

ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕСИТЕ НА СТАРЕЕНЕ ВЪРХУ ОСТАТИЧНИЯ РЕСУРС НА СЪОРЪЖЕНИЯ ОТ АЕЦ

доц. д-р М. Лаков, ст. н.с. I ст. д-р Ст. Воденичаров, д-р Д. Нейчев

1. Въведение

Реакторните материали, особено тези на активната зона, вътрешнокорпусните устройства, корпусът, главните циркуляционни тръбопроводи, компенсаторът на налягането и дихателните тръбопроводи на КН са изложени на силни механични, топлинни, радиационни и корозионни въздействия. Естествено, не всички от изброените въздействия протичат едновременно. За компоненти на I контур, като вътрешнокорпусните устройства и корпуса на реактора, всичките тези въздействия протичат едновременно и формират сложните условия на работа на тези компоненти в експлоатационни условия на реактора. За други компоненти на I контур, като главните циркуляционни тръбопроводи, компенсатора на налягането, дихателните тръбопроводи на КН и колекторите на парогенераторите, са характерни всички въздействия без радиационното.

Известно е, че корпусът на реактора, главните циркуляционни тръбопроводи, компенсатора на налягането и колекторите на парогенераторите представляват втората бариера срещу разпространението на радиоактивните продукти в околната среда и поради това представляват отговорни компоненти за безопасната експлоатация на ядрената инсталация.

Сложните условия на работа на компонентите на I контур, обусловено от комплексното действие на изброените въздействия, са причина за деградацията на характеристиките на материалите, от които тези компоненти са произведени. Тази деградация е добре известна под общото понятие "процес на стареене" на материалите. Така процесът на стареене е пряко свързан с безотказното функциониране на компонентите, а оттам и с безопасността на реакторната инсталация.

В настоящата работа са поставени следните основни задачи:

- Да се систематизират механизмите на стареене на компоненти от I контур на реакторите от типа ВВЕР;
- Да се дефинират качествено факторите, влияещи върху процеса на стареене;
- Да се идентифицират тези механизми, които имат доминиращо влияние върху стареенето на материалите на отделните компоненти;
- Да се обвържат количествените характеристики на процеса на стареене с ресурса на материалите, а оттам и с времето за безопасна експлоатация на ядрената инсталация;
- Да се формулират принципи и механизми за управление на процеса на стареене, ако е възможно, а също така и критерии за оптимално управление на този процес.

2. Механизми на стареене на съоръженията от I контур на АЕЦ с ВВЕР

В експлоатационни условия механизмите на стареене се детерминират от параметрите на околната среда и параметрите на натоварването.

Параметрите на околната среда (температура, налягане, облъчване, химическа активност, влажност и др.) предизвикват следните механизми на стареене: радиационно окръжностяване; термично стареене; пълзене; корозия (корозионна умора, корозионно напукване, интеркристална корозия, обща корозия, локална корозия, ерозия – корозия).

Параметри на натоварването (статично, динамично, ударно и др.) са в основата на следните механизми на стареене: умора (многоциклова, малоциклова, термична, фретинг умора); износване, фретинг.

Последствията за материала на съоръженията, вследствие на изложените механизми на стареене, се изразяват в: намаляване жилавостта; формиране на пукнатини; увеличаване на обема; изтъняване; структурни изменения.

По-долу са изложени най-общите характеристики на отделните механизми на стареене и съоръженията от I контур, за които тези механизми са характерни.

Радиационно окрежкостяване. Радиационното окрежкостяване е ефектът от взаимодействието на различните видове лъчения с атомите от кристалната решетка на металите. В ядрените реактори доминираща роля има неутронното облъчване със спектър в енергийния интервал от 0 до 15 MeV. Съпровождащото процеса на делене γ -лъчение има значително по-слаб ефект. (около 2% от ефекта на неутронното лъчение). При разсейването си в ядрата на атомите, неутроните отдават енергия, вследствие на което се получават отмествания на атомите в решетката и формирането на каскади от отместени атоми. Вследствие на това се формират области с ниска атомна плътност (голяма концентрация на ваканции) и висока атомна плътност (вместени атоми). В зависимост от температурата, при която протича облъчването, част от дефектите в кристалната решетка изчезват поради протичащите дифузионни процеси. Вследствие на това процесът на генериране и рекомбинация на дефекти клони към някаква равновесна стойност, която зависи от двата основни параметъра на процеса – интегралния неутронен поток (флуенса) и температурата на метала.

Чувствителността на метала към неутронното облъчване зависи от вида на метала, химичния му състав, първоначалните механични свойства и вида на термичната обработка. Най-общо ефектът от неутронно облъчване предизвиква т.нар. радиационно окрежкостяване, изразяващо се в повишаване на температурата на преход от пластично към крехко разрушаване, а също така понижаване на ударната якост при определена температура.

Ефектът от радиационното окрежкостяване налага ограничения в параметрите на преходните процеси при нормални експлоатационни условия (скорост на промяна на механичните натоварвания и скорост на промяна на температурата на метала). Особено важна роля играе радиационното окрежкостяване в аварийни условия, когато се налага бързо понижаване на температурата на метала при високи механични натоварвания, при което е възможно достигане на границата на преход към нулева пластичност.

От гледна точка на безопасността на ядрената инсталация радиационното окрежкостяване лимитира параметрите на експлоатация на корпуса на реактора, обвивките на топлоотделящите елементи и на вътрешнокорпусните устройства.

Термично стареене. Термичното стареене е свързано с всички термично предизвикани премествания (дифузия) на атомите на решетката, протичащи в условия с или без външно механично натоварване. Параметрите, предизвикващи дифузионните процеси и отговорни за термичното стареене са: ниво на температурата; микроструктура на метала; време на термичното въздействие.

Микроструктурните процеси, протичащи в метала вследствие на термичното въздействие, се проявяват в: отделяне на фази; трансформация на фази; растеж на отделните фази в матрицата; обратно разтваряне на отделните фази. Комплексното действие на тези процеси води до деградация на метала, наричано общо термично стареене, изразяващо се в намаляване на якостните характеристики и промяна на твърдостта и жилавостта.

Скоростта на термичното стареене за конкретен метал се определя от нивото на температурата и времето на термична експозиция. Механизмът на термично стареене

обаче се усложнява при механично натоварване, поради взаимодействието на дифузионните процеси и дислокационното движение. Влияние върху механизма на термично стареене оказва видът на пластичната деформация (студена или гореща) преди подлагането на метала на термично въздействие в експлоатационни условия.

Отговорните за безопасността на ядрената инсталация компоненти, на термично стареене е подложен метала на : корпуса и капака на ядрения реактор; обвивките на топлоотделящите елементи; главните циркуляционни тръбопроводи; дихателните тръбопроводи на КО; компенсатора на обема.

Пълзене. Пълзенето представлява зависеща от времето пластична деформация на метала, протичаща вследствие на следните фактори : движение на дислокации; дифузионни процеси; процеси на приплъзване по границата на зърната. Ефектът от процеса пълзене се изразява в промяна товароносимостта и остатъчната жилавост на метала с течение на времето, поради което в съответствие с изложеното по-горе, може да се разглежда като един от механизмите на стареене.

Изложените три фактора, пораждащи пълзенето на метала, обикновено действат едновременно, но с различна тежест, което зависи от времето, размера на зърната, онечиствания, отделяния, вторични фази и др. Процесът на пълзене и свързаната с него деформация водят до повреди в метала, които обикновено протичат в следните стадии :

- Деформация, дължаща се на пълзенето, в която се наблюдават три режима, управлявани от различни механизми. В първия режим се наблюдава монотонно нарастване на деформацията във времето. Във втория режим нарастването на деформацията е квазилинейно във времето. В третия режим протича рязко увеличение на деформацията с последващо разрушение. Детайлите се проектират за работа в първия и втория режим, за които настъпилите повреди са обратими.
- Образуване на стабилни зародиши на пори от пълзене до края на втория режим.
- Коагулация на порите от пълзенето до формиране на микропукнатини.
- Растеж на пукнатината поради пълзенето. В този режим е възможно получаването на спонтанна повреда, засягаща значителна част от метала.
- Разрушаване вследствие на пълзенето. С течение на времето натрупването на микроструктурни повреди води до намаляване на способността за деформация при пълзене, което води до разрушаване на метала.

За металите процесът на пълзене е характерен при температури по-високи от около 40 % от температурата на топене. Поради сравнително ниските температури, на които се изложени отговорните за безопасността компоненти на ядрената инсталация, стареенето, предизвикано от процеса на пълзене, не представлява самостоятелно съществен фактор в общия механизъм на стареене. Състоянието му обаче с някои от останалите механизми, като радиационното окрежкостяване и механичната умора, не може да бъде пренебрегнато при оценката на поведението на метала.

Механична умора. Под действието на механични натоварвания, дори и при ниски напрежения в микрообласти около отделни кристали протича ограничена пластична деформация. В зависимост от ориентацията на решетката, дислокационната конфигурация и натоварването, дислокациите могат да бъдат активирани и да причинят необратими процеси на приплъзване.

Цикличното натоварване на метала води до натрупване на микродефекти (умора). След като енергийното натрупване е достигнало нивото на насищане, е невъзможно по-нататъшно приплъзване в кристали, в следствие на което се появяват микропукнатини. С нарастване броя на циклите от механичното натоварване, микропукнатините нарастват и предизвикват локални напрежения в нови области. Комбинацията от по-интензивно поле на напреженията около микропукнатините и прогресивното локално намаление на способността на метала до претърпяване пластична деформация, води до нарастване на

микроразмерите и в претоварените зони те достигат макроразмери. С нарастването на пукнатината локалните напрежения във върховете ѝ също нарастват, което ускорява увеличаването на размерите ѝ за сметка на живото сечение. Когато живото сечение не е в състояние да понесе механичното натоварване, се достига до пълно разрушаване.

Механизмът на механична умора принципно се определя от амплитудата на приложеното напрежение и броят на циклите. Освен това процесът на механична умора се влияе силно и от следните фактори : вид на натоварването – опън, натиск, усукване; свойства на материала (с нарастване на началната якост, уморната якост също нараства); нехомогенност на метала; геометрична форма и качество на повърхността на детайлите; остатъчни напрежения; околна среда (температура, химически свойства).

От гледна точка на броя на циклите, след които се достига до разрушение, се очертават два режима : режим на многоциклова умора, режим на малоциклова умора. Многоцикловата умора е характерна за движещи се (ротирани) детайли. Малоцикловата умора е характерна за компоненти, които периодично са подложени на механични или термични напрежения (например съдове под налягане) или работят в преходни режими.

Към отговорните за безопасността на АЕЦ компоненти, за които механичната умора играе съществена роля спадат : корпусът на реактора; главните циркуляционни тръбопроводи; компенсатора на налягане; дихателните тръбопроводи на компенсатора на налягане. За тези компоненти умората се обуславя от следните фактори :

- Циклично повишаване и понижаване на налягането в I контур при пускане и спиране на инсталацията;
- Хидравлични изпитания на плътност, (опресовка) след презареждане на реактора или ремонт;
- Преходни процеси (транзиенти), свързани с промяна на параметрите (налягане и температура) на топлоносителя;
- Термични деформации при промяна на температурата;
- Вибрации;
- Външни въздействия по общи причини (природни бедствия, земетресения)

Необходимо е да се отбележи, че за корпуса на реактора, например, протичат едновременно механизмите на механична умора и на радиационно окръжкостяване (синергичен ефект).

Корозия. Корозията е процес на взаимодействие на метала с околната среда, който причинява откриваема промяна в неговите физико-механични свойства, а оттам и на възможността за изпълнение на функционалното му предназначение.

Разнообразните физични и химични свойства на средите и металите обуславят и големия брой различни корозионни процеси. Най-общо корозионните процеси могат да се класифицират по следния начин :

- Корозия без механично натоварване : обща корозия; локална корозия; селективна корозия.
- Корозия с механично натоварване : корозионно напукване под действието на напрежение/деформация; корозионна умора.
- Корозия - ерозия.

От изброените процеси най-съществена роля за стареенето на метала на отговорните за безопасността на АЕЦ компоненти играят корозионното напукване под напрежение/деформация и корозионната умора. Необходимо е да се отбележи, че тези процеси обикновено не са доминиращи в общия процес на стареене, а действуват синергично на други механизми, като механичното стареене и пълзенето.

Съществено е влиянието на корозионните процеси върху механизмите на стареене на отговорни компоненти като : коректорите на парогенераторите; главните

циркуляционни тръбопроводи; корпуса на реактора; дихателните тръбопроводи на компенсатора на обема.

В табл.1 са систематизирани механизмите на стареене и ефектите, които те оказват върху общия процес на стареене.

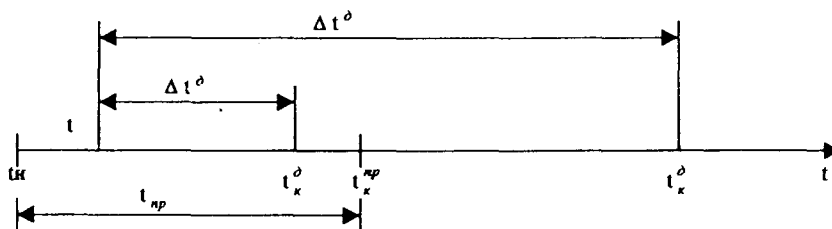
От изложеното по-горе могат да се направят следните изводи :

- Стареенето представлява монотонен процес на деградация във времето на свойствата на металите под въздействието на фактори, характерни за експлоатацията на ядрената енергийна инсталация.
- Металите на отделните компоненти са подложени на един или повече механизми на стареене. Всеки от механизмите може да оказва самостоятелно въздействие на метала, но в съчетание на два и повече механизма (синергичен ефект), водещо до по-интензивна деградация (стареене).
- Стареенето на металите може да се оцени количествено чрез стойности на негови характеристики, представителни за надеждната и безопасна експлоатация на компонента, произведен от даден метал.
- Върху процесите на стареене е възможно да се въздейства в периода на експлоатация по два основни начина : намаляване на ефектите от стареене чрез подходяща технология за третиране на метала; промяна на експлоатационните параметри с отчитане на ефектите на стареене.
- Процесите на стареене на съоръженията на ЯЕИ е възможно и трябва да се идентифицират с подходящи технически средства и въз основа на установеното състояние на метала да се вземат решения, касаещи контролирането и управлението на този процес.

3. Управление на ресурса на съоръжения от I контур на АЕЦ, отговорни за безопасната експлоатация

Процесът на стареене оказва пряко въздействие върху ресурса на метала, респективно на съоръженията. Под понятието ресурс на дадено съоръжение се разбира интервалът от време, през който съоръжението изпълнява надеждно и безопасно функционалното си предназначение в условията на въздействия, произтичащи от режима на експлоатация и поддържане. Необходимо е да се прави разлика между проектния и действителния ресурс на съоръженията.

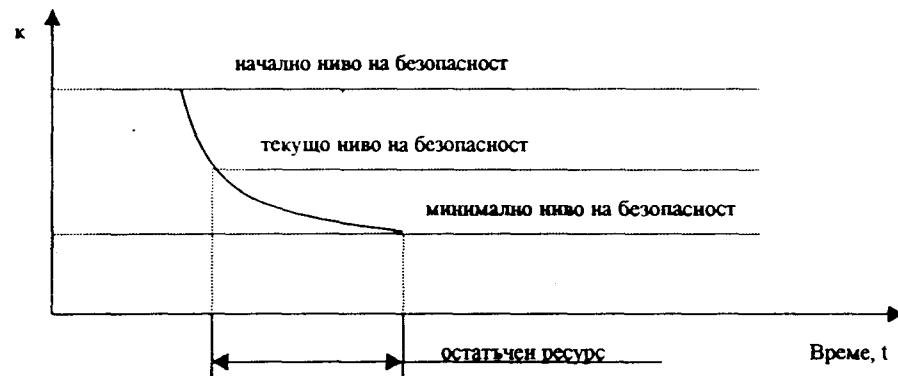
Проектният ресурс на дадено съоръжение се дефинира като интервал от време, през което ако се поддържат проектните условия на експлоатация и поддържане, производителя гарантира надеждната му работа. На фиг.1 е представена схема на възможно изчерпване на ресурса на едно съоръжение.



Фиг.1

Във фиг.1 са приети следните означения : $t_x(t=0)$ - начало на експлоатацията; t_x^p - проектен ресурс; t - произволен момент от експлоатацията; t_x^d - действителен ресурс на съоръжението; Δt^d - остатъчен ресурс на съоръжението към момента t .

Необходимо е да се отбележи, че проектният ресурс не трябва да се разглежда като интервал от време, след изтичането на който експлоатацията на съоръжението трябва да приключи. Поради сложността и комплексността на деградационните процеси на металите, проектният ресурс в голяма степен има вероятностен характер, поради което трябва да се разглежда като една прогноза, направена към момента на проектирането. Критериите, по които става оценката на ресурса на едно съоръжение, имат детерминистичен характер и се изразяват количествено чрез характерни параметри на метала за отделните механизми на стареене като : температура на окръжкостяване; ударна якост; жилавост; граници на пълзене; размери на пукнатини.



Фиг.2

На фиг.2 е представено изменението на характерния критерий k за определен механизъм на стареене, който определя нивото на надеждна, респективно безопасна работа на едно съоръжение. Естествено, възможно е характерният критерий за безопасност да нараства до достигане на началното допустимо ниво на безопасност.

Минималното допустимо ниво на безопасност на едно съоръжение се регламентира от международни и национални норми за безопасност в зависимост от приноса на съоръжението в общата безопасност на ядрената инсталация.

Текущото състояние на нивото на безопасност може да бъде оценено чрез количественото определяне на характерния критерий за доминиращия механизъм на стареене. Това може да стане чрез измерване и пресмятане на специфични за съоръжението параметри и индикатори на състоянието.

Поради сложността на ядрената енергийна инсталация, а също така и на процесите на стареене за отделните ѝ съоръжения и компоненти, е целесъобразно прилагането на единен подход (методология) при анализа и определянето на остатъчния ресурс на отговорните за безопасността компоненти. На фиг.3 е представена структурната схема на такъв подход.

Подходът за анализ и определяне на остатъчния ресурс е основа за разработването на методология за управление на остатъчния ресурс. На фиг.4 е представена структурната схема при реализирането на тази методология, която се реализира в следните процедурни стъпки :

- Подготовка на реалистичен технически анализ на текущото състояние на избрани ключови компоненти, системи и оборудване.
- Контрол на състоянието на метала за : откриване на дефекти; откриване на промяна във физико-механичните свойства и структура на метала; оценка на състоянието на метала.
- Дефиниране на липсващата информация, необходима за оценка на остатъчния ресурс.
- Оценка на получените резултати с оглед дефинирането на превантивни мерки
- Определяне на текущата граница на безопасност от гледна точка на критериите за безопасност.

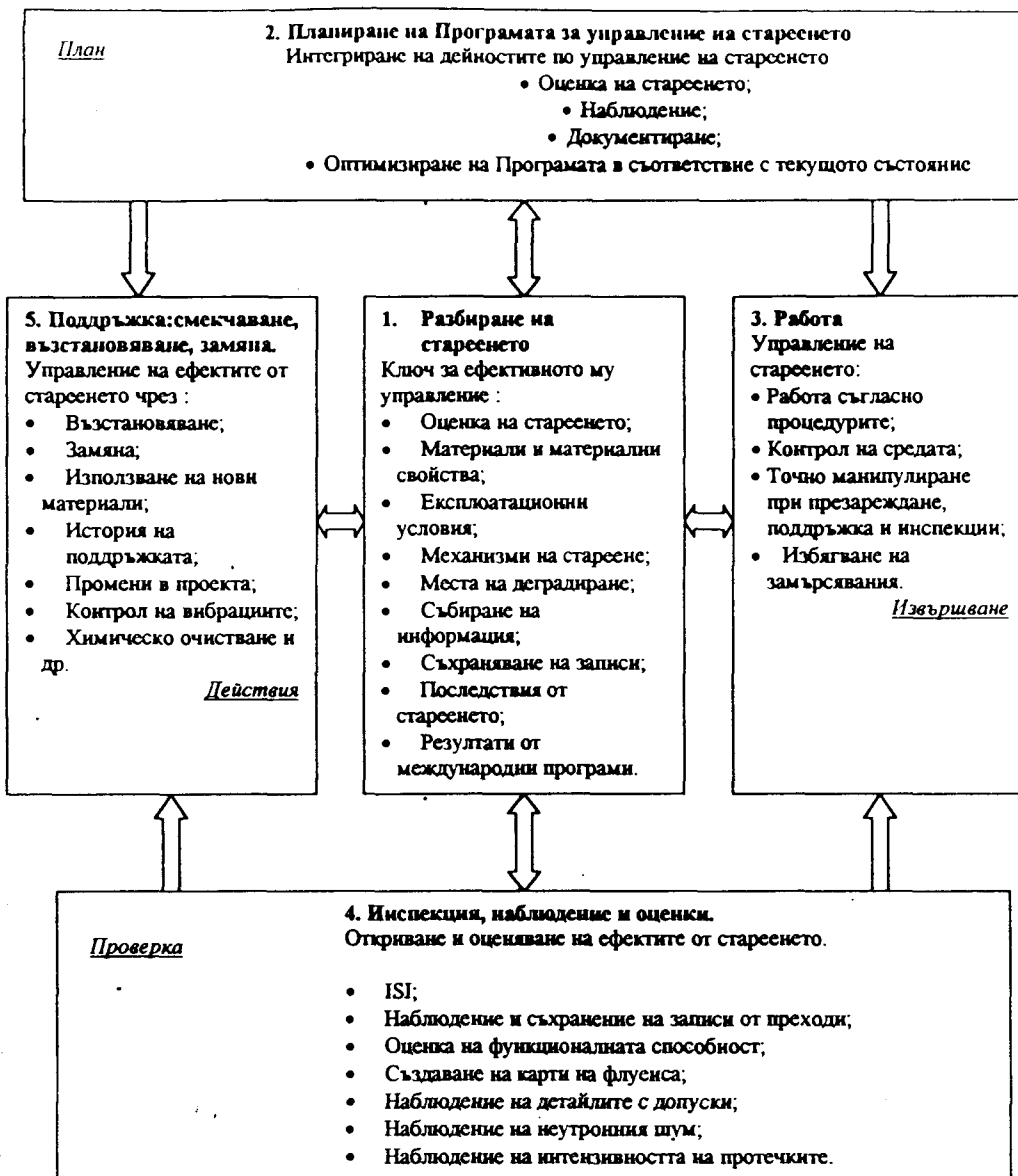


Фиг.3 Подход при анализа на слаби точки и оценка на остатъчен ресурс

Практиката в експлоатацията на ЯЕЦ е доказала необходимостта методологията за оценка на остатъчния ресурс, а също така и неговото управление, да бъде съпътствана от програма за управление на стареенето. Основната философия на една такава програма е последователността от активности "Планиране – Извършване – Проверка – Действия". На фиг.4 е показана структурата на програма за управление на стареенето, разработена въз основа на изложената философия.

Необходимо е да се отбележи, че програмите за управление на стареенето са валидни за всички компоненти и всяко оборудване, важни за безопасността и определящи остатъчния ресурс на цялата АЕЦ.

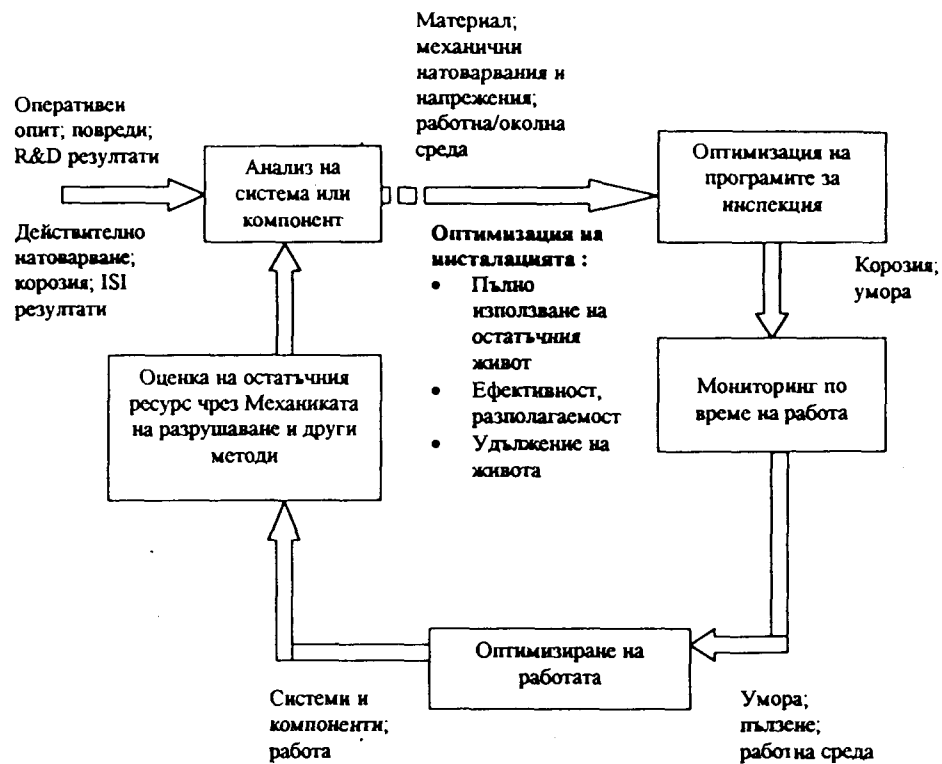
Въз основа на философията в Програмата за управление на стареенето се разработват конкретни подходи за управление на този процес за отделни компоненти. На фиг.5 е показана структурната схема на един възможен подход за управление на стареенето.



Фиг.4 Концепция на Програма за управление на стареенето

Изложеният на фиг.5 подход за управление на ресурса се реализира в следните основни етапи

- Изясняване на механизма на стареенето.
- Планиране на програмата за управление на стареенето.
- Експлоатационни условия на метала.
- Откриване и оценка на ефектите от стареенето.
- Управление на ефектите от стареенето.



Фиг.5 Методология за управление на остатъчен ресурс

4. Заключение

В работата са систематизирани основните механизми на стареене на компоненти от I контур на ядрени инсталации с реактори с ВВЕР, важни за безопасността на инсталациите. Идентифицирани са механизмите на стареене, имащи доминиращо влияние върху метала на основните компоненти на I контур. Дефинирани са качествено факторите, влияещи върху механизма на стареене. Изложени са методология, програма и подход за оценка на остатъчния ресурс на отговорни за безопасността компоненти на I контур. Изложените резултати могат да бъдат използвани в процедури по идентификация на процеса на стареене, организацията на мониторинга на метала, изводи за неговото състояние и вземане на решения, касаещи управлението на остатъчния ресурс на съоръженията.

Литературни източници

1. Shah, V.N., P.E. Macdonald, "Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components", Elsevier
2. Methodology for the Management of Aging of Nuclear Power Plant Component Important to Safety, N338, IAEA, Vienna, 1992.
3. Assessment and management of aging of major NPP components important to safety, IAEA TECDOC -981, 1997.
4. Shih, C.F., Kumer, F., Estimation Technique for the Prediction of Elasto - Plastic Fracture of Structural Components of Nuclear Systems, General Electric Company, Corporate Research and Aeronautic Report, 1979.