация НУЕ+ПЗ. Чрез метода на компютърна симулация в сечения 1, 2 и 3 са имплантирани дефекти с минималния детектируем размер (1 mm) по метода ултразвуков контрол. Проследено е тяхното нарастване за период от 4 години (периода от време до следващия експлоатационен контрол на метала) и 30 години (периода от време до края на експлоатационния срок на енергоблока). Резултатите са приемливи от позиция на нормативния документ ПНАЕГ-7-002-86, [8].

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси

- 1) Разработена е научнообоснована методология за провеждане на оценки на надеждност на механично оборудване на ядрени блокове с реактори с вода под налягане от типа ВВЕР.

Приложни приноси

- 2) Създадена е методика за провеждане на контрола и оценките на ресурса от гледна точка на комплексните въздействия на различните механизми на деградация на механични свойства на материалите.
- 3) Разработени са вероятностни методи за проследяване на тенденциите показателите, свързани с процесите на стареене.
- 4) Извършена е систематизация и е изградена база данни, в която са включени всички дефекти в оборудването на блокове №5 и №6 на „АЕЦ Козлодуй“ за период от първите 30 години на експлоатация.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- 1) Dimova G. T, Ageing of Nuclear Power Plant's Equipment. Assessment of Reactor Pressure Vessel ageing effect, GJSFRH, Global Journal of Science Frontier Research: H Environment & Earth Science, 2023
- 2) Dimova G. T, Evaluation of metal ageing of Reactor Pressure Vessels in a Nuclear Power Plant under the influence of ageing mechanisms and environmental conditions, Comptes rendus de l'Académie, pp. 1754, 2023
- 3) Dimova G. T, Methodology for lifetime characteristics assessment of mechanical equipment in nuclear power plants. Ageing management of NPP mechanical equipment, IOP Conference Ser: Earth and Environmental Science 27th Power Engineering and Power Machines Conference 2022 15/09/2022 - 19/09/2022 Sozopol, Bulgaria, pp. 012020
- 4) Dimova G. T., Ageing Management Effectiveness for NPP's, Amazon.de, 2018
- 5) Димова Г., Стаевски К., Вероятностно разпределение на дефекти в метала на компоненти от I-ви контур на ядрени електроцентрали, Годишник на Софийски университет, том 106, 2013

SUMMARY

PhD Thesis Title: Evaluation of resource characteristics of mechanical equipment in NPP with WWER type reactors.

PhD Candidate: Galya Dimova

The dissertation discusses a methodology for conducting assessments of mechanical equipment of WWER-type reactors in NPPs, applying deterministic and probabilistic methods. The assessment approaches are summarized in methodologies for the evaluation of resource characteristics of a reactor vessel, steam generators and pressurizers. Assessments of the resource characteristics of the equipment should be conducted due to the expiration of the design lifetime of the NPP, both in our country and in other NPPs. The problems with conducting assessments of the main equipment in NPP stem from the lack of developed regulatory and methodological base in the area.

The methodology includes the following constituents:

- conducting equipment classifications;
- determination of the basic mechanisms of degradation of mechanical properties of materials;
- determination of the effects of degradation of mechanical properties of materials;
- definition of methods to control degradation effects of mechanical properties of materials;
- writing down the methodologies for assessing the effects;
- appointment of measures (programmes) for management of equipment ageing in NPP;
- evaluate the effectiveness of ageing management measures (programmes).
- evaluation of the effectiveness of control methods(s).

The RPV metal is subjected to a complex of loading factors – neutron and thermal aging from the neutron flux, corrosion-erosion wear by the fluid along the first loop, metal embrittlement due to the loading operating conditions and the presence of defects, fatigue due to cyclic temperature and hydraulic loading. A methodology for assessing reliability and resource characteristics of reactor vessels has been prepared. Deterministic methods apply to assessments of the resistance of the metal to: 1) neutron embrittlement and thermal ageing; 2) corrosion-erosion wear; 3) development of Incompleteness (defectcrack); 4) the fatigue fracture resistance. The probabilistic methods are applied for evaluations on the criterion resistance to development of incompleteness in the metal of the reactor vessel. The probabilistic estimation methods were used: 1) probabilistic method by normalized equivalent areas of established indications of incompleteness; 2) probabilistic Method following the model of Weibull Distribution of Incompleteness Indication Lengths.

A methodology for evaluating reliability and resource characteristics of steam generators has been prepared. Deterministic methods are applied to assess resource characteristics of a resistance to: 1) corrosion destruction of the metal (corrosion-mechanical fracture), 2) fast fracture of the metal; 3) fatigue destruction of the metal and the housing of the steam generators. The methodology contains probabilistic methods for the evaluation of resource characteristics of steam generators.

A methodology for assessing reliability and resource characteristics of pressurizers has been prepared. Assessments of resource characteristics were carried out by the methods included in the methodologies and based on real data from the operation of NPPs, obtained over a period of 30 years.