

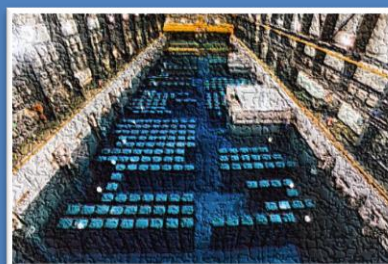
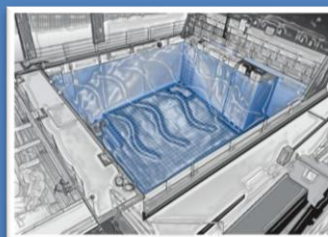


ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

КАТЕДРА „ТОПЛОЕНЕРГЕТИКА И ЯДРЕНА ЕНЕРГЕТИКА“

БОРИС КУЗМАНОВ

ОТЛЕЖАВАНЕ И ВРЕМЕННО СЪХРАНЕНИЕ НА ОТРАБОТЕНО ЯДРЕНО ГОРИВО



Д
О
К
Л
А
Д

София, 2013

СЪДЪРЖАНИЕ

Въведение

I. Отлежаване на касетите с отработено ядрено гориво

II. Временно съхранение на касетите с отработеното ядрено гориво

1. Управление на касетите с отработено ядрено гориво
2. Методи за съхранение на касетите с отработено ядрено гориво

III. Технологични различия и особености на съоръженията за съхранение на отработено ядрено гориво

1. Съоръжения за съхранение на отработено ядрено гориво от мокър тип
 - 1.1. Технология на басейните за съхранение
 - 1.2. Видове конфигурация на басейните за съхранение
 - 1.3. Методи за компактно съхранение
2. Съоръжения за съхранение на отработено ядрено гориво от сух тип
 - 2.1. Видове съоръжения за съхранение на отработено ядрено гориво от сух тип

Заклучение

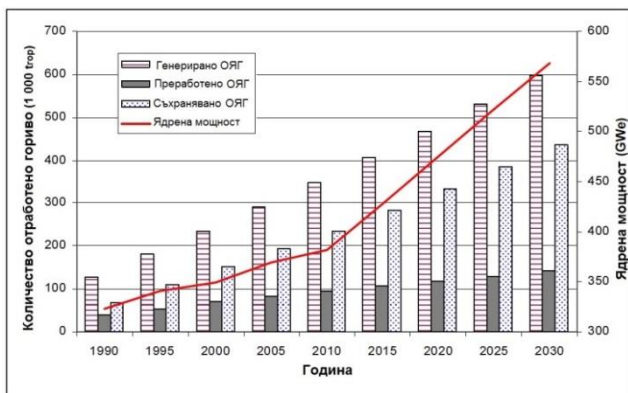
Литература

ВЪВЕДЕНИЕ

Отработеното ядрено гориво (ОЯГ) се генерира в процеса на експлоатация на ядрените реактори и, независимо от техния тип, то трябва да бъде управлявано безопасно след изваждането му от активната зона на реактора. То представлява матрица от първоначално зареденото гориво, но с различно процентно съдържание на дялящите се ядра, натрупани нови такива, както и определено количество продукти на делене. ОЯГ в някои случаи бива разглеждано като радиоактивен отпадък, а в други – като източник на свежо ядрено гориво. В първия случай горивните касети се съхраняват временно за даден период от време, целящ понижаване на тяхната активност и остатъчно топлоотделяне до желаното ниво, след което биват транспортирани до съоръжения за тяхното окончателно геоложко погребване (отворен горивен цикъл). Във втория случай касетите с ОЯГ се съхраняват за кратък период от време, след което се транспортират до преработвателен завод за отделяне на горивната компонента от продуктите на делене, представляващи високоактивни отпадъци (ВАО) (затворен горивен цикъл). Следователно, независимо от избраната стратегия за управление на отработеното гориво, то трябва да бъде съхранявано за известен период от време, който варира от няколко месеца до няколко десетилетия.



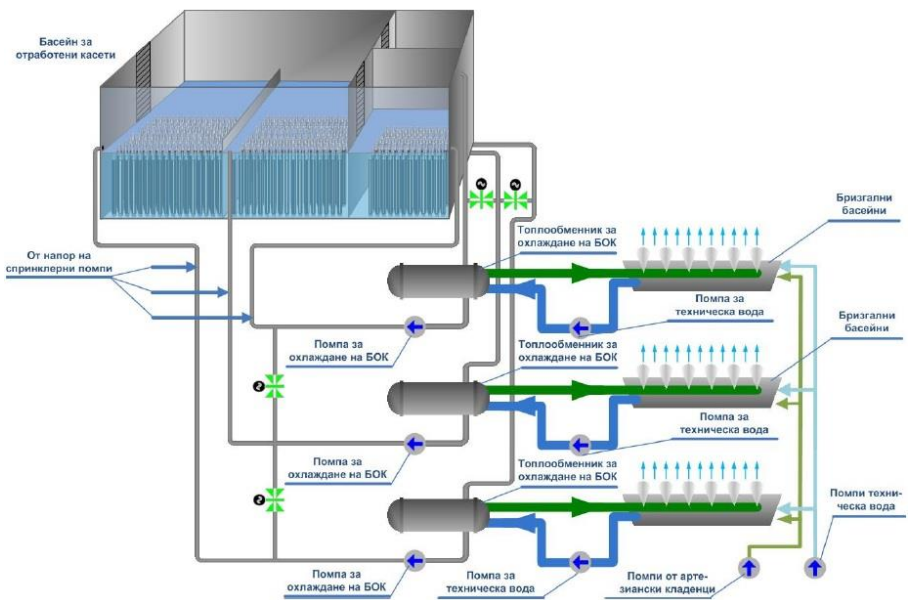
Според оценката, извършена от информационната система за ядрен горивен цикъл (NFCIS – Nuclear Fuel Cycle Information System) на МААЕ, стойността на количеството генерирано отработено ядрено гориво в световен мащаб през 2007 г. е било около 11 000 $t_{\text{ОЯГ}}$ /година и се очаква да се увеличи до около 13 000 $t_{\text{ОЯГ}}$ /година до 2030 г. Настоящата практика е по-малко от една трета от наличния горивен инвентар да бъде преработвана, в следствие на което през 2007 г. е било необходимо около 8 500 тона ОЯГ да бъдат въведени в съоръжения за временно съхранение. В началото на 2008 г. малко повече от 200 000 тона ОЯГ биват съхранявани в различни видове съоръжения, предназначени за тази цел. При запазване на настоящите тенденции в темпа на развитие на заводите за преработване на касетите с ОЯГ, то количеството му през 2030 г. ще достигне до 400 000 тона. Общият капацитет на съществуващите съоръжения за съхранение на ОЯГ (ХОГ) през 2003 г. е 243 800 тона, а общият капацитет на съоръженията, които са в процес на изграждане, е около 24 000 тона. През последните години усиленото изграждане на съоръжения за



сухо съхранение доведе до увеличение на количеството ОЯГ, съхранявано в съоръжения от такъв тип (повече от 12 000 $t_{\text{ОЯГ}}$). Следователно в световен мащаб не се очаква недостиг на съоръжения за съхранение на касети с ОЯГ. На национално ниво, обаче, вероятността това да се случи е доста по-голяма, тъй като има вероятност да не е възможно увеличаване на капацитета на съществуващите съоръжения или да не бъдат изградени нови такива в необходимия срок.

I. ОТЛЕЖАВАНЕ НА КАСЕТИТЕ С ОТРАБОТЕНО ЯДРЕНО ГОРИВО

Ядреното гориво, което е престояло в активната зона на ядрения реактор за период, гарантиращ достигане до определено ниво на дълбочината на изгаряне, при което е изчерпан запасът от реактивност, се нарича отработено ядрено гориво. То трябва да бъде заменено със свежо ядрено гориво, т.е. ядреният реактор да бъде спрян за презареждане. След процеса на презареждане на реактора отработеното гориво се съхранява в басейн за отлежаване на касетите (БОК) при реактора за определен период от време (до 5 години) до спадане на активността му до дадено ниво. След като бъде извадено от реактора, отработеното гориво продължава да излъчва радиация в следствие на процеса на разпадане на ядрата на продуктите на делене, а също така и топлина. Следователно БОК трябва да е в състояние да осигури както нужната подкритичност на горивото, т.е. недостигане на критична маса, така и да отвежда отделената от горивните касети топлина. Това се постига чрез запълването му с воден разтвор на борна киселива (H_3BO_3) с концентрация $15 \div 22 \text{ gH}_3\text{BO}_3/\text{kgH}_2\text{O}$. Водата в БОК представлява също и биологична защита, а касетите с ОЯГ се охлаждат посредством циркулацията ѝ през външни повърхностни топлообменни апарати, при което се отвежда отделящата се топлина. Като охлаждащ агент за тези топлообменници се използва също вода, която се осигурява от системите за техническо водоснабдяване на отговорни потребители (бризгални басейни), при които като краен поглътител на топлината се явява атмосферата (фиг. 1).



Фиг. 1. Басейн за отработени касети (БОК) на 5-ти и 6-ти енергоблок на "АЕЦ Козлодуй" ЕАД

II. ВРЕМЕННО СЪХРАНЕНИЕ НА КАСЕТИТЕ С ОТРАБОТЕНО ЯДРЕНО ГОРИВО

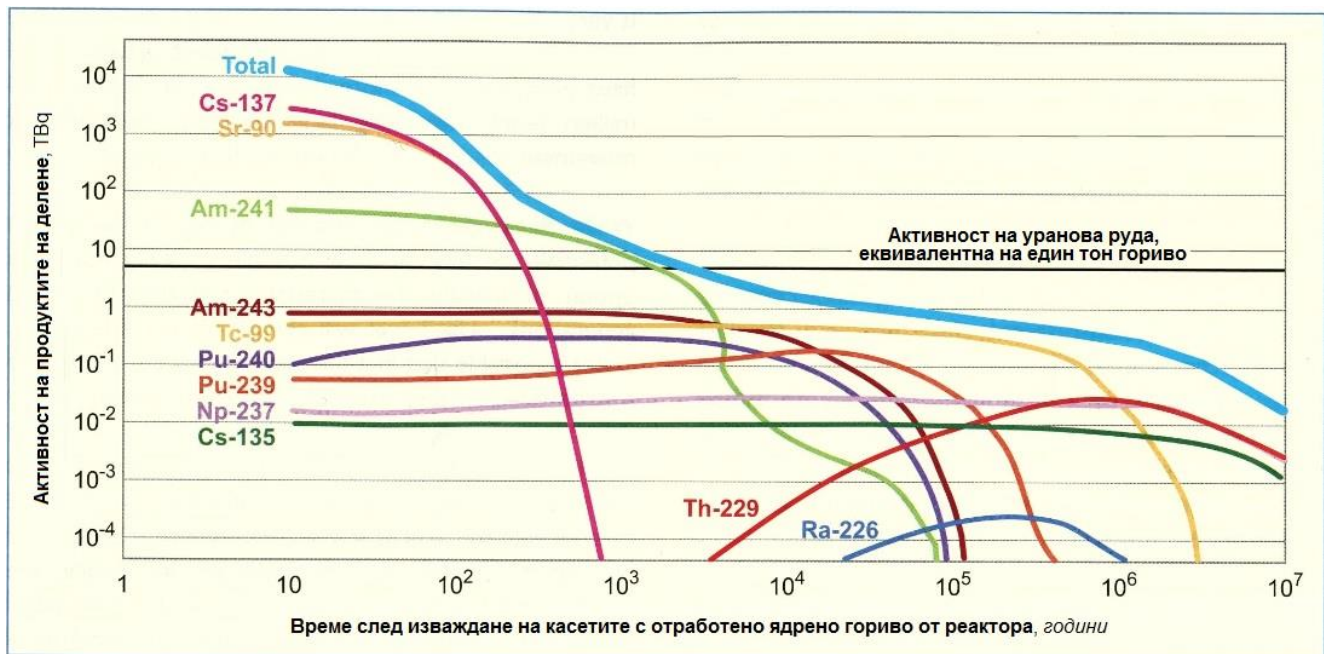
Отработеното ядрено гориво трябва да бъде съхранявано за определен период след презареждането на реактора, независимо от начина за неговото управление, което представлява междинен етап от „задния край“ (back-end) на горивния цикъл. Въпреки това, продължителността на периода на съхранение зависи именно от метода на управление на ОЯГ, както и от вида на изгаряното гориво (вид горивна матрица, концентрация на изотопите, първоначално ниво на обогатяване и т.н.).

1. Управление на касетите с отработено ядрено гориво

При вариант на отворен ядрен горивен цикъл (ЯГЦ) следващ етап след отлежаване на горивните касети за кратък период от време в басейн при реактора (БОК) е съхранението им в хранилище за отработено ядрено гориво (ХОГ). В ХОГ касетите с ОЯГ могат да преседят за среден или дълъг период от време, след което да бъдат разположени в съоръжения за окончателното им погребване.

Ако държавата, експлоатираща ядрени мощности, е избрала политика на управление на ядреното гориво, отговаряща на затворен ЯГЦ, то след престоя си в БОК горивото се рециклира в радиохимичен преработвателен завод, като по този начин се спомага за увеличаване на наличния ядрен горивен ресурс.

Наличните решения за съхранение на касетите с ОЯГ позволяват на ядрените енергийни предприятия да управляват собственото отработено гориво в продължение на няколко десетилетия. Предизвикателство в дългосрочен план (фиг. 2) представлява окончателното погребване на наличния собствен инвентар от ОЯГ на ЯЕЦ, което се разглежда от националните ядрени програми за погребване на радиоактивни отпадъци (РАО).



Фиг. 2. Активност на високоактивните отпадъци (ВАО) в един тон отработено ядрено гориво

2. Методи за съхранение на касетите с отработено ядрено гориво

Наличните понастоящем технологии за съхранение на отработено ядрено гориво според вида на използваната охлаждаща среда се разделят най-общо на два основни типа:

- Мокър тип;
- Сух тип.

➤ *Мокро съхранение на касетите с ОЯГ*

Мокрият начин на съхранение на ОЯГ е метод, който се експлоатира от повече от 30 години. Касетите с ОЯГ се съхраняват във вертикални кошници. Обикновено кошниците се правят от неръждаема стомана с вложен в нея бор, за да се избегне достигането на критична маса. Температурата на използваната за охлаждане на ОЯГ вода е под 40°C. Водата постоянно се пречиства, чрез което активността се поддържа по-ниска от 10⁷ Вq/m³.

➤ *Сухо съхранение на касетите с ОЯГ*

Методът на сухо съхранение се осъществява, като отвеждането на отделената топлина от ОЯГ се осигурява чрез използването на въздух, азот, въглероден диоксид или инертен газ. Настоящите констатации за съхраняването на ОЯГ във въздушна среда са, че максималната температура на обвивката на ТОЕ не трябва да надвишава 140÷150°C. Според предварителни оценки при тези условия допълнителното окисляване на циркониевата обвивката ще бъде по-малко от 10 µm за период от 50 години. По отношение на съхранението на ОЯГ в инертен газ, за да се избегне риск от окисление на обвивката на ТОЕ и от пълзене на метала, извършените експерименти и изчисления довеждат до препоръката за ненадвишаване на максималната ѝ температура повече от диапазона 350÷400°C.

III. ТЕХНОЛОГИЧНИ РАЗЛИЧИЯ И ОСОБЕНОСТИ НА СЪОРЪЖЕНИЯТА ЗА СЪХРАНЕНИЕ НА ОТРАБОТЕНО ЯДРЕНО ГОРИВО

Вариантът на мокро съхранение във времето е използван основно при съоръженията, предназначени за отлежаване на касети с отработено ядрено гориво (басейн при реактора – *фиг. 3*), а също и при съоръженията за временно съхраняване (хранилища за съхранение на касетите на площадката на електроцентралата или извън нея – *фиг. 4*). При съоръженията за сухо съхранение се различават няколко разновидности според техните конструктивните различия (*табл. 1*).

Табл. 1. Технически варианти и употреба на хранилища за съхранение на отработено ядрено гориво

Тип	Вариант	Топлообмен / топлоносител	Преграда срещу разпространение на радиоактивни продукти на делене (охлаждаща среда)	Биологична защита	Особеност	Примери
Мокър	Басейн	Лека вода	Вода/сграда (лека вода)	Лека вода	Класически	Повечето БОК и много от ХОГ по света
Сух	Метален контейнер	Топлопроводност през стената на контейнера	Двоен капак / метално уплътнение (инертен газ)	Метална стена	Двучелеви	CASTOR, TN, NAC-ST / STC, BGN Solutions
	Бетонен контейнер / силос	Въздушна конвекция около вътрешния контейнер	Обшивка на кухините / уплътняване чрез заваръчни съединения (инертен газ)	Бетон и метално покритие	Вертикален	CONSTOR, HI-STORM / HI-STAR
	Бетонен модул	Въздушна конвекция около вътрешния контейнер	Запечатване на контейнера (инертен газ)	Бетонна стена	Хоризонтален	NUHOMS NAC-MPC / UMS MAGNASTOR
	Хранилище	Въздушна конвекция около тръбата	Тръба (инертен газ)	Бетонна стена	Няколко случая	MVDS MACSTOR
	Сух кладенец / тунел	Топлообмен през земната повърхност	Контейнер (инертен газ)	Земна повърхност	Подземен	Не е осъществен / комерсиализиран

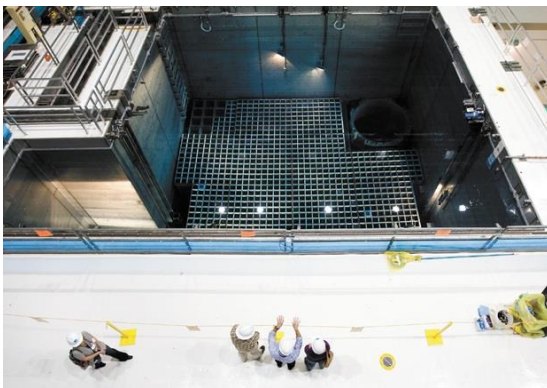
1. Съоръжения за съхранение на отработено ядрено гориво от мокър тип

Съоръженията за съхранение на касетите с отработено ядрено гориво от мокър тип по същество представляват водни басейни. Използването на тези басейни за съхранение на отработеното гориво е установена практика още от ранните години на ядрената енергетика за мирни цели, поради възможността да се използва леката вода едновременно като топлоотвеждащ агент и биологична защита. Поради тази причина този метод за съхранение е добре усвоена и изучена технология, която гарантира безопасното управление на касетите с отработено ядрено гориво.

1.1. Технология на басейните за съхранение

Басейните за съхранение на отработено ядрено гориво са проектирани да отговарят на следните основни изисквания:

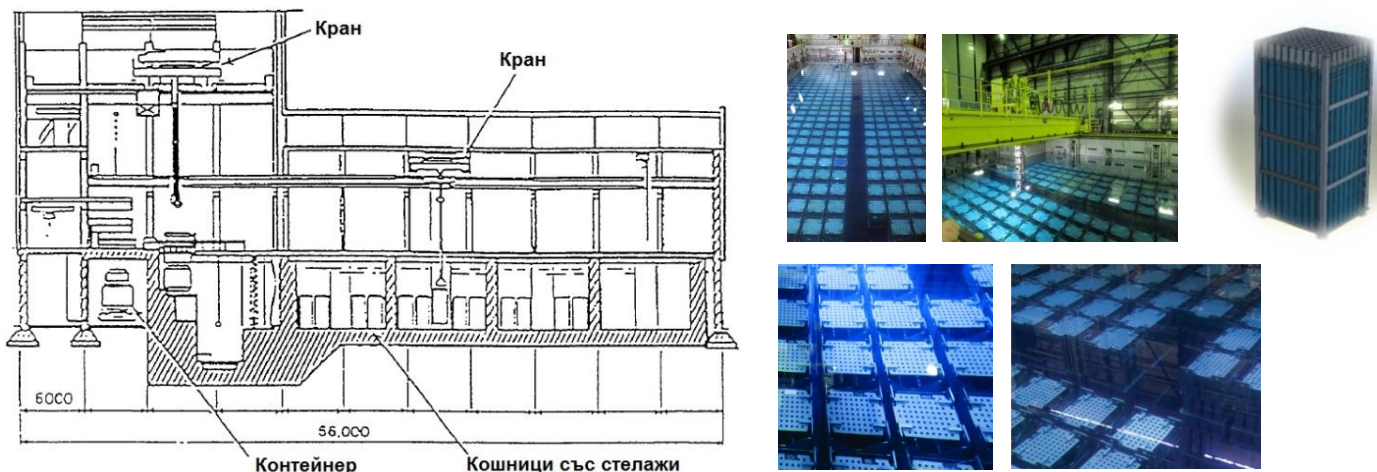
- Да задържат водата и да минимизират течовете, които трябва да бъдат в такова количество, което е практически разумно, установимо и събираемо;
- Да бъдат експлоатируеми по всяко време в периода на проектния си живот и да гарантират толкова ниско ниво на погълнатата доза радиация от персонала, колкото е разумно достижимо (ALARA);
- Да бъдат експлоатируеми в случаи на екстремни метеорологични условия или при увеличаване на температурата на водата, породено от неизправност в системата за охлаждане;
- Да гарантират безопасни условия за съхранение на отработеното гориво дори след появата на сеизмично събитие.



Фиг. 3. Общ вид, основни елементи и следени параметри на басейн за отлежаване на касети с отработено ядрено гориво при реактора

Някои от техническите характеристики на съоръженията за съхранение на отработено ядрено гориво от мокър тип са, както следва:

- Повечето басейни имат вътрешна облицовка от неръждаема стомана. Заваръчните ѝ съединения се проверяват постоянно посредством безразрушителен анализ, чрез което се локализируют възникналите по време на експлоатация течове;
- Течовете от басейна могат да се следят както чрез интегрирана система за събиране на течове, така и чрез двустенно междинно пространство в басейна. И в двата случая водата, възстановена от изтичанията, трябва да се пречисти преди да бъде върната обратно в него;
- Водата в басейна се охлажда и пречиства посредством топлообменни апарати и йонообменни филтърни инсталации. Те могат да бъдат инсталирани както в самия басейн, така и извън него. Обикновено водата в басейна е под 40°C, а дъното му се почиства, за да се избегне натрупване/утаяване на продукти на корозия.
- Активността на водата в басейна се поддържа на ниски нива в границите на $1,85 \div 3,7 \cdot 10^7 \text{Bq/m}^3$. При нормална експлоатация на басейна ^{60}Co е основният източник на радиация в него. Разхерметизиралите се горивни касети се съхраняват в специално проектирани за целта херметични отсеци, за да се избегне повишаване на активността на водата в басейна (особено от ^{137}Cs);
- При контролиране на активността при някои от басейните в допълнение към йонообменните инсталации се прилага и определен водно-химичен режим за:
 - контролиране на рН,
 - гарантиране на подкритичност чрез поддържане на определени борни нива (концентрация на H_3BO_3),
 - поддържане на ниски нива на агресивни аниони (хлоридни, сулфатни) за минимизиране на корозията на горивните касети.
- Поддържането на добър водно-химичен режим гарантира добра чистота на водата и предотвратява образуването на микроорганизми в нея. Ако все пак се образуват, те биват третирани чрез дозиране във водата на специфични биоцидни химикали;
- При правилно поддържани басейни средните нива на дозата, погълната от оператор, могат да бъдат сведени до 1 mSv/година/оператор.



Фиг. 4. Общ вид и основни елементи на хранилище за съхранение на касети с ОЯГ от мокър тип

Въпреки че има множество общи характеристики между различните съоръжения за съхранение на ОЯГ от мокър тип, някои от съществуващите различия в концепцията на проектите им се дължат на местни експлоатационни или регулаторни изисквания.

1.2. Видове конфигурации на басейните за съхранение

Докато техническите характеристики на съоръженията за съхранение от мокър тип са сходни, то има значителни разлики по отношение на конфигурацията им. Това се дължи най-вече на някои предварително съществуващи местни условия за управление и съхранение на отработеното ядрено гориво.

➤ *Единичен басейн (single pool)*

Това е най-простият вариант за оформление, който е използван при повечето басейни за отлежаване на касетите (БОК) с малък капацитет. Поради специфичното разположение на БОК в електроцентралата евентуално физическо увеличаване на капацитета му е изключително трудно, дори невъзможно. Като цяло единствената налична възможност за увеличаване на капацитета за съхранение на БОК е чрез пренареждане на стелажите с максимална гъстота.

➤ *Последователност/серия от басейни (serial pools)*

В някои случаи множество броя от допълнителни басейни могат да бъдат свързани в серия посредством поставяне на шлюзове върху стените между тях (или подводни тунели, транспортъори и др.). Това е характерно за случаите, които допълнителен дял/сегмент бива конструиран като допълнение към съществуващия(те) басейн(и) с цел увеличаване на капацитета му(им). В следствие на това касетите с отработено ядрено гориво трябва да бъдат преместени през басейните посредством кран, за което е необходимо да се гарантира необходимото за целта пространство. В такъв случай се усложнява изолирането на басейна при възникване на теч или друга аварийна ситуация.

➤ *Паралелни/успоредни басейни (parallel pools)*

По подобен начин множество по брой басейни могат да бъдат свързани успоредно чрез шлюзове, разположени върху стени с общ воден канал по между им. Възможно е всеки един от басейните да се отдели/изолира от останали с оглед на изпразването му за регулярни ремонтни дейности или в случай на авария. И в двата случая е необходимо да се гарантира водонепроницаемост на шлюзовете по време на дейностите по преместване на касетите с ОЯГ към и от водните канали, както и по време на съхранение.

1.3. Методи за компактно съхранение

➤ *Пренареждане на стелажите (re-racking)*

С увеличаване на нуждите от съоръжения за съхранение на отработеното ядрено гориво повечето компании, на които е собственост то, прибегват до най-лесния и евтин начин за справяне с проблема, а именно чрез пренареждане на стелажите на вече съществуващите басейни. По този начин се увеличава капацитета за съхранение на басейните, тъй като горивните касети се

разполагат по-близо една до друга. Това изисква замяна на стелажите с такива с вложен в тях поглътител на неутрони (борно уплътняване) и разполагането им по-нагъсто. Пренареждането на стелажите може да доведе до увеличаване на капацитета за съхранение на басейна с 40% до над 100% , в зависимост от конкретната ситуация.

Преди да се извърши пренареждане на стелажите е необходимо да се установи, че басейнът има структурната способност (механична здравина/якост) да приеме допълнителната маса. В случаите на по-голяма гъстота на разполагане на стелажите за съхранение обикновено за поглъщане на неутроните се използват разделителни прегради с неутронни поглътители, с което се удовлетворява изискването за подкритичност. Различават се няколко концепции на използваните поглътители на неутрони, които отличават проектите на различни производители (борирана стомана, бориран алуминий между стоманени прегради, кадмиеви съединения и др.).

Предвид икономическата си целесъобразност и сравнително лесния начин за изпълнение, пренареждането на стелажите вече е било използвано интензивно в повечето от ядрени електроцентрали по света. В някои централи, обаче, има малка възможност за допълнително разполагане на касети с отработено гориво чрез повторно пренареждане на кошниците със стелажи в съоръженията за мокро съхранение на ОЯГ.

➤ *Други методи*

Налични са и няколко други метода за съхранение на допълнително количество отработено гориво във вече изградените съоръжения, а именно:

1) *Групиране по двойки на кошниците с отработено ядрено гориво*

Прилагане на техниката за сдвояване (групиране по двойки) е възможно само в редки случаи, когато условията в басейна са подходящи за такъв вид подреждане. В тези случаи възникват въпроси, свързани с теглото на съхранявания продукт и сеизмичната устойчивост на басейна. Също така чрез използването на този метод се затруднява достъпът до някои от касетите с отработено гориво, в следствие на което възникват проблеми, свързани с гарантиране на сигурността и с отговаряне за цялостното поддържане на нормалните експлоатационни условия в басейна.

2) *Обединяване на горивните пръти от всички касети с отработено ядрено гориво*

Чрез обединяване на горивните пръти от касетите с ОЯГ може да се постигне удвояване на капацитета на басейна за съхранение. Горивните пръти от две касети с отработено ядрено гориво се поставят под вода в кошница/контейнер на мястото, отговарящо по геометрични размери на една горивна касета. Според приетата концепция за експлоатация негоривните носещи компоненти (**NFBCs** – **non-fuel bearing components**) на касетите се уплътняват и съхраняват поотделно или се освобождават от специален надзор след процес на дезактивация.

3) *Съвременни концепции на съоръжения за съхранение на отработено ядрено гориво от мокър тип (басейни)*

Някои съвременни концепции на басейни за ОЯГ обединяват в себе си различни характеристики с цел подобряване на някои от известните недостатъци на съоръженията за съхранение от мокър

тип. Например тези подобрения могат да включват охладителни и пречиствателни инсталации от модулен тип, които се разполагат вътре в басейна с помощта на оборудване за потопяване.

При новите конструкции на басейни за съхранение са налице също и подобрения в сигурността (напр. защитно бетонното покритие над нивото на водата в басейна).

Въпреки това, нито едно от тези подобрения не способства за увеличаване на капацитета за съхранение на басейна или за намаляване на инвестиционните разходи.

2. Съоръжения за съхранение на отработено ядрено гориво от сух тип

Различават се няколко проекта на съоръжения за съхранение на касетите с отработено ядрено гориво от сух тип, които се предлагат от производители от различни страни. Принципно тези проекти са до голяма степен сходни, но имат и някои съществени различия, които са основно от конструктивен характер.

2.1. Видове съоръжения за съхранение на отработено ядрено гориво от сух тип

Различните видове съоръжения за сухо съхранение на ОЯГ се делят на четири основни типа:

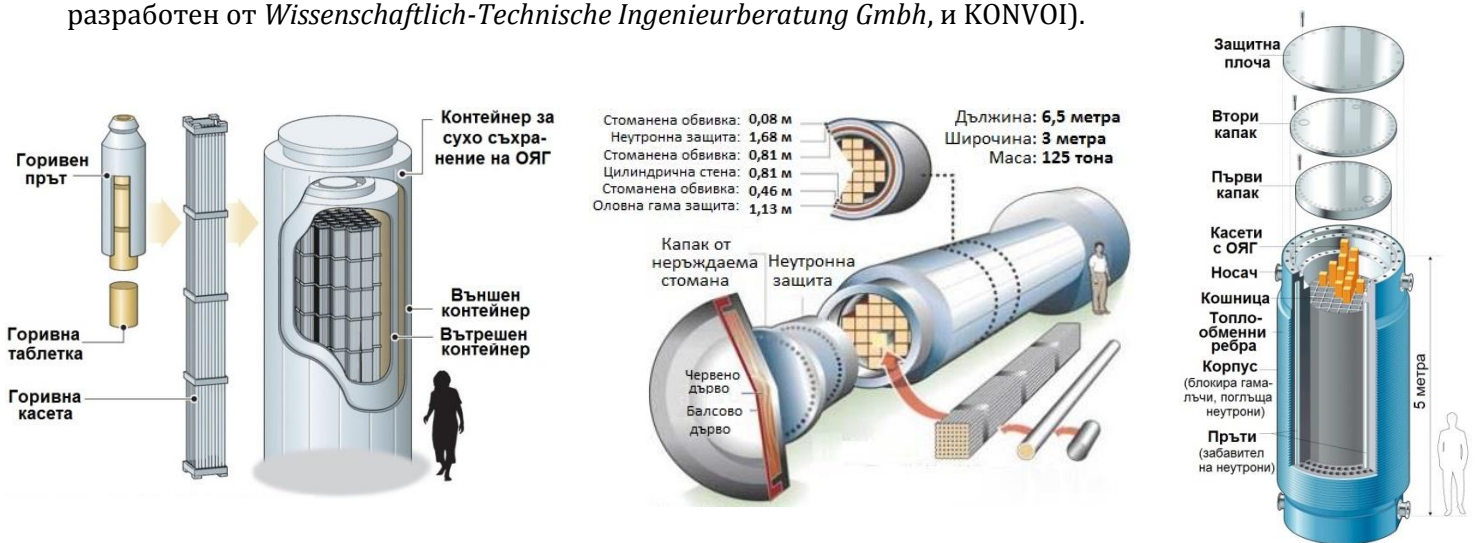
- Метален контейнер;
- Бетонен контейнер/силос/модул;
- Хранилище;
- Други (кладенец, тунел и т.н.).

Основните технически характеристики, според които могат да се групират съоръженията биват: начин/метод за осигуряване на топлоотвеждането от горивото, тип на неутронна и гама- защита, транспортируемост, местонахождение според геологичната повърхност, степен на независимост на всяка от единиците (контейнерите) за съхранение и структура на съоръжението за съхранение на отработено гориво. Те също се различават и според това какви конструкционни материали са използвани за направата им, както и според размерите им, модулност, конфигурация на касетите с ОЯГ, направление на контейнера за съхранение (хоризонтален или вертикален) и методи за управление на касетите с ОЯГ.

➤ **Метални контейнери (metal casks)**

Металните контейнери (фиг. 5) могат да бъдат проектирани по начин, който да осигурява използването им само като съоръжения за съхранение на ОЯГ, а също и по начин, който обезпечава използването им както за съхранение, така и за транспортиране на касетите с ОЯГ (двуцелеви контейнери). Защитата от неутронно и гама-лъчение се осигурява от структурните материали на контейнера, които могат да бъдат кована стомана, метални листове или композитни материали. Обикновено контейнерите за сухо съхранение се изпълняват във вертикално направление, като биват съхранявани на открито върху бетонен фундамент. Въпреки това в някои страни в Европа (Швейцария, Германия и др.) контейнерите се съхраняват в сгради/халета, като в някои случаи

затворените обеми се изграждат с дебели бетонни стени (напр. в Германия – концептите WTI, разработен от *Wissenschaftlich-Technische Ingenieurberatung GmbH*, и KONVOI).



Фиг. 5. Общ вид и основни елементи на метален контейнер за сухо съхранение на отработено ядрено гориво

Основните компоненти на металните контейнери за сухо съхранение на ОЯГ са:

- Кошница за ОЯГ, която ограничава и поддържа горивните касети, предава топлината от горивото на стените на контейнера и поглъща генерираните неутрони, с което се удовлетворяват изискванията за подкритичност;
- Вътрешен контейнер, който обикновено представлява цилиндър с интегрирано заварено дъно от въглеродна стомана, заварен кован фланец, капак от въглеродна стомана с фланцеви и болтови съединения и проникващи в капака отвори. Има два проникващи отвори в контейнера за съхранение, като и двата са в капака: единият е за дрениране, а другият - за вентилиране на контейнера. За всеки отвор е осигурен двойно уплътнен затварящ механизъм. При затваряне на контейнера за съхранение с капак той се уплътнява с двойни метални O-образни уплътнения, в които са предвидени пространства/кухни за мониторинг на междупространствените изтичания. За да се изключи възможността за изтичане на въздух извън контейнера, в кухнята се създава налягане над атмосферното посредством подаване на хелий;
- Гама- защита около стените на контейнера за съхранение, която се осигурява от отделна облицовка, а около дъното - чрез плоча от въглеродна стомана, която е заварена към фланеца за затваряне на контейнера;
- Неутронна защита, обграждаща гама- защитата, която е обвита с външна стоманена обвивка за допълнителна защита от неутронно лъчение. Неутронната защита, от своя страна, се осигурява от борирана полиестерна смола.
- Защитно покритие на капака за затваряне на контейнера и уплътняващите го компоненти срещу атмосферни събития;
- Система за мониторинг на налягането в контейнера;
- Комплект горни и долни носачи, чрез които е възможно осъществяване на повдигане и въртене на контейнера за съхранение.

➤ **Бетонни контейнери, силози и модули (concrete casks, silos and modules)**

1) **Бетонни контейнери (concrete casks)**

Бетонни контейнери (фиг. 6) са подобни по форма на металните, с изключение на бетонната външна опаковка/обвивка, която осигурява биологична защита, и стоманената обвивка в кухината на вътрешния контейнер, представляваща преграда срещу разпространение на радиоактивните продукти на делене. Един типичен бетонен контейнер се състои от следните компоненти:

- Транспортируем стоманен контейнер за съхранение (**TSC – transportable storage canister**), който представлява кръгъл цилиндричен корпус със заварена долна плоча, проектирана да издържа теглото на касетите с отработено гориво;
- Кошница със стелажи за касетите с ОЯГ;
- Защитен капак;
- Две облицовъчни покрития на проникващите отвори;
- Структурен капак.



Фиг. 6. Общ вид и основни елементи на вертикален бетонен контейнер за сухо съхранение на ОЯГ

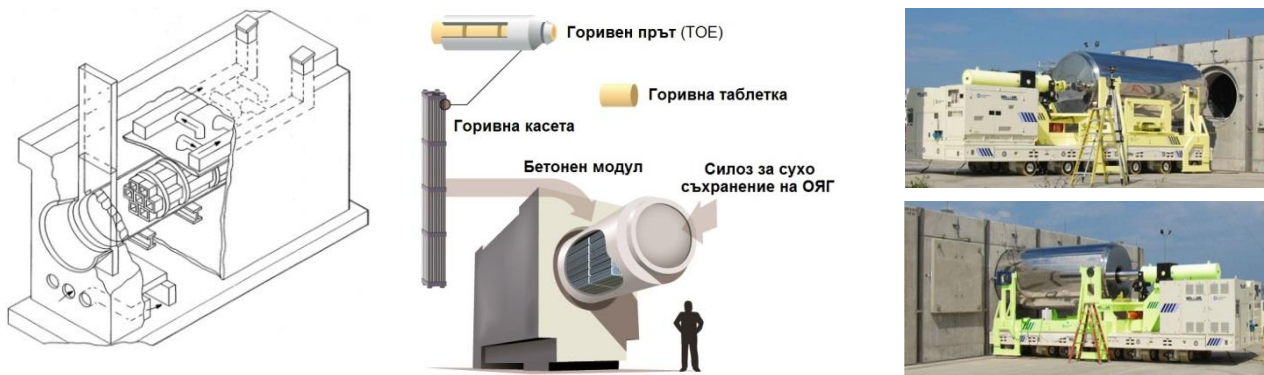
Бетонната обвивка на TSC при период на продължително съхранение на горивото осигурява структурна здравина, биологична защита, защита от външни въздействия (условия на околната среда) и охлаждане на контейнера чрез естествена конвекция. Тя обикновено представлява стоманобетонна конструкция с вътрешната обвивка от въглеродна стомана и пръстеновиден въздушен канал, чрез който се осигурява естествената циркулация на въздуха около TSC.

2) **Бетонни силози (concrete silos)**

Силозите представляват големи монолитни структури, обикновено изработени от предварително напрегнат стоманобетон. Бетонът осигурява биологична защита, но ограничението срещу разпространението на продуктите на делене се предоставя от вътрешна стоманена обвивка. Стоманената обвивка се запечатва, след като бъдат заредени касетите с отработено гориво. Използването на вътрешно охлаждане позволява значително количество топлина да бъде отстранено от корпуса и предпазва от прегряване и деградация на бетонния материал. Подобно на бетонните контейнери, тук също се изисква разработване на специално оборудване и системи за зареждане/изваждане на отработеното ядрено гориво в/от контейнерите за транспортиране.

3) Бетонни модули (concrete modules)

Системата за съхранение NUHOMS е пример за хоризонтален бетонен модул (фиг. 7). Системата използва запечатани метални силози за съхранение на отработеното гориво. Горивото се поставя вертикално в силозите, които се съхраняват в хоризонтално направление вътре в бетонните модули. На място се използват контейнери за пренасяне, които служат за прехвърляне на силозите с гориво в хоризонталните бетонни модули за съхранение. Металните силози за съхраняване на ОЯГ се затварят посредством използването на два капака. Те се запечатват чрез заваръчни съединения, след което се тестват за херметичност. Някои запечатани метални силози могат да бъдат лицензирани и за превозване на ОЯГ, като част от пакет за транспортиране.



Фиг. 7. Общ вид и основни елементи на хоризонтален бетонен модул за сухо съхранение на ОЯГ

➤ Хранилища (vaults)

Хранилището представлява стоманобетонна конструкция, съдържаща последователност от камери за съхранение, построена над или под земята (фиг. 8). Биологичната защита се осигурява от обграждаща структура. Предлаганите на пазара системи за съхранение на ОЯГ от типа хранилище са разположени над нивото на земната повърхност. При тях топлината обикновено се отдава на атмосферата чрез процес на естествена конвекция между въздуха и външната повърхнина на камерите. Всяка камера за съхранение може да съдържа една или повече касети с ОЯГ, съхранявани в метални тръби или цилиндри за съхранение (контейнери).

Отработеното гориво се зарежда в тези цилиндрични тръби или на място (в зала за зареждане) посредством машина за управление на горивото, или извън него - в БОК. Самото хранилище може да бъде със сравнително прост дизайн, но изисква допълнителна инсталация за приемане и управление на касетите с отработено ядрено гориво. Концепцията на хранилищата за съхраняване на ОЯГ позволява използване на модулна конструкция и частично увеличаване на капацитета в последствие.



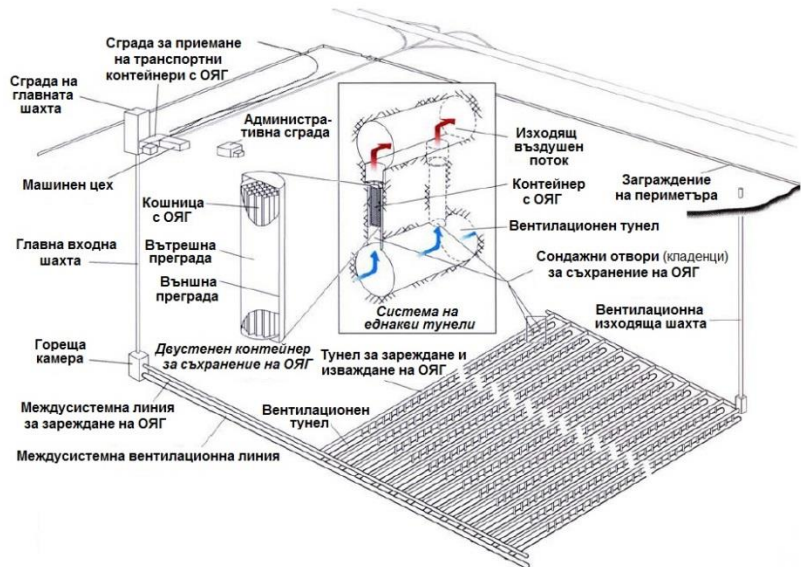
Фиг. 8. Общ вид на хранилище за сухо съхранение на отработено ядрено гориво

1) Сух кладенец (*dry well*)

Сухият кладенец представлява вертикален подземен секционирен единичен отвор (кухина). Всеки отвор може да бъде проектиран така, че да съхранява по няколко касети с отработено гориво. Действителният брой на горивните касети се определя от вида на горивото и от средствата за съхранение. Биологичната защита се осигурява от заобикалящата земна повърхност и от покриващия защитен цилиндър (запущалка). Отвеждане на топлината се осигурява главно чрез топлопроводимост към земната повърхност (околната среда).

2) Концепция на еднакви тунели (*twin tunnel concept*)

Това е подземен метод за съхраняване на касетите с ОЯГ (фиг. 9), който съчетава концепцията на сухия кладенец с разположение от тунелен тип в хранилище за геоложко погребване, с оглед на дълговременно съхранение преди окончателното погребване или изваждане на касетите за повторна употреба (рециклиране).



Фиг. 9. Общ вид и основни елементи на концепцията на еднакви тунели за сухо съхранение на ОЯГ

Всяка от концепциите за сухо съхраняване на ОЯГ има отвори/кухини, запълнени с уплътняващ и охлаждащ газ, който може да бъде въздух, азот, въглероден диоксид или някой инертен газ (напр. хелий, аргон, неон и др.). Циркулацията на охлаждащата среда се осъществява на пасивен принцип, което гарантира по-ниски начални инвестиционни разходи (напр. не е нужно инсталиране на система за осигуряване на циркулацията на флуида от активен тип, както и нейното поддържане в процеса на експлоатация на съоръжението, както е случаят при съоръженията за мокро съхраняване на ОЯГ). Също така пасивността на системата за охлаждане понижава риска от авария и повишава нивото на ядрена безопасност и сигурност. Това се дължи на отсъствието на възможност за отказ на системата за охлаждане на касетите с ОЯГ, поради неналичието на агрегати, които да отговарят за циркулацията на флуида (напр. помпени агрегати, както при басейните за съхранение на отработено ядрено гориво).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съхранението на отработено ядрено гориво в съоръжения от мокър тип в настоящия момент се счита за достатъчно добре усвоена („зряла“) технология. От друга страна през последните три

десетилетия съоръженията за съхранение на ОЯГ от сух тип са в непрекъснат процес на развитие и усъвършенстване, поради което те също могат да се считат на този етап за добре развита технология.

Всички налични технологии за съхранение имат специфични предимства и недостатъци, които могат да преобладават в зависимост от ситуацията. Абсолютно необходимо е да бъдат изготвени подробни критерии за необходимите съоръжения за изграждане още в самото начало на проекта за съхранение на отработено ядрено гориво. Тези изисквания или особености оказват много голям ефект върху избора на технология и капиталовите разходи за съоръженията, които ще бъдат построени.

Например, по отношение на начални капиталови разходи, басейните винаги са по-скъпи. Но температурите на съхранение са значително по-ниски от тези, характерни за съоръженията за сухо съхранение. Басейните осигуряват възможност за съхранение на голямо количество гориво с високо обогатяване и висока дълбочина на изгаряне (вкл. смесено (уран-плутониево) окисно гориво), което е трудно постижимо при съоръженията за съхранение на ОЯГ от сух тип. Те, също така, са относително удобни за гарантиране на необходимите предпазни мерки (добра охлаждаща способност на водата) и провеждане на инспекции на горивото по време на периода на неговото съхранение (прозрачност на водата).

От друга страна, контейнерите за сухо съхраняване на ОЯГ имат по-ниски начални капиталови разходи, по-добра модулност и пасивност (напр. неналичие на необходимост от активни системи за охлаждане, както при басейните). Контейнерите, предназначени едновременно за съхраняване и транспортиране, също така допускат непосредствено управление на отработеното гориво. Икономическото значение на различните особености на съоръженията за съхранение на ОЯГ могат да се определят единствено чрез задълбочена оценка на наличните варианти за изграждане, характеризиращи се със специфичните местни изисквания и ограничения на площадката.

Следователно изводът е, че независимо от вида на съоръженията за съхранение на отработено ядрено гориво, като цяло те предоставят необходимите условия за безопасното съхраняване на горивото за кратък, среден, а дори и дълъг период от време, което е в резултат на натрупания дългогодишен опит от експлоатацията на тези съоръжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Вапирев, И. Христосков, Съхраняване на отработено ядрено гориво. Технология и опит, Библиотека „Ядрена безопасност и радиационна защита“, БалБок, София, 1994.
2. В. Велев, К. Филипов, Ядрени горива, ИФО Дизайн, София, 2008.
3. АЯР, Европейски „стрес тестове“ за ядрени електроцентрали, Национален доклад на България, Декември 2011.
4. Е. Вапирев, И. Христосков, Неутронно-физични процеси при ВВЕР-440 (В-230) и ВВЕР-1000 (В-320), Пособие за инструктора, СУ „Св. Климент Охридски“, Физически факултет, 2003.
5. Ian Hore-Lacy, The World Nuclear University Primer: Nuclear Energy in the 21st Century, 3rd Edition, World Nuclear University Press, London, UK, 2012
6. IAEA-TECDOC-1613, Nuclear Fuel Cycle Information System, A Directory of Nuclear Fuel Cycle Facilities, IAEA, Vienna, 2009.
7. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-3.5, Costing of Spent Nuclear Fuel, IAEA, Vienna, 2009.
8. IAEA Safety Standards Series No. SSG-15, Storage of Spent Nuclear Fuel, Specific Safety Guide, IAEA, Vienna, 2012.
9. IAEA-CSP-20, Storage of Spent Fuel from Power Reactors, 2003 Conference, IAEA, Vienna, 2003