

**Конкурс за най-добър доклад за студенти и ученици
„Ядрена техника и ядрена енергетика“ 26.04.2018 год.**

**Радиоактивни отпадъци и
отработено ядрено гориво
– класификация и
съхранение**

Иван Красимиров Маринов

Симона Митева

1. Въведение
 - 1.1. Въприемане на риска
 - 1.2. Класификация на рисковете
 - 1.3. Количествен анализ на риска
2. Дефиниции
3. Класификация на Радиоактивните отпадъци
4. Политика на Република България в областта на управление на отработеното ядрено гориво и радиоактивните отпадъци
5. Държавно предприятие „Радиоактивни отпадъци“
 - 5.1. Специализирано поделение „Постоянното хранилище за радиоактивни отпадъци-Нови хан“
 - 5.2. СП „НХРАО“
6. Многобариерен подход
7. Съществуващи съоръжения за управления на отработено ядрено гориво в България
 - 7.1. Басейни за отлежаване на касетите (БОК) - блок 5 и 6
 - 7.2. Хранилище за ОЯГ
 - 7.3. Хранилище за сухо съхраняване на отработено ядрено гориво (ХССОЯГ)
8. Планирани съоръжения за управление на ОЯГ
9. Заключение и изводи

1. Въведение

Ядрената енергетика остава до ден днешен един от най-благоприятните за околната среда източници на енергия. Този енергиен отрасъл има сравнително ниски въглеродни емисии, генерира относително евтина електрическа и топлинна енергия, съоръженията и оборудването се характеризират със сравнително дълъг живот и изпитва минимално влияние от климатичните условия (за разлика от ВЕИ). Един от по-важните фактори за развитието на ядрената енергетика днес е общественото мнение, което се влияе до голяма степен от обстоятелството, че експлоатацията на ядрени съоръжения води до натрупването на радиоактивни отпадъци (РАО), както и от възникналите в миналото ядрени аварии. За да се увеличи обществената подкрепа, следва да се гарантира безопасното управление на радиоактивните отпадъци, а влиянието им върху околната среда да бъде сведено до минимум.

1.1. Въприемане на риска

Най-общо, рискът представлява вероятностно разпределение на резултатите от определено действие. Това определение е твърде широко; то свързва риска с факта, че резултатът от дадено събитие може да заема най-различни стойности, без да е известно предварително коя точно стойност на резултата ще се сбъдне. Рискът може да бъде разглеждан от гледна точка на отделен обект или на съвкупността от различни събития.

Широкото значение на понятието риск изразява обстоятелството, че резултатите от дадено действие са неизвестни, т.е. те могат да приемат най-различни стойности в очаквани състояния. Рискът от гледна точка на отделен обект се дефинира като неопределеност, която от всички възможни стойности на загубата, породена от случайни събития, ще се сбъдне.

1.2. Класификация на рисковете

Възможни са различни класификации на видовете риск според различни признаци и критерии за постигане на поставените цели.

Според възможния резултат рисковете могат да бъдат разделени на чисти и спекулативни. Чисти са тези рискове, които изразяват възможността за получаване на отрицателни или нулеви резултати. Спекулативните, от своя страна, са свързани с вероятността да се сбъдне както положителен, така и отрицателен резултат.

В зависимост от степента на влияние на човека върху резултатите от риска се различават обективни и субективни рискове. Субективните рискове зависят от поведението, умението, професионалната подготовка и знанията на отделната личност, а обективните се определят от обективни обстоятелства, които определят опасността и се характеризират с недостиг на информация. Обективни рискове са природните бедствия, както и промени в законодателната, данъчната и финансовата сфера [1].

1.3. Количествен анализ на риска

За целите на практиката се налага и количествена оценка на понятието риск. Рискът се определя като произведение на вероятността за настъпване на събитието и последствията от него:

Риск = вероятност x последствия [2]



Висока вероятност от падане; Малки последствия от падането
-> **Малък риск**



Висока вероятност от падане; Големи последствия от падането
-> **Голям риск !**



Малка вероятност от падане; Сериозни последствия от падането -> **Малък риск**

Фиг.1 Илюстрация на количествен анализ на риска

Човешките реакции на риска са няколко [13]:

- Синдром „Не в моя двор“ (Not In My Backyard Syndrome): опозиция за ново развитие, защото не е пряко свързано с обществото или в някои случаи, защото развитието включва спорна или потенциално опасна технология - често с конотацията, че развитието е необходимо, но трябва да се отдалечи;
- Изискванията за намаляване на риска се определят по-скоро от възприетите последствия от някаква злополука, отколкото от вероятността тя да се осъществи;
- Изискванията за намаляване на риска се покачват, когато индивидът не може да се самозащити;
- Същото е валидно и когато определени чувствителни групи (например деца) са изложени на риск;
- Понякога възприемането на риска може да доведе до ирационални решения и забрана на дейността.

От изложеното дотук може да се определи необходимостта методите за управление на риска да бъдат приложени при съвременните подходи за управление на РАО. За начало трябва да се състави списък с целите и потенциалните рискове от ядрената техника и енергетика. След това да се категоризира въздействието върху околната среда и приоритизират рисковете от радиоактивните отпадъци. Следващите действия включват подбиране на информация от достоверни източници и изготвяне на доклад за потенциалните решения, който да бъде изложен пред засегнатите групи. Накрая се изготвя решение според реакцията и обратната връзка на обществото.

2. Дефиниции

Радиоактивните отпадъци са всички материали, които съдържат радиоактивни нуклиди, и за които не се предвижда последващо практическо приложение. Те съдържат нестабилни ядра, които претърпяват радиоактивен разпад и в резултат излъчват йонизиращо лъчение, което може да бъде опасно за живите организми и околната среда [3]. Такива материали се получават при добив на радиоактивни руди, при производство на ядрена енергия, както и в научно-изследователски лаборатории [4].

3. Класификация на радиоактивните отпадъци

Класификацията на радиоактивните отпадъци може да бъде от голяма полза при различните фази на тяхното управление: събиране, сортиране, третиране, съхранение и транспортиране. Отпадъците могат да бъдат класифицирани по множество признаци, основните от които са: според агрегатното им състояние и според активността им.

Според агрегатното си състояние радиоактивните отпадъци могат да бъдат течни, газообразни и твърди.

Течните радиоактивни отпадъци са водни разтвори, суспензии, концентрати, масла, които се генерират при експлоатацията на ядрени съоръжения и процесите на преработка на отработено ядрено гориво. Тези отпадъци могат да бъдат третирани чрез изпарение, филтрация, йонообмен и др.. В процеса на почистването им съществено приложение имат зеолитните филтри. Зеолитите представляват голяма група минерали с алумосиликатна кристална структура. Поради подходящата си структура, химичната си инертност, високия си капацитет и стабилност, зеолитите са много подходящи за почистване на радиоактивни води чрез йонообмен [5].

Твърдите радиоактивни отпадъци идват предимно от замърсено оборудване и се генерират в резултат на поддръжката и ремонта на ядрените съоръжения. Те се пресоват с цел намаляване на обема им и след това се извършва процес на имобилизация (например циментиране, битуминиране или остъкляване, при което радионуклидите се включват в стъклена матрица, която ограничава разпространението им в околната среда).

Газообразните радиоактивни отпадъци са резултат от експлоатацията на ядрените централи. Характерни радионуклиди са криптон-85 и ксенон-133, които са химически инертни и имат кратък период на полуразпад. Поради това активността на емисиите им се намалява чрез забавяне на освобождаването им. Генерираните в процеса на експлоатация на ЯЕЦ

газообразни отпадъци се очистват през специалните вентилационни и очистващи системи на всеки блок.

Според нивото на радиоактивност радиоактивните отпадъци се класифицират като високо-, средно- и нискоактивни [6].

Нискоактивните отпадъци могат да бъдат предмети и материали, които са замърсени с радионуклиди, или които са станали радиоактивни чрез излагане на неутронно лъчение. Общо 90% от всички отпадъци са нискоактивните – защитни обувки и дрехи, пречиствателни станции за тежката вода от реактора, филтри, медицинско оборудване. Само малка част от тях произлиза от експлоатацията на ЯЕЦ [7].

Средноактивните отпадъци представляват около 7%. Те се имобилизират в бетон или битум с цел съхранение и често се нуждаят от слой, служещ като обвивка, с цел безопасност. В България ниско- и средноактивните радиоактивни отпадъци се обработват в „Постоянното хранилище за радиоактивни отпадъци – Нови хан“, където се осигурява безопасно съхранение на отпадъци, генерирани през последните 48 години, съхранявани в подходяща среда.

Високоактивните отпадъци генерират 95% от общата радиоактивност на РАО като цяло. Те включват течни отпадъци от първия цикъл на преработване на отработеното ядрено гориво и твърди вещества, създадени при втвърдяване на течните отпадъци. Типичната им активност е $10^4 - 10^6$ ТВq/m³. От 10 тона ураново гориво се получава 1,5 m³ високоактивен отпадък, 0,115 m³ остъклен такъв и 0,35 m³ средноактивен отпадък [8].

Вид	Отворен	Затворен
	ЯГЦ	ЯГЦ
	m ³	m ³
Ниско- и средноактивни отпадъци	50 - 100	70 - 190
Високоактивни отпадъци,	0	15 - 35
Отработено ядрено гориво	45 - 55	0

Табл. 1. Количество РАО, генерирано годишно от един реактор ВВЕР-1000 [9]

В табл.1 е представано количеството (m³) РАО, произведено от един 1000 MW ВВЕР за една година. Забелязва се, че при затворен ядрен горивен цикъл, при който отработеното ядрено гориво подлежи на преработка, се получава по-голямо количество ниско- и средноактивни отпадъци в сравнение с отворения цикъл, както и високоактивни отпадъци, които при отворения цикъл липсват. За сметка на това, при отворен цикъл се погребва цялото отработено гориво, без да се извлича нищо от него.

4. Политика на Република България в областта на управление на отработеното ядрено гориво и радиоактивните отпадъци

Радиоактивни отпадъци от ядрената енергетика в България се генерират от 1974 г., когато е въведен в експлоатация първи енергиен блок на АЕЦ „Козлодуй“. Получаваните високоактивни отпадъци, след съответна обработка, се съхраняват на площадката на централата. Ниско- и средноактивните отпадъци от експлоатацията на ядрената централа се преработват и кондиционират от Държавно предприятие „Радиоактивни отпадъци“ и след изграждането на Националното хранилище за ниско- и средноактивни РАО (НХРАО) се предвижда да бъдат погребани в него.

България не разполага с възможности за реализация на цялостен ядрен горивен цикъл. Към настоящия момент страната е възприела политика за прилагане на отворен цикъл - след облъчване на горивото в активната зона на реактора, отработеното гориво се изпраща за преработка в Руската федерация, с последващо връщане на високоактивните отпадъци, което е предвидено, но все още не е реализирано. В този смисъл, националната практика при управление на отработеното ядрено гориво е свързана със съхранение на отработеното гориво на площадката на АЕЦ „Козлодуй“ в басейните за отлежаване на касетите и хранилищата за съхранение на отработеното ядрено гориво (хранилище от „мокър тип“ за 5-ти и 6-ти блок и от „сух тип“ за 1-4 блок), с последващо извозване на отработеното ядрено гориво за технологично съхранение и преработка.

В България радиоактивни отпадъци се генерират и в около 2000 обекта на промишлеността, медицината, селското стопанство и институтите за научни изследвания при използването на източници на йонизиращи лъчения. Излезлите от употреба източници се предават в Специализирано поделение „Постоянно хранилище за радиоактивни отпадъци – Нови хан“ (СП „НХРАО“) на ДП „РАО“ без предварителна преработка, където се обработват и съхраняват [10].

5. Държавно предприятие „Радиоактивни отпадъци“

Основна цел на Държавно предприятие „Радиоактивно отпадъци“ е да осигури погребването на радиоактивни отпадъци в Националното хранилище за погребване на радиоактивни отпадъци по начин, осигуряващ безопасността на персонала, населението и околната среда. Предметът на дейност на предприятието е:

- управление на радиоактивни отпадъци: манипулиране, предварителна обработка, преработка, кондициониране, съхраняване и погребване, включително извеждане от експлоатация на съоръжения за управление на радиоактивни отпадъци;
- изграждане, експлоатация, рехабилитация и реконструкция на съоръжения за управление на радиоактивни отпадъци;
- извършване на превоз на радиоактивни отпадъци извън площадката на съответното ядрено съоръжение при спазване изискванията за физическата защита в съответствие с определената категория;
- извеждане от експлоатация на ядрени съоръжения.

5.1. Специализирано поделение „Постоянно хранилище за радиоактивни отпадъци-Нови хан“

Специализирано поделение „Постоянното хранилище за радиоактивни отпадъци (ПХРАО)“ е разположено край село Нови хан, община Елин Пелин. То е изградено в края на 50-те и началото на 60-те години на ХХ век в съответствие с действащото в страната законодателство. Хранилището е предназначено да приема радиоактивните отпадъци, които се получават в резултат на използване на радиоактивни източници в медицината – за диагностика и лечение, в промишлеността, в науката и образованието. От 2006 г. хранилището влиза в структурата на Държавно предприятие „Радиоактивни отпадъци“ и днес функционира като негово специализирано поделение.

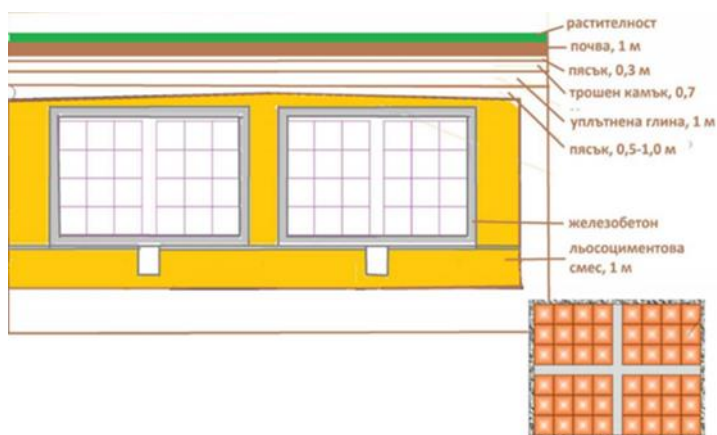
Експлоатацията на съоръжението, съгласно условията на лицензията, издадена от Агенцията за ядрено регулиране, включва:

- Транспорт, обработване и съхраняване на радиоактивни отпадъци;
- Съхраняване на източници на йонизиращи лъчения с неизвестен собственик;
- Радиоактивни отпадъци категория 1 и категория 2 съгласно категоризацията, установена с Наредбата за безопасност при управление на радиоактивни отпадъци, генерирани извън АЕЦ “Козлодуй” [11].

Предметът на дейност на хранилището, както и всички подобни съоръжения във всяка държава, е да осигури безопасно управление на приетите отпадъци в дългосрочен план. Съхранението се извършва в подходящи многобариерни съоръжения – шахти, бетонни контейнери, голямотонажни контейнери и т.н.

В своята дейност ДП „РАО“ използва траншеен тип на съхранение на радиоактивни отпадъци (фиг.2), защото: притежава предимства пред останалите от гледна точка на безопасността (множество инженерни бариери); сигурна защита в периода на експлоатация на Национално хранилище за погребване на радиоактивни отпадъци; безопасност в периода след затваряне на съоръжението; лесно манипулиране с радиоактивни отпадъци; осигурена възможност за коригиращи действия; стриктен контрол във всяка една точка на съоръжението; съвременна технология, доказала своите качества.

Траншейният тип хранилище се състои от няколко стоманобетонни вкопани конструкции (модули), разделени на камери от вътрешни преградни стени. След запълване с опаковки, тези камери се покриват със стоманобетонна плоча и се изолират от атмосферните води чрез изграждане на многопластов земнонаситен слой [14].



Фиг. 2 Траншеен тип на съхранение

5.2. Специализирано поделение „Национално хранилище за погребване на радиоактивни отпадъци ”

Изграждането на Национално хранилище за погребване на радиоактивни отпадъци е от най-висок приоритет за страната. Националното хранилище е предназначено за погребване на радиоактивни отпадъци, които се генерират при експлоатацията и извеждането от експлоатация на ядрени мощности и при използването на радиоактивни източници в промишлеността, медицината, селското стопанство и научните изследвания. НХРАО е определено за обект с национално значение, национален обект и стратегически обект за националната сигурност.

Хранилището ще бъде многобариерно повърхностно модулно инженерно съоръжение с капацитет 19 008 броя стоманобетонни контейнери с размери 1,95 x 1,95 x 1,95 m, разположено на площадка „Радиана“ в непосредствена близост до „АЕЦ Козлодуй“. Предвижда се НХРАО да бъде изградено на три етапа, като първият етап следва да осигури погребването на отпадъците от извеждането от експлоатация на блокове 1-4 на „АЕЦ Козлодуй“.

В съответствие с изискванията на нормативната база, препоръките на Международната агенция за атомна енергия и добрите практики, на площадка „Радиана“ се изпълняват програми за предексплоатационен мониторинг. Извършва се подготовка на инфраструктурата на площадката за бъдещото строителство. Предвижда се хранилището да бъде въведено в експлоатация през 2021 г. На първия етап ще бъдат построени първия модул на хранилището – 22 броя клетки, които ще поемат 6336 бр. стоманобетонни конструкции както и прилежащата инфраструктура на обекта. Изграждането на втория и третия модул ще се извършва в съответствие с темповете на генерация на радиоактивните отпадъци. Към настоящия момент се предвижда експлоатацията на хранилището да продължи 65 години. След изтичане на този срок хранилището ще бъде затворено посредством изграждането на защитна многобариерна покривка. Периодът на институционален контрол ще продължи 300 години.

Оцененият инвентар радиоактивни отпадъци, който се очаква да бъде генериран в Република България, подлежащ на погребване в съоръжението по предварителната оценка, е общо 138 200 m³, което съответства на около 18 600 контейнера с РАО [10,11].

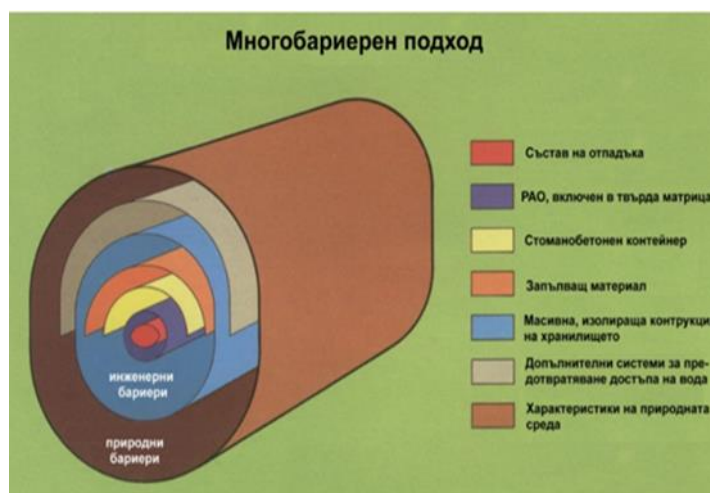
6. Погребване на отработено ядрено гориво. Многобариерен подход

Понастоящем се смята, че най-подходящият метод за окончателното погребване на отработено вдрено гориво (ОЯГ) е в дълбоко лежащи геоложки пластове (няколкостотин или повече метра под земната повърхност).

Концепцията за погребването на ОЯГ в дълбоки подземни (геоложки) хранилища се основава на съчетаването на природни защитни бариери с изкуствени (инженерни) такива, с което се намалява възможността за миграция на радионуклидите в биосферата. Многобариерният подход е основен при проектирането на такива хранилища.

Първата бариера пред разпространението на радионуклидите в околната среда е самата матрица на ядреното гориво. Втората бариера е обвивката на теплоотделящите елементи. Третата бариера е материалът между теплоотделящите елементи и контейнера, в който те се

поставят. Обикновено се предвижда заливане на ОЯГ в контейнера чрез топлопроводящи сплави. Всички бариери дотук се разглеждат като единна първа бариера.



Фиг.3 Илюстрация на многобариерен подход

Следващата бариера е контейнерът, предназначен да осигури задържането на радионуклидите в началния период, когато температурата на ОЯГ е най-висока.

Третата поредна бариера срещу миграцията на радионуклидите е буферен материал, който се насипва между контейнерите и скалата, в която е изкопано хранилището. Този материал трябва да има висока сорбционна способност с цел възможно най-дълго задържане на радионуклидите. Обикновено това са различни глини, сол или смес от глина и пясък в зависимост от вида на скалната формация, в която е изградено хранилището. Освен за забавяне на миграцията, буферният материал служи и за подобряване на топлинния контакт между контейнерите и околната скала.

Четвъртата бариера е самата геоложка формация. Нейната проникваемост зависи от целостта на структурата, наличието на примеси в основната порода и от възможното присъствие или проникване на вода.

Всички свойства на избраната за хранилище геоложка формация се изследват изключително внимателно. Специално внимание при това се отделя на сеизмичността, а също така и на отсъствието на находища на нефт, газ или други полезни изкопаеми в близост до хранилището с цел намаляване на риска от случайно разрушаване на хранилището вследствие на природни процеси или на бъдеща човешка дейност [12].

7. Съществуващи съоръжения за управления на отработено ядрено гориво в България

7.1. Хранилище за отработено ядрено гориво

Хранилището за отработено гориво е отделна сграда, намираща се на площадката на АЕЦ „Козлодуй“, в която са разположени оборудване и системи, осигуряващи подкритичност, отвеждане на остатъчното топлоотделяне на отработеното гориво и биологична защита.

Хранилището е предназначено за дълговременно (не по-малко от петдесет години) съхраняване на отработено гориво от реактори ВВЕР-440 и ВВЕР-1000 след първоначално най-малко тригодишно отлежаване в приреакторните басейни. Хранилището е от мокър тип, т.е. отработеното гориво се съхранява в басейни под вода.

Съоръжението има четири басейна за съхраняване на отработено гориво като касетите се съхраняват в транспортни кошници. Проектната вместимост на хранилището е 168 броя кошници.

7.2. Басейни за отлежаване на касетите - блок 5 и 6

Басейните за отлежаване и презареждане на горивото са разположени в хермозоната и служат за съхранение и отлежаване на отработено гориво (до намаляване на остатъчното топлоотделяне на допустимо ниво). Вместимостта на всеки басейн е 612 броя топлоотделящи касети и осигурява отлежаването им в продължение на не по-малко от три години.

Басейнът се състои от четири части (отсеци), физически разделени с преградни стени. Три отсека са предназначени за непосредствено съхранение на отработени касети, а четвъртият отсек – за провеждане на транспортни операции със свежо и отработено гориво. Във вътрешното пространство на отсеците за съхранение на ОЯГ са разположени стелажите и херметичните пенали за поставяне и отлежаване на топлоотделящи касети. Необходимата подкритичност в басейните е осигурена конструктивно. Басейните запазват работоспособността си при сеизмично въздействие.

7.3. Хранилище за сухо съхраняване на отработено ядрено гориво

Хранилището е предназначено за дълговременно съхранение (не по-малко от петдесет години) на отработено ядрено гориво от ВВЕР-440 по сух способ. То е снабдено с оборудване и системи, обезпечаващи приема, съхранението и извозването на отработеното гориво. Общите характеристики на хранилището са:

- самостоятелна конструкция, разделена на две основни експлоатационни зони: зона за приемане и зала за съхранение на контейнери. Двете зони са разделени със защитна врата;
- горивото се съхранява в контейнери тип CONSTOR 440/84;
- капацитет от 72 места за контейнери. Контейнерът се състои от корпус и затваряща система капаци, които осигуряват херметичността му при нормална експлоатация и аварии;
- вътрешността на контейнера, в която е разположено отработеното гориво, се изсушава, след което се запълва с хелий. Инертната атмосфера на вътрешността на контейнера изключва корозията на топлоотделящите елементи за периода на дългосрочното им съхранение.

Пасивната система за естествено охлаждане чрез конвекция на въздуха и конструкцията на контейнерите за оптимален топлообмен гарантират непревишаване на температурните ограничения за обвивката на топлоотделящите елементи и предотвратяване на стареенето на конструкциите на горивните касети и контейнера.

8. Планирани съоръжения за управление на отработено гориво

С оглед ефективното и безопасно управление на отработеното ядрено гориво, в случай че не се осъществяват планираните извозвания за преработка и съхранение на ОЯГ и ВВЕР-1000, ще възникне необходимост да бъде изградено хранилище за сухо съхранение на ОЯГ за ВВЕР-1000, което ще трябва да е готово за експлоатация към 2030 г. Предвид дългия процес на проектиране, изграждане и лицензиране на съоръжението, следва да се направи анализ на възможностите за транспортиране, преработка и съхранение и при необходимост дейностите да се стартират не по-късно от 2018 г.

Жизненият цикъл на хранилище за съхранение на отработено ядрено гориво (фиг.4) се състои от: избор на площадка; проектиране; сторително-монтажни работи и въвеждане в експлоатация; процес на експлоатация, предвиден да бъде около 60 години; затваряне и последващ контрол в продължение на минимум 300 години [10].



Фиг. 4 Жизнен цикъл на хранилище за съхранение на ОЯГ

9. Заключение и изводи

Ядрената енергийна технология разполага с много предимства: висока надеждност, икономическа изгодност – получават се големи количества енергия с използването на малко количество първично гориво, ниски въглеродни емисии. Основен недостатък е генерирането на радиоактивни отпадъци. Безопасността е основен приоритет на ядрения енергиен сектор. Затова трябва да се обърне съществено внимание на изходните продукти от експлоатационния цикъл на една ядрена централа, представляващи потенциална опасност за населението и околната среда.

Човешкият фактор е основен в ядрената енергетика и за да се сведат въздействията върху околната среда и рисковете от аварии до разумно постижимия минимум, освен вискоквалифицирани кадри, трябва да бъдат поддържани и развивани стриктният контрол и регламентираното управление на радиоактивните отпадъци и отработеното ядрено гориво. Също така трябва да се намерят начини за информиране на широката общественост за подходите за рационална оценка на рисковете и всеки, който участва в процеса на взимане на решения, да бъде добре информиран по енергийните въпроси.

В България има няколко хранилища за радиоактивни отпадъци и отработено ядрено гориво, които осигуряват сигурното им съхранение, между които: хранилище за отработено ядрено гориво; басейни за отлежаване на касетите - блок 5 и 6; хранилище за сухо съхраняване на отработено ядрено гориво и хранилищата към ДП „РАО“. Предвиденото за изграждане хранилище за сухо съхранение на ОЯГ за ВВЕР-1000, което трябва да е готово за

експлоатация към 2030 г., предопределя до голяма степен бъдещето развитие на ядрения сектор в България.

Литература:

- [1] Същност и определение на понятието риск. Видове риск – www.referati.org
- [2] Helm, P. 1996. “Integrated Risk Management for Natural and Technological Disasters”
- [3] U.S. NRC, Backgrounder on Radioactive Waste, accessed July 24, 2017
[<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/radwaste.html>]
- [4] Речник на научните термини, Е. Б. Уваров, А. Айзакс, издателство „Петър Берон“, София, 1992
- [5] Неда Христова Йорданова, „Синтез на зеолити от летяща пепел с приложение в системи за пречистване на течни радиоактивни отпадъци“
- [6] World Nuclear Association, Radioactive Waste Management, accessed July 24, 2017
[<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>]
- [7] U.S. NRC, Backgrounder on Radioactive Waste [<https://www.nrc.gov/waste/low-level-waste.html>]
- [8] IPFM, Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, Princeton, NJ, United States, 2011
- [9] European Commission , Radioactive Waste Management in the European Union (1998)
- [10] Стратегия за управление на отработено ядрено гориво и радиоактивни отпадъци до 2030г.
- [11] Агенцията за ядрено регулиране [<http://www.bnra.bg/bg/facilities/seraw/phrao>]
- [12] Л. Цанков, Увод в ядрената енергетика – 2008г.
- [13] Mattias Lantz , Uppsala university (Mattias.Lantz@physics.uu.se)
- [14] Димитринка Атанасова, Преработване и съхранение на радиоактивни отпадъци