

Активная зона реактора ВВЭР-1200 (В-392М)

Назначение и проектные основы

1 Активная зона реактора ВВЭР-1200 (В-392М) состоит из 163 ТВС, в части из которых, в соответствии с картограммой активной зоны, размещаются 121 ПС СУЗ.

ТВС предназначены для генерирования тепла и передачи его с поверхности твэлов теплоносителю в течение проектного срока службы без превышения допустимых проектных пределов повреждения твэлов.

ПС СУЗ предназначены для быстрого прекращения ядерной реакции в активной зоне, поддержания мощности на заданном уровне и ее перевода с одного уровня на другой, выравнивания поля энерговыделения по высоте активной зоны, предупреждения и подавления ксеноновых колебаний. ПС СУЗ, сцепленный со штангой привода, представляет собой ОР СУЗ.

Для проекта энергоблока №1 Нововоронежской АЭС (РУ ВВЭР-1200) выбрана активная зона реактора с использованием ТВС, обеспечивающими:

- номинальную тепловую мощность реактора 3200 МВт;
- длительность работы РУ между перегрузками 12 месяцев (с учетом времени на ППР).

В основу конструкции ТВС для ВВЭР-1200 положены решения, опробованные и имеющие положительный опыт эксплуатации на действующих энергоблоках ВВЭР-1000 в следующих конструкциях:

- ТВС-2 (со штатным количеством топлива). ТВС-2 находилась в опытно-промышленной эксплуатации, начиная с 2003 года, а с 2006 года переведена в промышленную эксплуатацию на энергоблоках №1-4 Балаковской АЭС и №1 Ростовской АЭС;

- ТВС-2М (с увеличенным количеством топлива). ТВС-2М в 2006-2010 годах успешно прошла опытно-промышленную эксплуатацию на энергоблоке №1 Балаковской АЭС, с 2010 года переведена в промышленную эксплуатацию, в 2010 году энергоблок №2 Ростовской АЭС введен в эксплуатацию с активной зоной полностью состоящей из ТВС-2М. начиная с первой топливной загрузки.

В настоящее время энергоблоки №1-4 Балаковской АЭС и №1, 2 Ростовской АЭС эксплуатируются с активными зонами полностью состоящими из ТВС-2М в 18 месячном топливном цикле на мощности 104 % Nном.

Безопасность активной зоны обеспечивается наличием барьеров, ограничивающих распространение радиоактивных продуктов деления топлива. Такими барьерами являются топливная матрица и оболочка твэла.

Обеспечение безопасной эксплуатации основано на осуществлении мероприятий по сохранению и поддержанию целостности и герметичности оболочек твэлов.

В проекте активной зоны не превышаются пределы повреждения твэлов:

эксплуатационный предел повреждения твэлов - в режимах НЭ:

1) дефекты типа газовой неплотности – не более 0,2 % от числа твэлов в активной зоне;

2) прямой контакт ядерного топлива с теплоносителем – не более 0,02 % от числа твэлов в активной зоне;

предел безопасной эксплуатации повреждения твэлов - в режимах ННЭ:

1) дефекты типа газовой неплотности - не более 1 % от числа твэлов в активной зоне;

2) прямой контакт ядерного топлива с теплоносителем – не более 0,1 % от числа твэлов в активной зоне.

Для контроля соблюдения данных пределов в процессе эксплуатации в проекте установлены предельные значения удельной активности реперных изотопов йода в пробах воды с учетом требований к системе очистки теплоносителя :

-эксплуатационному пределу по негерметичности твэлов соответствует суммарная удельная активность радионуклидов I-131 – I-135 в теплоносителе первого контура реактора – $1,66 \cdot 10^7$ Бк/кг ($4,5 \cdot 10^{-4}$ Ки/кг);

- пределу безопасной эксплуатации по негерметичности твэлов соответствует суммарная удельная активность радионуклидов I-131 – I-135 в теплоносителе первого контура реактора - $1,85 \cdot 10^8$ Бк/кг ($5 \cdot 10^{-3}$ Ки/кг).

Для оценки состояния активной зоны в режимах проектных аварий установлены следующие проектные пределы:

- максимальный проектный предел повреждения ТВЭлов, который соответствует не превышению следующих предельных параметров, которые являются проектными критериями в отношении топливных стержней в аварии с потерей теплоносителя :

- 1) температура оболочек ТВЭлов - не более 1200 °С;
- 2) эквивалентная степень окисления оболочек ТВЭлов должна быть не более предельного значения, устанавливаемого в проекте на основе экспериментальных данных;
- 3) доля прореагировавшего циркония в активной зоне не более 1 % его массы в оболочках ТВЭлов;

В проекте установлено предельное значение эквивалентной степени окисления оболочек ТВЭЛов 18 %, которое экспериментально обосновано.

Температура плавления диоксида урана: $T_{пл} = 2840 - 0,56 \cdot B$, °С, где B - выгорание, МВт·сут/кг U, добавка Gd_2O_3 снижает температуру солидуса, при содержании Gd_2O_3 5 и 8 % она составляет ~ 2405 и 2300 °С соответственно .

Предельные значения усредненной по сечению топливной таблетки энтальпии топлива экспериментально обоснованы и составляют 963 Дж/г для свежего топлива и топлива с выгоранием до 50 МВт·сут/кгU и 691 Дж/г для топлива с выгоранием более 50 МВт·сут/кгU в любом сечении по высоте ТВЭЛА.

Основные требования к тепловыделяющим элементам, вытекающие из документов Ростехнадзора, заключаются в следующем:

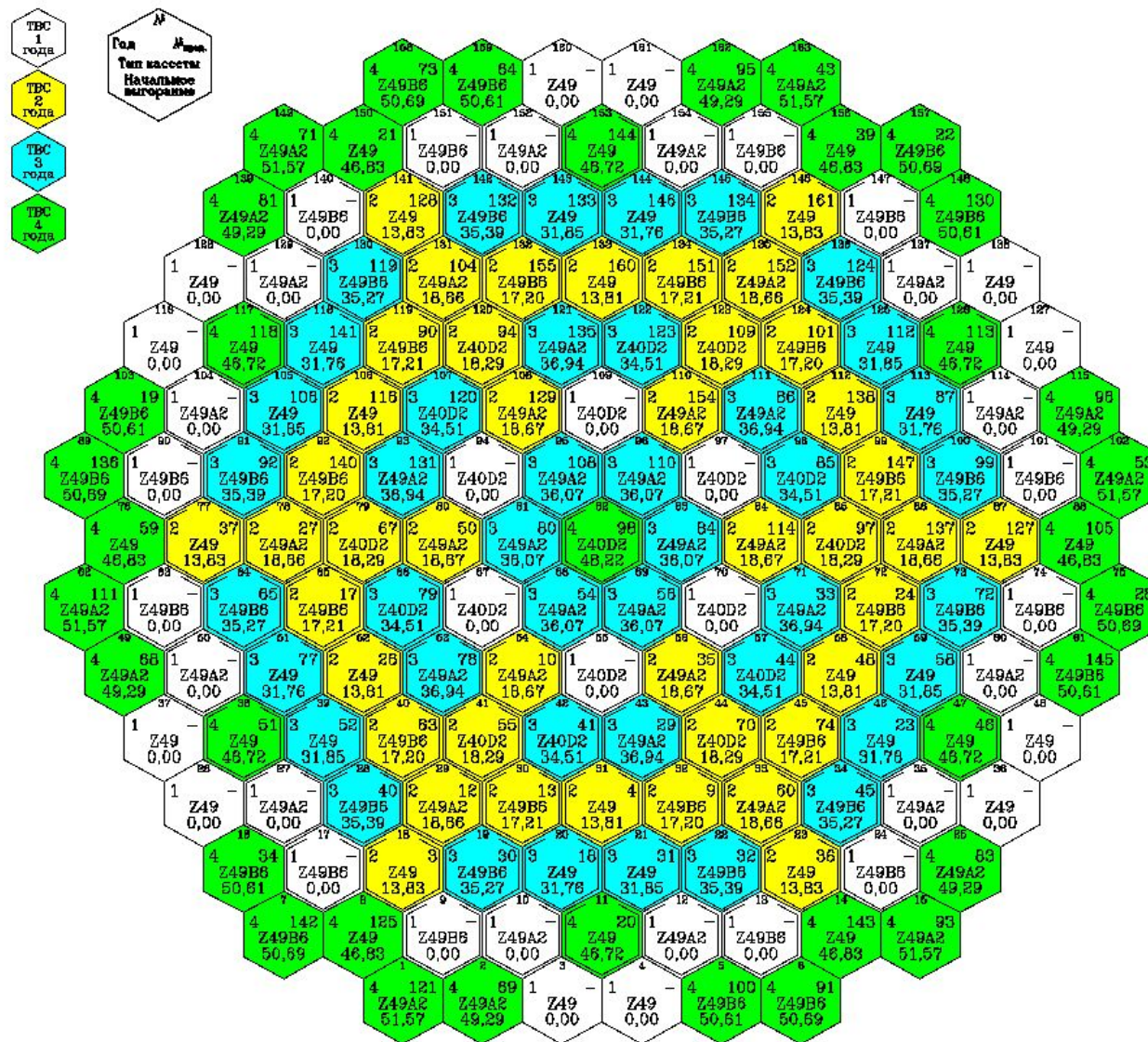
- обеспечивать такую конструкцию топливной системы, которая в состоянии выдерживать механические нагрузки в соответствующих проектных режимах;
- обеспечивать наличие барьера, разделяющего топливо, продукты деления и теплоноситель в режимах нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации;
- выдерживать коррозионные, электро-химические, тепловые, механические и радиационные воздействия на материалы;
- обеспечивать приемлемый расход теплоносителя и теплопередачу в проектных режимах;
- обеспечивать работоспособность в составе топливной сборки.

Проектное обоснование твэлов (твэгов) ВВЭР-1200 обуславливается:

- использованием в твэлах ВВЭР-1200 конструктивных и топливных материалов, применяемых в ВВЭР-1000;
- незначительным изменением конструкции твэла, а именно, увеличением высоты топливного столба на 50 мм, относительно прототипа - твэлов ТВС-2М, прошедших в 2006-2010 годах опытную эксплуатацию на блоке №1 Балаковской АЭС и в настоящее время эксплуатируемых в составе ТВС-2М в промышленной эксплуатации. Остальные параметры – наружный и внутренний диаметр оболочки, наружный диаметр таблетки, диаметр центрального отверстия в таблетке твэла ВВЭР-1200 идентичны твэлу ТВС-2М ВВЭР-1000;
- принципиальным для работоспособности и системы критериев твэлов является сохранение объема газосборника под оболочкой твэла ВВЭР-1200, что достигнуто путем уменьшения габаритного размера верхней концевой детали – головки ТВС ВВЭР-1200 по сравнению с ТВС-2М ВВЭР-1000;
- непревышением максимального выгорания топлива в среднем по ТВС – $60 \text{ МВт} \cdot \text{сут/кгU}$, освоенного при эксплуатации топлива ВВЭР-1000.

Технические характеристики активной зоны

Наименование характеристики	Значение	
Количество ТВС, шт.	163	163
Количество ТВС с ПС СУЗ, шт.	121	61
Мощность реактора тепловая (номинальная), МВт	3200	3000
Давление теплоносителя на выходе из реактора, абсолютное (номинальное), МПа	16,2	15,7
Температура теплоносителя на входе в реактор, номинальная, °С	298,2	289,8
Температура теплоносителя на выходе из реактора, номинальная, °С	328,6	320
Шаг между ТВС, м	0,236	0,236
Расход теплоносителя через активную зону, (при температуре на входе), м ³ /ч, номинальный	85000	84000
Проходное сечение активной зоны, м ²	4,15	4,17
Высота обогреваемой части (в холодном состоянии), м, номинальная	3,73	3,53
Номинальное время пребывания ТВС в активной зоне при ежегодной перегрузке топлива, топливных загрузок	3-4	3
Максимальное эффективное время эксплуатации ТВС (с учетом работы на мощностном эффекте реактивности), эфф.ч	До 46000	24 000
Средняя расчетная глубина выгорания топлива в выгружаемых ТВС для режима стационарных перегрузок, МВт·сут/кг U	55,5	43
Максимальная допустимая глубина выгорания топлива в ТВС, МВт·сут/кг U	60,0	49
Время падения ОР СУЗ при срабатывании аварийной защиты, в пределах, с	1,2-4,0	4
Скорость перемещения ПС СУЗ в режиме регулирования, м/с, номинальная	0,02	0,02
Примечание - Точность поддержания параметров реактора (с учётом погрешностей измерения и регулирования): - по тепловой мощности - не более + 4 % от номинального значения; - по давлению теплоносителя первого контура - не более ± 0,3 МПа.		



Картограмма стационарной топливной загрузки

Характеристики ТВС

Наименование параметра	Значение
Максимально допустимая мощность ТВС, МВт	31 (27)
Площадь проходного сечения пучка твэл с учетом половины межкассетного зазора в активной зоне, м ²	0,02546
Гидравлический диаметр пучка твэл в активной зоне, м	0,01051
Форма ТВС	Шестигранная призма
Высота ТВС, мм	4570 ± 1
Размер «под ключ» ТВС, мм, максимальный	235,1
Количество твэлов и твэгов в ТВС, шт.	312
Сетка расположения твэлов (твэгов)	Равномерно треугольная
Шаг между твэлами (твэгами), мм	12,75
Топливо таблетки твэла	Диоксид урана (UO ₂)
Топливо таблетки твэга	Спеченная смесь диоксида урана и оксида гадолиния (UO ₂ + Gd ₂ O ₃)
Плотность топлива в твэлах, кг/м ³	(10,4-10,7)·10 ³
Плотность топлива в твэгах, кг/м ³ : - для таблеток с массовой долей Gd ₂ O ₃ 5,0 %; - для таблеток с массовой долей Gd ₂ O ₃ 8,0 %	(10,4-10,7)·10 ³ (10,3-10,7)·10 ³
Массовая доля Gd ₂ O ₃ в топливе твэгов, %	5,0; 8,0
Массовая доля смеси изотопов урана в топливе, %, не менее: - для твэлов; - для твэгов	87,9 80,4
Материал оболочки твэла (твэга)	Сплав Э-110
Наружный диаметр оболочки твэла (твэга), мм	9,10 ± 0,04

Характеристики

ТВС

Наименование параметра	Значение
Внутренний диаметр оболочки твэла (твэга), мм	7,73 ^{+0,06}
Наружный диаметр топливной таблетки твэла (твэга), мм	7,60 _{-0,03}
	(7,57)
Диаметр центрального отверстия в топливной таблетке твэла (твэга), мм	1,2 ^{+0,2}
	(1,5)
Размер зерна в топливной таблетке UO ₂ , мкм, не менее	25
Размер зерна в топливной таблетке UO ₂ + Gd ₂ O ₃ , мкм	от 6 до 25
Высота топливной таблетки, мм	9,0-12,0
Высота столба топлива в холодном состоянии в твэле (твэге), мм, номинальная	3730
Масса топлива в твэле, кг, номинальная	1,712
Масса топлива в твэге (при содержании Gd ₂ O ₃ 5 %), кг номинальная	1,712
Масса топлива в твэге (при содержании Gd ₂ O ₃ 8 %), кг, номинальная	1,695
Масса топлива в ТВС, кг	534,1±4,5 (491,4)
Температура наружной поверхности оболочки твэла (в стационарном режиме), °С, не более	355
Среднее обогащение топлива ТВС по U ²³⁵ для первой загрузки, % масс.	1,30; 2,40; 3,27; 4,00; 4,37
Среднее обогащение топлива ТВС по U ²³⁵ для стационарной топливной загрузки, % масс.	3,98; 4,95; 4,90; 4,93
Количество твэгов в пределах одной ТВС, шт.	0; 6; 9; 12
Обогащение топлива в твэгах по U ²³⁵ , % масс.	2,40; 3,30; 3,60
Направляющий канал: - количество, шт.;	18
- материал;	Э-635
- наружный диаметр, мм;	13,0 ± 0,05
- внутренний диаметр, мм	11,0 ^{+0,1}
- масса, кг, номинальная	1,04
Дистанционирующая решетка: - количество, шт.;	13
- материал;	Э-110
- высота ячейки, мм, номинальная;	30
- высота обода, мм, номинальная;	40
- толщина стенки ячейки, мм, номинальная;	0,3
- масса, кг, номинальная	0,9
- размер ДР под «ключ» при изготовлении, мм	233,7±0,5

Характеристики ТВС

Наименование параметра	Значение
Шаг размещения ДР по высоте ТВС: - от НР до ДР №1 - от ДР №1 до ДР №2 - от ДР №2 до ДР №11 - от ДР №11 до ДР №13	100 250 340 280
Инструментальный канал: - количество, шт.; - материал; - наружный диаметр, мм; - внутренний диаметр, мм - масса, кг, номинальная	1 Э-635 13,0 ± 0,05 11,0 ^{+0,1} 0,93
Решетка нижняя: - количество, шт.; - материал	1 сталь 12Х18Н10Т
Хвостовик: - количество, шт.; - материал	1 сталь 12Х18Н10Т
Головка: - количество, шт.; - материал	1 сталь 12Х18Н10Т
Пружинный блок: - количество пружин, шт., общее - количество пружин, участвующих в демпфировании ОР СУЗ, шт. - материал пружин - диаметр проволоки пружин, мм	19 16 сплав ХН77ТЮР 5,1
Масса ТВС, номинальная, кг	750