

Обща позиция относно изискванията за лицензиране на новите доставки на ядрено гориво за реактори ВВЕР

Автори:

Алжбета Беднаржова (SÚJB - Чешка република)

Даниел Влчек (SÚJB - Чешка република)

Съавтори:

Елизабет Цветанова (АЯР - България)

Анти Даавиттила (STUK - Финландия)

Михал Меличарек (UJD - Словакия)

Естер Ретфалви (НАЕА - Унгария)

Август, 2022

Цел на документа

Тъй като диверсификацията на доставките на ядрено гориво става все по-важна, Държавната служба за ядрена безопасност на Чешката република (SÚJB) установи, че е необходимо да се опростят и хармонизират лицензионните изисквания за доставка на ново ядрено гориво в страните, които използват гориво за реактори ВВЕР. Това доведе до създаването на набор от изисквания за лицензиране на новото гориво и последва обсъждане на различията между другите национални подходи.

Следният набор от изисквания беше избран и разгледан от националните регулаторни органи на България, Финландия, Унгария и Словакия, като техните мнения и коментари бяха отразени в текста.

Тези изисквания трябва да бъдат изпълнени, за да се одобри доставчикът на ново гориво в АЕЦ "Темелин и АЕЦ "Дуковани" или всяка друга АЕЦ с реактори ВВЕР. Документът се основава на Ръководството за безопасност на SÚJB BN-JB-3.2 „Проектиране на активната зона на реактор с вода под налягане” и на Стандарта за безопасност на МААЕ №. SSR2/1, „Безопасност на атомните електроцентрали: Проект, специфични изисквания за безопасност”, № SSR-2/1 (Rev. 1), заедно с TECDOC № 1720 на МААЕ, „Експлоатация и лицензиране на смесени активни зони във водоохлаждаеми реактори”.

1. Експлоатационен опит

- (1.1) Приложим експлоатационен опит или достатъчни експериментални измервания трябва да бъдат натрупани за горивните касети (ГК) или за основни компоненти със същата конструкция и свойства или много сходни свойства, които служат като еталон.
- (1.2) Резултатите и опитът трябва да бъдат натрупани в ядрена или експериментална инсталация, в която ГК се експлоатират и изследват при същите експлоатационни условия.

2. Термохидравлични анализи

- (2.1) Основната цел на топлинния и хидравличния проект на активната зона на реактора е да се осигури такъв пренос на топлина от активната зона, който да осигури отвеждането на топлината при всички експлоатационни състояния.
- (2.2) Специфичните проектни предели трябва да отчетат оценката на следните параметри:
 - Максималната локална и средна линейна или обща топлинна производителност на топлоотделящия елемент (ТОЕ);
 - Минималният запас до криза на топлообмена;
 - Максималната температура и енталпия на горивната таблетка;
 - Максималната температура на обвивката на ТОЕ.

- (2.3) Анализите на проекта следва да отчитат по подходящ начин неопределеностите в стойностите на параметрите на процеса, неутронно-физичните свойства на активната зона на реактора и методите за изчисление, използвани при оценката на термохидравличните проектни предели.
- (2.4) При анализите следва да се вземат предвид проектните предели за минималния и максималния разход на топлоносителя в активната зона и тези предели следва да се спазват или трябва да бъдат представени подробни анализи, за да се докаже, че проектните предели за активната зона не се превишават. Общият разход на топлоносителя през активната зона, ГК и байпаса на активната зона трябва да бъде определен в термохидравличния проект на ГК.
- (2.5) Анализите на термохидравличния проект на активната зона на реактора трябва да отчитат всички специфични проектни характеристики на ГК и свързаните с тях производствени и експлоатационни отклонения, които са стъпката на отделните ТОЕ в касетата, мощността на ТОЕ, формата и размера на подканалите, дистанционниращите решетки и смесителните решетки, включително техните допустими експлоатационни деформации.
- (2.6) Термохидравличният проект трябва да гарантира, че определянето на запаса до криза на топлообмена отчита факта, че корелациите на критичния топлинен поток са определени на основата на изпитвания, извършени в стационарни условия. Вследствие на това следва да се използва и ясно да се демонстрира запасът, установен за нестационарни изходни събития при оценка на нормалната експлоатация и нарушения на нормалната експлоатация. Тъй като критичният топлинен поток е измерен при стационарни условия, запасът трябва да бъде достатъчно адекватен, за да се избегне повреда на ТОЕ дори при нестационарни състояния при нормална експлоатация и при нарушения на нормалната експлоатация.
- (2.7) Експериментите за установяване на корелациите на критичния топлинен поток трябва да се провеждат за достатъчно широк диапазон на предвидените работни условия и с достатъчен брой измерени точки, за да се осигури, че определянето на пределните стойности на минималния критичен топлинен поток може да бъде статистически оценено в съответствие със световната практика. Освен това трябва да се направи оценка на използваната корелация за запас до криза на топлообмена и неговите пределни стойности, както и да се извърши оценка на стойността на турбулентното смесване за всяка използвана корелация на запаса до криза на топлообмена.
- (2.8) Запасът до криза на топлообмена се изчислява за избраните горивни зареждания, за да се потвърди достатъчната безопасност на активната зона. За да се демонстрира съответствието с проектните термохидравлични изисквания, оценката на запаса до криза на топлообмена с корелациите на критичния топлинен поток трябва да бъде гарантирана с вероятност от 95 % при ниво на

значимост 95%, че "горещият" ТОЕ в активната зона не достига условията на криза на кипене при никакви състояния на нормална експлоатация или нарушения на нормалната експлоатация.

3. Неутронно - физични анализи

(3.1) Проектът на активната зона на реактора трябва да определя основните параметри на безопасност, характеризиращи неутронно-физичните свойства на активната зона. Наборът от ключови параметри на безопасност трябва да бъде следния:

- Температурният коефициент на реактивност на горивото (коефициент на Доплер);
- Температурният коефициент на реактивност на забавителя (топлоносителя);
- Коефициент на реактивност по плътност на теплоносителя и забавителя;
- Скоростта и ефективността на изменение на концентрацията на разтворимия поглъtitел в теплоносителя;
- Скоростта и величината на внасяне на положителна реактивност, причинена от движението на органите за регулиране или промени в параметрите на процеса;
- Скоростта и степента на въвеждане на отрицателна реактивност, свързана със спиране на реактора;
- Минималната част на забавените неутрони за началото и края на кампанията, предели за дълбочина на изгаряне на горивото;
- Резервът на реактивност до спиране на реактора;
- Коефициентите на неравномерност в радиална и аксиална посока (коефициенти на изкривяване на мощността за ТОЕ и ГК), включително отклонението, предизвикано от ксенонови колебания, когато е приложимо;
- Относителната максимална линейна скорост на увеличаване на топлинната мощност.

Гореспоменатите коефициенти трябва да бъдат определени така, че да покриват избрани събития, които могат да възникнат по време на експлоатацията на ядрената инсталация за всички типове ГК. За всички състояния на ядрената инсталация анализите трябва да показват, че не са превишени проектните предели за горивото, приложими към определените състояния на ядрената инсталация.

(3.2) Проектът на активната зона на реактора трябва да включва изчисления на стационарните и нестационарните пространствени разпределения на неутронния поток и на топлинната мощност, неутронно-физичните

характеристики и ефективността на средствата за контрол на реактивността за избраните състояния на ядрената инсталация.

- (3.3) Ключови параметри на безопасност, като например коефициенти на реактивност, се изчисляват за избраните експлоатационни състояния (например нулева мощност, номинална мощност, начало на експлоатационния период, края на експлоатационния период) и за избрани горивни кампании. Анализира се тяхната зависимост от горивното зареждане и от дълбочината на изгаряне на горивото.
- (3.4) Трябва да бъдат отчетени основните изходни събития, свързани с въвеждането на реактивност, като например:
- Изхвърляне на най-ефективния орган за регулиране;
 - Неконтролирано навлизане на чист кондензат в топлоносителя (разреждане на борната киселина);
 - Неконтролирано извличане на група от органи за регулиране;
 - Падане на орган за регулиране.
- (3.5) Ограничението за скоростта и количеството на внасяната реактивност се определят на базата на анализите, доказващи съответствие с проектните критерии за горивото.
- (3.6) Оценява се съвместимостта на ГК със системата за измерване в активната зона, включително съвместимостта между показанията на датчиците и резултатите от изчисленията на софтуера. Освен това следва да се изчисли флуенсът на неутроните върху корпуса на реактора, вътрешно-корпусните устройства на реактора и образците - свидетели.

4. Механични и термомеханични анализи

- (4.1) Конструкцията на ГК и на ядрената инсталация трябва да гарантират, че касетите няма да бъдат повредени в условията на нормална експлоатация и отклонения от нормалната експлоатация поради механичното натоварване, предизвикано от следните въздействия:
- Всички манипулации с касети и ТОЕ, включително зареждането им в активната зона;
 - Преднамерените и непреднамерените промени в нивото на мощност на реактора;
 - Силите на натиск върху ГК (които компенсират силите на хидродинамичното повдигане и промените в геометрията на вътрешните части на реактора и на касетите; поради облъчване и топлинно разширение);
 - Температурните градиенти;
 - Хидравличните сили, включително напречния поток между деформираните ГК или различните ГК в смесената активна зона;

- Ефектите от облъчването върху материалите (напр. радиационно индуциран растеж и набъбване);
 - Хидро-динамичните вибрации на ТОЕ и вибрационното износване на обвивката на ТОЕ (износване на ТОЕ от триене в дистанциониращата решетка);
 - Нееластичните деформации на скелета на ГК, които могат да доведат до прекомерна деформация на ГК - огъване и усукване.
- (4.2) Критерият за повреда на обвивката на ТОЕ по време на стъпаловидно повишаване на мощността трябва да се подкрепя чрез един от следните подходи или чрез тяхната комбинация, като се вземат предвид характеристиките на конкретния тип на ТОЕ, по-специално характеристиките на горивото и материала на обвивката на ТОЕ:
- Изпитвания в активната зона, т.нар. вътрешно-реакторни изпитвания със стъпаловидно повишаване на мощността;
 - Моделиране на изпитвания в активната зона; или
 - Експерименти, проведени върху облъчената обвивка на ТОЕ.
- (4.3) Целостта на ТОЕ поради хидро-динамичните ефекти (напр. предизвиканите от потока износване и вибрации, спадове на налягането) се демонстрира чрез изпитвания, извършени на квалифицирани хидравлични контури, като се използват имитатори на ГК (за предпочитане пълномащабни) и в условията на изпитване на прототипа (напр. налягане, температура и напречен поток).
- (4.4) Проектът на активната зона на реактора трябва да включва анализи на напреженията, като например оценка на разхлабването на пружините на дистанциониращите решетки по време на облъчване на ГК, за да се предотврати възможността за вибрационно износване, предавано от решетка към ТОЕ. Анализите на напреженията и геометричната стабилност трябва да включват въздействието на облъчването върху компонентите на ТОЕ, ГК и АЗ, върху механичните свойства на използваните материали, като якост на опън, пластичност, радиационно-индуцирано нарастване, пълзене, радиационно втвърдяване и отпускане.
- (4.5) Трябва да бъде оценена съвместимостта на ГК с актуалния химичен състав на водата в първи контура за различни експлоатационни състояния.

5. Проектни аварии

- (5.1) В условията на проектна авария обвивката на ТОЕ не трябва да се поврежда до степен, при която не може да издържи на механичното натоварване при аварията (напр. натоварване, предизвикано от авария със загуба на топлоносител при скъсване на тръбопровод с голям диаметър). Оценката трябва да вземе предвид степента на окисляване на обвивката на ТОЕ както преди преходния процес, така и по време на преходния процес (от външната страна на

обвивката на ТОЕ и, ако е необходимо, от вътрешната страна на обвивката на ТОЕ за повредени ТОЕ); освен това тя трябва да включва химическите взаимодействия между горивната таблетка и обвивката на ТОЕ. Препоръчителните критерии за проектна авария трябва да ограничават:

- Окисляване на обвивката;
 - Хидрогениране на обвивката;
 - Увеличаване на радиалната средна енталпия на горивото;
 - Температура на обвивката.
- (5.2) В горепосочените анализи трябва да бъдат включени специфичните ефекти от поведението на горивото, като се вземат предвид разширението и деформацията, като балониране, разкъсване на обвивката на ТОЕ, както и усукване и огъване на ТОЕ и ГК, пикови ефекти или предизвикани от потока вибрации. Трябва да бъде оценено тяхното въздействие върху отвеждането на топлината и последващото освобождаване на продукти на делене от ТОЕ.
- (5.3) Проектът на активната зона на реактора трябва да гарантира, че промените в геометрията на ГК и ТОЕ са ограничени, за да се избегне контакт или механично взаимодействие между ТОЕ и горната част на ГК и между ТОЕ и долната част на ГК. Освен това трябва да гарантира, че изкривяванията на ТОЕ и/или ГК са ограничени и деформациите на органите за регулиране и техни други възможни взаимодействия с направляващите тръби на ГК не засягат структурната цялост на касетите и/или функцията по безопасност на органите за регулиране (напр. управление на реактора, спиране, дългосрочно охлаждане).
- (5.4) Влиянието на облъчването върху устойчивостта на дистанциониращите решетки на натиск в хоризонтална посока трябва да се отчита при оценката на сеизмичните събития или аварии със загуба на топлоносител (анализ на механичната реакция на ГК на сеизмично натоварване или натоварване при авария със загуба на топлоносител – доказателство за запазване на способността за охлаждане на ТОЕ и геометрията на ГК).
- (5.5) ГК, като част от активната зона, трябва да се оценяват на сеизмични въздействия.
- (5.6) Ако е необходимо, се оценяват избрани сценарии на надпроектни аварии.

6. Система за контрол и управление

- (6.1) Конструкцията на ГК и на активната зона на реактора трябва да улеснява и осигурява използването на необходимите контролно-измервателни уреди и датчици за наблюдение на активната зона.
- (6.2) Контролните пръти се проектират така, че да могат да приведат реактора в подкритично състояние дори в условията на проектни аварии и при надпроектни условия без стопяване на активната зона.

- (6.3) Проектът на органите за регулиране и другите компоненти на активната зона трябва да гарантира, че те издържат без да се повредят, на всички технологични операции по време на презареждане на горивото, транспортиране и съхранение.
- (6.4) Проектът на органите за регулиране и контрол трябва да отчита тяхното износване и ефекта от облъчването при експлоатацията, например изгаряне на поглътителя, промени във физичните свойства и производство на газообразни продукти на делене.

7. Управление на горивото

- (7.1) Анализите на проекта за зареждане с гориво и свързаните с тях изчисления трябва да обхващат случаите с гранични стойности на параметрите за експлоатационни събития и експлоатационни състояния по време на избрани горивни кампании.
- (7.2) Оценката на безопасността трябва да описва изходните събития, които биха могли да предизвикат неочаквана критичност при манипулации с горивото по време на презареждане.

8. Съхранение

- (8.1) Проектът на ядрената инсталация и на контейнера трябва да отговаря на изискванията за подкритичност за зареждането на контейнера при преместване, транспортиране, съхранение и погребване на гориво, които включват неопределености и достатъчно запас за всички използвани видове ГК.
- (8.2) Проектът за съхранение на гориво и проектът на контейнера трябва да гарантират, че стойността на ефективния коефициент на размножаване на неутроните (K_{eff}) не превишава:
- 0,95 за всички състояния; и
 - 0,98 за състоянията на оптимално забавяне на неутроните (напр. наводняване с чиста вода) за контейнерите при сухо съхранение или съхранение под вода.
- (8.3) Пределите за температура на горивото не трябва да се превишават при съхранение на горивото (сухо и под вода) и трябва да се оценяват.
- (8.4) Проектът на решетките за съхранение трябва да включва анализи за свежо гориво, определящи подкритичността за групата. Анализите се провеждат по-специално за следните условия:
- Заливане на ядреното гориво с чиста вода с максимална плътност;
 - Падане на касета при операции с гориво (напр. върху горните части на други касети, съхранявани в басейн за съхранение на отработеното гориво).

9. Превоз

- (9.1) Анализите на подкритичността за контейнерите (за превоз и съхранение, за облъчено и свежо гориво) се провеждат за условията на проектни аварии и условията на оптимално забавяне на неутроните. В случай на наводнение (или оптимално забавяне на неутроните) ефективният коефициент на размножаване на неутроните (K_{eff}) не трябва да надвишава 0,98, а в останалите случаи - 0,95. Транспортните контейнери могат да бъдат лицензирани отделно или да се използват вече лицензирани контейнери в рамките на спецификацията.

10. Смесена активна зона

- (10.1) Ако приложимият експлоатационен опит и експерименталните измервания при експлоатацията на смесена активната зона не могат да бъдат демонстрирани (напр. съвместното разполагане на новото гориво и експлоатирувания тип ядрено гориво в активната зона), се предлага програма за пилотна тестова касета (LTA).
- (10.2) Проектът на смесената активна зона трябва да включва анализ на механичната и термохидравличната съвместимост между съществуващата и новата ГК заедно с реакторно-физични изчисления, както и оценка на условията на деформация.
- (10.3) Проектът на смесената активна зона следва да включва изчисления на преразпределението на градиента на налягането между новия и съществуващия тип ГК, който се използва за определяне на силата, приложена към притискащата пружина на касетата.
- (10.4) Проектът на смесената активна зона трябва да предотвратява прекомерната деформация на геометрията на ГК и не трябва да надвишава предварително определената проектна разлика в хидравличното съпротивление на ГК от различни типове (по-специално на новия тип касети, съседен на съществуващия тип ГК).
- (10.5) Проектът на новия тип ГК трябва да включва оценка на зависимостта на вибрациите на отделните компоненти от дълбочината на изгаряне, интензивността на вибрациите и скоростта на вибрационното износване, като се вземат предвид условията в смесената активна зона.
- (10.6) Анализът на смесената активна зона следва да включва оценка на напречния поток между касетите.
- (10.7) Консервативното допускане за относителната мощност на ТОЕ ($F\Delta h$, K_r) и аксиалното разпределение на потока трябва да се оценят за всяка касета в смесената зона, за да се осигури съвместимост на различните конструкции на горивото.
- (10.8) Изчисленията трябва да включват в достатъчна степен всички нехомогенности по границите на отделните видове гориво, които могат да доведат до

неочаквана промяна на плътността на неутронния поток и разпределението на мощността в активната зона, или до загуба на валидността на използваните изчислителни методи.

- (10.9) Ако типовете ГК, които се експлоатират едновременно в смесена активна зона, имат различна твърдост, проектът трябва да включва изчисления на силите, приложени към касетите по време на проектните аварии и следва да определи скоростта на деформация на геометричната устойчивост на ГК и да демонстрира изпълнението на основните функции на безопасност. Комбинирането на изкривяването на отделните видове ГК не трябва да ограничава възможността за падане на органите за регулиране и контрол или да предизвика засядането им в направляващите тръби. Анализите или експерименталните данни трябва да показват, че геометричната стабилност на ГК не се нарушава и че основните функции на безопасност се изпълняват.

11. Методи и процедури

- (11.1) Методите и процедурите на горепосочените анализи и проведените експерименти се документират по такъв начин, че да са ясни и лесни за идентифициране, да са проследими и възпроизводими.
- (11.2) Входните параметри трябва да са ясно определени, за да може да се възпроизведат данните при независима оценка.
- (11.3) Необходимо е провеждането на независимата оценка.
- (11.4) Компютърните програми, използвани за горепосочените анализи, трябва да бъдат проверени и одобрени от местен или международен компетентен орган или тяхното валидиране и проверка се документират, реферират и преглеждат в съответствие с регулаторните изискванията.