

УДК 621.039.5

Р.Я.ТОМЯК, С.В.ШИРОКОВ

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТОПЛИВА ДЛЯ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ

1 ИЗМЕНЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ТАБЛЕТКИ И ТВЭЛ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Реактор ВВЭР-1000 является дальнейшим развитием разрабатывавшихся в СССР водо-водяных корпусных реакторов на тепловых нейтронах. В качестве топлива применены спечённые таблетки из диоксида урана с плотностью более $10,2 \cdot 10^3$ кг/м³ (обогащение по ²³⁵U – 2...4%), оболочка изготовлена из сплава Zr-1%Nb, зазор между топливом и оболочкой составляет 0,14 – 0,27 мм. По концам ТВЭЛа в трубке помещаются разрезные втулки из сплава Zr-1%Nb, которые удерживают столб таблеток в оболочке в определённом положении. Свободный объём в ТВЭЛе при 20°C равен 30,5 см³, а при работе в реакторе – 21,8 см³. Это вполне достаточно, чтобы давление газообразных продуктов деления в ТВЭЛе (14 МПа) не превышало давления теплоносителя (16 МПа). На внешней стороне оболочки максимальная температура составляет 350, а на внутренней стороне – 410°C. Максимальная температура на поверхности таблеток достигает 1270, а в центре их – 2700°C.

В процессе работы топлива наблюдается объемное распухание топливных таблеток из-за накопления продуктов деления и увеличивается давление газообразных осколков деления под

оболочкой. Распухание топлива компенсируется созданием радиального и высотного зазора между топливом и оболочкой. Кроме этого, зазоры компенсируют расширение топлива при переходе от холодного состояния к рабочему [1].

Для компенсации колебаний объема диоксида урана при изменениях уровня мощности реактора и ее перераспределения в центральной части топливных таблеток выполнены осевые отверстия. Одновременно центральные отверстия служат приемником для газообразных продуктов деления, а также несколько снижают максимальную температуру топлива в ТВЭЛах.

Изначально топливные таблетки не имели отверстий внутри, их диаметр составлял 7,57 мм, а высота 10 мм (см. рис. 1а). Затем увеличилась высота топливных таблеток до 18 мм (см. рис. 1б), внутри появилось отверстие для снижения температуры диаметром 1,4 мм (см. рис. 1б).

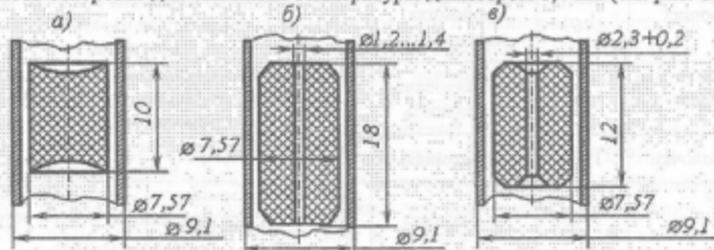


Рис. 1. Топливная таблетка

В результате накопленного опыта эксплуатации и поведения ТВЭЛ в активной зоне, а также из-за увеличения обогащения и энергонапряженности топлива выполнены следующие мероприятия:

- снижена высота топливной таблетки (до 12 мм) (см. рис. 1в);
- увеличен диаметр внутреннего отверстия таблетки (с 1,4 мм до 2,3 мм) (см. рис. 1в);
- в таблетках выполнена внутренняя фаска (см. рис. 1в);
- увеличена плотность топлива;
- выполнено напыление на внутреннюю поверхность ТВЭЛ;
- увеличен начальный газовый объем под ТВЭЛ с 18 см³ до 30,5 см³;
- увеличено давление гелия внутри ТВЭЛа с $2 \cdot 10^5$ Па до $22 \cdot 10^5$ Па.

Надежная герметичность оболочек тепловыделяющих элементов, предотвращающая выход радиоактивных осколков деления из топлива, гарантирует радиационную безопасность атомной электростанции и окружающей местности. Герметичность оболочек должна сохраняться в течение всего срока работы ТВС в реакторе и последующего хранения отработавшего топлива до отправки на переработку. В связи с этим свойства материала оболочек ТВЭЛов должны удовлетворять требованиям коррозионной стойкости, прочности и пластичности в условиях нормальной работы реактора и максимального разогрева в аварийных ситуациях. Одним из основных требований к материалу оболочек ТВЭЛов является малое сечение захвата нейтронов.

В качестве такого материала используется цирконий. Преимущество циркония заключается в удачном сочетании ядерных и физических характеристик с механическими и коррозионными свойствами. Цирконий является коррозионноустойчивым материалом в большинстве сред, применяемых в качестве теплоносителей ядерных реакторов, и достаточно технологичен. Наибольшее распространение в реакторах типа ВВЭР получил сплав циркония с одним весовым процентом ниобия [2].

2 ЭВОЛЮЦИЯ ТВС И ТВЭЛ РЕАКТОРОВ ТИПА PWR

В настоящее время одним из требований к АЭС является снижение до минимума эксплуатационных затрат и в то же время поддержание экономических показателей АЭС на высоком уровне. Требования к топливу реакторов типа ВВЭР общие с западными реакторами типа PWR - выдерживать более продолжительные топливные циклы и большие выгорания, что на сегодняшний день является важным показателем в эксплуатации АЭС.

Компания «Вестингауз» на протяжении 20 лет вела комплексную работу, направленную на совершенствование конструкции сборок и ТВЭЛов, предназначенных для реакторов с водой под давлением (PWR). Разработки характеризуются повышением надежности, безопасности и экономичности. Таблица 1 даёт представление об этапах этой работы.

Эволюция ТВС реактора с водой под давлением типа PWR

Изменённый элемент конструкции	Год внедрения	Область воздействия	Результат усовершенствования или нововведения
Упругая дистанционирующая решётка	1963	Экономика	Разделение процессов производства ТВЭЛов и сборок, исключение сварки, уменьшение паразитного поглощения нейтронов
Интенсификаторы теплообмена	1965	Лицензирование	Увеличение запаса предельной мощности
Пучок регулирующих стержней	1967	Экономика, надёжность	Снижение до минимума водяного зазора и дальнейшее уменьшение паразитного поглощения нейтронов
Улучшенная дистанционирующая решётка	1967	Лицензирование, надёжность	Дальнейшее увеличение запаса до кризиса кипения, улучшение крепления ТВЭЛов, применение инконеля
Циркаловые оболочки	1968	Экономика	Дальнейшее уменьшение паразитного поглощения нейтронов
Предварительная опрессовка ТВЭЛов гелием	1968	Надёжность	Снижение до минимума взаимодействия топлива с оболочкой, предотвращение потери устойчивости (смятия) ТВЭЛов
Циркаловые направляющие трубы	1970	Экономика	Дальнейшее уменьшение паразитного поглощения нейтронов
Конструкция ТВС 17×17	1975	Лицензирование	Уменьшение максимальной линейной мощности ТВЭЛов для снижения температуры при потере теплоносителя
Уменьшение диаметра ТВЭЛа; циркаловые дистанционирующие решётки	1979	Экономика	Оптимизация отношения Н/У, Дальнейшее уменьшение паразитного поглощения нейтронов

На рис. 2 представлены обобщённые результаты работы ТВЭЛов с оболочками из циркалоя. Видно, что имеется существенное снижение активности теплоносителя при увеличении числа ТВЭЛов. Относительно высокая активность теплоносителя в начале 70-х годов была вызвана или гидридизацией циркаловых оболочек из-за влаги, содержащейся в таблетках топлива, или потерей устойчивости ТВЭЛов, которые не подвергались предварительной опрессовке. В дальнейшем указанные причины были ликвидированы, и активность теплоносителя составляет менее 2% проектной [3].

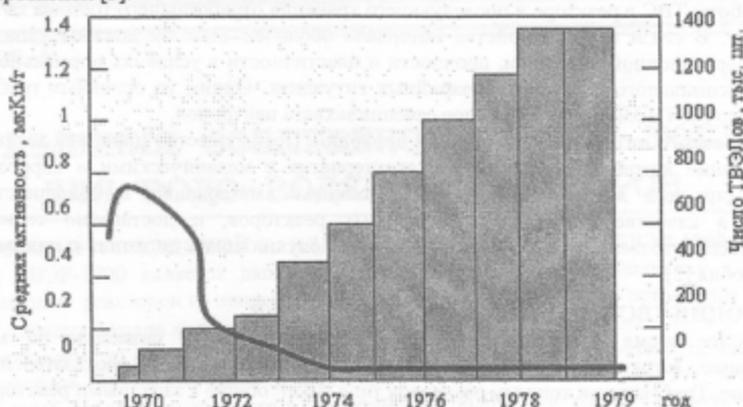


Рис. 2. Изменение средней активности теплоносителя и циркаловых ТВЭЛов, эксплуатировавшихся в период 1970-1980 гг.

Продолжаются работы по улучшению конструкции сборок в целях повышения экономичности топливного цикла. Окончательный результат этих исследований позволит дать количественное выражение возможности улучшения использования урана и уменьшения стоимости топливного цикла в энергетических реакторах. В последующие годы предполагается продолжить облучение и исследование сборок свыше трёх циклов. Считают, что дальнейшее

эффективное использование урана связано с увеличением выгорания.

В настоящее время доля негерметичных ТВЭЛов в активных зонах реакторов PWR не превышает 0,05%. Такие хорошие показатели надёжности получены в результате проведения различных мероприятий по усовершенствованию технологии и конструкции ТВЭЛов, ТВС и активной зоны в целом, а также улучшению эксплуатационных условий: устранение отложенных осадков, предотвращение гидрирования и смятия оболочек, снижение максимальных и средних тепловых нагрузок на ТВЭЛы, снижение напряжений и деформаций в оболочках. Отложения на оболочках появились в результате применения схемы водного режима, которая была спроектирована не оптимально. Наблюдалось локальное гидрирование оболочки из циркониевого сплава вследствие загрязнения топлива водородосодержащими примесями, в основном влагой. Введение вакуумной сушки как окисных таблеток, так и оболочки с таблетками до герметизации позволило устранить разгерметизацию ТВЭЛов при локальном гидрировании. Удалось решить проблему смятия оболочек созданием избыточного давления (2,5...3,0 МПа) гелия под оболочкой ТВЭЛа, использованием топлива с плотностью выше $10,4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и повышением качества таблеток по структуре. Снижение допустимой линейной мощности от первоначального значения 60,4 до 43,3 кВт/м позволило существенно повысить надёжность ТВЭЛов за счёт снижения тепловых нагрузок и напряжений в оболочках. Сложное механическое взаимодействие оболочки и таблетки под облучением в реакторе, особенно при повышенном выгорании и охрупчивании оболочки при наличии больших напряжений и деформаций в ней, а также при повышенной концентрации вредно действующих продуктов деления (I, Cs, Cd и др.), при резких повышениях мощности и остановах реакторов, в большой степени способствует разгерметизации ТВЭЛов. Наиболее неблагоприятные последствия вызывает повышение мощности после длительной (более 30 суток) работы на пониженной мощности.

Широкое распространение стержневых ТВЭЛов (более 90%) обусловлено хорошей радиационной стойкостью конструкции.

В качестве оболочек используются цирконий-ниобиевые сплавы, циркалой-2, циркалой-4 и нержавеющие стали до температур на оболочке ТВЭЛа 316...360°C.

Максимальный тепловой поток в стержневых ТВЭЛах с пароводяным охлаждением при температурах теплоносителя 260...315°C достигает 1,1 МВт/м² при оболочке из циркониевого сплава и 1,4 МВт/м² при оболочке из нержавеющей стали с максимальным выгоранием в ТВЭЛах до 3000 МВт-сут/т. Эти выгорания не являются предельными. Совершенствование конструкции ТВЭЛа и технологии изготовления приведёт к увеличению выгорания до 7000 МВт-сут/ТВС при максимальных тепловых потоках 1,6 МВт/м² и температурах сердечника, не превышающих 1093°C. Увеличение глубины выгорания выгружаемого топлива приводит к увеличению остаточного энерговыделения, что, в свою очередь, требует большего времени пребывания в бассейне выдержки до передачи на хранение в ХОЯТ[4].

Конструкция ТВЭЛов с топливом из диоксида урана для реакторов на тепловых нейтронах типа кипящих водяных и водо-водяных под давлением претерпела значительные изменения в процессе перехода от небольших тепловых нагрузок в начале 80-х годов к современным с большими тепловыми нагрузками и с учётом удовлетворения требований охраны окружающей среды как при эксплуатации, так и при аварийных случаях. Кроме того, наступает период работы атомных электростанций с пиковым режимом эксплуатации (с резким колебанием мощности), при котором к АЭС, а особенно к ТВЭЛам, ТВС и ко всей активной зоне реактора в целом, должны предъявляться жёсткие требования надёжности и работоспособности.

Литература

1. Самойлов А. Г., Каштанов А. И., Волков В. С. Дисперсионные ТВЭЛы. Т. 2. Конструкция и работоспособность. -М.: Энергоатомиздат, 1982. 256с.
2. Самойлов А. Г. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов: Учеб. пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1985. 224с.
3. Фрост Б. ТВЭЛы ядерных реакторов: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1986. 247с.
4. Халимончук В.А., Кучин А.В. Внедрение в эксплуатацию на украинских АЭС новых типов топлива: состояние, конструктивные особенности, преимущества, проблемы, возможность реализации маневренных режимов. Ядерная и радиационная безопасность. 2008. №1. С. 13.