

22. Транспорт и съхраняване на ОЯГ

Съхраняването на отработено ядрено гориво (ОЯГ) е междинен етап от движението на ядреното гориво - между използването му в АЕЦ и преработката или окончателното му погребване.

ОЯГ изисква специални технологии на съхраняване поради голямата радиоактивност ($\sim 1 \text{ Ci/g}$, $\sim 10^5 \text{ n/s.kg}$), остатъчното топлоотделяне ($\sim 1 \text{ W/kg}$), натрупания плутоний (5 - 10 kg/tU) и опасността от радиоактивно замърсяване, ако се допусне деградация на състоянието на горивото.

Отработеното ядрено гориво е особен клас продукт, генериран при работа на ядрените реактори. Общото между ОЯГ и високоактивните отпадъци (ВАО) са хранилищата за окончателно погребване, които се предвижда да бъдат едновременно за ВАО и ОЯГ след съответна подготовка.

Ако ОЯГ бъде декларирано, че ще се погребва без преработка, ОЯГ се превръща във високорадиоактивен отпадък.

1. Съхраняване на отработено ядрено гориво

ОЯГ се съхранява в басейни при реактора и в хранилища за отработено ядрено гориво. От гледна точка на ядрената безопасност е съществено осигуряване на подкритичност и охлаждане на горивото.

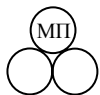
Съгласно Наредба № 11 за “Безопасност при съхраняване на отработено ядрено гориво”:

“Чрез осигуряване на подходящи характеристики на съоръженията се изключва възможността за достигане на критичност при съхраняване и манипулации с ОЯГ.

Предвиждат се надеждни системи за отвеждане на остатъчното топлоотделяне с цел предотвратяване на повреди на ОЯГ и изхвърляне на радиоактивни вещества в помещенията и околната среда над установените от проекта стойности .”

2. Осигуряване на подкритичност

За съществуващите технологии за съхранение на работило ядрено гориво (под вода и сухо съхранение) е необходимо да се докаже, че коефициентът на размножение е под някаква определена стойност. В наредба No.11 изискването е $K < 0.95$ за най-благоприятното отношение гориво/забавител.



При съхранение под вода се приема, че водата може да започне да кипи и поради това се изисква да се докаже подкритичност при най-благоприятното отношение гориво/забавител. При сухо съхранение се допуска, че може да има проникване на вода. Освен това, ако пресмятанията са тримерни, се изисква да се приеме най-високия коефициент на размножение по височина (или по дължина при хоризонтално съхранение).

При съхранение и транспорт съгласно Наредба No. 11 се приемат най-благоприятни условия за размножение. Приема се също така, че горивото е свежо и не се отчита изгарянето (burnup credit):

“Чл . 75. Анализът на подкритичността се провежда при максимален коефициент на размножение на неутрони за всички разглеждани състояния... и следните консервативни изисквания:

- 1 . отработеното гориво се разглежда като свежо ;*
- 2. при наличие на ОЯГ с различни обогатявания се приема, че съхраняваното гориво е с максимално обогатяване; пресмятанията се правят предвид специфичните характеристики на посоченото гориво;*
- 3. разглежда се максимален проектен капацитет на запълване на съоръженията;*
- 4. отчита се такова количество, разпределение и плътност на забавителя, които водят до максимален коефициент на размножение на неутрони;*
- 5. приема се наличие на отражател с най-добри характеристики;*
- 6. наличието на поглъщащи елементи в касети не се отчита;*
- 7. за касети, съдържащи изгарящи поглъщащи елементи на неутрони, се приема, че поглъщащите елементи отсъствуват;*
- 8. за съоръжения с хомогенни поглъщащи елементи (борен разтвор) се приема, че те отсъствуват;*
- 9. при изменение на температурата в условията на нормална експлоатация и при изходни събития се разглежда състоянието, което води до максимален коефициент на размножение на неутрони;*
- 10. отчита се възможността за образуване на пароводна смес в транспортните контейнери и последващо увеличаване на коефициента на размножаване на неутрони при разхлаждане; при сухо съхраняване и транспортиране се отчита възможността за наличие на кондензирана вода в транспортния контейнер;*
- 11. отчита се изменението на геометрията на касетите или тяхното разположение в резултат на изходните събития;*

12. отчитат се допустимите грешки на методите за пресмятане на концентрации и изотопен състав на поглъщащите елементи и допуски при производството.“

В някои страни се допуска отчитане на изгарянето на горивото (burnup credit). При отчитане на изгаряне на горивото, трябва да се има в предвид следното:

- не винаги работило гориво има по-малък коефициент на размножение, отколкото свежо гориво. При наличие на изгарящ поглъстител в горивото, дяляща се система от такова гориво има максимум на коефициента на размножение като функция на изгарянето;

- изгарянето по височина е различно;

- в повечето от страните допускащи възможността за “burnup credit” се изисква експериментално измерване на дълбочината на изгаряне преди поставяне на касетите в хранилище или контейнер.

Съществуват два начина за намаляване на коефициента на размножение:

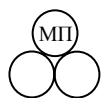
- чрез увеличаване на геометричната стъпка на разположение на касетите;

- чрез поставяне на твърди прегради между касетите, съдържащи неутронни поглъстители.

При намаляване на стъпката, за да се увеличи капацитетът на съоръжението, съществуващите технологии в момента се основават на бориране на стомана или алуминий с естествен или бор обогатен по ^{10}B . Трябва да се има предвид, че стоманата има ограничение по борсъдържание, и по тази причина, ако се държи на минимизиране на тегло, може да се наложи използване на обогатен бор. Технологиите на добавяне на бор при алуминий е следната: борно съединение се поставя между две алуминиеви плоскости, които чрез пресоване формират една плоскост.

В миналото е имало опити за използване на кадмий (Cadminox, Франция) – метален Cd лист между два стоманени листа. Тази технология е отпаднала поради масово наблюдаване на изкривяване на плоскостите. Имало е дори опити за използване на бор във високоустойчива на радиация пластмаса (Boroflex, САЩ), но поради стареене и начупване на плоскостите до 1985 г. са подменени всички пластмасови плоскости.

Използването на плоскости, поглъщащи неутрони, може да се окаже недостатъчно при максимално уплътняване (минимална стъпка) на касети с голямо напречно сечение и високо обогатяване, тъй като плоскостите поглъщат само топлинни неутрони. Тези прегради не поглъщат бързи неутрони и поради тази причина няма утечка на бързи неутрони по периферията на касетата. При максимално уплътняване и касети с голямо напречно сечение



е възможно да се изисква наличието на течен поглъtitел в допълнение към твърдия поглъtitел по периферията на касетата.

За повишаване на дълбочината на изгаряне се използват касети с обогатяване $\geq 5\%$, за които се прилагат течен и твърд поглъtitел при уплътнено съхранение.

3. Остатъчно топлоотделяне и активност на ОЯГ

За водно-водни реактори под налягане активността и остатъчното топлоотделяне при дълбочина на изгаряне $\approx 30 \text{ GWd/tU}$ са приблизително следните (виж раздел 15):

Таблица 22.1. Остатъчно топлоотделяне на ОЯГ, 30 GWd/tU

отстояване	активност, Ci/kg	Топлоотделяне, W/kg
150 дни	$4.6 \cdot 10^3$	24.3
1 г.	$2.3 \cdot 10^3$	10.4
10 г.	$3.2 \cdot 10^2$	1.3

В зависимост от дълбочината на изгарянето ОЯГ излъчва неутрони от натрупаните трансуранови елементи приблизително $(2 - 5) \cdot 10^5 \text{ n.s/kgU}$.

Остатъчното топлоотделяне и активност на една касета при дълбочина на изгаряне съответно 40 GWd/tU (ВВЕР-1000 при тригодишна кампания) и 30 GWd/tU (ВВЕР-440) са:

Таблица 22.2. Топлоотделяне kW/касета:

отстояване	0.5 г.	1 г.	2 г.	3 г.	10 г.
ВВЕР-1000	11.1/9.5	6.0/5.4	2.8/-	1.7/1.7	-/0.6
ВВЕР-440	2.2/1.8	1.2/1.05	0.6/-	0.3/0.33	-/0.12

Забележка: Данните преди и след наклонената черта са от различни автори. Изчислените разлики достигат до 10 и повече процента. Най-големи различия има в данните за натрупване на трансуранови изотопи и остатъчното гама-излъчване.

Таблица 22.3. Активност Bq/касета $\times 10^{15}$, продукти на деление + трансурани

отстояване	0.5 г.	1 г.	3 г.	10 г.
ВВЕР-440	16.9	9.8	3.8	1.7
ВВЕР-1000	84.4	48	18	8

4. Съхраняване на ОЯГ в хранилища

При описание на съоръженията за съхранение на ОЯГ са необходими следните данни (освен цени и срокове на построяване):

Основни параметри:

- капацитет,
- размери,
- максимално допустима мощност, охлаждане,
- период на съхранение;

Ядрена безопасност:

- критичност,
- възможни инциденти,
- проектно земетресение,

Радиационна безопасност:

- защита от гама-лъчи и неутрони,
- дозово натоварване при нормална експлоатация,
- защита при инциденти;

Гаранции за неразпространение на ядрени материали - плутоний и обогатен уран.

4.1. Съхраняване на ОЯГ под вода

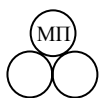
Водата има някои предимства, поради което първоначално е избрана за работна среда при временно съхраняване на ОЯГ:

- ефективен охладител,
- добра защита от гама-лъчи и неутрони,
- прозрачна е и позволява оптичен контрол при работа и съхраняване,
- добре се пречиства, лесно се охлажда.

Съхраняването под вода е предназначено само за кратковременно или дълговременно междинно съхранение на ОЯГ (засега до 30 - 50 г.), но например Швеция за известното си хранилище в монолитна скала CLAB не е обявила срок на съхранение.

Технологията на съхранението под вода практически е завършена. Продължават някои изследователски проекти по усъвършенстване на БОК и ХОГ - уплътняване на горивото, разполагане на етажи, пресмятания и конструктивни мерки по ядрена безопасност, протечки, дълговременно съхраняване, отлагания по горивото и т.н.

При проектирането и експлоатацията на ХОГ под вода се спазват някои общи правила:



- да не се допуска при всички възможни и малко вероятни ситуации възникване на критичност; да се осигури подкритичност при най-неблагоприятни геометрии на горивото и най-неблагоприятни външни условия (напр. температура).

- да е пригодно да устои на физично и химично въздействие, което може да застраши целостта на басейните, като земетресение, или въздействие, което може да се очаква поради местоположението на площадката и близост до други обекти.

- да е в състояние да отнема генерираната топлина при всякакви условия като се осигурява достатъчен запас до критични явления дори и при отпадане на охлаждащата система.

- да има съоръжения и устройства за постоянен контрол на състоянието на горивото.

- да има устройства, които постоянно да контролират работата на системите за охлаждане, системите за радиационен контрол и за контрол на системите за физическа защита на обекта.

- да е осигурено наблюдение вътре в хранилището и около хранилището за предотвратяване на враждебни действия.

В повечето страни се изисква анализ на безопасността на събития като:

- падане на контейнер или чохъл,
- скъсване на тръба от охлаждащата система,
- загуба на вода в басейн,
- отпадане на електрическото захранване.

Състоянието на водата във водните басейни се регулира така, че да се минимизират процесите на корозия на топлоотделящите елементи на ОЯГ и компонентите на басейна. За поддържане на качеството на водата се използват следните системи и устройства:

- йонообменни системи за контрол на йонните примеси,
- филтри за пречистване на водата от попаднали частици,
- гребла за пречистване на повърхностния слой,
- вакуумни подводни системи за пречистване на стелажите и дъното от утайки,
- системи за почистване на стените от налепи и по-специално на разделителната повърхност вода/въздух.

Качеството на водата непрекъснато трябва да се следи, тъй като има съобщения, че в някои ХОГ са регистрирани проблеми по прозрачността на водата поради развитие на водорасли.

Основните характеристики от новопостроените или проектирани ХОГ под вода са следните:

- проектният срок на експлоатация е средно около 60 г., като максималният срок на престояване на горивото под вода се предвижда да е около 40 - 50 г.
- конструкцията е от напрегнат бетон с вътрешна облицовка от неръждаема стомана.
- оставя се празнина между бетона и облицовката за контрол на протечките.
- съображения за увеличена сеизмичност са взети в предвид при строежа на нови басейни. Новите конструкции се поддържат на еластични подложки.
- финландският басейн (VO-KPA-Store) в Олкилуото е построен частично под земя. CLAB в Швеция е изцяло под земя в скална порода.
- практикува се уплътняване на касети и ТОЕ с използване на метални прегради съдържащи бор.
- точността на пресмятане на критичност е повишена, което позволява строеж на ХОГ с висок коефициент на размножение - до $K_{eff} = 0.95$. Използват се метални прегради с неутронни поглъщатели за повишаване на ядрената безопасност.

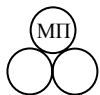
Наблюденията и изследванията на гориво без дефекти и разхерметизирани касети показват, че след дълговременно съхранение - над 20 г. под вода - не се наблюдава деградация на горивото или задълбочаване на дефектите.

4.2. Особености на сухото съхранение на уран-двуокисно гориво

Сухото съхранение при пасивно охлаждане съдържа в себе си възможността за значително увеличение на времето на съхранение за срок от 100 и повече години.

Основните недостатъци на гориво от UO_2 е възможното доокисляване до U_3O_8 при съхраняване на въздух и висока температура и промяна на геометричните размери на ТОЕ поради висока температура и дълго време на престой.

При наличие на дефекти в циркониевата обвивка горивото увеличава обема си, тъй като U_3O_8 има по-малка плътност от UO_2 и е възможна разхерметизация и замърсяване с продукти на делене и актиниди. При доокисляване до U_3O_7 обемът на горивото не се променя, тъй като плътността на U_3O_7 и UO_2 е една и съща, поради което не настъпват повреди в обвивката на ТОЕ. При по-ниска температура и по-малко съдържание на кислород в атмосферата UO_2 се доокислява до U_3O_7 . Под 300 °C скоростта на реакцията $O_2 + UO_2$ намалява приблизително с един порядък на всеки 30 градуса.



При доокисляване на горивото се изменя първичната кристална решетка и многократно се намалява способността на горивото да задържа внедрените в решетката парчета на делене.

Според изследвания от 1993 г. безопасна температура за съхранение на повредени ТОЕ за срок от 30 г. е в границите 135 – 160 °С. Оценките за безопасна температура на съхранение в инертна атмосфера с примес на 1 % кислород за срок от 30 г. е около 210 - 220°С. Има и по-общии оценки, че вероятно приемливата температура, под която окисляването на горивото не би довела до забележими дефекти, ще лежи под 200°С.

Възможните пътища за преодоляване окислението на нехерметично гориво са:

- използване на инертна атмосфера;
- откриване на дефектни елементи и съхраняването им в инертна атмосфера;
- съхраняване на горивото на въздух при температури под прага на значително окисляване.

Според оценки от 1992 г. херметично гориво може да бъде съхранявано на въздух при температура 330°С за 30 г.;

Освен от съображения за окисление на горивото, оказва се, че температури над 350 °С са неприемливи за продължително съхранение поради пълзене на Zr обвивка, деформации и възможности за механични повреди.

4.3. Принцип на “двойната бариера”

В най-новите технологии има предвиден контрол за състоянието на атмосферата между двойния капак - контрол по налягане, контрол по хелий (ако в контейнера атмосферата е хелиева или със следи от хелий).

Често това положение се обяснява като “двойна бариера”, в смисъл че чрез едната бариера се контролира състоянието на другата.

За технологиите, при които не се извършва такъв контрол се разчита се на високото качество на заваряване. При евентуално дефектиране на бариерата и навлизане на въздух, при високата температура и открити неплътности в обвивката на ТОЕ, може да се стигне до доокисляване и разрушаване на обвивката на ТОЕ. При това положение отварянето на канистрата (контейнера) може да доведе до масивно изхвърляне на продукти на делене върху технологичните съоръжения за обработка на ОЯГ. В тези технологии преди отваряне трябва да се въведе етап “проверка на състоянието на ОЯГ” чрез визуален оглед или проби от атмосферата на съхранение.

4.4. Разновидности на сухо съхранение на ОЯГ

Съществуват 4 разновидности на сухо съхранение на ОЯГ - контейнер, силос, кладенец, хранилище.

В момента технологиите се развиват само в направление на контейнерно съхранение и хранилища.

Контейнерните технологии включват:

- контейнер само за съхранение на площадката. Най-често това е метален херметичен вътрешен контейнер (канистра) и външна бетонна защита;
- контейнер с двойно предназначение – за съхранение и транспорт. Това са изцяло метални контейнери;
- многоцелеви контейнери. Една канистра с различни външни контейнери – за съхранение на площадката, за транспорт, за окончателно погребване.

Технологиите на хранилищата се развиват основно към модулност – възможност за постепенно увеличаване на капацитета с добавяне на модули към някаква основна конфигурация.

Охлаждането на горивото се осигурява от работен газ - въздух, азот, въглероден диоксид или инертен газ (хелий, неон, аргон), пасивно чрез конвекция или активно чрез принудителна циркулация на работния газ.

Основните принципи, които трябва да се спазват при проектиране и строеж на съоръжения за сухо съхранение, са:

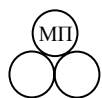
- възможност за контрол на състоянието на горивото;
- техническа възможност за обратно извличане на ОЯГ от мястото за съхранение.

4.5. Съоръжения за сухо съхранение на ОЯГ

а) КОНТЕЙНЕР (cask) - контейнерът е предназначен за транспорт и/или за съхранение на ОЯГ. Контейнерът се състои от вътрешен херметичен контейнер (канистра) и външен контейнер служещ за защита и механична здравина. При повечето конструкции е предвидена и частична защита от неутрони.

Според съображения за ядрена безопасност, вътрешните кошници на повечето от използваните контейнери, разделителните повърхности на която най-често са от борирана стомана, може да бъде запълнена с вода, както това става в БОК при презареждане.

Според изискванията на МААЕ контейнерите за транспорт трябва да отговарят на следните условия:



- запазване на целостта и херметичността при падане от 9 m върху здрава основа - бетон с маса не по-малко от 100 t върху 35 t стоманена плоскост;

- запазване на целостта и херметичността при падане от 1 m върху 15 cm дебела стоманена греда;

- запазване на херметичността при тест за пожар при 800 °C за 30 мин;

- запазване на целостта и херметичността при симулиране на падане на самолет чрез изстрелване на стоманено торпедо с тегло около 1 t и скорост приблизително скоростта на звука - 300 m/s.

Построени са хранилища за ОЯГ с пасивно охлаждане, в които горивото се съхранява в транспортни контейнери (Германия, Швейцария). Контейнерите са с двойна преграда, контрол на херметичността между преградите и инертна атмосфера.

б) СИЛОЗ (silo) - силотът представлява монолитно съоръжение, обикновено от железобетон, за съхранение на ограничено количество ОЯГ. Бетонът осигурява радиационната защита, докато херметичността се осигурява от стоманен съд вътре в бетона. Някои силози са преносими на къси разстояния, докато други са стационарни.

В САЩ от NUTECH (начало 1980 г., NUTECH + DOE + Electric Power Research Institute + Carolina Power&Light) е разработена хоризонтална модулна система за съхранение на ОЯГ (Horizontal Modular Storage - NUHOMS). Системата е пасивна и се състои от два модула - тежък защитен модул и сух силоз. Поради модулността си и използването на евтини материали (бетон), се твърди, че системата е икономически изгодна в сравнение с други предлагани възможности. Модулността позволява да се изгради хранилище за дълговременно съхранение на ОЯГ.

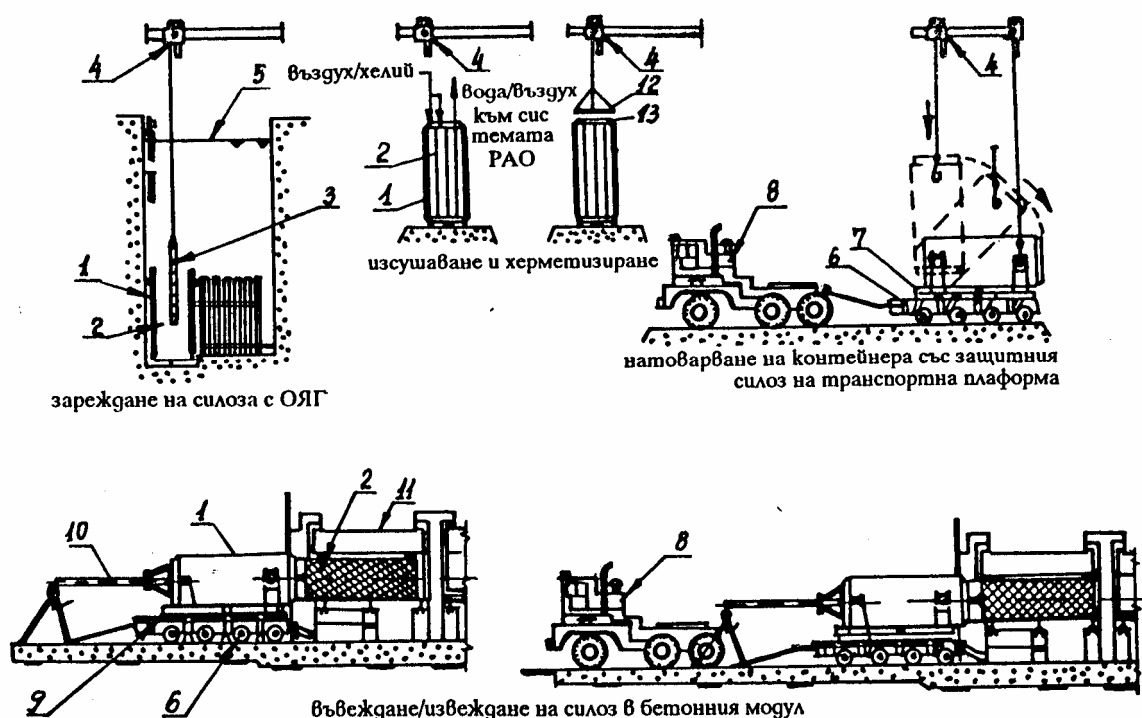
Процесът на прехвърляне на горивото от БОК или ХОГ като цяло е показан на Фиг. 22.1. Сухият силоз е цилиндричен и херметичен съд от неръждаема стомана, в който има отделения (каналы), обединени в кошница за касетите, които да запазват безопасна геометрия по време на зареждане (под вода + бор), пренасяне, съхранение и регламентирани инциденти като изпускане на силоз. От двата края на силоза радиационната защита се осигурява със защитни "тапи".

Долният или в хоризонтално положение задният край на силоза е с фабрично проверена за херметичност заварка. Предният край се херметизира с последователно автоматично заваряване на две кръгли стоманени "тапи".

Не се предвижда контрол на състоянието на горивото или на херметичността на заварките по време на съхранението.

Силозът може да разсейва около 20 kW топлинна мощност. Могат да се приемат 24 касети от ВВЕР-1000, но с над 5 г. отстояване. Със смяна на кошницата могат да се приемат и касети от ВВЕР-440. Работният газ в силоза е хелий или азот.

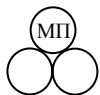
Приблизителната доза при пренасяне и вкарване на един силоз в бетонния модул е около 10 mSv.човек/силоз.



- | | |
|--------------------------|--|
| 1. Транспортен контейнер | 7. Плъзгач |
| 2. Сух защитен силоз | 8. Влекач |
| 3. Касета с ОЯГ | 9. Хидравлична позиционираща система |
| 4. Кран | 10. Хидравлично бутало |
| 5. БОК | 11. Хоризонтален модул за съхраняване на ОЯГ |
| 6. Транспортна платформа | 12. Капак на транспортния контейнер |
| | 13. Капак на силоза |

Фигура 22.1. Процес на прехвърляне на горивото от БОК или ХОГ в силоз според системата NUHOMS.

Относно срока на съхранение, системата NUHOMS се оценява, че може да бъде от порядъка на живота на една ядрена централа (около 50 г.) и освен това, че ОЯГ може да бъде окончателно погребвано. Предвижда се строеж на хранилище до централа с продължителност времето на експлоатация на централата).

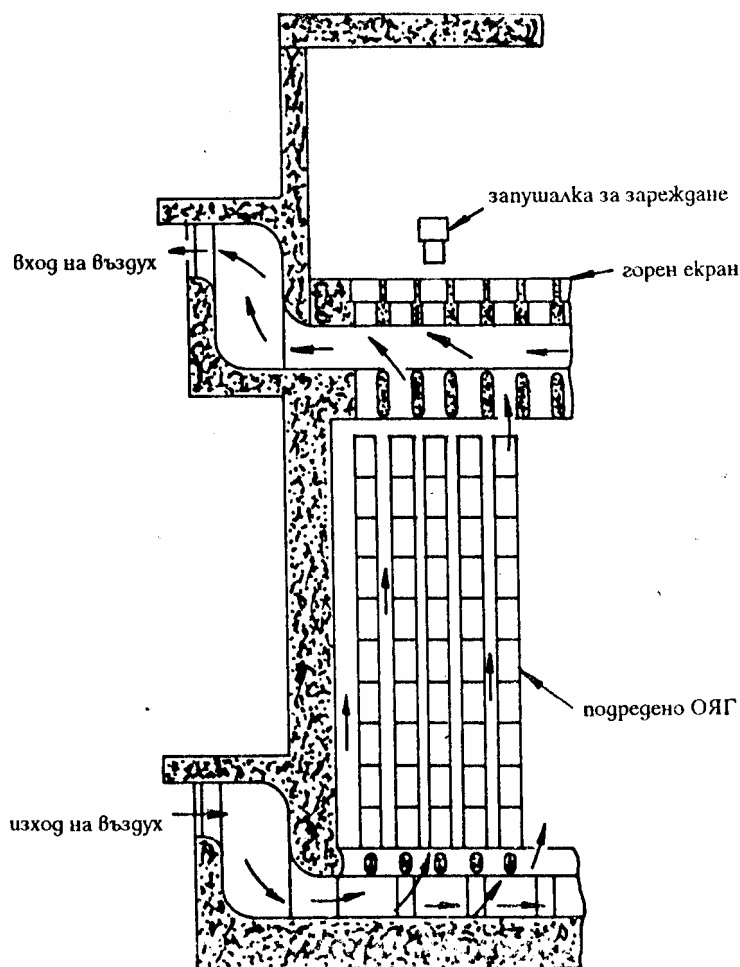


в) СУХ КЛАДЕНЕЦ или СУХ КЕСОН (dry well, dry caisson) - сухият кладенец е стационарна облицована кухина под повърхността на земята за съхраняване на една или повече горивни касети или горивни елементи. Тази технология не се развива.

Защитата се осигурява от заобикалящата кладенеца земя и от защитния затвор (капак). Топлината се отвежда към земята чрез топлопроводност. Тези системи са по-малко използвани за съхранение на ОЯГ и не се развиват.

г) ХРАНИЛИЩЕ (vault) - хранилището е съоръжение, предназначено за сухо съхранение на големи количества ОЯГ. Отработеното гориво може да се съхранява самостоятелно, може да се съхранява в контейнери, а също така може да се съхранява в бетонни силози.

Съществуват два варианта на хранилище - първият е хранилище с конвекционно охлаждане (Фиг. 22.2), вторият е с охлаждане с топлопредаване. И при двата варианта може да се приложи принудителна циркулация на въздуха, но при естествена конвекция не са нужни редица съоръжения (помпи, вентилатори) и освен това пасивните системи имат предимства по отношение на сигурността. При необходимост от филтрация на излизания въздух се налага принудителна циркулация.



Фигура 22.2. Хранилище с конвекционно охлаждане.

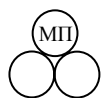
Освен по начин на охлаждане, хранилищата могат да бъдат класирани и по признак модулност. Някои хранилища се състоят от модули, всеки от които самостоятелно отговаря на условията за охлаждане и защита от излъчването на ОЯГ.

Съвременните конструкции за сухо съхранение с пасивно охлаждане са от модулен тип - един общ модул за посрещане и обработка на горивото и много модули за съхранение, построявани според необходимостта.

ОЯГ в хранилищата с пасивно охлаждане (GEC- ALSTHOM, CASCAD) се съдържа в стоманени херметични тръби, с бетонна запущалка за защита.

В първите варианти във всяка вертикална тръба се съдържа само една касета. В по-късните варианти (1993 г.) във всяка тръба се поставят няколко (5-15) касети.

В някои от реализираните и проектирани хранилища всяка касета се поставя в отделен херметизиран цилиндър в инертна атмосфера (в някои случаи заварен цилиндър) и тези цилиндри с касети се поставят във вертикалната тръба, която също се херметизира. При



такова съхранение има две бариери и е възможен контрол на херметичността на металните контейнери с касетите чрез пробоотбор на атмосферата на вертикалната тръба.

Според друг вариант на хранилище с пасивно охлаждане касетите се поставят направо във вертикалната тръба, която се херметизира.

Строените съоръжения са предназначени за период на съхранение 40 - 50 г. с възможност за продължаване до 100 г. Съществуват и варианти за окончателно погребване.

Поради ограниченията за максимална топлинна мощност, ОЯГ е необходимо да отстои дълго време в БОК или ХОГ под вода. За гориво от ВВЕР с дълбочина на изгарянето 30-50 GWd/tU е необходим престой от 5 и повече години под вода.

Вероятно при някои от лицензираните и построени хранилища за сухо съхранение, срокът на съхранение след време ще бъде продължен.

5. Съхраняване на ОЯГ в басейна за отлежаване на горивото

В Таблица 22.4 са показани типични стойности на обема на БОК за различни типове реактори:

Таблица 22.4

тип реактор	типичен обем, m ³
BWR	600-1600
PWR	1000-1600
HWR	2000
ВВЕР-440	400
ВВЕР-1000	1300

БОК за ВВЕР-1000 има около 560 гнезда на един етаж и място за контейнер ТК-13 за пренасяне на касети. За ВВЕР-440 БОК има гнезда за около 500-700 касети на два етажа и място за контейнера ТК-6 за пренасяне на касети.

В БОК на ВВЕР-440 и ВВЕР-1000 има пенал за извършване на контрол на херметичността на топлоотделящите елемент, а също така и херметични гнезда за съхраняване на нехерметични касети.

При презареждане концентрацията на борна киселина в басейна и шахтата на реактора е 12-16 g/kg.

За БОК с уплътняване на касетите подкритичност се осигурява при по-малка стъпка чрез разделителни повърхности от борирана стомана.

6. Транспорт на ОЯГ

Транспортирането на ОЯГ за реакторите ВВЕР-440 и ВВЕР-1000 се извършва с транспортни контейнери, като контейнерът за касети от ВВЕР-440 се транспортира във вертикално положение (ТК-6), а контейнерът за ВВЕР-1000 в хоризонтално положение (ТК-13).

Контейнерите се състоят от външен контейнер, осигуряващ биологичната защита при транспорт, и вътрешен контейнер - "чохъл", в който са подредени касетите с ОЯГ.

Конструкцията на повечето транспортни контейнери са подобни - състоят се главно от две части, като в някои случаи вътрешният контейнер има прегради с неутронни поглъщители за предотвратяване на критичност при нормална експлоатация на контейнера или при разрушаване на горивото. Неутронните поглъщители са от борирана стомана или кристали борен карбид, вградени в алуминий ("Борал", Англия), кадмий - CADMINOX, Франция.

В Таблица 22.5 са дадени характеристиките на транспортните контейнери:

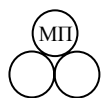


Таблица 22.5. Характеристики на транспортни контейнери за ОЯГ от ВВЕР

	ВВЕР-440	ВВЕР-1000
Брой касети	30	12
Максимално допустима дълбочина на изгаряне GWd/t	40	50
Максимално топлоотделяне kW	15	20
Охлаждане	вода	инертен газ
Макс. температура на повърхността на контейнера, °C	82	-
Максимална температура на ТОЕ, °C	-	350
Максимално работно налягане в контейнера, МПа	0.4	0.5
Мощност на експозиционната доза, mber/h		
-на повърхността на контейнера	200	-
-на разстояние 2 m	10	-

Транспорт се допуска след като температурата в контейнера се стабилизира (3 - 5 дена).

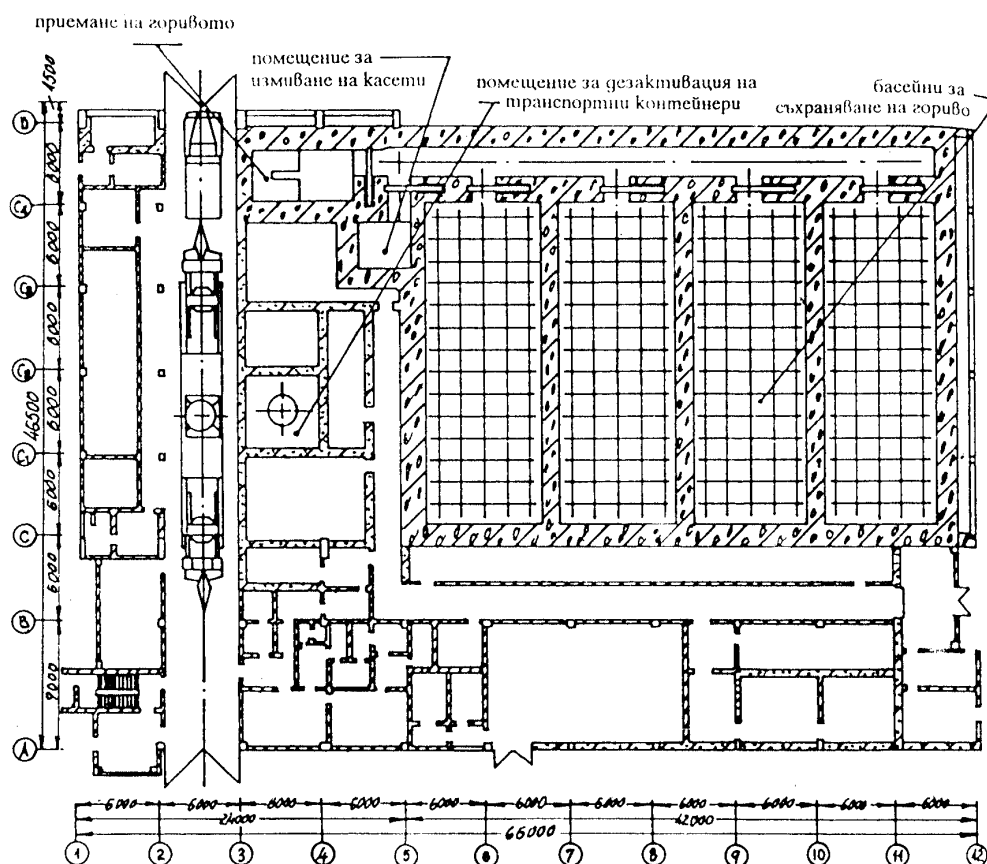
При транспорт е необходимо да се контролира освен дозовото поле от гама-лъчи и потокът от неутрони, тъй като ОЯГ е интензивен източник на неутрони - напр. 30 касети след 3-годишно отлежаване излъчват около $1.5 \cdot 10^9$ n/s. При транспорт под вода освен това има умножение на неутронния поток с коефициент $1/(1-K)$.

7. ХОГ за гориво ВВЕР под вода

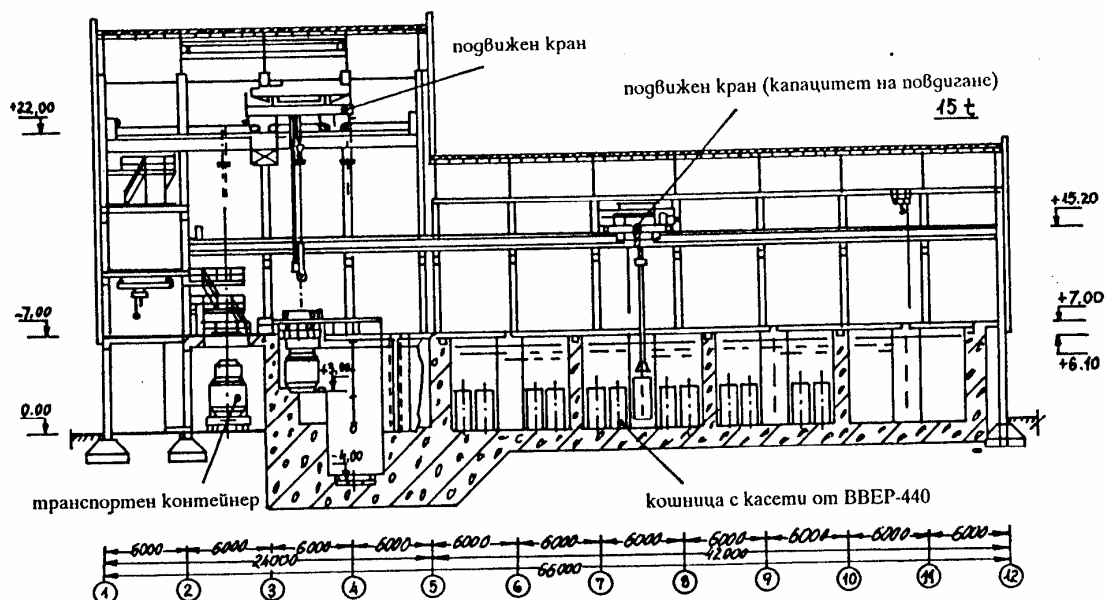
ХОГ е разположен на площадката на АЕЦ, близо до спецкорпус 2 и вентръба 2.

Хранилището е разположено над земята и е фундирано върху льосо-циментова възглавница от 2 m, лежаща върху льосовидни глини. Сеизмичността на района е от VII степен и за категория А на сградата, т.е. от VIII степен съгласно "Правила за строителство в сеизмични райони " от 1964 г. и хоризонтални ускорения от 0.12 g.

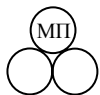
На фигури 22.3 и 22.4 са показани схеми на серийно хранилище от типа на построеното в Козлодуй в хоризонтален и вертикален разрез.



Фиг.22.3. Хоризонтален план на ХОГ от типа на построеното в Козлодуй хранилище



Фиг.22.4. Вертикален разрез на ХОГ от типа на построеното в Козлодуй хранилище



Хранилището се състои от две отделения - отделение за разтоварване на контейнерите и отделение за съхраняване.

Отделението за разтоварване се състои от транспортен коридор, отсек за приемане на контейнерите, шахта за дезактивация и помощни помещения.

Отделението за съхраняване се състои от зала, четири басейна (1 резервен), коридор и шахта за съхраняване на херметичните пенали.

Транспортният контейнер се потапя под вода, чохълът с касетите се изтегля от контейнера и се транспортира до басейните за съхраняване.

Басейните са с размери 23.4 x 8.3x8.3 m и представляват железобетонни конструкции, облицовани с многослойни стени и дъно - слой неръждаема стомана, слой дренажен бетон, слой черна ламарина. Тази структура позволява за всеки басейн независимо да се организира контрол на протечките и събирането им. На дъното на всеки отсек могат да се разположат 56 чохъла. Над горивото има слой вода не по-малко от 2990 mm. Общото количество ОЯГ, което може да се съхранява в хранилището е 600 t (по уран).

Касети с ОЯГ, които при контрол на херметичността са показали дефекти, се съхраняват в хермопенали, за да не замърсяват водата.