



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
КАТЕДРА ТОПЛО И ЯДРЕНА ЕНЕРГЕТИКА

МАРИЕЛА ДАНЧОВА МЛАДЕНОВА

ВЕРОЯТНОСТЕН АНАЛИЗ НА БЕЗОПАСНОСТТА

ДОКЛАД

София, 2015г.

1 УВОД

Под “безопасност на ядрената електроцентрала” се разбира “свойство на ЯЕЦ да ограничава радиационното въздействие върху персонала, населението и околната среда в установените предели по време на нормална експлоатация или в случай на аварии. Нивото на безопасност се счита за приемливо, ако осигурява спазването на изискванията на нормативните документи”.

Законът за безопасно използване на ядрената енергия (ЗБИЯЕ) изисква лицата, които извършват дейности по използването на ядрената енергия и по управлението на радиоактивните отпадъци и отработеното гориво да извършват оценка на ядрената безопасност и радиационната защита на ядрените съоръжения и на източниците на йонизиращи лъчения. Оценката на безопасността се извършва на основата на данните, получени в резултат на проведен анализ на безопасността, предишния опит от експлоатация, резултатите от спомагателни изследвания и инженерно-техническа практика.

Анализът на безопасността има за цел да покаже поведението на ЯЦ при широк спектър от експлоатационни условия, при постулирани изходни събития (ПИС) и други обстоятелства, за да се получи по-пълно разбиране за очакваното поведение на блока и да се демонстрира възможността за поддържането му в безопасни режими на експлоатация, установени с проекта.

С анализа на безопасността се идентифицират потенциални слабости на проекта, оценяват се предложени изменения в проекта и се потвърждава изпълнението на изискванията и критериите за безопасност. Също така се използва в поддръжка на безопасната експлоатация като важно средство за определяне и потвърждаване на пределите и условията за експлоатация, включително на запаса до стойностите на параметрите за сработване на системите за безопасност, за валидиране на инструкциите за нормална експлоатация, изискванията за техническо обслужване и контрол и аварийните процедури и ръководства.

За анализ на безопасността на ЯЕЦ се прилагат два различни метода – Детерминистичен анализ и Вероятностен анализ на безопасността.

Детерминистичният метод се прилага при анализа на етапите на развитието на аварийните процеси от изходното до крайното събитие. Той включва симулационно моделиране на термохидравличните процеси в първи и втори контур, както и в помещенията на хермозоната.

Вероятностният подход дава възможност за количествена оценка на безопасността, съответно на риска, при експлоатация на ЯЕЦ. Този метод дава информация относно техническите способности за повишаване на безопасността. Съществено предимство на вероятностния анализ е възможността за идентифициране на аварийните сценарии, които имат голям принос в крайното събитие.

2 РИСК

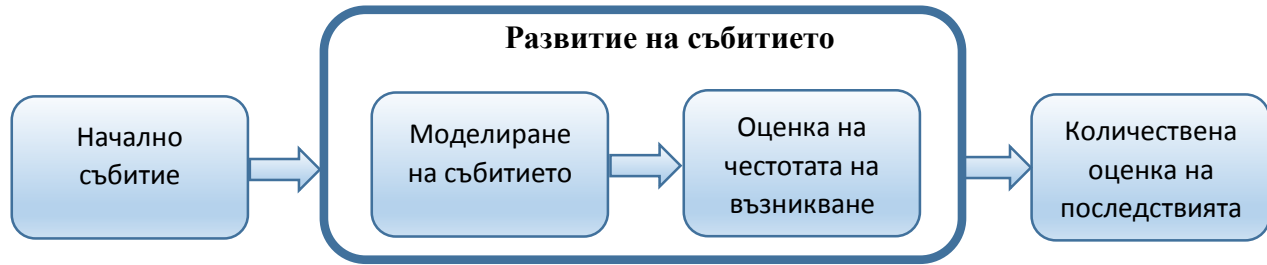
2.1 Определение

Рискът е вероятността от неблагоприятни последици причинени при специфични обстоятелства от определен фактор в даден организъм, население или екологична система. Рискът е пълното разпределение от резултати и вероятности, определено за конкретен процес, водещ до нежелани резултат.

2.2 Вероятностен подход за определяне на риска

Подходът за определяне на риска се основава на отговорите на следните въпроси:

1. Какво опасно събитие може да се случи?
2. Колко е вероятно то да се случи?
3. Какви са очакваните последици?



Фиг.1 Вероятностен подход за определяне на риска

Отговорът на първия въпрос дава информация за групата от аварийни сценарии, които могат да възникнат. Вторият въпрос изисква оценка на вероятността за възникване на тези сценарии, докато третият оценява техните последици. За отговорът на всеки въпрос се крие някаква неяснота. Тази неопределеност зависи от факта дали са идентифицирани всички възможни аварийни събития и дали оценките за възникване на аварийни събития и тези за последициите от тях са взети под внимание източниците на променливост и ограниченията на наличната информация.

Сценариите и неопределеностите са едни от най-важните компоненти за определяне на риска. Фиг.1 показва осъществяването на тези концепции при вероятностния подход за определяне на риска. В тази фигура анализът на неопределеността е показан като съществена част от процеса, а не като изчисление, което е направено накрая на количествената оценка на риска.

Аварийните сценарии започват с поредица от инициращи събития, които представляват отклонение от нормалната експлоатация на системата. За всяко начално събитие, анализът продължава като определя основните събития, които са свързани с развитието на даденият сценарий и които могат (или не) да се случат, и имат смекчаващ или влошаващ ефект върху развитието на аварията. Определят се честотите на сценариите с нежелани последици.

Накрая, всички тези сценарии са събрани и съобразени с неопределеността на събитията, за да се направи профил на риска на системата.

2.3 Крива на Фармер

$$\text{Риск} = [(B_1, P_1), \dots, (B_i, P_i), \dots, (B_n, P_n)],$$

където B_i и P_i означават съответно Вероятност и Резултат (последствие).

Разпределението на двойката вероятност-резултат се нарича профил на риска (или крива на риска):



Фиг.2 Крива на Фармер

ВАБ определя риска от ЯЕЦ като сума от рисковете на отделните постулирани сценарии на аварии:

$$\text{Риск} = \sum (\text{Вероятност}_{\text{събитие}}) \cdot (\text{Последиция}_{\text{събитие}})$$

Рискът може да се определи и като комбинация на пет базови елемента:

- Резултат;
- Вероятност;
- Важност;
- Сценарий на причината;
- Засегната група.

Те определят профила на риска.

3 ВЕРОЯТНОСТЕН АНАЛИЗ НА БЕЗОПАСНОСТТА (ВАБ)

ВАБ представлява системен анализ на безопасността на ЯЕЦ, който позволява:

- да се открият основните източници на аварии;
- да се оцени вероятността/честотата им на възникване и сериозността на последствията;
- да се разработят необходимите средства и мероприятия за достигане на приемливо проектно ниво на безопасност и поддържането му при експлоатацията на ЯЕЦ

3.1 Методи за количествена оценка на безопасността

Методите за количествена оценка на безопасността се разделят на два класа: преки и косвени. Като преките методи се основават на резултати от статистическата обработка на данните от експлоатацията, а косвените методи се основават на оценката на показателите на структурната надеждност на системите и надеждността на елементите им.

Способите за оценка на структурната надеждност на системите се подразделят на *аналитични методи* и *метод на статистическото моделиране* (метод Монте-Карло).

За оценка на структурната надеждност по-често се използват *логико-вероятностните методи*. С тях се описват структурни схеми на обекти, състоящи се от елементи, които могат да се намират само в две състояния: работоспособно ($x = 0$), или неработоспособно ($x = 1$).

Логико-вероятностните методи се основават на понятието *минимално сечение* – минималната група елементи от структурната схема на обекта, отказът на която води до отказ на обекта, а възстановяването на поне един елемент води до възстановяване на обекта като цяло относно указания отказ. Със същия смисъл се използва и понятието *критична група елементи*.

Методът за анализ на структурната надеждност дава възможност да се получат характеристиките на надеждността във функция от времето, което не е възможно при използването на други методи. Същността на метода се изразява в моделиране на процеса на преход на обекта от едно състояние в друго.

В зависимост от начина на анализиране на логическата структура на системата, логико-вероятностните методи се подразделят на *индуктивни* и *дедуктивни*. Характерно за индуктивните методи е, че анализът на надеждността започва с приемането на отказ на някой елемент или група от елементи. Отказите се анализират индуктивно за оценка на последствията от тях. При дедуктивните методи се приема отказ на цялата система, а събитието се раздробява до конкретни откази на отделните елементи.

В зависимост от формата за изразяване и представяне на логическите връзки се различават следните методи:

- *Таблица на решенията*. Този метод изразява връзката между изменението на състоянията, възникващи в сложни системи, приведени до зависимости между входните и изходните събития и условия;

- *Метод на “Дърво на събитията”*. Методът служи за систематично идентифициране на потенциалните резултати на известно изходно събитие;
- *Метод на “Дърво на отказите”*. Методът изобразява логическите зависимости между събитието и условията и състоянието на системата, които могат да доведат до нейния отказ;
- *Метод на “Причинно-следствената диаграма”*. Методът показва възможните причини за възникването на отказ или аварийно състояние в системата и възможните последици от това състояние;
- *Метод “Блок-диаграма на надеждност”*. При този метод системата се представя чрез блокове, изразяващи отделните елементи, които са свързани така, че да гарантират нейната надеждна работа. Този метод се прилага за системи със зависими откази и възстановяване на елементите. Използва се при анализ на надеждността на комуникационни системи и на системи за контрол и управление;
- *Метод на мрежите*. При този метод функционалните връзки между елементите се представят чрез ориентиран граф. Методът е подходящ за анализ на надеждността на комуникационни системи, електроенергийна система и изчислителна техника.

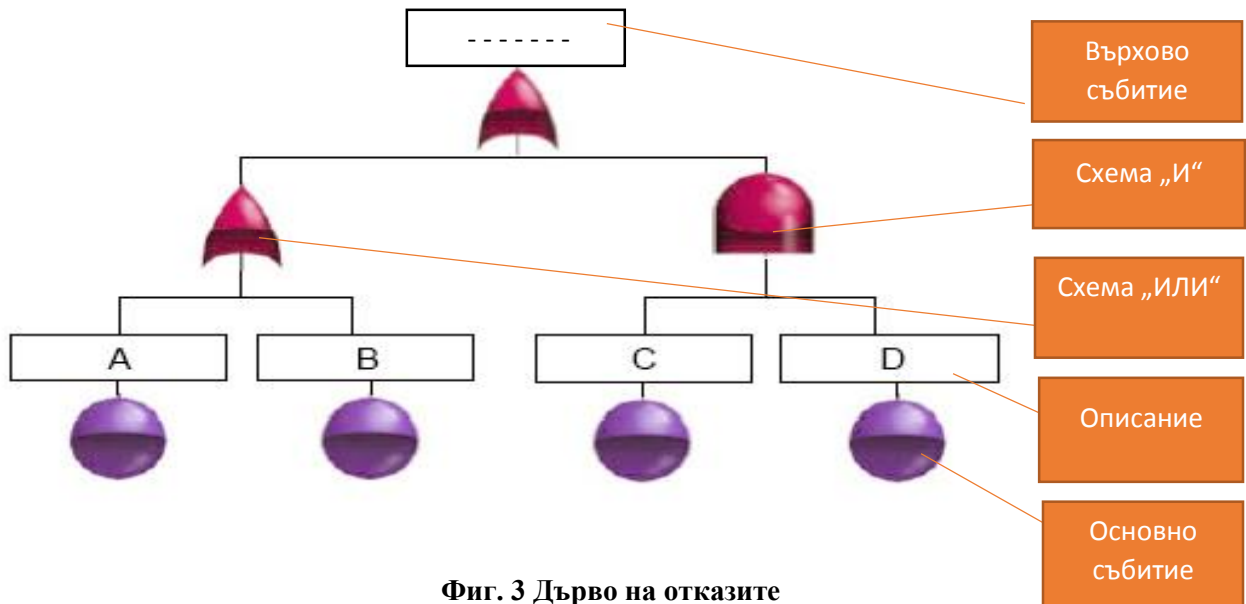
3.2 Дърво на отказите (ДО)

Дървото на отказите е “Аналитична техника, с помощта на която се определя нежелано състояние на системата и тогава тя се анализира в контекста на нейната заобикаляща среда и работа за да се намерят всички правдоподобни начини, по които нежеланото събитие може да се случи.”

Цел на анализа с ДО:

1. Да се открият начините, по които системата може да откаже
- “Минималните сечения” илюстрират пътищата, по които системата може да откаже
2. Квантифициране на изпълнението на системата (определяне на ненадеждността ѝ) чрез основните видове на отказ на елементите ѝ (basic event)
 3. Модели, които могат да бъдат използвани за откриване:
- Взаимозависимост между събитията на отказ;
 - Вероятности за отказ на системата;
 - Откриване на слабости на системата.

Дървото на отказите показва всички възможни комбинации от откази на елементи, които могат да доведат до *специфичен* отказ на системата. Отказите на елементите и други събития се комбинират и свързват чрез логически оператори („И“, „ИЛИ“), за да се осигури логическо описание на системния отказ. ДО е метод за анализ „отгоре надолу“ (*top-bottom*). Започва с възможен отказ на системата (*върхово събитие*). Целта е да се определят пътищата, по които може да възникне върховото събитие.



Фиг. 3 Дърво на отказите

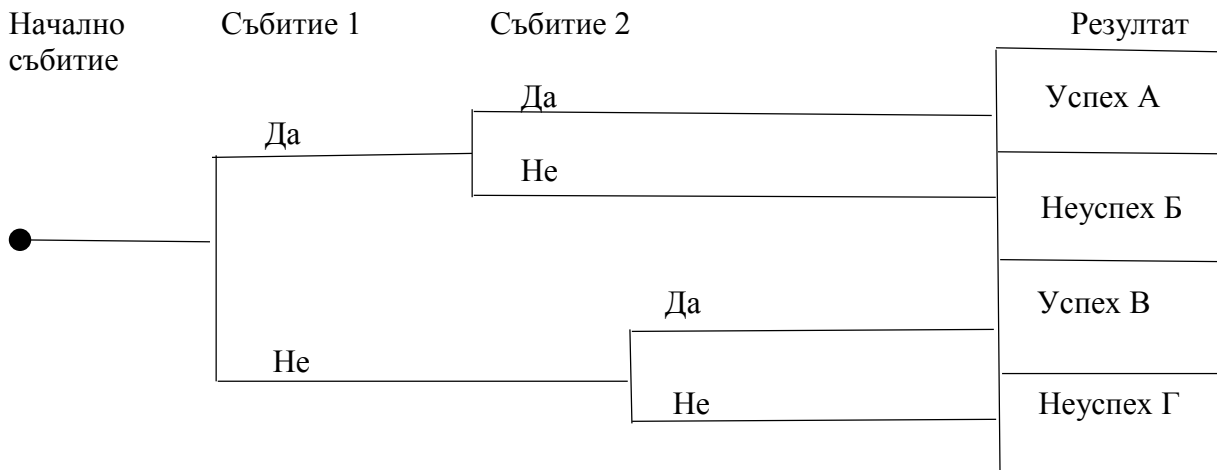
3.3 Дърво на събитията (ДС)

Дървото на събитията е “Аналитична техника за систематично идентифициране на потенциалните резултати на известно изходно събитие.”

Процесът на разработване на ДС:

1. Определят се границите на анализа - с какво започва последователността от събития (ИЕ), какви са резултатите (последствията)
2. Определяне на “критерии за успех” - какво трябва да работи
3. Заглавия на ДС (върхови събития – top event)
4. Изобразяване на последователността

ДС се построява чрез индуктивен анализ. Търсят се вероятните следствия от настъпили откази на елементи. ДС е метод „отдолу нагоре“ (*bottom-top*), а стартовите откази се наричат начални събития (*initiating events*).



Фиг. 4 Дърво на събитията

3.4 Алгоритъм на ВАБ

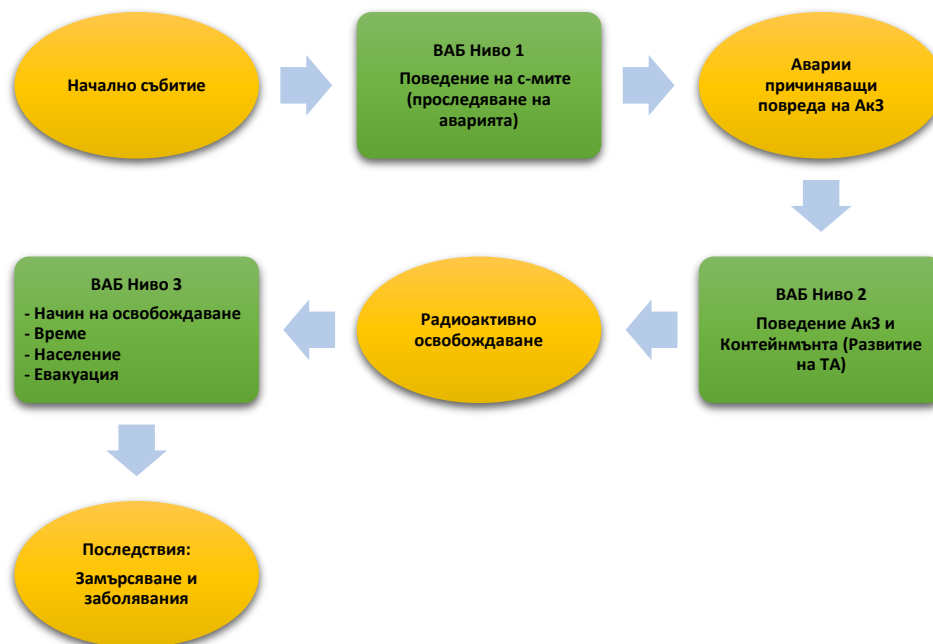
Алгоритъмът за изработване на вероятностните анализи на безопасността е:

- Идентифициране на опасностите (иницииращи / начални събития);
- Идентифициране на бариерите за предотвратяване на опасност, защитни функции, системи за безопасност и системи важни за безопасността;
- Оценка на вероятността на последователност от събития;
- Оценка на последствията.

Вероятностните модели трябва да бъдат разработени за вътрешните и външните изходни събития за експлоатационните състояния на ЯЕЦ: работа на мощност (пълна или ниска) и планови периоди на техническото обслужване (презареждане на ядреното гориво, замяна, ремонт на основното оборудване и другите системи).

3.5 Нива на ВАБ

Всички нива на ВАБ представляват итеративни процеси, които могат да включват няколко етапа, различаващи се по обем, съдържание и дълбочина на изпълняваните анализи. Извършването на тези етапи в необходимия обем е възможно при наличие на съответните методики, специалисти и време. Обемът и съдържанието на ВАБ определят неговата пълнота и в крайна сметка, нивото на остатъчния риск (т.е. рискът, който не се подлага на анализ), а дълбочината на ВАБ определя нивото на реализъм на разработените модели за поведението на ЯЕЦ при аварии. Всичко това оказва определящо влияние на достоверността на получаваните резултати и ефективността на тяхното използване като основа за изработването на решения по управления на безопасността.



Фиг.5 Връзка между нивата на ВАБ

В досегашната практика на провеждане на Вероятностния Анализ на Безопасността в международен аспект са се оформили три нива:

- *Ниво 1*: Оценка на честотата на разрушаване на активната зона и идентифициране на основните опасности;
- *Ниво 2*: Анализ на поведението на контеймънта и на действията по управление на аварията и оценка на честотата на радиоактивни изхвърляния в околната среда, на основата на ВАБ Ниво 1;
- *Ниво 3*: Оценка на последствията за околната среда и риска за населението (индивидуален и обществен риск).

4 ВАБ Ниво 1

Това е анализ на отказите и нарушенията в работата на системите в ЯЕЦ за определяне на честотата на авария с увреждане на активната зона. Това ниво осигурява възможността за изясняване на недостатъците на проекта и пътищата за предотвратяване на аварии с повреждане на активната зона, които в повечето случаи са предпоставки за развитие на радиационни аварии с възможни отрицателни последствия за здравето на хората и за околната среда.

При анализа на безопасността ниво 1 се:

- Идентифицират се всички потенциални източници на значителни радиоактивни изхвърляния в ЯЦ;
- Оценява се риска, изразен чрез честота за повреда на източниците за радиоактивно изхвърляне, включително на горивото в басейна за отлежаване на отработеното ядрено гориво на ЯЦ;
- Анализира се риска за всички експлоатационни състояния на ЯЦ. Случаите на намалена мощност на ЯЦ се оценяват отделно, както за планово, така и за непланово спиране;
- Вътрешните събития, вътрешните и външните опасности се отчитат и моделират в единен подробен модел на ВАБ. Моделът на ВАБ може да бъде разделен на модел за пълна мощност, ниска мощност и спряно състояние;
- Преглежда се специфичния за ЯЦ експлоатационен опит, с оглед определяне на експлоатационните състояния на ЯЦ за експлоатация на по-ниски нива на мощност;
- Определя се и се обосновава ясно съответния интерфейс между взетите предвид експлоатационни състояния във ВАБ.

4.1 Анализ на надеждността на КСК

Трябва да се определи и документира обхвата на типовете КСК, границите на КСК, видът на отказ на КСК и набора от надеждностни параметри (напр. интензивност на отказ или вероятност за отказ при поискване).

4.2 Анализ на човешкия фактор

Анализът на човешкия фактор включва всички действия идентифицирани в хода на развитие на модела, имащи потенциал за въздействие върху структурата и изхода на моделите. Човешките действия, които могат да повлияят както на причината, така и на честотата на възникване на дадено събитие, може да се осъществят преди, по време или след започване на аварията. Въз основа на тези съображения, е направена следната класификация:

- Категория А – човешки грешки, направени преди началото на аварията;
- Категория В – действия, водещи до възникване на инициращите събития, като едновременно с това могат да повлияят на надеждността на системите важни за безопасността;
- Категория С – действия, засягащи развитието на аврийния сценарий.

Вероятността за човешка грешка трябва да бъде пресметната. В идеалния случай, данните за оценка на вероятността, могат да бъдат взети от голяма група хора, изпълняващи задачите. Въпреки това, налице е липсата на актуални данни за човешкия фактор. Оценката за вероятността от човешка грешка трябва да се екстраполира с данни от други източници на информация в съчетание с експертната оценка.

4.3 Вътрешни събития

4.3.1 Изходни събития

Изчерпателният списък от потенциални вътрешни изходни събития се дефинира с активното участие на персонала на ЯЦ. За да се осигури (колкото е възможно) по-голяма пълнота на списъка от потенциални изходни събития се прилага следния метод:

- системни анализи – това включва систематичен преглед на КСК, тестовите и ремонтната практика в ЯЦ;
- използване на аналитични методи – „Главна логическа диаграма”, “Анализ на вида и ефекта на отказите”, или други подходящи методи;
- оценка на експлоатационния опит – отчитат се онези изходни събития, които са възникнали реално, както и предшествващи събития, дължащи се на операторски действия и/или поради ограничаване от системите не се стига до спиране на реактора;
- оценка на обобщения експлоатационен опит – оценява се международно признат и наличен списък от изходни събития за подобни типове ЯЦ.

4.3.2 Анализ на аварийните последователности

- Идентифициране на функциите за безопасност - Идентифицират се функциите за безопасност, необходими да предотвратят повреждането на активната зона или горивото;
- Моделиране на последователността на събитието - За всяка група изходни събития се разработват възможните аварийни последователности. Аварийните

последователностите на дадено събитие се представят посредством свързано дърво на отказите или метода на свързано дърво на събитията.

4.3.3 Анализ на критериите за успех

Критериите за успех по отношение на КСК се идентифицират и документират за всяко изходно събитие и специфична последователност. За валидиране на критериите за успех се извършват реалистични и/или консервативни термо-хидравлични анализи. За провеждане на анализите се използват валидирани компютърни програми.

4.3.4 Анализ на системите

Моделите на системите е необходимо да включват:

- неразполагаемостта на активните и пасивни компоненти поради независими и зависими откази или дейности по тестване/ремонт;
- специални режими на отказ (ако е приложимо), такива като отклоняване на потока или лъжливо сработване;
- ограничения на експлоатацията, произтичащи от технологичния регламент на ЯЦ;
- функционални зависимости, вкл. електричество, охлаждаща вода, вентилиране на приборите, задействане и др.;
- оперативно разпределение на системите или конфигурациите;
- влияние на изходните събития върху експлоатационните качества на системите;
- човешки грешки.

Отказите по обща причина е необходимо да бъдат моделирани най-малко за следните компоненти – помпи, дизел-генератори, вентилатори, регулиращи органи (пръти), клапани (ел. задвижвани, пневматични и обратни), топлообменници, трансмитери, предпазни и изпускащи клапани, клапани за изолиране по пара, батерии, зарядни устройства, инвертори, релета, прекъсвачи, филтри.

4.4 Вътрешни опасности

4.4.1 Вътрешни пожари

Документацията на ЯЦ е необходимо да се използва за събиране на следната информация:

- пожарните зони/клетки (съгласно концепцията за пожарна защита);
- пожарно натоварване (т.е. постоянни, временни и преходни горивни материали);
- потенциални източници на запалване (напр. трансформатори, електрически шкафове или операции по заваряване) и уязвими компоненти на ВАБ;
- кабелни етажерки (трасета); - противопожарно оборудване за известяване, гасена на пожари, противопожарни бариери и продължителност на тяхната устойчивост на пожар.

Дървото на събитието за разпространение на пожара трябва да бъде използвано за оценка на честотите на всеки пожарен сценарий. Дървото на събитието за разпространение на пожара трябва да разгледа честотата на пожарните събития, разполагаемостта на системи за пожароизвестяване и пожарогасене и пожарните бариери в пожарните зони.

4.4.2 Вътрешни наводнения

Документацията на ЯЦ се използва за събиране на следната информация:

- източници на наводнение (напр. водни резервоари и тръбопроводи);
- зони на наводнение;
- потенциални причини за наводнение (напр. разкъсване на тръбопровод, лъжливо задействане на системи или инициирани от човека събития с препълване на резервоари);
- характеристики на източниците на наводняване (напр. местоположение, капацитет, тип на изтичащата среда, разход);
- оборудване, което може да бъде засегнато от наводнението;
- проектни особености за защита против наводнения (напр. дренаж, дренажни помпи, водоустойчиви врати (херметични), системи за откриване и потискане на наводненията).

Честотата на всеки сценарий на наводнение се определя, базирайки се на честотата на събитието и на разполагаемостта на системите (в зоната на наводнение) за откриване и потискане на наводнението.

4.4.3 Летящи предмети, генерирани в резултат от разрушаване на турбината

При разрушаване на турбината се определят възможните траектории на парчетата изхвърлени от турбината. При тяхното определяне се разглеждат следните фактори, като скорост на парчетата от облицовката, варирането на ъгъла на летене, както и възможните препятствия.

За дадено събитие с летящи предмети е необходимо да бъде определена условната вероятност на попаденията на летящите предмети за всеки от идентифицираните обекти допускайки, че 4 летящи предмета с независими траектории се генерират едновременно. Последствията на четирите най-неблагоприятни независими летящи предмета е необходимо да бъдат анализирани. В същото време неразполагаемостта на компонента на ВАБ, причинена от пожар на турбината (поради възпламеняването на водорода или на уплътняващото и смазочно масло) е необходимо да бъде разгледана във модела на ВАБ. В допълнение е необходимо да бъдат обсъдени ефектите от експлозията на водорода и дима.

4.5 Външни опасности

4.5.1 Земетресения

Сеизмичният ВАБ е необходимо да включва вероятностна оценка на сеизмичната опасност, на сеизмичните откази и анализ на сеизмично предизвиканите аварийни

последователности. За колебателните земни движения причинени от земетресения се изисква подробна вероятностна оценка. В допълнение е необходимо да се оценят и възможностите за други сеизмични опасности и тяхна приложимост. За количествено определяне на сеизмическите честоти на повреждане на АкЗ и/или горивото е необходимо да бъдат разгледани неопределеностите на честотите на изходните събития и вероятностите за отказ на КСК, както и човешките действия.

4.5.2 Екстремални ветрове

Анализът на екстремални ветрове е необходимо да включва вероятностна оценка на опасността от вятър и на отказите възникнали в резултат от него, както и количествено определяне на честотата на повреждане на Акз и/или горивото, вкл. неопределеностите. Необходимо е да бъде разработена актуална изчерпателна база данни за явления на вятъра и неговата максималната скорост. За всяка категория на вятъра е необходимо да се приеме загуба на външно електрозахранване.

4.5.3 Смерчове (торнада)

Анализът на смерчове (т.е. екстремни въртящи се ветрове) е необходимо да включва вероятностна оценка на хазарта от смерч и на отказите възникнали в резултат от него, както и количествено изразяване на риска от повреждане на Акз и/или горивото, вкл. неопределеностите. За всяка категория скорост на смерча е необходимо да се приеме загуба на външно електрозахранване.

4.5.4 Външни наводнения

Анализът на външните наводнения е необходимо да включва вероятностна оценка на опасността от наводнения и на отказите възникнали в резултат от него, както и количествено определяне на честотата на повреждане на Акз и/или горивото, вкл. неопределеностите. Необходимо е да бъдат разгледани следните категории събития с наводнения:

- силни дъждовни бури или неочаквани събития с големи разтопявания на снега, причиняващи възникването на високо речно ниво при ЯЦ;
- отказ (разрушаване) на структури (язовирни стени, преливници, диги), регулиращи водния разход нагоре и надолу по-течението, както и на площадката, вкл. възможни откази по ефекта на доминото (верижна реакция) и едновременни откази на отдалечени структури за контрол на водния разход (напр. поради земетресение);
- интензивни валежи (събития с дъждове) на площадката на ЯЦ и в близките околности.

За събитията с наводнение водещи към нива на водата над котата на ЯЦ или над котата, на която се намират външните (за площадката) трансформатори или свързаното с тях електрическо оборудване се приема загуба на външно електрозахранване.

4.5.5 Самолетни катастрофи

Анализът на самолетните катастрофи е необходимо да включва оценка на честотите на самолетните катастрофи и оценка на отказите, получени в резултат на самолетните катастрофи, както и количествено определяне на честотата на повреждане на Акз и/или горивото, вкл. неопределеностите. За анализ на риска се разглеждат следните три категории самолети във ВАБ:

- търговски самолет (т.е., с тегло > 5.7 тона) - Честотите на самолетни катастрофи се изчисляват, като се използва четири-факторна формула, която взема в предвид: количеството на самолетните полети, вероятността, че ще катастрофира самолет, за дадена катастрофа вероятността, че самолетите катастрофират на площ от един квадратен километър, където е разположена ЯЦ и виртуална площ на динамично въздействие;
- военен самолет - Годишната стойност на катастрофи на военни реактивни самолети на единица площ се пресмята директно по броя на катастрофи на територията на България. Времевия интервал, който е необходимо да бъде разгледан е най-малко 20 години;
- лек самолет (т.е., с тегло < 5.7 тона) - Годишната стойност на катастрофи на леки самолети на единица площ се пресмята директно по броя на катастрофи на територията на България. Времевия интервал, който е необходимо да бъде разгледан е най-малко 5 години.

4.5.6 В допълнение при анализите по отсяване е необходимо да бъдат разгледани следните външни опасности:

- засушаване;
- ерозия;
- горски пожари;
- високи летни температури;
- сняг и ледени покрития (заледяване);
- аварии на обекти с индустриално или военно предназначение;
- свлачища;
- мълнии;
- ниско речно ниво;
- ниски зимни температури;
- аварии на тръбопроводи (напр. нефтопроводи, газопроводи);
- изхвърляне на химикали на площадката;
- транспортирани материали по река, водещи до задръстване на водовземашите съоръжения (напр. дървени трупи, листа, миди, водорасли);
- намаляване/увеличаване на затвърдяването на почвата;
- аварии при транспортирането по земя и по вода.

5 ВАБ НИВО 2

Анализ на развитието на аварията в херметичната зона за определяне на честотата на радиоактивно замърсяване извън нея с използване на резултатите от ниво 1. Това ниво осигурява допълнителна информация за относителната значимост на аварийните сценарии с повреждане на активната зона по отношение на степента на радиоактивното замърсяване, което те могат да предизвикат, както и за пътищата за подобряване на мерките за ограничаване на последствията от аварията в активната зона

Аварийните последователности на ВАБ ниво 1 със сходно развитие на тежка авария се групират в състояния с повреда на ЯЦ (PDS). PDS се характеризират най-малко с:

- типът на изходното събитие (т.е. преходен процес, авария със загуба на топлоносител и др.);
- налягането в първи контур в момента на повреда на активната зона или горивото (ако активната зона е в корпуса на реактора);
- статусът на защитните системи;
- статусът на изолиране на херметичната конструкция (системите за изолиране и отвеждане на топлината на херметичната конструкция, участващи във ВАБ ниво 2 се моделират детайлно, използвайки метода на дървото на отказите);
- аварийната последователност, която предизвиква байпас на херметичната конструкция (т.е. течове от първи към втори контур, между системен теч от първи контур);
- статусът на системите на херметичната конструкция за отвеждане на топлина или за намаляване на налягането и намаляване на продуктите на делене.

5.1 Работоспособност на херметичната конструкция

С оглед определяне на реагирането на херметичната конструкция в условията на авария се извършва анализ на реакцията на строителната конструкция. При анализа на реакцията на строителната конструкция се взема в предвид всичката информация, отнасяща се до проекта на херметичната конструкция, такава като:

- свойства на конструкционните материали и на арматурата; - размери и местоположения на проходките в херметичната конструкция;
- конструкция и материали на проходките;
- локални изменения, напр. преходни форми, промени в стоманената обшивка или арматурата (на бетонните конструкции);
- възможни взаимодействия между структурата на херметичната конструкция и съседните структури (строителни или др.).

Структурните анализи на херметичната конструкция се извършват за идентифициране на местоположението на откази в херметичната конструкция. В резултат от тези анализи ще бъде получена реалистична оценка за налягането на отказ на херметичната конструкция при

дадена температура за всяко местоположение и реалистична оценка за механизма на отказ (напр. неплътност, пукнатини, голямо разкъсване и др.).

5.2 Натоварвания на херметичната конструкция

За определянето на натоварванията на херметичната конструкция следва да се отчитат натрупаните познания на международната общност по ядрена безопасност, имащи отношение към ключовите феномени, характерни за тежка авария. Необходимо е да се вземат в предвид следните явления при развитието на тежка авария:

- вътрешно корпусното окисляване на метала и генерацията на водород, последствия от всякакви приложими механизми на горене на водорода в херметичната конструкция (вкл. дефлаграция, детонация, прехода дефлаграция към детонация, механизъм с ускорение на фронта на горене);
- вътрешно корпусни взаимодействия между стопилката и топлоносителя (вкл. парни експлозии);
- взаимодействие на стопилката с дъното на корпуса на реактора и режими на повреждането му (вкл. влиянието на външното охлаждане на дъното на корпуса на реактора, ако е приложимо);
- загуба на целостта на първи контур;
- изхвърляне на стопилка при високо налягане;
- отказ на корпуса;
- повишаване на налягането в херметичната конструкция поради генерацията на пара и отделянето на некондензиращи газове от първи контур;
- реактивни сили, действащи върху корпуса (в случай на повреждане при високо налягане);
- директно нагряване на херметичната конструкция;
- разпръскване и разстилане на стопилката;
- извън корпусни взаимодействия на стопилката и топлоносителя (вкл. парни експлозии);
- взаимодействия между стопилката и бетона с отчитане на възможностите за охлаждане на стопилката, атакуването (увреждане) на фундамента и страничните стени от стопилката, генериране на водород и въглероден окис, генериране на други некондензиращи газове (напр. въглероден двуокис);
- квази-статично повишаване на налягането, като резултат от дълговременно генериране на топлина, пара и некондензиращи газове в атмосферата херметичната конструкция.

5.3 Развитие на тежка авария

За всяко състояние с повреда на ЯЦ или аварийна последователност се моделира развитието на тежка авария от повредата на активната зона (или горивото) до изхвърлянето на радиоактивни материали, като се използват дървета на събитията за развитие на аварията.

Ако е възможно възловите въпроси в дървото на събитието за развитие на аварията АРЕТ е необходимо да следват хронологията на аварийната последователност. В случаите, когато горивото се намира вътре в корпуса на реактора се разглеждат като минимум следните времеви прозорци или етапи от аварията:

- от повреждането на активната зона (или горивото) до отказ на корпуса на реактора;
- непосредствено след отказът на корпуса на реактора; - в по-дългосрочен план след отказът на корпуса на реактора.

Количествената оценка на възловите вероятности е необходимо да се обосновава основно от съвременни компютърни кодове за анализ на тежки аварии и инженерни пресмятания. Ако не е възможно да се използват аналитични методи се прилага обоснована експертна оценка.

5.4 Анализ на количеството на радиоактивните материали, изхвърлени в околната среда

За всяка категория на изхвърляне се пресмята количеството на радиоактивните материали, изхвърлени в околната среда, вкл. величината и времето на радиоактивно изхвърляне. Количеството на радиоактивните материали, изхвърлени в околната среда се представят от радиологични групи, които характеризират количеството на радиоактивни продукти, съдържащи се в активната зона на реактора. Тези групи се базират на сходство в термодинамичните и химични свойства на радионуклидите. Като минимум е необходимо да бъдат разгледани следните радиологични групи:

№	Име на групата	Елементи
1	Благородни газове	Xe, Kr, Ne, Ar, Rn, H, N
2	Халогени	I, Br, Cl, F, At
3	Алкални метали	Cs, Rb, Li, Na, K, Fr, Cu
4	Халкогени	Te, Se, S, O, Po
5	Алкалоземни метали	Ba, Sr, Be, Mg, Ca, Ra, Es, Fm, Ga, Ge, In, Sn, Ag, B, Si, P
6	Преходни метали	Mo, V, Cr, Fe, Co, Mn, Nb, Tc, Ta, W
7	Платиноиди	Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt, Au, Ni
8	Четиривалетни вещества	Ce, Ti, Zr, Hf, Th, Pa, Np, Pu, C
9	Тривалетни вещества	La, Al, Sc, Y, Ac, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Am, Cm, Bk, Cf, U

Фиг. 6 Таблица на радиологичните групи

Пресмятанията на количеството на радиоактивните материали, изхвърлени в околната среда се основава на специфичен за ЯЦ модел, като се вземат в предвид количество на радиоактивните продукти в активната зона на реактора, първи и втори контури, сградата на херметичната конструкция и системите в нея, и др. Използва се съвременен, напълно интегриран код, който обединява термохидравликата с изхвърлянето на продукти на делене, транспорта им и задържането им.

6 ВАБ НИВО 3

Това е анализ на последствията за околната среда (радиологичните последствия) и заедно с резултатите от ниво 2 на обществения риск. Това ниво спомага за определяне на относителната значимост на мерките за предотвратяване и ограничаване на последствията от аварията с отчитане на нежелателните последствия върху здравето на експлоатационния персонал и населението, замърсяването на почвата, водата, въздуха и храните.

Анализът съчетава принципите на:

- Изчисления на метеорологичните условия и атмосферната дисперсия;
- Концепциите на ВАБ Ниво 1 и ВАБ Ниво 2;
- Аварийни планове;
- Здравето.

За начални данни, кодът за Ниво 3 използва тези от Ниво 1 и Ниво 2. Друга информация, която трябва да се събере преди започването на анализа е метеорологични данни, данни за населението и селскостопанското, както и други икономически данни в зависимост от обхвата на анализа.

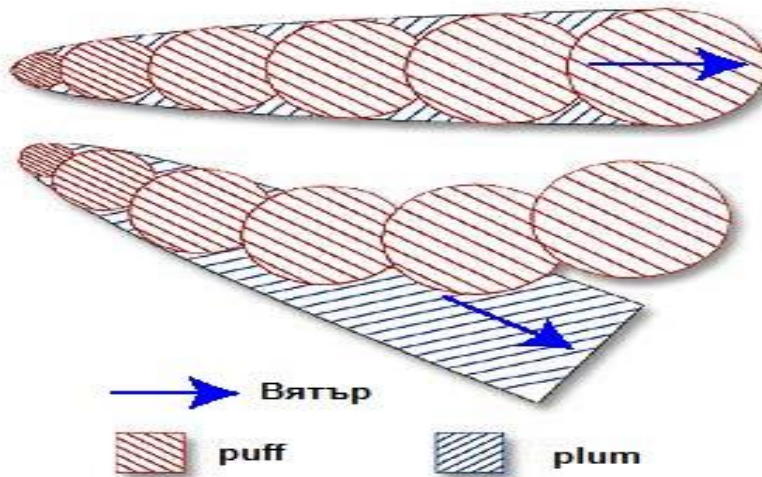
6.1 Процеси

Освободените радиоактивни вещества при авария, може да се разпространят от източника на освобождаване по редица различни начини. Крайните ефекти, които представляват интерес при извършване на анализа са силно променливи. Ниво 3 се състои от много отделни процеси, които се обединяват. В първият процес се разглежда развитието на аварията и радиоактивния източник, на който ще бъде изложена околната среда. Тези параметри се взимат от нива 1 и 2. Следващата стъпка в анализа е да се определи как радиоактивния източник влияе на околната среда. Чрез начина на достигане на радиоактивния материал, може да се определят дозите за населението. Накрая, се определят ефектите върху здравето от погълнатите дози.

6.2 Модели

Основният начин на разпространение на радиоактивните материали от тежката авария е чрез транспортирането и разпространението по въздуха на продуктите на делене. В резултат на това, като основен метод за количествено изчисление се използват модели на атмосферната дисперсия. Тези модели са сложни. Простите модели описващи тази дисперсия се управляват от Гаусово разпределение в една единствена линейна посока на транспорт, което е приетият Гаусов струен модел ("plum" модел).

Съществуват няколко по-сложни модела, като „puff” модела, но като основен метод остава Гаусовият.



Фиг. 7 Атмосферни модели

Атмосферните дифузионни модели изискват значително количество метеорологични данни за предоставяне на вероятностното разпределение на продуктите при авария. Значителното количество входни данни, значително затруднява изпълнението на ВАБ 3, като самостоятелен анализ. Кодовете за вероятностния анализ на последствията изискват на всеки час да се въвеждат данни за посока и скорост на вятъра, валежи и т.н., като минимум за цялата година. При по-сложни изчисления, данните се въвеждат за няколко години. Индивидуалните модели за анализ често се нуждаят от повече данни за по-подробни изчисления. Рядкост е да има пълният набор от данни и често липсват за някои параметри. За да се попълнят пропуските се взема информация от алтернативни източници (напр. От националната метеорологична станция). Събирането на данни се оказва една много трудна задача за вероятностния анализ на последствията. Много от най-широко използваните кодове за анализ използват два отделни вида операции. Операция с постоянни метеорологични условия и операции с променливи условия.

6.3 Количествена оценка

Получените количествени оценки в Ниво 3 PSA са:

- концентрацията на съответните радионуклиди;
- дозите и свързаните с тях последици за здравето;
- ефективността за противодействие;
- икономическите въздействия.

Често най-важните резултати са тези за ефекта върху здравето на обществото. Тези ефекти са изчислени от определените индивидуална и колективна доза.

7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ядрените електроцентрали като сложни устройства са предмет на постоянни изменения във времето. Тези изменения могат да бъдат *физически* (в резултат на модификации, модернизации, реконструкции и т.н.), *експлоатационни* (в резултат на подобряване на процедурите, инструкциите, ТОБ и т.н.) и *организационни*. Успоредно с това се променя, подобрява и усъвършенства разбирането на персонала за централата, поради:

- натрупаните умения и знания;
- анализа на експлоатационния опит;
- създаването и поддържането на системите за събиране на данни;
- разработване на подобрени модели и т.н.

Следователно, за да бъде използван ВАБ адекватно и ефективно в експлоатацията и регулирането, то той трябва да бъде периодично актуализиран и/или модифициран, когато е необходимо, за да отрази реалната конфигурация на блока. Моделът на ВАБ трябва да се документира по такъв начин, че да може да бъде пряко свързан със съществуващата информация, документация или допусканията на анализаторите при липса на такава информация.

Чрез усъвършенстването на ВАБ, днес се достигат много високи нива на безопасност, както за проектиращите се електроцентрали, така и за тези, които вече се експлоатират.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вероятностни анализи на безопасността на ядрени централи, АЯР, 2010г.
2. Introduction to Probabilistic Safety Assessments (PSA), Leibstadt NPP
3. Probabilistic Risk Assessment (PRA), United States Regulatory Commission
4. Addressing Off-site Consequence Criteria Using Level 3 Probabilistic Safety Assessment, Royal Institute of Technology, 2012
5. Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners, 2011г.