



Реактори с малка и средна мощност

Гергана Герова

I. Увод

Непрекъснатото увеличаване на населението на земята и заедно с това нарастването на неговите нужди неизбежно водят към увеличаване производството на стоки и услуги, осигуряващи жизнената дейност на човечеството. В условията на интензивен научно-технически прогрес производителността постоянно расте. Всичко това изисква употребата на все повече енергоресурси. Сегашните мащаби на използването им са такива, че е невъзможно да не се замислим за тяхното изчерпване, а също така и за последствията от въздействието им върху околната среда.

Модерният човек до такава степен е свикнал с използването на електрическата енергия, че без нея животът му би бил немислим. За съжаление хората се сещат за енергията едва когато тя липсва! През последните няколко десетилетия се наблюдава рязко нарастване на потреблението на енергия от населението – за 20 години близо 6 пъти! Това води до необходимостта от създаване на нови електроцентрали. По-голямата част от тях използват минерални горива – въглища, нефт и природен газ. Но запасите от тези суровини са ограничени. Освен това при този начин на добиване на електроенергия се отделят множество вредни емисии – CO_2 , серни, азотни и други окиси, сероводород и т.н.

Изброените проблеми, свързани с производството на енергия от природни горива, както проблемите, свързани с транспортирането на тези горива, оказват силно влияние върху световната екология. Повишаването на енергийното потребление ще доведе не само до екологични, но и до политически и финансови проблеми, поради това, че повишеното търсене и намаляващите добиви ще бъдат съпътствани от повишаване на цените на горивата. Съществуват разбира се, и алтернативни източници на електроенергия, като слънчевите лъчи, водата, вятъра и други, но поне засега техният дял в производството на енергия е твърде малък.

Всичко това накуп – ограничените и незаменими запаси на изкопаемите горива, неразумното им директно изгаряне, замърсяването на околната среда и другите споменати фактори – доказват не само необходимост за тяхното пестене, но и до голяма степен необходимостта от замяната им с други източници на енергия.

На преден план излиза следващият по ред източник на енергия – реакциите на делене на тежки ядра. За много хора атомната енергия е свързана с трагедията в Хирошима и Нагасаки, катастрофите в Три Майл Айлънд, САЩ; Чернобил, СССР и Фукушима, Япония – трите най-добре технологично развити за времето си страни. Наистина неконтролираната верижна реакция може да сее смърт и разрушения. Ако

бъде укротена обаче, тя става практически неизчерпаем източник на електричество, топлина и други неелектрични приложения.

За решаването на проблеми като постоянно нарастващото потребление на енергия, използването на ограничени минерални горива за добиването ѝ и заедно с това сериозното замърсяване на околната среда с вредни емисии се появяват реакторите с малка и средна мощност.

Тези реактори са предназначени за потребители в страни, които понастоящем или нямат изградена ядрена инфраструктура или имат такава, но с малки мащаби и които планират значително ѝ разширяване.

Най-иновационните проекти на реактори с малка и средна мощност са предназначени да изпълняват широк спектър приложения и притежават редица предимства пред конвенционалните централи с голяма мощност. Някои от тях са по-краткия период за изграждане, производството на електрическа или топлинна енергия или комбинацията от тях, по-дългия срок на експлоатация на активната зона без презареждане, обезоляване на морска вода, възможност за комбиниране на няколко модула на едно място, приложимостта им към по-малки електрически мрежи и по-малкото ядрени отпадъци.

Наред с предимствата, които притежават, тези реактори са изправени и пред някои предизвикателства, някои от които са повишеното ниво на безопасност и надеждност, опростената експлоатация и разбира се икономическата ефективност.

Разгледаните концепции на реактори с малка и средна мощност включват реактор с вода под налягане, реактор със забавител тежка вода, високотемпературен газоохлаждаем реактор, два бързи реактора – единият използващ натрий за топлоносител, а другият – олово и един с нетрадиционна конструкция – високотемпературният реактор с оловно-бисмутен топлоносител.

II. MARS

2.1. Описание

MARS е реактор борирана лека вода под налягане и електрическа мощност 150 MW. Предназначението на италианския проект е разполагане на централата в непосредствена близост до гъсто населени и бързо разрастващи се райони за осигуряване на нуждите им от топлинна и електрическа енергия.

Системата за охлаждане на активната зона включва само един контур с рециркуляционен тип парогенератор. По време на нормална експлоатация, принудената циркулация на топлоносителя в основния контур се осъществява чрез използване на помпа, докато при аварийни условия необходимият дебит през активната зона се поддържа посредством независима охлаждаща система, която пренася топлината до външната атмосфера благодарение на естествена конвекция и разчита само на неподвижни компоненти и на един не статичен, директно действащ компонент (спирателен клапан, 400 % резервиран).

Реакторният модул е затворен в контейнмент под налягане запълнен със студена вода; като цяло ядрена централа също включва сграда – контейнмент, необходима за справяне с външни събития (такива като самолетна катастрофа). Тя е в състояние да устои на вътрешното налягане, в случай на хипотетично събитие, при което става напълно разрушаване на границата на основния контур за охлаждане на активната зона.

Аварии със загуба на топлоносител, аварии със загуба на поток и очаквани преходни процеси без сработване на аварийната защита са елиминирани в концепцията на MARS посредством дизайна, който има за цел да направи централата надеждна,

безопасна и лесна за експлоатация. С премахване на главните аварии, централата постига значително намаляване броя на свързаните с безопасността елементи, системи и компоненти, и осигурява лесния им монтаж/демонтаж.

Характеристики на диайна на MARS:

- интегрална конфигурация на основния контур с вътрешнокорпусно разположени основни и спомагателни системи като парогенератори и регулиращи органи;
- елиминиране на тръбопроводи с голям диаметър, свеждайки до минимум пробиването на корпуса
- устройства, ограничавщи изтичането – всички предотвратяващи LOCA или ограничавщи техния обхват;
- използване на бор изгарящ поглъtitел за компенсиране на излишната реактивност.

За разлика от много други проекти на реактори с вода под налягане, основната система за охлаждане на MARS включва само един циркуляционен кръг с тръбопроводи с вътрешен диаметър 63,5 cm, един вертикален U-образен ПГ и една помпа свързана към изходния щуцер на ПГ. Компенсатор на обема контролира налягането в системата с основния топлоносител.

Проектът включва първичен охладителен контур, междинен охладителен контур и контур с резервоар и кондензатор (познат като третият охладителен контур) в каскадно работеща верига, осигуряваща резервирани бариери срещу възможната активация на топлоносителя от основния контур по пътя към околната среда.

Системата за безопасно охлаждане на активната зона е свързана с корпуса на реактора. Тя работи посредством възвратни клапани, които се отварят автоматично когато условията изискват допълнително охлаждане на активната зона, без операторска намеса и без работата на която и да е електрическа система. Тези клапани имат иновативен дизайн. Те се съхраняват в затворено положение благодарение на разликата в налягането между входа и изхода на реактора. Когато дебитът през активната зона отива към нула, разликата в налягането намалява, и когато вече не е достатъчна за да поддържа тежестта на работния елемент на клапана, проходното му сечение се отваря, при което флуидът преминава с много малко хидравлично съпротивление.

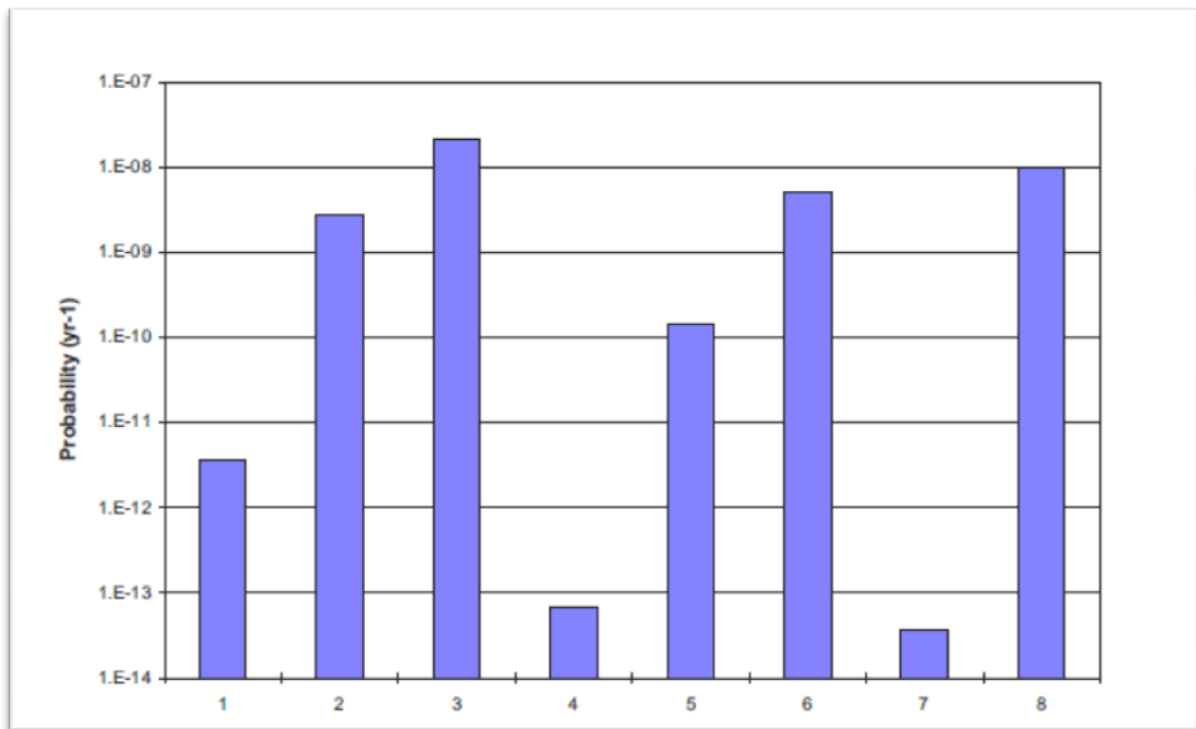
Два клапана, всеки с 100 % мощност са поставени на всеки канал от системата за безопасно охлаждане на активната зона. За увеличаване надеждността на системата към клапаните, които правят отказа невъзможен, към всеки контур са включени два допълнителни клапана, различни по тип и механична конструкция (вторият клапан във всяка линия е с традиционна конструкция).

Когато някой от четирите възвратни клапани е отворен, след кратка преходна фаза, дебитът в първичния охладителен контур се осигурява чрез разлика от около 7m в нивото между изходният щуцер на корпуса и основният топлообменен апарат и чрез разликата между вътрешната и външната температури на корпуса. Хоризонталния U-образен топлообменен апарат пренася топлината от първичния охладителен контур към междинния охладителен контур.

Нялягането в междинния охладителен контур е малко над 7,5 МРа (благодарение на компенсатора на налягане). Тази стойност гарантира определен запас до температура на кипене при каквито и да е аварийни ситуации или преходни процеси. Разликата в нивото за естествена циркулация в междинния охладителен контур е около 10m. Вторият ТОА пренася топлината от междинния охладителен контур към водата в резервоара.

Парата произведена в резервоара се смесва с въздух първоначално намиращ се в купола над басейна; налягането в купола се покачва и това причинява течение на паровъздушна смес. Теплообменният апарат, който е поставен в купола на басейна е свързващият път към атмосферата, където парата частично кондензира, поради пасивната въздушна тяга.

Фиг. 2. Резултати от вероятностни анализи на безопасността



1. Спиране на ГЦП; 2. Отказ на предпазен клапан да затвори;
3. Загуба на подхранваща вода в ПГ; 4. Загуба на външно/вътрешно електрозахранване; 5. Загуба на топлоносител от помощните системи;
6. Пробив в тръбичка в ПГ; 7. Повреда на главна циркуляционна помпа;
8. Разрушаване на главен паропровод

2.2. Пасивни проектни характеристики, функции и системи за безопасност

Присъщите характеристики за безопасност в проекта на MARS са:

- отрицателни коефициенти на реактивност при всички нива на мощност и стойности на температурата на топлоносителя;
- основната охлаждаща система и всички компоненти на системата за аварийно охлаждане на активната зона се намират вътре в основния контейнмент под налягане. Той е запълнен с вода със същото налягане като на основния топлоносител, но с по-ниска температура (70°C). Този контейнмент под налягане, служи за защита на основния контур и осигурява присъща защита от загуба на топлоносител;

- ниска максимална температура на горивото, което като цяло това осигурява значително увеличаване на запаса му до топене и допълнително ограничава възможното изпускане на радиоактивни изотопи в топлоносителя по време на каквито и да е състояния на централата;
- ниски температурни градиенти в горивото поради относително ниската плътност на активната зона, както и бавни топлинни преходни процеси в него, които ограничават възможността за повреждането му;
- значително намаляване броя на физичните връзки между основния охладителен контур и спомагателните кръгове;
- контейнмент, проектиран да издържа на външни събития като удар на самолет, осигурявайки допълнителна защита срещу възможно изпускане на радиоактивни продукти в околната среда по време на постулирани аварии;
- благодарение на дизайна, човешкият фактор не може да повлияе на системите за безопасност;

Пасивните системи за безопасност са следните:

- **система за пасивно аварийно охлаждане на активната зона** – тя се основава единствено на естествената конвекция на охлаждащият флуид и използва външния въздух като краен погълтател на топлина. Проектирана е да предаде остатъчната топлина от активната зона директно от корпуса на реактора към външния въздух, без намесата на каквито и да е системи или компоненти, използващи енергия. Принципът ѝ на работа разчита на разликата в плътностите на флуида, дължащи се на разликата в температурите. Системата включва два канала; всеки от които може да отнеме 100 % от остатъчната топлинна мощност. При авария, причиняваща намаляване на охлаждащия поток през зоната (такава като загуба на захранване или отпадане на главна циркулационна помпа) системата се задейства автоматично, без да изисква намесата на оператор. Системата има само един механичен компонент с движещи се части – възвратен клапан с иновационен дизайн – който е 400 % резервиран;
- **допълнителна пасивна аварийна защита** – действаща чрез гравитацията. Тази система осигурява въвеждането на допълнителни регулиращи пръти в активната зона когато температурата на топлоносителя в нея достигне зададената стойност. Работата ѝ се основава на разликата в топлинното разширение на биметалния сензор, намиращ се вътре в горивните касети.

III. AHWR

3.1. Описание

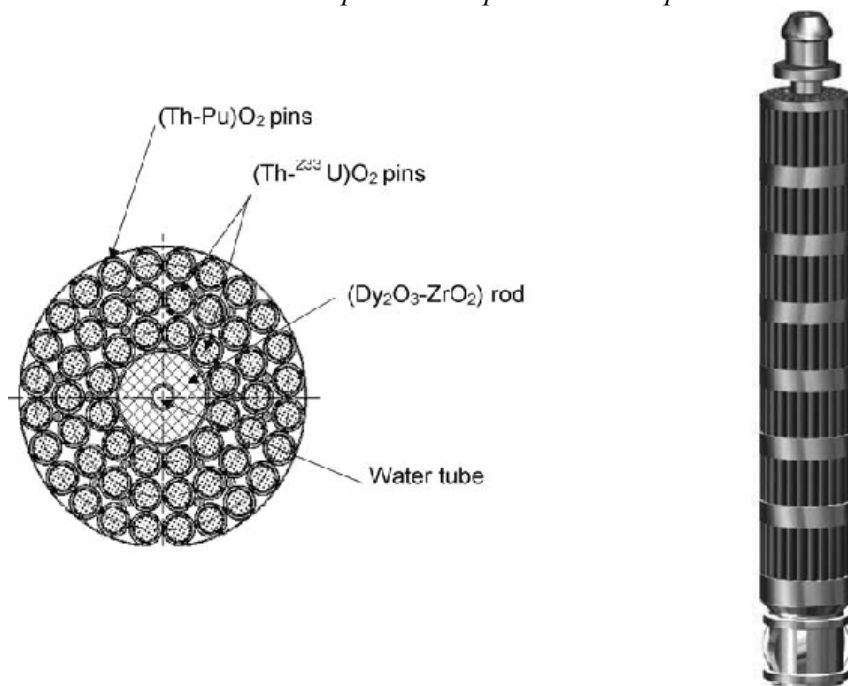
AHWR е индийски реактор от вертикален тип с електрическа мощност 300 MW, използващ кипяща лека вода за топлоносител и тежка – за забавител. Реакторът е проектиран да използва ($^{233}\text{U}-\text{Th}$)O₂ MOX заедно с (Pu–Th)O₂ MOX гориво. Неговото предназначение е освен генериране на електричество, също така и производство на питейна вода.

Топлоотнемането от активната зона се постига чрез естествената циркулация на топлоносителя. Активната зона се състои от 452 вертикални горивни канали поместени в каландър с диаметър 7,4 m, съдържащ тежка вода за забавител. Каландърът се намира в запълна с вода реакторна кухня. Зоната е свързана с четири парни барабана. Голям воден басейн наречен гравитационен воден басейн, се намира в близост до върха на

контейнента. Топлината от забавителя се използва за подгриване на подхранващата вода. Двоен контеймент осигурява защита срещу каквото и да е изпускане на радиоактивност в околната среда.

Горивните касети са окачени на върха на горивните канали. Касетата с активна дължина 3,5 m се състои от единичен, дълъг горивен клъстер и две предпазни подкомпозиции. В нея има 54 топлоотделящи елементи, подредени в три концентрични кръга: 12 от тях във вътрешния, 18 в средния и 24 във външния кръг около централен прът съдържащ диспрозиев изгарящ погълтател $Dy_2O_3-ZrO_2$. Двадесет и четирите горивни топлоотделящи елементи от външния кръг съдържат $(Th-Pu)O_2$ MOX гориво, а останалите тридесет във вътрешния и средния кръг са с $(Th-^{233}U)O_2$ MOX гориво. Както други конструкции на тежководни реактори с вода под налягане АНWR предвижда презареждане на място.

Фиг. 3. Подредба на горивния клъстер



Характеристики на дизайна на АНWR:

- използване на естествена конвекция за отнемане на топлина при нормална експлоатация, елиминирайки ГЦП;
- осигуряване на относително голям запас топлоносител в основната охлаждаща система за осигуряване на голямата му термична инерция и бавна скорост на преходните процеси;
- осигуряване на относително голям воден запас в гравитационен воден басейн, намиращ се вътре в контейнента, който е предназначен за пасивни аварийни впръсквания с охлаждаща вода, пасивно охлаждане на контейнента и пасивно отнемане на остатъчното топлоотделяне чрез изолационни кондензатори.

3.2. Пасивни проектни характеристики, функции и системи за безопасност

Основните **присъщи пасивни характеристики/функции** за безопасност са:

- отрицателна обратна връзка на реактивността;

- отрицателен температурен коефициент на реактивност за горивото;
- отрицателен мощностен коефициент на реактивност;
- двоен контейнмент;
- липса на ГЦП;
- независими канали на системата за аварийно охлаждане на активната зона – високо и ниско налягане;
- директно впръскване на вода от системата за аварийно охлаждане на активната зона в горивния клъстер.

Пасивните системи за безопасност са следните:

- **пасивно отнемане на топлината от активната зона** – в АНWR естествената конвекция е режимът на циркулация на топлоносителя за отнемане на топлината от активната зона в случай на нормална експлоатация и в състояния на спиране. Двухазната смес от пара и вода генерирана в активната зона се отвежда към парен барабан, където парата се сепарира от водата. Сепарираната вода изтича надолу през дренажни тръби към вътрешния колектор на реактора. От него тя протича обратно в активната зона през вътрешни подхранващи тръбопроводи.

По време на спиране остатъчната топлина от активната зона се отнема благодарение на изолационни кондензатори, изцяло потопени в гравитационния воден басейн. Осигурени са пасивни клапани по направление на потока от изолационните кондензатори. Те работят с налягане от парния барабан и установяват взаимодействие между парните барабани и изолационните кондензатори в състояния на горещо спиране. Парата доведена до изолационните кондензатори посредством естествената конвекция, кондензира вътре в тръбите на изолационните кондензатори. След това кондензатът се връща обратно в активната зона под действие на гравитацията.

Изолационните кондензатори са конструирани да понижават температурата в основната система за транспорт на топлина от 558 К на 423 К. Запасът на вода гравитационния басейн е достатъчен за охлаждане на активната зона за повече от 3 дни без каквато и да е операторска намеса и без закипяване на водата него.

- **система за аварийно охлаждане на активната зона** – тази система осигурява впръскването на вода директно в активната зона на три етапа. През първия етап става впръскване от акумулатор. Във втория – вода от гравитационния басейн осигурява охлаждане на активната зона в продължение на 3 дни. При третия етап, водата акумулирана в реакторната кухня се изпомпва обратно в гравитационния басейн от където навлиза в активната зона. Първият и вторият етап са пасивно задействащи се и не зависят от каквото и да е активен компонент. Важните компоненти на системата са гравитационния воден басейн и усъвършенстваното акумулаторно оборудване с флуидно устройство. Устройството за контрол на флуидният поток е просто пасивно устройство, което намалява потока автоматично след известно време заради увеличаване пада на налягане дължащ се на формирането на вихрушка.

- **пасивна система за охлаждане на контейнмента** – пасивните охладители на контейнмента се използват за да се осигури след аварийно охлаждане на основния контейнмент в пасивен режим, както и да се ограничи след аварийното налягане в него. Охладителите на контейнмента се намират под гравитационният воден басейн и са свързани със съдържанието му.

- **пасивна система за изолиране на контейнмента** – реакторът има двоен контейнмент, т.е съчетава първичен и вторичен контейнмент. Между тях се поддържа по-малко налягане по отношение на атмосферното, за да се гарантира, че няма изпускане на радиоактивност в атмосферата. Има много малка вероятност за изпускане на радиоактивност заедно с парата в контейнмента при аварийни състояния. При такива

състояния от изключителна важност е да се изолира контеймента от атмосферата в рамките на възможно най-малко време. ANWR включва *схема за изолиране на контеймента* неизискваща задействане на активни средства. Тази пасивна система се базира на изолиране на атмосферата в контеймента чрез създаване на течно U-образно уплътнение във вентилационният канал.

- **система за пасивно охлаждане на бетона** – тя е проектирана да защитава бетонната структура на реактора във високотемпературната зона. Охлаждането се постига чрез циркулация на топлоносител от гравитационния воден басейн в режим на естествена конвекция през охладителни тръби намиращи се между бетонната структура и изолационният панел, който обхваща топлия тръбопровод на системата за основен транспорт на топлина. Топлинните загуби от високо температурния тръбопровод на системата за основен транспорт на топлина се намаляват чрез изолационния панел. Топлината, преминала през него, се отнема в режим на естествена конвекция чрез вода от гравитационния воден басейн през тръби фиксирани върху гофрирана плоча на външната повърхност на панела. Тази пасивна конструкция поддържа температурата на бетона по-ниска от 55°C. По този начин се елиминира нуждата от мощни вентилатори и се предотвратяват последствия, които в противен случай могат да възникнат от отказ на оборудване или захранване и които биха довели до повишаване температурата на бетонната структура.

IV. GT – MHR

4.1. Описание

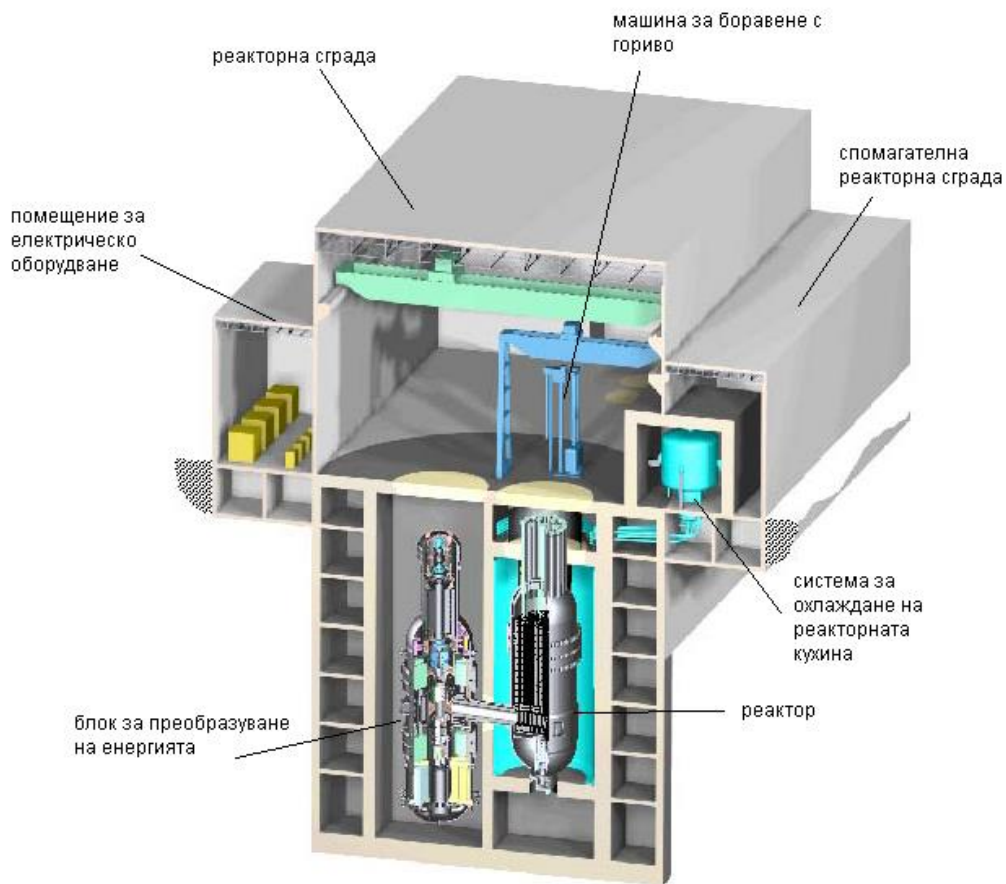
GT–MHR е международен проект на високотемпературен едноконтурен реактор с електрическа мощност 287 MW и ефективност 47%. Той използва хелий за топлоносител, графит за забавител и плутониево гориво с обогатяване 92 %. Предназначението на реактора е когенерация.

Газоохлаждаемият модулен реактор в съчетание с газова турбомашина, състояща се от турбина, електрически генератор и компресори изпълняват директен газо-турбинен цикъл на Брайтън.

Реакторът, блокът за преобразуване на енергия и всички свързани с основния кръг системи се намират в подземен силос на реакторната сграда. Активната зона има пръстеновидна форма с височина 8 m, вътрешен диаметър – 3 m и външен диаметър – 4.8 m, съдържа 1020 шестоъгълни горивни касети и е заобиколена от графитен отражател. Системата за охлаждане след спиране се намира в по-ниската част на корпуса. Той от своя страна е заобиколен от пасивния охладител на системата за пасивно охлаждане на реакторната кухня. Тази система отнема топлината от корпуса на реактора при всички аварии, включително и при пълната загуба на топлоносител. Системата за преобразуване на енергия включва турбомашина, рекуператор, водоохлаждаем предохладител и междинен охладител.

Проектните реакторни характеристики и директният затворен газо-турбинен цикъл са основни предимства на централите с GT-MHR реактори в сравнение с други централи с парни цикли, защото те дават възможност за опростяване и намаляване броя на изискваните елементи и системи на оборудването (включително системите за безопасност) чрез елиминиране на паротурбинния кръг от централата.

Фиг. 4. Реакторна сграда



Характеристики на дизайна на GT – MHR:

- отрицателен коефициент на реактивност по температурата;
- контролни пръти с абсорбиращи елементи от борен карбид, намиращи се в отражателя, се използват по време на нормална експлоатация и в условия на горещо спиране;
- контролни пръти с абсорбиращи елементи от борен карбид, намиращи се в активната зона, се използват за аварийна защита;
- продължителен период на пасивно отнемане на остатъчното топлоотделяне от активната зона към външната част на корпуса на реактора благодарение на естествените процеси на кондукция, радиация и конвекция и отвеждане на топлината от външната част на корпуса към крайния поглъtitел на топлина;
- постигане на голяма температурна разлика между експлоатационната граница и безопасната експлоатационна граница, благодарение на присъщите ограничаващи продукти на делене свойства на TRISO горивото при високи температури и дълбочина на изгаряне;
- постигане на увеличен самоконтрол на реактора в очаквани преходни процеси без сработване на аварийната защита и без превишаване безопасните експлоатационни граници за горивото;
- относително висок термичен капацитет на активната зона и вътрешнокорпусните устройства и ниска плътност на мощността ѝ, в резултат на бавната прогресия на преходните процеси.

4.2. Пасивни проектни характеристики и функции за безопасност

- **термична стабилност на активната зона** се осигурява чрез използване на:
 - гориво във формата на малки частици с няколко покривни слоя, които могат ефективно да задържат продуктите на делене при високи температури (до 1600°C) и голяма дълбочина на изгаряне (до 70% на дялящите се материали за Pu гориво);
 - графит като структурен материал за активната зона. Той има температура на сублимация около 3000°C и по тази причина може да издържи на високи температури. Графитните структури поддържат здравината си дори при температури по-високи от тези възможни при аварии. Тази характеристика осигурява стабилността на конфигурацията на активната зона и предотвратява преразпределяне на горивото в обема ѝ при аварии.

- **неутронна стабилност на активната зона** се постига чрез:
 - висока степен на самоконтрол на мощността на реактора и самоограничаване дължащо се на отрицателната обратна връзка по температурата в активната зона и мощността на реактора;
 - факта, че топлоносителят не оказва влияние на неутронния баланс поради нулевото му неутронно поглъщане и напречните сечения на разсейване. Така се осигурява последващо предотвратяване на неконтролирано повишаване мощността на реактора по време на изменения в плътността на топлоносителя, както и загубата на топлоносител при аварии.

- **химична стабилност** се реализира чрез хелиевия топлоносител, който:
 - е химически инертен;
 - не е предразположен към промяна на фазите, което изключва резки промени в условия на отнемане на топлина от активната зона.

- **структурна стабилност** се дължи на:
 - липса на тръбопроводи с голям диаметър, използвани в основния контур;
 - липса на ПГ и парни линии с голям диаметър.

- **динамична стабилност** е обезпечена посредством:
 - охлаждане на активната зона чрез естествени процеси; предотвратяване разтопяването ѝ във всички вероятни аварии, включително при падане на налягането в основния контур без компенсиране на загубения топлоносител;
 - способност на централата да премине в безопасно състояние, ако всички източници на захранване са загубени;
 - способност на централата да поддържа такова безопасно състояние в продължение на десетки часове без задействане на аварийната защита.

- **локализация на активността**
 - пасивната локализация на активност се осигурява основно чрез контейнента проектиран за запазване на хелиево-въздушния флуид по време на аварии с падане на налягането в основния контур. Той е проектиран също така и за външни натоварвания, които могат да се приложат по отношение на сеизмични въздействия, падане на самолет, въздушни шокови вълни и т.н.

V. 4S – LMR

5.1. Описание

4S – LMR е японски проект на бърз реактор от басейнов тип с електрическа мощност 50 MW, топлоносител натрий и интервал за презареждане 10 години. Той е

проектиран да осигури лесна експлоатация, опростена поддръжка, включително презареждане, високо ниво на безопасност и подобрени икономически показатели. Предназначението му е производство на електричество и/или когенерация.

Специфичните проектни особености на този реактор са обобщени в следващите девет проектни цели:

- (1) без презареждане в продължение на 10 – 30 години;
- (2) лесен контрол на дълбочината на изгаряне без регулиращи пръти и без задвижващите им механизми;
- (3) контрол и регулиране на реактора чрез системи и компоненти, които не принадлежат на реакторната система;
- (4) осигуряване на качеството и кратък период за строителство основани на заводско производство на реакторния блок;
- (5) минимална поддръжка и инспекция на реакторните компоненти;
- (6) отрицателен температурен коефициент на реактивност;
- (7) без повреждане на активната зона във всички възможни изходни събития без задействане на аварийната защита на реактора;
- (8) пълно изолиране на радиоактивността при всички експлоатационни състояния и извеждане от експлоатация

От точка 1 до точка 5 са свързани с опростяване на системите и поддръжка. От точка 6 до точка 8 са свързани с проектната безопасност.

Подобен подход би могъл да помогне за реализирането на високо ниво на безопасност и последователно намаляване броя на спомагателни системи. В резултат на намаляване броя на системите и опростяването им може от своя страна да намали обхвата за поддръжката им.

Корпусът на реактора е с диаметър 3m и височина – 18m и дебелина 25 mm. Активната зона е със диаметър 1,2 m, вътрешна височина – 1 m и външна – 1,5 m и съдържа 469 горивни елемента с диаметър – 10 mm. Във външната част се намират директния топлообменен апарат на основната система за охлаждане на реактора, междинният топлообменен апарат, електромагнитните помпи и радиалните механизми на екраните, отгоре надолу. Като опция в проекта, основната система за охлаждане на реактора може да се замени с междинна спомагателна система за охлаждане, която отнема топлината при спиране чрез второстепенния натрий в активен (при нормална експлоатация) или пасивен (при постулирани изходни събития) режим. Вътре в корпуса на реактора няма движещи се части, с изключение на отражателя, който се движи много бавно – с 1-2 mm на седмица.

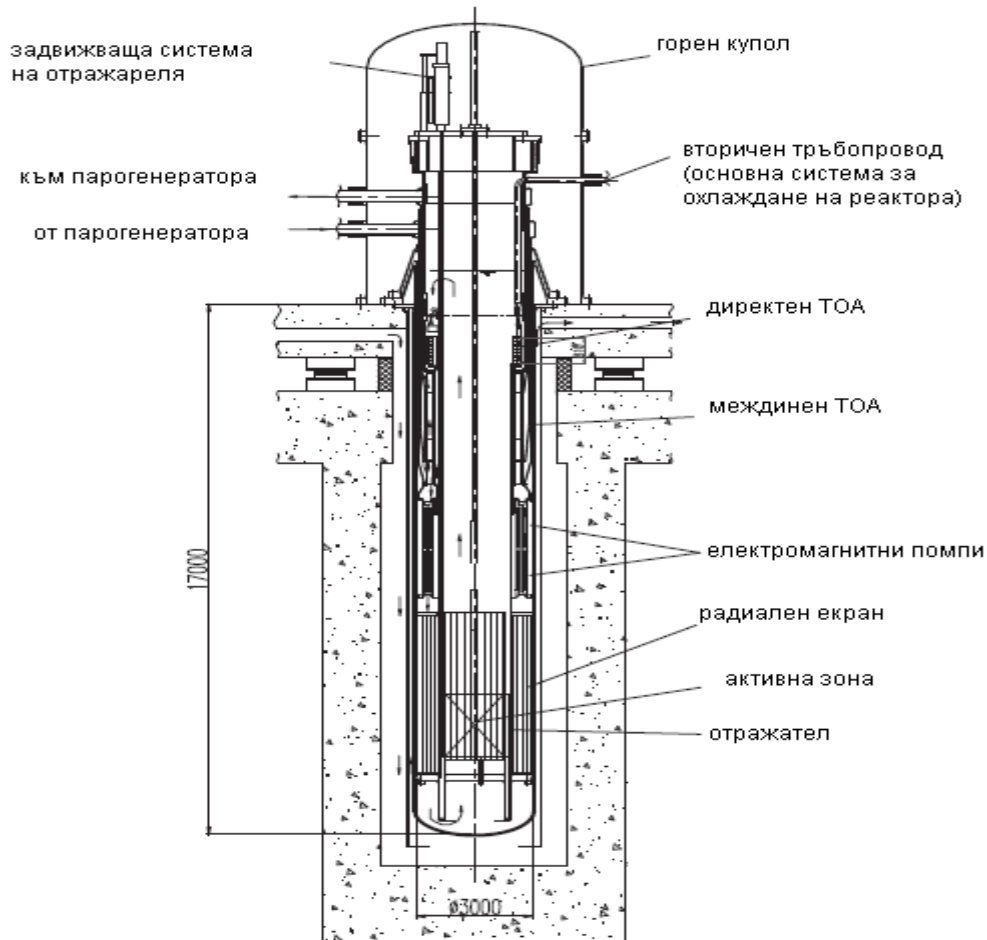
Защитният корпус с дебелина 15 mm покрива реакторния за да се предотврати загубата на топлоносител от основния контур. Този корпус също така формира границите на контеймента заедно с горният купол. Охлаждащата система работеща с естествена въздушна тяга между защитният корпус и стената на кухнята е така наречената спомагателна система за охлаждане на корпуса и е проектирана като система за пасивно отнемане на топлина. Основната система за охлаждане на реактора и междинната спомагателна система за охлаждане на реактора са резервирани и различни.

Междинната система за транспортиране на топлина се състои от една електромагнитна помпа, един парогенератор, тръбопровод и дренажен резервоар. Помпата е интегрирана в парогенератора.

Активната зона на 4S-LMR е проектирана за експлоатация без презареждане на място и осигурява отрицателен коефициент на реактивност и намален пад на налягането при относително голяма височина на активната зона. Отрицателният

коэффициент на реактивност и намаляваният пад на налягането могат да подобрят безопасността чрез присъща защита от събития със загуба на поток.

Фиг. 5. . Вертикален изглед на 4S-LMR



Характеристики на дизайна на 4S – LMR

- ефективно използване на спомагателни системи за пасивно отнемане на остатъчното топлоотделяне с естествена тяга на въздух от околната среда, действащи като краен поглътител на топлина;
- постигане на относително висок топлинен капацитет на основната охлаждаща система, в резултат на бавната прогресия на преходните процеси.

5.2. Пасивни проектни характеристики, функции и системи за безопасност

Проектната философия на 4S-LMR е да подчертае простите, пасивни и присъщи функции за безопасност като основна част на стратегията за защита в дълбочина. Крайната цел на проектната безопасност е да елиминира изискването за евакуация на населението като аварийна мярка.

Присъщите проектни характеристики и функции за безопасност са:

- ниска плътност на мощността в активната зона;
- добри термични характеристики на металното гориво;
- отрицателни температурни коефициенти на реактивност;
- отрицателни натриеви коефициенти на реактивност;
- голям запас на топлоносител;
- елиминиране на активни регулиращи системи работещи вътре в корпуса на реактора;
- премахване на компоненти съдържащи въртящи се части (използване на неподвижни устоява като електромагнитни помпи);
- ограничаване на радиоактивните замърсявания (без презареждане на място и без системи за товарене/разтоварване и пренасяне , без съоразения за складиране на гориво в реактора или около него);
- множество бариери срещу изпускане на радиоактивни продукти на делене, включващи:
 - ✓ обвивката на горивото;
 - ✓ корпуса на реактора и тръбите на междинния ТОА;
 - ✓ горния купол и защитния корпус като контейнмент.
- относително малък запас на реактивност в реактор с малка мощност;
- предотвратяване изтичането на натрий и смекчаване на въздействията или влиянията му ако такова изтичане се случи чрез двони разделящи повърхности за натрия със система за откриване на малки течове в слуай на отказ на едната разделяща повърхност:
 - ✓ корпус на реактора и защитния корпус за натрия от основния контур;
 - ✓ двойни тръбопроводи, тръби и съдове за натрия от втори контур, включително тръби за пренос на топлината към ПГ.

Пасивните системи за безопасност са:

- автоматична система за дренаж на натрия от парогенератора към дренажен резервоар – ако стане реакция между водата и натрия, покачващото се налягане на покриващия газ в парогенератора причинява бързото дрениране на натрия от втори контур в дренажен резервоар намиращ се под самия парогенератор;
- две различни и резервирани пасивни системи за отнемане на топлината след спиране работещи чрез естествена конвекция на топлоносителя и естествена въздушна тяга.

За отнемане на остатъчната топлина са предвидени две независими пасивни системи – спомагателната система за охлаждане на корпуса на реактора и междинната спомагателна система за охлаждане:

- помощната система за охлаждане на корпуса на реактора е напълно пасивна и отнема топлината след спиране от повърхността на защитния корпус използвайки естествена въздушна тяга. Там няма клапани и демпфери на пътя на въздушния поток; следователно тази система работи винаги, дори и при нормална експлоатация

- междинната спомагателна система отвежда топлината след спиране посредством на натрия от втори контур. При нормално спиране, топлината се отнема чрез принудителна циркулация на въздух с помощта на вентилатор задвижван от нормално електрическо захранване; Тази система може също да отнеме необходимото количество топлина самостоятелно чрез естествена циркулация и на въздуха и на натрия в случай на постулирани изходни събития.

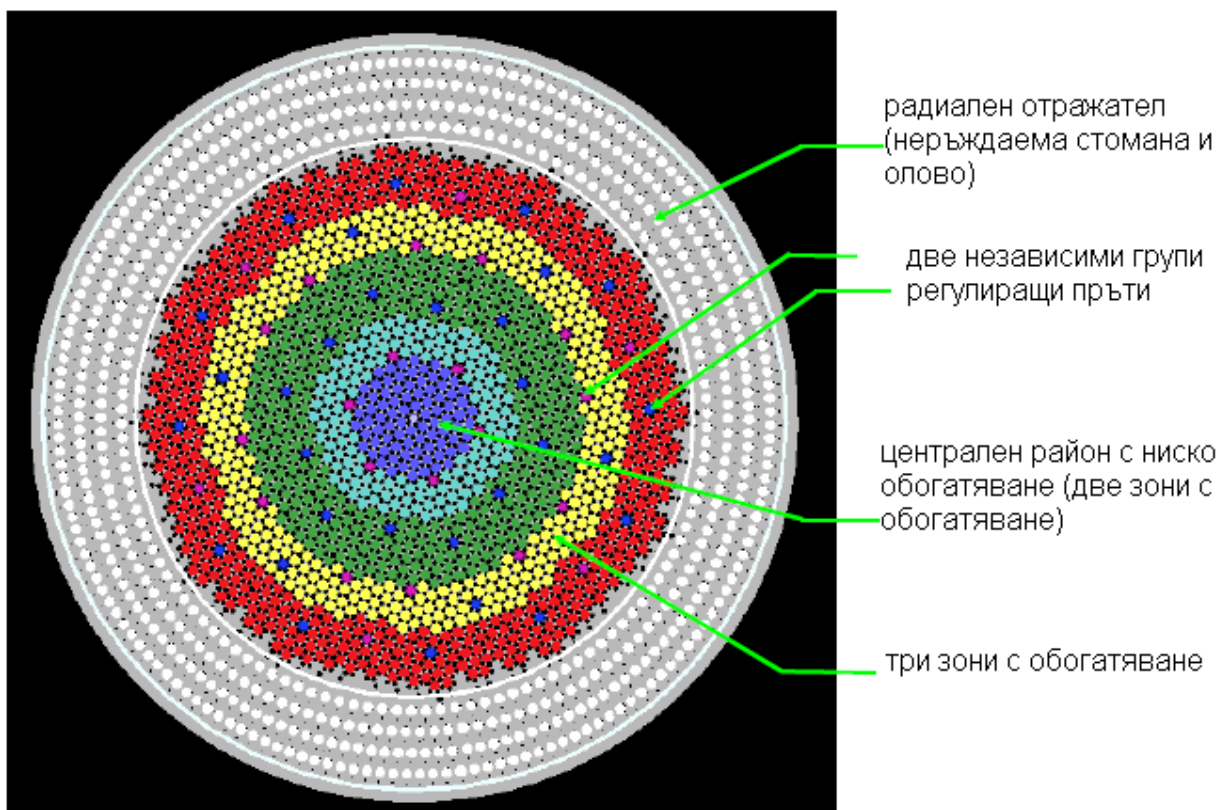
VI. SSTAR

6.1. Описание

SSTAR е американски проект на басейнов тип реактор с естествена циркулация и електрическа мощност 20 MW, използващ суперкритичен въглеродно-диоксиден цикъл на Брайтън, естествена циркулация, оловен топлonosител и ефективността на централата е 43,8%. Предназначението му е производство на електрическа енергия и/или когенерация.

Активната зона има пет зони на обогатяване и срок на експлоатация – 30 години. По тази причина нормално презареждащо оборудване не присъства. Това оборудване включва верижан кран, който може да бъде докаран чак след изтичане срока на експлоатация на активната зона. Презареждането се осъществява по следния начин – горната затваряща глава на защитния и реакторния корпуси се маха, отработената активна зона се изважда от корпуса и се поставя вътре в транспортен контейнер; след което се транспортира в център за преработване и препроизводство. Свежата активна зона се поставя в корпуса на реактора и презареждащото оборудване се премахва.

Фиг. 6. Конфигурация на АЗ на SSTAR



6.2. Пасивни проектни характеристики, функции и системи за безопасност

Подходът за проектна безопасност на SSTAR се основа на принципа за защита в дълбочина за осигуряване на многобройни нива на защита срещу изпускане на радиоактивни материали:

- (1) дизайн за постигане на високо ниво на надеждност, такова че специфични радиационни инициатори на аварии са елиминирани или е предотвратено случването им;
- (2) осигуряване на защита в случай на отказ на оборудване или операторска грешка;
- (3) осигуряване на допълнителна защита на общественото здраве и безопасност в случай на изключително необичайно събитие, което не е очаквано да се случи по време на срока на експлоатация на централата или което не е предвидено по време на проектирането и конструирането ѝ.

Присъщите проектни характеристики и функции за безопасност са:

Присъщите характеристики и функции на SSTAR дължат предимството си на ключовите присъщи свойства на оловото като топлоносител, трансураниевото нитридно гориво, активната зона с бързи неутрони, интегралния дизайн на реактора, съдържащ всички основни системи и компоненти на основния контур и транспортиране на топлината чрез естествена циркулация.

Оловния топлоносител от основния контур има висока температура на кипене около 1740°C, което е доста над температурите при които структурите от неръждаема стомана губят силата си и се топят. По тази причина оловото е топлоносител с ниско налягане. Всички основни системи и компоненти на основния контур включително активната зона и оловно-CO₂ топлообменни апарати се намират вътре в корпуса на реактора, който е заобиколен от защитен корпус. Нивото на топлоносителя вътре в корпуса е такова, че в случай на теч от корпуса на топлоносителя съдържащ се в защитния корпус винаги надвишава нивото на входовете на оловото към оловно-CO₂ топлообменни апарати. Липсата на кипене или изпарение на топлоносителя дължащо се на високата му температура на кипене, комбинирано с басейновата конфигурация на системата и защитния корпус изключват загубата на топлоносител от основния контур. Също така се осигурява толоотнемането и топлопренасянето от активната зона към вътрешнокорпусните топлообменни апарати или стената на корпуса чрез помощната система за охлаждане чрез естествената циркулация на еднофазния оловен топлоносител.

Оловото не реагира силно нито с водата, нито с въздуха. Това прави възможно елиминирането на нуждата от междинен охладителен контур, осигурявайки надеждност на централата.

Оловото слабо поглъща неутрони. Това позволява активната зона да бъде отворена чрез увеличаване на обема на топлоносител без значително нарушаване на реактивността. Повишаването на обема на топлоносителя увеличава хидравличния диаметър на потока на топлоносител през активната зона, намалявайки пада на налягане в активната зона. В резултат естествената циркулация е по-ефективна и може да транспортира по-голяма мощност. Възможно е проектиране на бързи реактори с оловен топлоносител при които естествената циркулация е ефективна при нива на мощност превишаващи 100% от номиналната, елиминирайки нуждата от главни циркулационни помпи. Премахвайки ги се елиминират инициаторите на аварии със загуба на поток. Отворената решетъчна конфигурация на активната зона с широки отвори за кръстосан поток на топлоносител елиминира инициатори на аварии с блокиране на потока.

Трансураниевото нитридно гориво има висока топлопроводимост, което в комбинация със свързването на горивните елементни към обвивката чрез течна олово между елементите и обвивката, намалява максималната температура на горивото по време на нормална експлоатация и при аварии. Това намалява складираната енергия в горивото и понижава положителната обратна връзка.

Трансураниевото нитридно гориво има висока температура на разрушаване 1350°C, такава че горивото запазва целостта си при температури при които структурните материални от нераждаема стомана губят тяхната здравина.

Нитридното гориво се очаква да е съвместимо с оловото и с ферито-мартензитните стоманени обвивки.

Пасивни системи за безопасност

SSTAR включва само една защитна система за аварийно отнемане на топлината, която е система за охлаждане на корпуса на реактора. Тя охлажда външната страна на защитния корпус чрез естествена въздушна тяга. Поради това, че системата за охлаждане на корпуса представлява единична система, тя би трябвало да е с висока надеждност по отношение на сеизмични събития и саботажки. Планирано е да бъдат добавени пасивни ТОА на директната охладителна система на реактора, намиращи се вътре в корпуса, за да бъдат осигурени независими и резервирани мерки за аварийно отвеждане на топлина.

VII. CHTR

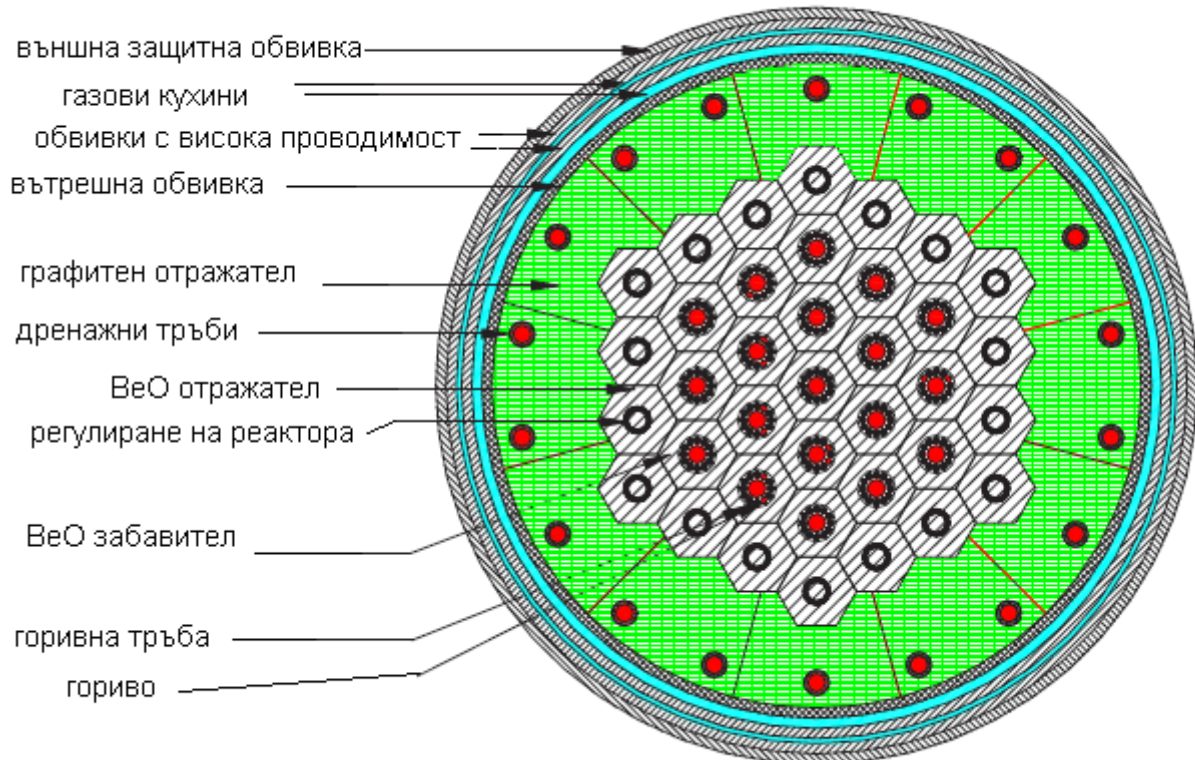
7.1. Описание

CHTR е индийски проект на реактор с естествена циркулация и има електрическа мощност 100 kW (th), използва оловно-бисмутен топлоносител, берилиев оксид за забавител и е проектиран да работи основно с $^{233}\text{U-Th}$ гориво. Предназначението му е за производство на електричество, водород и други неелектрични приложения. Концепцията на този реактор включва няколко усъвършенствани пасивни функции за безопасност, като по този начин позволява неговото функциониране като компактен агрегат в отдалечени райони без връзка с електрическата мрежа. Реакторът е проектиран да работи при 1000°C и така има възможност за прилагане на технологии за топлинни приложения на процеси при високи температури, а именно – производството на водород чрез разделяне на водата.

Активната зона на реактора има срок на експлоатация – 15 години и съдържа 19 призматични блокчета забавител от берилиев оксид. Тези блокчета имат графитени горивни тръби, разположени централно. Всяка горивна тръба съдържа 12 равноотстоящи надлъжни отвори и също така служи за канал за топлоносителя. Горивото за този реактор се основава на TRISO горивата (триизотопни горивни частици с покритие) и се състои от $^{233}\text{UC}_2$, ThC_2 и малки количества гадолий като изгарящ погълтател (осигурени само в централната горивна тръба). Тория и изгарящия погълтател правят температурния коефициент на горивото отрицателен, като по този начин правят реактора присъщо безопасен. Частиците с покритие са смесени с графитена пудра като матрица и са оформени в цилиндрични горивни елементи. Този тип гориво може да издържи на температури до 1600°C. 18 блокчета отражател от берилиев оксид заобикалят блокчетата забавител. Централно тези блокчета съдържат в себе си пасивната система за регулиране на мощността.

Активната зона и частта отражател на реактора се намират в метална черупка, устойчива на корозия от оловно-бисмутната евтектична сплав – топлоносител.

Фиг. 7. Напречно сечение на АЗ на СHRT



7.2. Пасивни проектни характеристики, функции и системи за безопасност

Присъщите проектни характеристики и функции за безопасност са:

- силно отрицателен доплеров коефициент на горивото за всяко работно състояние, в резултат на намаляване мощността на реактора в случай на повишаване температурата на горивото при всеки постулиран аварийен сценарий;
- висока топлинна инерция на цялата керамична активната зона и ниска плътност на мощността на активната зона, в резултат на много бавното повишаване на температурата на компонентите в зоната също и на горивото в състояние когато всички погълтители на топлина са загубени;
- голяма разлика между нормалната работна температура на горивото (около 1100°C) и допустимата граница на TRISO горивото (1600°C), осигуряваща задържането на продуктите на делене;
- отрицателния температурен коефициент на забавителя води до понижаване мощността на реактора в случай на повишаване температурата на забавителя поради всяко постулирано аварийно състояние;
- поради използването на оловно-бисмутна сплав за топлоносител, имаща много висока точка на кипене (1670°C), има много голяма термична граница за кипене

на топлоносителя, при нормална работна температура от 1000°C. Това елиминира възможността за кризис на топлообмена и увеличава надеждността на отнемане на топлина от активната зона. Теплоносителя работи при ниско налягане и така няма шанс за термична експлоазия на реактора поради прегряване на топлоносителя;

- висока температура на оловно-бимутния топлоносител, която се поддържа в атмосфера с инертен газ. Дори и при евентуален случаен контакт с въздух или вода, топлоносителя не реагира бурно и не причинява никакви експлозии или пожари;
- поради над атмосферната точка на топене от 123°C дори и в случай на теч в основния контур, топлоносителя се втвърдява и предотвратява по-нататъшно изтичане;
- много ниското налягане на топлоносителя позволява използването на графит/въглерод канали с малко напречно сечение, което поглъща неутрони, като по този начин подобрява неутронната кинетика на реактора;
- за оловно-бисмутния топлоносител, реактивностните ефекти (обем, мощност, температура и тн.) са отрицателни, като по този начин се намалява мощността на реактора в случай на всяко непреднамерено повишаване на мощността и температурата.

Пасивните системи за безопасност са следните:

- **система за пасивно регулиране на мощността** – тя съдържа 18 пасивни регулиращи елемента, всеки от които е разположен централно в 18 берилиеви отразителни блокчета. Пасивните регулиращи мощността елементи има конструкция тръба в тръба. Външната тръба е контролна тръба, а вътрешната е водеща. Водещата тръба също служи за насочване на абсорбера. Абсорбер, направен от борен карбид (B_4C) имащ пръстеновидна форма се намира в пръстеновидното пространство между контролната и водещата тръби. В тези тръби има течна оловно-бисмутна сплав и двете тръби са във флуидна връзка чрез дъното на водещата тръба. Пасивните регулиращи мощността елементи има конструкция тръба в тръба. Външната тръба е контролна тръба, а вътрешната е водеща. Водещата тръба също служи за насочване на абсорбера. Абсорберът е направен от борен карбид (B_4C), има пръстеновидна форма и се намира в пръстеновидното пространство между контролната и водещата тръби. В тези тръби има течна оловно-бисмутна сплав и двете тръби са във флуидна връзка чрез дъното на водещата тръба. Когато реакторът е критичен, абсорбера на пасивната система за регулиране на мощността се намира на контретно място в активната зона. В това стабилно състояние, газът в колектора ще бъде в равновесие с температурата на топлоносителя в горния обем. Всяко отклонение от това равновесно състояние ще предизвика повишаване или понижаване на налягането във водещата тръба, дължащо се съответно на повишаване или понижаване на температурата. Тъй като контролната и водещата тръби комуникират флуидно, тази промяна на налягането ще се предаде на контролната тръба. Крайният резултат ще е промяна в нивата на оловно-бисмутната сплав и в двете тръби. След като абсорбера се движи по свободната течна повърхност в пръстеновидното пространство между контролната и водещата тръби, той също ще бъде избутан или изваден с повишаване или намаляване на налягането, съответно, като по този начин става промяна на реактивността. Тази система е способна да спре реактора.
- **пасивна изключваща система** – при нормална експлоатация, тази система има група от седем изключващи пръти направени от волфрам, които са закрепени

над активната зона чрез индивидуални електро-магнити. Тези изключващи пръти се освобождават пасивно при аномални състояния когато температурата на топлоносителя или активната зона върви нагоре. Те падат в централния отвор на горивните тръби, осигурен за потока топлоносител. в случай на загуба на захранване на батериите, изключващите пръти ще паднат и изключат реактора.

- **пасивно отнемане на топлината от активната зона при нормална експлоатация** – по време на нормална работа на реактора, топлината в активната зона се отнема посредством естествена циркулация на оловно-бисмутния евтектичен топлоносител. Оловно бисмутната евтектична сплав има висока точка на кипене (1670°C) при атмосферно налягане. Това улеснява ниското налягане в основния контур, което е функция за безопасност при реакторите с топлоносител течен метален. Основната линия за циркулация на топлоносителя съдържа горивни тръби, дренажни тръби и горен и долен обем. Горивото пренася енергия към топлоносителя протичащ нагоре вътре в горивните тръби посредством естествена циркулация.
- **Пасивно пренасяне на топлина към второстепенните системи** – група от 12 вискотемпературни натриеви топлинни тръби пасивно пренасят топлина от горния обем на реактора към група съдове за оползотворяване на топлината.

VIII. Заключение

Въз основа на направения преглед на реактори с малка и средна мощност, независимо от различията в някои техни характеристики, могат да се направят следните изводи:

- ✓ Имат дълъг срок на експлоатация без презареждане, което от екологична гледна точка води до чувствително намаляване обема на отработеното ядрено гориво;
- ✓ Системите за безопасност са главно пасивни, основани на естествени процеси и не изискващи операторска намеса в случай на авария. По този начин рискът от възможни човешки грешки е сведен до минимум;
- ✓ Поради своята компактност и значително по-опростено изграждане, експлоатация и поддръжка е възможно използването им в отдалечени и/или гъсто населени райони, които нямат достъп до електрическа мрежа
- ✓ Подходящи освен за производство на електрическа енергия и/или когенерация и за различни не електрически приложения, като обезоляване морска вода, генериране на водород и други.