

2. **Levina I.K., Pavlovichev A.M., Styurin U.A., Alekseev P.N.** Current status and future activities on determination of technical requirements to test MOX-fuel assemblies with weapon-grade plutonium for disposition in VVER-1000 core. — In: Bilateral Russian—French Meeting on Manufacturing of First MOX LTAs with W-Pu for Irradiation in VVER-1000, 17—19 June 1998r., Moscow, Bochvar Institute.
3. **Alekseev P.N., Pavlovichev A.M., Ponomarev-Stepnoy N.N.** Status of the Russian Federation reactor-based plutonium disposition programme. — In: Proc. Workshop of Physics and Fuel Performance of Reactor-Based Plutonium Disposition, OECD, Paris, France, 28—30 September, 1998, p.39—49.
4. **Зродников А.В., Поплавский В.М., Троянов М.Ф. и др.** Реакторные способы утилизации оружейного плутония, выводимого из оборонных программ. — Nucl. Engng Design, 1997, № 173, p.301—309.

Ядерное топливо для энергетических водоохлаждаемых реакторов. Состояние и перспективы

*Коновалов В.Ф., Молчанов В.Л. (ОАО "ТВЭЛ"), Солонин М.И.,
Бибилашвили Ю.К. (ГНЦ РФ—ВНИИНМ им.А.А.Бочвара),
Цыканов В.А. (ГНЦ РФ—НИИАР)*

Выполненные в последние годы исследования позволили обеспечить надежную и безопасную эксплуатацию ВВЭР в 3- и 4-годичных топливных циклах при среднем выгорании 43—45 МВт·сут/кг U (в комплекте выгружаемых ТВС). В частности, на отдельных блоках ВВЭР-440 (4-м Кольской, 2-м Ровенской) в настоящее время реализуется опытно-промышленная эксплуатация топлива в 5-годичном цикле.

По условиям эксплуатации топлива, уровню и причинам отказов твэлов ВВЭР можно разделить на четыре группы: ВВЭР-440 типа В-230, В-179 и В-270 — первое поколение реакторов, ВВЭР-440 типа В-213 — второе усовершенствованное поколение реакторов, ВВЭР-1000 (тип В-187, единственный блок на Нововоронежской АЭС, ТВС этого реактора имеют шестигранный чехол), серийные ВВЭР-1000, в которых ТВС являются бесчехловыми.

В ВВЭР-440, как и во всех ВВЭР-1000, конструкторские и технологические решения по твэлам и ТВС в значительной степени унифицированы. Тем не менее в ВВЭР-440 типа В-213 и всех ВВЭР-1000 отказы твэлов носят случайный характер. За последние несколько лет уровень отказов твэлов в этих реакторах в среднем находится в пределах $\sim(2-3)10^{-5}$ (ВВЭР-1000) и $\sim(3-5)10^{-6}$ (ВВЭР-440 типа В-213), что отвечает современным показателям ведущих западных фирм-поставщиков топлива.

В ВВЭР-440 типа В-230 уровень отказов заметно выше (табл. 1, 2). Особенно это начало проявляться в последние 5—7 лет (старение реакторов).

Т а б л и ц а 1. Эксплуатация ТВС в ВВЭР-400

Год	Число выгруженных	Число негерметичных	Доля негерметичных
В-213			
1998	1676	0	0
1999	998	5	$\sim 4 \cdot 10^5$
В-230			
1998	747	79	$8 \cdot 10^{-4}$
1999	453	39	$6,8 \cdot 10^{-4}$

Т а б л и ц а 2. Эксплуатация ТВС в ВВЭР-1000

Параметр	Значение
Число выгруженных (по всем блокам)	1798
Число признанных негерметичными по методике КГО:	
новой*	18
старой	53
Средний уровень повреждения твэлов (отношение числа негерметичных к общему числу выгруженных):	
АЭС России	$2,5 \cdot 10^{-5}$
АЭС Украины	$6,8 \cdot 10^{-5}$

* По старым нормам негерметичными считались ТВС, активность которых в пенале КГО на 3σ превышает фон. По новым нормам, кроме указанного условия, активность ТВС должна превышать $1 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг.

Послереакторные исследования ТВС 3-го блока Нововоронежской АЭС (В-230) показали, что наиболее вероятной причиной отказов твэлов являются высокие вибрационные нагрузки на ТВС.

Несмотря на хорошие эксплуатационные показатели активных зон, ВВЭР по экономическим показателям все же уступают западным аналогам. Главными факторами, вследствие которых экономические показатели серийных ВВЭР, прежде всего ВВЭР-1000, уступают зарубежным аналогам, являются:

- 1 использование в качестве конструкционного материала для дистанционирующих решеток и направляющих каналов нержавеющей стали (около 2 т в активной зоне ВВЭР-1000);
- 2 применение в активной зоне для компенсации избыточной реактивности стержней выгорающего поглотителя (ВВЭР-1000) или топливных компенсаторов (ВВЭР-440) в отличие от введенного в топливо поглотителя нейтронов, используемого в большинстве PWR;
- 3 значительная утечка нейтронов вследствие неоптимальной схемы перегрузок топлива;
- 4 использование сплавов циркония с высоким содержанием гафния.

Поэтому важное место в комплексе работ по улучшению экономики топливных циклов ВВЭР на современном уровне отводится дальнейшему совершенствованию конструкторских и технологических решений как по твэлам и ТВС, так и по активной зоне в целом.

Реализуемая в настоящее время в стране отраслевая программа "Твэлы и ТВС ядерных энергетических установок АЭС" по созданию усовершенствованных топливных циклов и топлива нового поколения предусматривает достижение в ближайшей перспективе (2000—2003 гг.) в активной зоне ВВЭР следующих характеристик:

максимальное выгорание топлива в ТВС до 55 МВт·сут/кг U (4-годовой топливный цикл в ВВЭР-1000 и 5-годовой в ВВЭР-440). Для сравнения в настоящее время серийно поставляемая и лицензированная продукция западных фирм (Фраматом, Сименс) для PWR имеет максимальную проектную глубину выгорания 52 МВт·сут/кг U;

обеспечение маневренных характеристик АЭС;

переход на перегрузку топлива по схеме in-in-out;

увеличение длительности кампании топлива до 350 эф. сут;

обеспечение разборности ТВС;

применение в качестве конструкционного материала для дистанционирующих решеток, направляющих каналов и чехлов ТВС сплавов циркония с содержанием гафния не более 0,01% по массе.;

применение поглотителя нейтронов ($\text{UO}_2\text{—Gd}_2\text{O}_3$);

использование топливных таблеток с оптимизированными параметрами по микроструктуре, физико-механическим характеристикам;

вовлечение регенерированного урана в топливный цикл;

применение в качестве конструкционного материала для оболочек твэлов, труб направляющих каналов и дистанционирующих решеток циркониевого сплава Э-635, обладающего высокой радиационной и коррозионной стойкостью;

повышение эксплуатационной надежности топлива до уровня отказов менее 10^{-5} (для комплекта выгружаемых ТВС).

Внедрение нового топлива в практику ВВЭР позволит существенно повысить экономические показатели топливных циклов и безопасность. При этом будет обеспечен современный уровень расхода природного урана $\sim 0,196$ кг/(МВт·сут).

Ядерное топливо нового поколения создается для ВВЭР-1000 с начала 90-х годов. В 1993 г. на 1-м блоке Балаковской АЭС (базовой для испытания нового или усовершенствованного топлива) была установлена первая опытная партия усовершенствованных ТВС с направляющими каналами и дистанционирующими решетками из циркониевого сплава Э-110 вместо нержавеющей стали. В 1994 г. на 3-м блоке Балаковской АЭС была установлена первая опытная партия ТВС с уран-гадолиниевым топливом. В эти же годы два обстоятельства повлияли на задержку и развитие работ по промышленному внедрению и лицензированию усовершенствованного ядерного топлива и топливных циклов ВВЭР-1000:

искривление ТВС и активной зоны в целом из-за осевого "пережатия" ТВС внутрикорпусными устройствами реактора (результат неправильной контрольной сборки внутрикорпусных устройств при проведении монтажных работ);

увеличение времени испытаний опытных партий усовершенствованных ТВС с 3 до 5 лет вследствие диспетчерских ограничений на Балаковской АЭС.

В настоящее время ТВС с уран-гадолиниевым топливом находятся в опытно-промышленной эксплуатации на всех четырех блоках Балаковской АЭС: на 2, 3, 4-м блоках эксплуатируются в объеме одной подпитки при перегрузках топлива (48 усовершенствованных ТВС вместо 54 серийных), на 1-м блоке при плановом ремонте активная зона будет полностью сформирована из таких ТВС.

На Усть-Каменогорском заводе освоена и внедрена промышленная технология изготовления уран-гадолиниевых топливных таблеток. Осуществляется освоение такой технологии и на заводе в Электростали. Освоение и внедрение технологии изготовления уран-гадолиниевое топлива было осуществлено с непосредственным участием сотрудников ВНИИМ.

Таким образом, научно-технический и технологический задел позволяет осуществить промышленное внедрение 4-годичного топливного цикла на базе усовершенствованных ТВС с уран-гадолиниевым топливом в 2001 г. (первый этап – объем подпитки в стационаре 48 ТВС). Техничко-экономические исследования показали, что при внедрении 4-годичного топливного цикла (этап 1) экономический эффект от снижения стоимости топлива подпитки, исключения из состава активной зоны стержней с выгорающим поглотителем, снижения затрат на хранение и вывоз отработавшего топлива эквивалентен примерно 12 ТВС на один реактор в год в сравнении с проектным 3-годичным циклом.

Работы по внедрению ТВС с уран-гадолиниевым топливом на Балаковской АЭС позволили принять обоснованное решение и по поставке на Ростовскую АЭС, начиная с первой топливной загрузки, усовершенствованного топлива с выходом в стационаре на 4-годичный цикл.

При внедрении циркониевых дистанционирующих решеток в 1998 г. выявилась еще одна проблема – их смещение относительно исходного положения (случай на Балаковской, Запорожской и Ровенской АЭС). Причиной смещения дистанционирующих решеток явилась конструкторская недоработка усовершенствованных ТВС. Недоработка устранена в 1999 г.

В настоящее время по инициативе ОАО "ТВЭЛ" на основании результатов опыта эксплуатации усовершенствованных ТВС и анализа термомеханических исследований конструкции бесчехловой ТВС ведутся работы по созданию новой конструкции ТВС с жестким каркасом, которая позволит эксплуатировать активную зону в 4-, 5-годичных топливных циклах ВВЭР-1000. Первую опытную партию таких ТВС предусматривается установить в 2002 г.

ОКБМ разработан новый альтернативный вариант конструкции ТВС ВВЭР-1000. В основу этой конструкции заложено использование силового опорного каркаса, обеспечивающего приемлемую устойчивость ТВС к формоизменению. На Калининской АЭС (1-й блок) в настоящее время проводится опытно-промышленная эксплуатация таких ТВС. В конце июня 2000 г. блок остановлен на плановый ремонт, в процессе которого будут осмотрены ТВС. На данный момент времени состояние активной зоны указанного блока позволяет заключить, что альтернативные ТВС эксплуатируются нормально (без отказов). Намечено установить дополнительно еще 60 ТВС. При положительных результатах опытно-промышленной эксплуатации ТВС могут быть рекомендованы для реализации на 1-м блоке Калининской АЭС в 4-, 5-годичных топливных циклах.

Сравнительный анализ эффективности топливных циклов активной зоны ВВЭР-1000, выполненный ОКБМ, показал, что переход на 4-годичный (и более) топливный цикл позволяет заметно снизить себестоимость вырабатываемой энергии, переход на кампанию длительностью 18 мес ведет к увеличению годовой энерговыработки АЭС. Анализ проводился исходя из повышения глубины выгорания топлива до 55 МВт·сут/кг U.

В настоящее время состояние работ по совершенствованию ядерного топлива для ВВЭР-440 характеризуется следующим:

продолжается опытно-промышленная эксплуатация ядерного топлива на 4-м блоке Кольской и 2-м блоке Ровенской АЭС в 5-годичном топливном цикле, который по основной характеристике топливоиспользования (удельному расходу природного урана) соответствует лучшим показателям зарубежных PWR;

завершен комплекс работ по лицензированию 4-годичного топливного цикла для АЭС “Дукованы” (Чехия), АЭС “Моховце”, 1-й блок (Словакия), АЭС “Пакш” (Венгрия). На АЭС “Дукованы”, “Моховце” уже внедрены такие топливные циклы. Поставка усовершенствованного ядерного топлива на АЭС “Пакш” осуществляется с 2000 г.;

проводятся НИОКР в обеспечение лицензирования 4-годичного топливного цикла для 2-го блока АЭС “Моховце” и 3-го и 4-го блоков АЭС “Ясловске-Богунице” (Словакия).

Как уже было сказано, старение ВВЭР-440 первого поколения (тип В-230, В-179, В-270) непосредственно влияет на эксплуатационную надежность ТВС, что потребовало разработки модернизированной конструкции, обладающей повышенными виброустойчивыми характеристиками топливных пучков. В 1999 г. была разработана такая конструкция ТВС и установлена опытная партия на 3-м блоке Нововоронежской АЭС, осуществлена поставка таких ТВС на АЭС “Козлодуй” (Болгария).

Для повышения эксплуатационной надежности ТВС и расширения алгоритмов управления реактором (маневрирование) в 1999 г. завершен комплекс НИОКР по обоснованию конструкции ТВС АРК с усовершенствованным стыковочным узлом. В 2000 г. будет установлена опытная партия ТВС на 4-м блоке Нововоронежской АЭС.

В соответствии с утвержденной в ОАО “ТВЭЛ” программой работ по модернизации ТВС ВВЭР-440 с 1999 г. ведутся работы по созданию и последующему внедрению на АЭС модернизированных конструкций рабочих ТВС и ТВС АРК, направленные на уменьшение протечек теплоносителя в межчехловом пространстве (т.е. на повышение теплотехнической надежности охлаждения твэлов) и улучшение водно-уранового отношения. С этой целью размеры чехлов рабочих ТВС увеличиваются до 145 мм, ТВС АРК — до 144,2 мм (при проектных 143 мм), толщина чехла уменьшается с 2 мм до 1,5 мм, шаг между твэлами повышается с 12,2 до 12,3 мм. Предусматривается увеличение загрузки топлива в активной зоне за счет повышения высоты топливного столба в твэлах на 100 мм.

На базе модернизированных конструкций рабочих ТВС и ТВС АРК разрабатываются оптимизированные 5-годичные топливные циклы с применением уран-гадолиниевого топлива для активных зон ВВЭР-440 (тип В-213). Ожидаемая глубина выгорания топлива — до 53 МВт·сут/кг U.

Первые опытные партии модернизированных ТВС в 5-годичном цикле запланировано установить в 2002 г. на 3-м блоке Кольской АЭС и на одном из блоков АЭС “Дукованы” (Чехия). Длительность кампании топлива для АЭС “Дукованы” будет составлять 320 эф. сут.

Опыт эксплуатации топлива ВВЭР, а также большой массив экспериментальных данных послереакторных исследований в горячих лабораториях показал, что имеются возможности дальнейшего повышения выгорания. Это обстоятельство было подтверждено и опытом дооблучения твэлов, демонтированных из штатных отработавших ТВС коммерческих реакторов в петлевой установке исследовательского реактора МИР (табл.3,4).

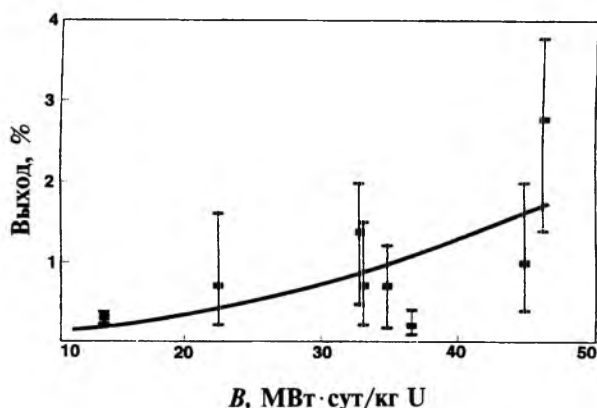
Т а б л и ц а 3. Дооблучение твэлов ВВЭР-440 до выгорания 72 МВт·сут/кг U и твэлов ВВЭР-1000 до 63 МВт·сут/кг U

АЭС, блок	Тип твэла	$B_{\max}/\bar{B}$ исходное, МВт·сут/кг U	$B_{\max}/\bar{B}$ после дооблучения, МВт·сут/кг U	$Q_{\max}$ после дооблучения, Вт/см
Кольская, 3-й, ВВЭР-440	ПТМ	61,1/52,9	72/68	207
	—	60,6/52,3	72/68	208
	РФТ	60,0/51,4	72/69	239
Нововоронежская, 5-й, ВВЭР-1000	ПТМ	48,8/44,6	82/57	222
	—	49,7/45,2	63/58	231
	РФТ	49,0/44,6	72/72	247

Т а б л и ц а 4. Интенсивность γ -линии $E_{\gamma}=514$ кэВ $^{85}\text{Kг}$ в газовой полости полномасштабных твэлов ВВЭР

Тип твэла	Выгорание, МВт·сут/кг U				Максимальная нагрузка в конце дооблучения, Вт/см	Интенсивность, имп./с·10 ⁴	
	до начала дооблучения		после окончания дооблучения			до начала дооблучения	после окончания дооблучения
	максимальное	среднее	максимальное	среднее			
ПТМ ВВЭР-1000	48,8	44,6	62	57	222	~1,1	~1,4
То же	49,7	45,2	63	58	231	~1,1	~1,7
ПТМ ВВЭР-440	61,1	52,9	72	68	207	~2,7	~5,4
То же	60,6	52,3	72	68	208	~2,8	~5,5

Исследования показали, что все основные характеристики твэлов (размеры, плотность топлива, выход газообразных продуктов деления, глубина окисления оболочек с наружной и внутренней стороны, их механические характеристики), полученные при выгорании 50—55 МВт·сут/кг, могут быть экстраполированы до более высокого выгорания 70—75 МВт·сут/кг U (рис. 1). Однако реальные ресурсные характеристики твэлов коммерческих реакторов определяются не только выгорани-



Р и с. 1. Газовыделение из топлива твэлов

ем. Лицензирование рабочих и ресурсных характеристик твэлов при повышении выгорания в ВВЭР требует более детального изучения и анализа следующих наиболее важных вопросов:

накопление повреждений в оболочках твэлов, в том числе с учетом допустимого при производстве труб технологического дефекта в переходных режимах эксплуатации с определением допустимого скачкообразного изменения мощности при выгорании свыше 55–60 МВт·сут/кг U;

газовыделение из топлива;

коррозия материала оболочек, в том числе и в условиях растягивающих напряжений;

ослабление закрепления твэлов в дистанционирующих решетках в результате релаксации напряжений и повышения вибрационных нагрузок на твэлы;

влияние аварий типа LOCA и реактивных аварий на состояние твэлов.

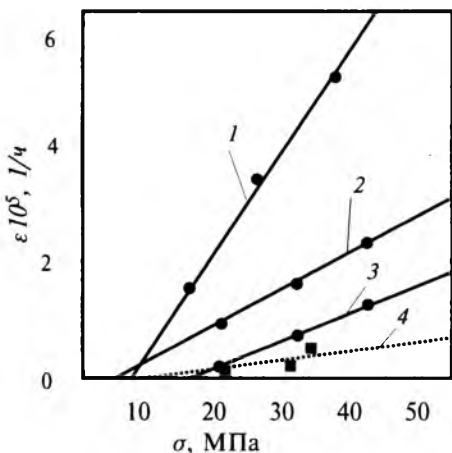
Одним из важнейших направлений повышения ресурсных характеристик твэлов является снижение повреждаемости оболочек, которая проявляется и накапливается при возникновении в них растягивающих напряжений. Для решения этой проблемы в настоящее

время разработано топливо из диоксида урана с легирующими добавками, обеспечивающими, с одной стороны, снижение сопротивления деформированию топливного сердечника, с другой, оптимизацию его структуры.

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований по определению пороговых напряжений, при которых может быть подавлено свободное распухание топливного сердечника. Для топливного сердечника с легирующими добавками (кривая 4) оно составляет ~2,7 МПа при 380–420 °С, для топлива из чистого диоксида урана ~8 МПа ($T=445$ °С) и 12 МПа ($T=350$ °С). Таким образом, топливо с легирующими добавками позволяет снизить накопление повреждений в оболочке и увеличить выгорание топлива.

Для повышения выгорания топлива рассматривается и использование нового материала для оболочек твэлов — циркониевого сплава Э-635 (Zr—Nb—Sn—Fe). Этот материал имеет высокую радиационную и коррозионную стойкость. Высокая радиационная стойкость сплава обеспечит геометрическую стабильность твэлов и ТВС в течение длительного ресурса до флюенса $\sim 10^{23}$ см⁻².

Р и с. 2. Зависимость скорости радиационной ползучести от напряжения при температуре 1010 (1), 900 (2), 490 (3), 390 °С (4) и $\Phi=(7,2-2,5)10^{13}$ дел·с⁻¹·см⁻³



Результаты экспериментальных исследований по поведению твэлов в реактивных авариях представлены на рис. 3, откуда видно, что топливо соответствует лицензионному критерию “отсутствие фрагментации топлива” до выгорания ~62 МВт·сут/кг U.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных работ по изучению состояния оболочек твэлов в авариях типа LOCA. Видно, что выгорание топлива не влияет на лицензионные критерии в авариях такого типа.

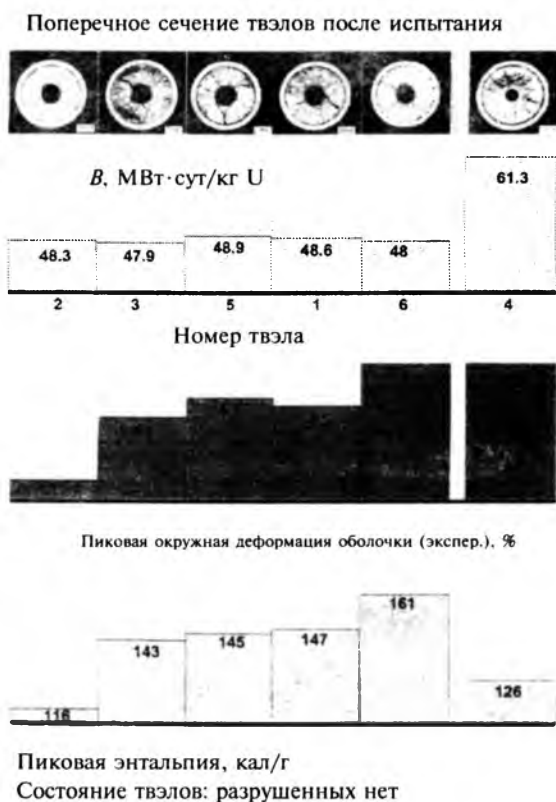
Требования к топливу по обеспечению маневренных режимов эксплуатации в настоящее время являются актуальными как для действующих, так и для строящихся АЭС, в том числе по зарубежным контрактам. Условия эксплуатации твэлов в режиме слежения за нагрузкой в сети значительно более жесткие, чем в базовом режиме. При теплосменах в оболочках твэлов появляются дополнительные растягивающие напряжения, способные привести к повреждению твэлов в условиях значительного числа изменений мощности реакторной установки при маневренном режиме эксплуатации АЭС.

Основными механизмами повреждения циркониевых оболочек являются коррозионное растрескивание в присутствии агрессивных продуктов деления и исчерпание усталостной циклической прочности.

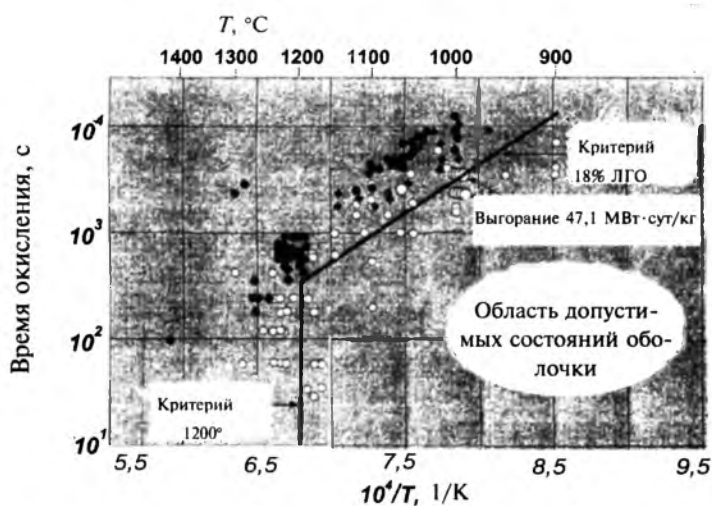
Заложенные в современную конструкцию твэла конструкторско-технологические решения в существенной степени способствуют их работоспособности в маневренном режиме. Оболочки из сплава $Zr-1\%Nb$, проявляя низкое окисление и гидрирование под облучением, обладают высокими механическими свойствами по прочности и остаточной пластичности. Применение топливных таблеток с центральным отверстием существенно повышает релаксационные возможности твэлов. Использование циркониевых труб с уменьшенным производственным дефектом (35 мкм) повышает прочность оболочек твэлов в отношении коррозионного растрескивания под напряжением. Все это создает благоприятные предпосылки для исследования и прогнозирования эксплуатации твэлов современной конструкции в маневренных режимах.

Маневренные характеристики топлива базируются на широком комплексе расчетно-экспериментальных исследований. В реакторе МИР проведен представительный объем испытаний твэлов ВВЭР на скачкообразное изменение мощности до выгорания 60 МВт·сут/кг U. На основе обширных исследований прочности исходных и облученных оболочек устанавливаются пороговые допустимые напряжения в оболочках твэлов с учетом производственных дефектов. Комплекс выполненных и продолжающихся исследований циклической прочности исходных и облученных оболочек из циркониевых сплавов до 10^8 циклов позволяет оценивать работоспособность твэлов с учетом накопления усталостных повреждений.

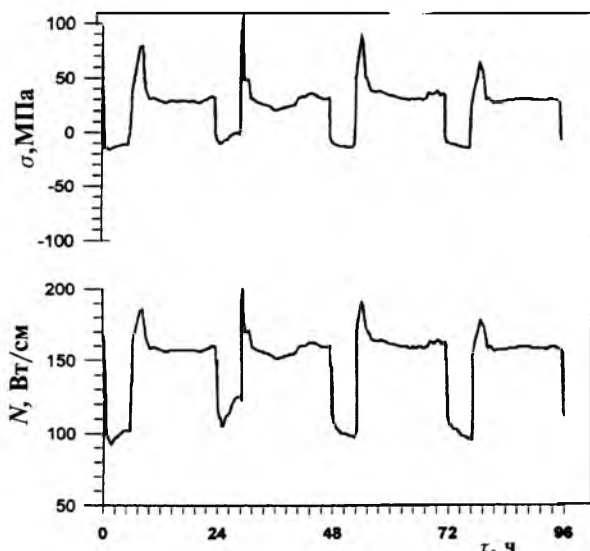
Расчеты прочности твэлов в режимах с изменением мощности определяют допустимые локальные скачки удельной нагрузки в твэлах, которые являются основой при разработке оптимальных алгоритмов управления активной зоной при маневрировании мощностью АЭС.



Р и с. 3. Обобщенные результаты испытаний рефабрикованных твэлов в реакторе БИГР



Р и с. 4. Диаграмма разрушения оболочек из сплава Э-110: $\circ$ — нет разрушения; $\blacklozenge$ — разрушение от механического воздействия и термоудара соответственно



Р и с. 5. Изменение линейной мощности твэла ВВЭР-1000 и напряжений в оболочке при суточном маневрировании

оболочке не происходит и твэлы способны надежно эксплуатироваться на протяжении всей кампании в данном маневренном режиме.

В 2000 г. запланировано испытание в реакторе МИР рефабрикованных твэлов ВВЭР-440 в маневренном режиме. Необходимо провести подобные испытания и твэлов ВВЭР-1000.

Практическому освоению режимов слежения за нагрузкой существенно способствовало бы завершение обоснования и проведение опытной эксплуатации 5-го блока Запорожской АЭС в режиме маневрирования ограниченной глубины (20%).

Работы по дальнейшему совершенствованию топлива РБМК направлены прежде всего на повышение безопасности. После аварии на Чернобыльской АЭС был значительно снижен паровой коэффициент реактивности РБМК за счет размещения в активной зоне дополнительных поглотителей, что привело к уменьшению выгорания топлива, а также увеличению средней и максимальной мощности ТВС. Поэтому такое решение было признано неоптимальным.

Расчетные исследования, направленные на снижение парового коэффициента реактивности, показали, что более оптимальным является использование выгорающего поглотителя эрбия в виде добавок Er_2O_3 в топливные таблетки из UO_2 (~0,4—0,6% по массе). Применение уран-эрибиевого оксидного топлива в РБМК снижает паровой коэффициент реактивности до уровня, при котором в активную зону не требуется устанавливать дополнительные поглотители. Кроме того, уран-эрибиевое топливо уменьшает неравномерность энерговыделения, увеличивает обогащение топлива и тем самым повышает выгорание.

Использование уран-эрибиевого топлива позволило повысить и эксплуатационную надежность твэлов. Из 6000 ТВС с уран-эрибиевым топливом, находящихся в эксплуатации (начиная с 1995 г.) на Ленинградской и Игналинской АЭС (6 блоков), вышло из строя всего 9 ТВС. В ближайшие 2 года будут внедрены ТВС с уран-эрибиевым топливом с оптимальным обогащением и содержанием эрбия, что позволит увеличить глубину выгорания. Разработка и внедрение ТВС с центральным закреплением твэлов позволит повысить эксплуатационную надежность (первая опытная партия таких ТВС будет установлена на Ленинградской АЭС).

Стратегия ОАО «ТВЭЛ» как поставщика ядерного топлива — предоставление максимально полного пакета услуг в топливообеспечении АЭС. В решении такой стратегической задачи центральное место занимает эффективная научно-техническая политика в области разработки, лицензирования и сопровождения эксплуатации топлива. И в данном направлении важным моментом является образование в 1999 г. Ассоциации участников создания

Для 5-го блока Запорожской АЭС проведены работы по изучению возможности ограниченного маневрирования в пределах 20%. РНЦ «Курчатовский ин-т» опробовал на блоке разработанный алгоритм управления. ВНИИНМ выполнил расчеты работоспособности твэлов в этом режиме. На рис. 5 представлены расчетные графики изменения локальной мощности и максимальные окружные напряжения в оболочке твэла. Локальные скачки мощности при маневрировании (по отношению к стационарным значениям) не превышают 30 Вт/см, максимальные растягивающие напряжения повсюду остаются ниже 110 МПа, что в 2 раза меньше порогового значения начала коррозионного растрескивания. В этих условиях зарождения или развития исходного дефекта в

ядерного топлива “ТВЭЛ—НАУКА”, в которую вошли наряду с ОАО “ТВЭЛ” и ведущие научные и конструкторские ядерные центры России.

Актуальность сегодняшнего момента состоит в том, что конкуренция за традиционные для России рынки сбыта ядерного топлива на зарубежных АЭС с ВВЭР в настоящее время переходит в новую фазу — фазу практической реализации установки опытных партий ТВС зарубежными поставщиками. В частности, эксплуатируются рабочие ТВС ВВЭР-440 фирмы BNFL (Великобритания) на 2-м блоке АЭС “Ловиса” (Финляндия), что позволило фирме BNFL заключить контракт на поставку топлива на один из блоков АЭС “Ловиса”; предусматривается установка в 2003 г. опытной партии рабочих ТВС с уран-гадолиниевым топливом фирмы BNFL на одном из реакторов АЭС “Пакш” (Венгрия); ведутся работы по установке в 2003 г. опытной партии (до шести) ТВС фирмы “Вестингауз” (США) на одном из ВВЭР-1000 Южно-Украинской АЭС.

Конкурентоспособность российского ядерного топлива в сложившихся условиях является главным направлением работ на ближайшие 3—4 года (краткосрочная программа).

Российское ядерное топливо и топливные циклы для энергетических реакторов базируются на современных инженерно-физических принципах проектирования топлива и активных зон (в зависимости от типа реактора):

- максимальное использование циркониевых сплавов в конструкциях ТВС;
- применение введенного в топливную композицию выгорающего поглотителя (гадолия и эрбия);
- повышение глубины выгорания топлива;
- использование профилирования топлива по сечению ТВС;
- применение схемы загрузки in-in-out;
- внедрение разборной конструкции ТВС и др.

В качестве основного конструкционного материала используется сплав Э-110, который по некоторым важным свойствам превосходит основной сплав западных ТВС циркалой-4. Активно ведутся работы и по перспективному сплаву Э-635.

Серийно поставляемая продукция западных фирм для PWR отличается немного большей глубиной выгорания и разной продолжительностью кампаний топлива (12, 18, 24 мес). Проектная глубина выгорания топлива, поставляемого фирмой “Вестингауз” на АЭС “Темелин”, составляет 52 МВт·сут/кг U.

Избыток производственных мощностей западных фирм-производителей ядерного топлива и требования операторов по снижению топливной составляющей стоимости вырабатываемой электроэнергии вынуждают поставщиков топлива идти на дальнейшее повышение технико-экономических характеристик. Опытно-промышленная эксплуатация в PWR топлива нового поколения ведущих западных фирм “Фраматом” (Франция, сборка AFA-3G), “Сименс” (Германия) и “Вестингауз” (США) на данном этапе характеризуется следующими показателями:

- общая тенденция — высокая эксплуатационная надежность при увеличении работы (поставка топлива, “свободного от проблем”, “Фраматом”) с уровнем отказа $1 \cdot 10^{-6}$;
- конструкция ТВС с повышенным сопротивлением изгибу;
- полное введение органов регулирования СУЗ в активную зону;
- применение в качестве конструктивных материалов коррозионно-стойких материалов;
- внедрение защитной решетки от посторонних предметов.

Заключение. В настоящее время и на ближайшие 3—4 года главным направлением работ является обеспечение конкурентоспособности российского ядерного топлива на традиционных для страны рынках. Научно-технический и технологический заделы позволяют в ближайшей перспективе внедрить на АЭС с ВВЭР топливо нового поколения, обеспечивающее топливные циклы с низким расходом природного урана $\sim 0,196$ кг/(МВт·сут), т.е. на уровне PWR.

Реализация поставленной задачи потребует:
для ВВЭР-1000 —

завершить работы по 4-годовому топливному циклу с усовершенствованными ТВС с уран-гадолиниевым топливом и выгоранием до 55 МВт·сут/кг U и внедрить такой цикл в промышленную эксплуатацию;

создать и внедрить конструкцию бесчехловой ТВС с жестким каркасом;
вовлечь регенерированный уран в топливный цикл;
завершить опытно-промышленную эксплуатацию альтернативного варианта конструкции ТВС и перейти при положительных результатах на 1-м блоке Калининской АЭС на 4-годовой топливный цикл;
для ВВЭР-440 —
модернизировать конструкцию ТВС;
перейти на промышленное внедрение 5-годового топливного цикла с уран-гадолиниевым топливом;
вовлечь регенерированный уран в топливный цикл;
для РБМК-1000, -1500 —
осуществить полный перевод на уран-эрбиевое топливо всех блоков;
провести дальнейшую оптимизацию топливного цикла с уран-эрбиевым топливом для повышения выгорания;
внедрить конструкцию с повышенной эксплуатационной надежностью (с центральным закреплением твэла).

СЫРЬЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯТЦ

Шаталов В.В. (ВНИИХТ)

По данным МАГАТЭ и Лондонского уранового института в 2000 г. мировое потребление урана оценивается на уровне 64 тыс.т/год, производство составляет только 40 тыс.т/год. При этом дефицит покрывается за счет складских запасов (до 25 тыс.т/год), производством смешанного уран-плутониевого топлива, использованием регенерированного урана. Два последних источника в обозримом будущем составят не более 5—7%. Значительный вклад вносит использование высокообогащенного урана до 10 тыс.т/год к 2010 г. При этом планируется ввод до 2010 г. новых значительных мощностей урановых рудников в Канаде, Австралии, Китае, России. Однако эта программа уже сейчас отстает от намеченных планов.

Таким образом, дефицит в производстве и потреблении природного урана при любом сценарии развития ядерной энергетики составляет 20—25 тыс.т/год и цены на уран будут определяться странами, обладающими большими складскими резервами. В этой связи начиная с 2010 г. планируется постепенное вовлечение в обработку месторождений со стоимостью добываемого урана более 52 дол./кг.

Потребление природного урана в России определяется мощностью АЭС, действующих на территории России, Украины и в Восточной Европе, и с учетом программы развития ядерной энергетики до 2010 г. составит 8,5 тыс.т/год в 2000 г. и медленно возрастет до 9,2 тыс.т/год к 2010 г. При этом объемы потребления в России и других государствах приблизительно равны.

Важными становятся задачи в области фундаментальных научных исследований по химии урана. К ним относятся:

исследования химико-минералогического состава и степени стабильности минералов;
направленный синтез стабильных минералов;
изучение реакционной и окислительно-восстановительной способностей систем вода—твердое, вода—органика—твердое;
развитие сольвометаллургии;
изучение миграционной способности радионуклидов в геохимических зонах;
комплексобразование и механизм ионного обмена;