

СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ИЗИСКВАНИЯТА В ПРОЦЕДУРА НА МААЕ, МЕТОДИКА НА ГП НАЭК “ЭНЕРГОАТОМ”, УКРАЙНА И МЕТОДИКА НА “РОСЭНЕРГОАТОМ”, РУСИЯ ЗА ОЦЕНКА НА РЕСУРСА НА ЯДРЕНИ СЪОРЪЖЕНИЯ, ТИП ВВЕР 1000 В ПРОЦЕСА НА ЕКСПЛОАТАЦИЯ

Галя Тодорова Димова,

3321 “АЕЦ Козлодуй” ЕАД, ОКС-ИЦ “ДиК”, България

1. Увод

Ресурсът за експлоатация на съоръжения и тръбопроводи в реакторните установки е обоснован с необходимия якостен запас за определения експлоатационен период. Независимо от това, фактическият ресурс на съдове и тръбопроводи може да е по-малък от проектния ресурс в зависимост от изготвянето и от условията на експлоатация на обектите. Изменението на механичните свойства на материалите под влияние на неутронното окрежкостяване се изразява в уякчаване при едновременна загуба на пластичност. Процесът се развива експоненциално и окрежкостяването е най-силно в първоначалните периоди от експлоатацията на енергоблока. Въпросът за оценка на ресурса на ядрени установки и на тази база удължаване на експлоатационния период е важен за по-нататъшната експлоатация на енергоблоковете. В настоящия доклад са разгледани изискванията на три документа – които са известни и приложими всеки поотделно в областта на оценка на ресурса. Към настоящия момент няма български нормативен документ за оценка на ресурса на ядрени съоръжения.

2. Унифицирана процедура за оценка на ресурса на компоненти и тръбопроводи в АЕЦ с ВВЕР тип реактори (Verlife procedures); изд. МААЕ

Процедурата е разработена и се съгласува между страните-членки на МААЕ в рамките на проекта RER/4/030 901601; предвижда се през 2010 г. да се въведе като действащ документ. Процедура е документ от методични части, които са разработени по отделни критерии за оценка на пределното състояние на обекти: оценка на остатъчния ресурс по критерий корозионно-механични повреди на материала, оценка на остатъчния ресурс по критерий съпротивление на умора на материала, оценка на остатъчния ресурс по критерий съпротивление на развитието на постулирана (детектирана) пукнатина, оценка на

остатъчния ресурс по критерий съпротивление на неутронно окрежкостяване. В приложенията са обхванати организационни и технически аспекти на дейностите по оценка на ресурса - концепцията “теч преди скъсване” (leak before breaking, LBB); квалификация на система за безразрушителен контрол; рисково-информирания контрола; оценка на ресурса на опори; препоръки за периодичност на контрола; оценка за зони без скъсване (No-break-area Assessment) - демонстриране, че в случай на потенциално скъсване на високоенергиен (главен) тръбопровод е възможно да се осигури безопасното спиране на енергоблока.

3. Методика оценки прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР в процессе эксплуатации, МТ-D.0.03.391-09, изд. ГП НАЭК “Энергоатом”, Украина, 2009 г.;

В методиката МТ-D.0.03.391-09, са изложени принципни положения за оценка на съпротивление на крехко разрушаване на корпуси на реактори в процеса на експлоатация. Типовите оценки се правят за постулирани дефекти или за констатирани дефекти при безразрушителен контрол; прилага се нелинейна механика на разрушаване.

4. Руководящий документ. Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР при эксплуатации (МПКР-СХР-2004), РД ЭО 0606-2005, изд. Федеральное агенство по атомной энергии и „РОСЭНЕРГОАТОМ”, 2005 г.

В руската методика са развити подробно якостните разчети и то при различни положения на постулираните дефекти. Определят се условията, които ефективните нето напрежения трябва да изпълняват, за да е приложима линейната или нелинейната механика на разрушение; зоните на остатъчни заварени напрежения и деформации извън зоната на заварения шев; кинетика на уморно разрушаване.

5. Основни позиции и технически изисквания в документите: процедурата Verlife, методиката МТ-D.0.03.391-09 и методиката МПКР-СХР-2004 за оценка на остатъчния ресурс

В Таблица 1 е обобщено съдържанието на изискванията на трите документа. Целта е да се представят параметрите, необходими за оценка на ресурса на корпуса на реактор ВВЕР-1000 и да се направи сравнителен анализ на техническите изисквания по трите документи. Използваните съкращения и обозначения са, както следва: АС - аварийни ситуации; ВВЕР – водо-водни енергийни реактори; МААЕ – Международна агенция по ядрена енергетика; НУЕ-нормални условия за експлоатация; ННУЕ – нарушение на нормалните условия на експлоатация; ХИ- хидравлични изпитания; A_f - химичен коефициент на окрежкостяване

- a – малка полуос на постулирана полуелиптична пукнатина, m;
- n_i – коефициент на якостен запас
- K_I - коефициента на интензивност на напрежението, $\text{Мра.m}^{1/2}$
- K_{IC} - критична стойност на коефициента на интензивност на напрежението, $\text{Мра.m}^{1/2}$
- $R_{P_{0.2}}^T$ - условна граница на провлачане, Мра
- s - дебелината на стената на корпуса на реактора, m
- T - температурата на стената, $^{\circ}\text{C}$
- T_K - критична температура на крехкост, $^{\circ}\text{C}$
- ΔT_K - преместване на критична температура на крехкост, $^{\circ}\text{C}$

Индексите характеризират: T – температурно стареене; N – циклично повреждане / брой цикли на натоварване; F – радиационно повреждане; 0 – изходно състояние.

6. Заключение

1. Процедура на МААЕ обобщава всички аспекти, отнасящи се за оценка на ресурса; но техническите подробности са ограничени.
2. Изискванията в украинската методика **MT-D.0.03.391-09** са насочени към тези въпроси на оценката на ресурса на корпуси на реактори, които се свързват с входните данни при пресмятанията и чието некоректно определяне е сериозен източник на грешки. Това са въпросите за определянето на флуенса на бързи неутрони на корпуса, изисквания към изпитванията на образци-свидетели, събирането на данни при термохидравличните разчети.
3. Изискванията в руската методика **РД ЭО 0606-2005** се свързват предимно с техническите аспекти на оценката на ресурса на корпуси на реактори - много подробно са якостните анализи и определяне на K_{IC} за различни реакторни материали, различни случаи на разположение на дефектите, зависимости в графичен и табличен вид.

7. Използвана литература

1. Unified Procedures for Lifetime Assessment of Components and Piping in NPPs with WWER type reactor (Verlife procedures); МААЕ, проектен документ
2. Методика оценки прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР в процессе эксплуатации, MT-D.0.03.391-09, изд. ГП НАЭК “Энергоатом”, Украина, 2009 г.;
3. Руководящий документ. Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР при эксплуатации (МРКР-СХР-2004), РД ЭО 0606-2005, изд. Федеральное агенство по атомной энергии и „РОСЭНЕРГОАТОМ”, 2005 г.

№	Обхват / изисквания/параметри	Процедурата Verlife (МААЕ)	Методиката MT-D.0.03.391-09 (украинска)	Методиката МРКР-СХР-2004 (руска)
1	2	3	4	5
1.	Избор на критични зони за оценка	Оборудване и системи, важни за безопасността	Корпуса на реактора	Корпуса на реактора-обечайки и кръгови заварени съединения на цилиндричната част на корпуса.
2. 2.1.	При избора на критични зони се вземат предвид: Резултати от безразрушителния контрол	Представена е методична част за оценка на ресурса в случай на дефекти от безразрушителен контрол; изисквания за схематизация на дефектите. Критерият за ресурса е изключване нарастването на дефекта над допустимите норми (т.е. времето, за което дефекта ще нарастне над допустимите стойности).	Методиката обхваща разчетни оценки с постулирани дефекти и с констатирани дефекти. За дефекти с размери $<$ постулираните се допуска да не се извършват разчети; в случай на дефекти $>$ постулираните, разчетите се изпълняват за най-лош сценарий – термоудар при аварийна ситуация.	Методиката обхваща анализ на зони с най-голяма стойност на K_I , или с най-малка стойност на $[K_{IC}]$, или с най-малка стойност на $[K_{IC}]/K_I$ във всеки момент от време. Разглеждат се постулирани дефекти (презумпцията е, че констатираните недопустимите дефекти са отстранени).
2.2.	Напрегнато-деформационното състояние на обекта	Напрегнато-деформационното състояние се изчислява на база вътрешното налягане, собствени напрежения на конструкцията (мембранни, огъващи, усукващи и др.) температурни градиенти и остатъчни заварени напрежения.	Методиката изисква определяне на параметрите на термосиловото натоварване, които са необходими за: градиента на налягане и температура на стената на корпуса на реактора; разпределението на полето на топлоотдаването на системата топлоносител – стена на корпуса.	В отделни методични части се определя K_{IC} за къси дефекти; разпределението на остатъчни заваръчни напрежения и деформации извън зоната на заварения шев, определя се K_{IC} за метала на наплавката. Прави се оценка на нарастването на пукнатината в метала на наплавката.
2.3.	Деградация на механични свойства	Оценките на ресурса се правят на база механизми на деградация:	Оценките на ресурса се правят на база механизми на	Оценките на ресурса се правят на база механизми на

№	Обхват / изисквания/параметри	Процедурата Verlife (МАНЕ)	Методиката МТ-D.0.03.391-09 (украинска)	Методиката МРКР-СХР-2004 (руска)
1	2	3	4	5
	на материалите при експлоатация / механизми на деградация, които се вземат предвид при оценката	-Циклична умора; - Корозия и ерозия; -Нарастване на пукнатината при циклично натоварване; - Неутронно окрежкостяване; - Стареење на материала	деградация: -Неутронно окрежкостяване; -Циклична умора; -Нарастване на пукнатината при циклично натоварване;	деградация: -Неутронно окрежкостяване; -Циклична умора; -Нарастване на пукнатината при циклично натоварване;
3.	Избор на експлоатационни режими за оценка на ресурса	Оценките на остатъчния ресурс следва да се провеждат за експлоатационни режими: НУЕ; ННУЕ; ХИ; АС		
4.	Оценка по критерий съпротивление на крехко разрушаване за постулирани дефекти	Критерият за ресурса е изключване на крехкото разрушаване за всички експл. режими, $K_I = n_i \cdot K_I \leq [K_{IC}]^*$	Критерият за ресурса е изпълнение на условието: $K_I = n_i \cdot K_I \leq [K_{IC}]^*$	Критерият за ресурса е изпълнение на условието: $K_I = n_i \cdot K_I \leq [K_{IC}]^*$
5.	Оценка по критерий съпротивление на крехко разрушаване за констатирани от безразрушителен контрол дефекти	Критерият за ресурса е изключване на нарастването на дефекта над допустимите стойности съгласно нормативите, $K_I \leq [K_{IC}]$ (позиция 2.1)	$K_I = n_i \cdot K_I \leq [K_{IC}]^*$	Не се изисква – разглеждат се само постулирани дефекти (граничния случай на оценка на ресурса)
6.	Оценка по критерий съпротивление на умора	Критерият за ресурса е изключване на всяко инициране на дефект с големина над 1mm вследствие на умора на материала.	Умората на материала се разглежда само като принос ΔT_N към критичната температура на крехкост: $T_K = T_{K_0} + \Delta T_F + \Delta T_T + \Delta T_N$	Умората на материала се разглежда: а) освен като принос ΔT_N към критичната температура на крехкост: $T_K = T_{K_0} + \Delta T_F + \Delta T_T + \Delta T_N$, б) $\frac{da}{dN} = f\left(\frac{\Delta K}{R}\right)$ приложени са формули за материала на наплавката, за

№	Обхват / изисквания/параметри	Процедурата Verlife (МААЕ)	Методиката MT-D.0.03.391-09 (украинска)	Методиката МРКР-СХР-2004 (руска)
1	2	3	4	5
				основния метал и за метала на шева
7.	Оценка по критерий съпротивление на корозионно-механични повреди	Критерият за ресурса е изключване на всяко инициране на дефект с големина над 1mm вследствие на корозионно-механични повреди.	Този критерий не е приложим	Не се включва.
8.	Оценка по критерий съпротивление на неутронно окрежкостяване	$T_K = T_{K_0} + \Delta T_F + \Delta T_T + \Delta T_N$ $\Delta T_F = A_F \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^{1/3}$ <p>Има конкретни стойности на A_F при различни марки стомани.</p>	$T_K = T_{K_0} + \Delta T_F + \Delta T_T + \Delta T_N$	$T_K = T_{K_0} + \Delta T_F + \Delta T_T + \Delta T_N$ $\Delta T_F = A_F \cdot \left(\frac{F}{F_0} \right)^{1/3}$ <p>Има конкретни стойности на A_F при различни марки стомани.</p>
9.	Избор на постулирана пукнатина	Повърхностна и поднаплавъчна полуелиптична пукнатина със съотношение на полуосите $a/c=0,3$ или $a_{calc}=0.1s$ до $0.25s$	Повърхностна и поднаплавъчна полуелиптична пукнатина със съотношение на полуосите 1:3	Плоски повърхностни и поднаплавъчни полуелиптични пукнатини с осева или окръжна ориентация. Има 3 варианта за избор на постулирана пукнатина.**
10.	Основни характеристики на материалите, използвани при оценките.	$K_{IC}, T_K, R_{P_{0,2}}^T, D$	$K_{IC}, T_K, R_{P_{0,2}}^T$	K_{IC}, T_K , остатъчни заваръчни напрежения Конкретни формули за пресмятане на $R_{P_{0,2}}^T$
11.	Изменението на механичните свойства на материалите в процеса на експлоатация се отчита чрез изменение на критичната	$K_{JC}^{5\%} = \min \{ 25.2 + 36.6 \exp(0.019 \cdot \Delta T_K), 200 \}$	$\bar{K}_{IC} = 23 + 48 \cdot \exp[0.019 \cdot \Delta T_K]$ $\tilde{K}_{IC} = 23 + 27 \cdot \exp[0.019 \cdot \Delta T_K] - \text{при доверителен вероятностен интервал } 0.05$	

№	Обхват / изисквания/параметри	Процедурата Verlife (МААЕ)	Методиката MT-D.0.03.391-09 (украинска)	Методиката МРКР-СХР-2004 (руска)
1	2	3	4	5
	температура на крехкост ΔT_K .			
12	Методична част за определяне на неутронния флуенс в реактора, изчислителни кодове, неопределеност на измерванията	Определянето на радиационното натоварване се извършва чрез комбинация от измервания и изчисления в случаи 1-D, 2-D, 3-D	Налице е много подробна и обоснована методична част за определяне на флуенса / подходяща е за целите на валидиране на тези процеси.	Не е включена.
13.	Ресурсът се определя като:	Критерият за ресурса е изключване на крехкото разрушаване за всички експлоатационни режими. $K_I = n_i \cdot K_I \leq [K_{IC}]^*$	Минималното време от началото на експлоатацията, при което в която и да е зона на корпуса на реактора, в какъвто и да е проектен режим се изпълняват якостните критерии по съпротивление на крехко разрушаване. $K_I = n_i \cdot K_I \leq [K_{IC}]^*$	Минималното време от началото на експлоатацията, при което в която и да е зона на корпуса на реактора, в какъвто и да е проектен режим се изпълняват якостните критерии по съпротивление на крехко разрушаване $K_I = n_i \cdot K_I \leq [K_{IC}]^*$

Таблица 1: Сравнителен анализ на изискванията на Процедурата Verlife, Методиката MT-D.0.03.391-09 и Методиката МРКР-СХР-2004