

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ ВВЭР-1000 ПУТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА

А.А.Афанасьев

*Министерство топлива и энергетики Украины, г. Киев, Украина,
afanasyev@min.energy.gov.ua, тел.: +38-044-228-47-81*

Успешная реализация Программ поэтапного повышения выгорания топлива [1-7] ведущими фирмами - производителями топлива и научно-исследовательскими центрами позволяет говорить, что в настоящее время не имеется серьезных технических препятствий для лицензирования в ближайшем будущем топлива легководных реакторов с допустимым выгоранием 65...70 МВт.сут/кг урана (среднее по ТВЭЛ) и 60...65 МВт.сут/кг урана (среднее по ТВС). Опыт эксплуатации украинских ВВЭР-1000 на начало 1999 г. составляет 130 реакторо-лет. На начало 1999 г. общее количество тепловыделяющих сборок (ТВС), выгруженных из активных зон украинских ВВЭР-1000, составило 5819 шт. (110 топливных циклов). Повышение экономичности топливоиспользования достигается увеличением выгорания топлива путем использования ТВС проекта 3-х годичной топливной кампании в четвертом топливном цикле. При использовании ТВС на 4-й год эксплуатации обеспечивается приемлемая надежность топлива. Переход на усовершенствованное топливо в ближайшие 4-6 лет позволит увеличить выгорание топлива на 5...7 % при снижении обогащения топлива на 5...7 %, что уменьшит потребности ядерной энергетики в природном уране и количество ОЯТ на единицу вырабатываемой электроэнергии. При определении тенденций развития ядерной энергетики на долгосрочную перспективу выгорание топлива правомерно рассматривать как один из оптимизационных критериев ядерного топливного цикла.

ВВЕДЕНИЕ

На начало 2000 г. в Украине находилось в эксплуатации четырнадцать водоохлаждаемых энергетических реакторов (11 ВВЭР-1000, 2 ВВЭР-440 и 1 РБМК-1000) с общей установленной мощностью 12820 МВт, что составляет приблизительно 25 % от общей установленной мощности электростанций Украины. Четыре ВВЭР-1000 в стадии сооружения.

В 1999 г. на АЭС Украины было выработано $72,072 \cdot 10^9$ кВт.ч электрической энергии (42,1 % от общей выработки электричества в стране).

Доля электроэнергии, производимой на АЭС, постоянно увеличивается при снижении общего энергопотребления в условиях экономического кризиса из-за более дешевого ее производства по сравнению с электростанциями на органическом топливе (рис.1).

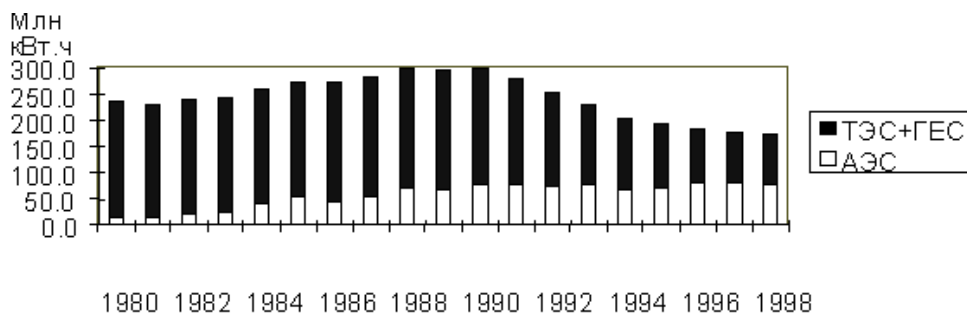


Рис.1. Производство электроэнергии в Украине

В период 2000 - 2010 г. энергоблоки с реакторами ВВЭР-1000 будут генерировать до 93...95 % электроэнергии, вырабатываемой на АЭС (приблизительно 40...50 % электроэнергии, вырабатываемой в стране).

Для организации, эксплуатирующей сегодня атомные электростанции, экономическая оптимизация означает минимизацию затрат (с учетом отчислений на завершение топливного цикла и снятие АЭС с эксплуатации) для выработки электроэнергии, основанной на высокой степени надежности работы оборудования, эксплуатационной гибкости и эффективного использования топлива.

1. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТОПЛИВА ВВЭР –1000

1.1. ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЕКТНЫХ ПРЕДЕЛОВ ТОПЛИВА И ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ ВВЭР-1000

Энергоблоки с реакторами ВВЭР -1000, эксплуатируемые в настоящее время, были сконструированы для работы при базовой нагрузке в общей энергетической системе СССР.

Первоначально, в соответствии с проектом энергоблока с ВВЭР-1000 эксплуатировались с использованием ТВС для 2-х топливных циклов с проектной продолжительностью топливной кампании 7000 ч (291,7 эффективных суток и использованием топлива обогащения 2,0 %, (3,0 + 3,3) % и 3,3 %, массой урана в ТВС 429,5 кг, диаметром центрального отверстия топливной таблетки 1,6 мм. Предел выгорания топлива был ограничен величиной 38 МВт · сут/ кг урана.

К 1989 г. согласно решению Главного конструктора реакторной установки (РУ) и тепловыделяющей сборки была рассчитана и обоснована активная зона с ТВС, которые должны были эксплуатироваться в течение 3-х топливных циклов с проектной продолжительностью каждой топливной кампании 7000 ч (291,7 эффективных суток) и использованием ТВС обогащением 1,6 %; 3,0 %; (3,6 + 4,4) %; 4,4 % для энергоблоков проектов В-338, В-320 с 61 ОР СУЗ. При этом диаметр центрального отверстия топливной таблетки был увеличен до 2,4 мм и соответственно среднестатистическая масса урана в ТВС снижена до 401,6 кг.

Для компенсации дополнительной избыточной реактивности и снижения неравномерности энерговыделения в активной зоне на начало топливной кампании в ТВС обогащения (3,6 + 4,4) % и 4,4 % на один год их эксплуатации загружаются кластерные сборки со стержнями выгорающего поглотителя. Поглощающий материал представляет собой диборид хрома в алюминиевой матрице ($\text{CrB}_2 + \text{Al}$).

Проектный состав комплекса свежих ТВС для режима стационарных перегрузок соответствует следующей номенклатуре:

- ТВС 1,6 % обогащения - 1 шт.;
- ТВС (3,6 + 4,4) % обогащения - 30 шт.;
- ТВС 4,4 % обогащения - 24 шт.

С целью унификации топливоиспользования на энергоблоках с ВВЭР-1000 решением Главного конструктора РУ от 23.08.1988 г. № 12-17/48 предусматривалась реконструкция реакторной установки энергоблока № 1 проекта В-302 Южно-Украинской АЭС изменением количества ОР СУЗ с 49 на 61 путем замены блока защитных труб и верхнего блока. Впоследствии выполнение этого решения было признано нецелесообразным. Перевод этого реактора на 3-х годичный топливный цикл обеспечивался компоновочным решением загрузки активной зоны с использованием ТВС 3,6 % и (3,6 + 4,4) % и варьированием плотности выгорающего поглотителя.

Проектный состав комплекса свежих ТВС для режима стационарных перегрузок реактора энергоблока проекта В-302 соответствует следующей номенклатуре:

- ТВС 1,6 % обогащения - 1 шт.;
- ТВС 3,6 % обогащения - 30 шт.;
- ТВС (3,6 + 4,4) % обогащения - 24 шт.

С 1996 г. ТВС обогащением 3,6 % с целью повышения гибкости компоновочных решений загрузки используются в реакторах энергоблоков № 2 и 3 Южно-Украинской АЭС.

Проектный предел среднего по ТВС выгорания топлива был увеличен до 49 МВт.сут/кг урана. Сум-

марное время работы ТВС в активной зоне реактора было ограничено 21000 ч. Число циклов увеличения мощности реактора более чем на 2 % относительно установившегося стационарного значения не должно превышать 70 в течение всего времени эксплуатации ТВС.

Предел безопасности по суммарной активности изотопов йода в теплоносителе первого контура (когда реактор должен быть остановлен) был установлен на уровне $1,5 \cdot 10^{-2}$ Ки/л.

В большинстве случаев проектные перегрузки не могли быть реализованы по следующим причинам:

- не обеспечивался отрицательный температурный коэффициент реактивности реактора на минимально контролируемом уровне мощности при введенных ОР СУЗ (Требование нормативного документа - "Номенклатуры..");

- вследствие внеплановых остановов энергоблоков для устранения возникающих неисправностей в системах (в основном тепломеханического оборудования) в некоторых случаях оказывалось целесообразным с целью исключения дополнительного времени простоя энергоблока в стадии ремонта параллельно осуществлять досрочную перегрузку реактора.

После дезинтеграции СССР и его единых энергетических систем стало еще более проблематичным обеспечивать проектную продолжительность топливной кампании (291,7 эффективных суток) и проводить плановые перегрузки топлива в весенний или летний период.

Среднее выгорание выгружаемого топлива ВВЭР-1000 в 3-летнем топливном цикле в Украине существенно ниже проектного, использование топлива неэффективное (рис.2 - распределение выгорания топлива в выгружаемых ТВС).

В связи с этим было решено использовать часть ТВС на 4-й год эксплуатации с целью повышения среднего выгорания выгружаемого топлива, повышения гибкости загрузочных решений активной зоны реактора, что позволяет варьировать продолжительность топливной кампании и повысить эффективность использования топлива в целом.

По отдельным техническим решениям 560 ТВС были использованы на 4-й год эксплуатации на украинских АЭС в период 1992-1996 г. 72 из них использовались на энергоблоке № 1 Южно-Украинской АЭС, имели начальное обогащение 3,3 % (проект 2-х годичного топливного цикла) и 478 ТВС обогащением (3,6 + 4,4) % и 4,4 % (проект 3-х годичного топливного цикла).

Научные организации, Главный конструктор реактора и ТВС и производители топлива не были заинтересованы вносить изменения в нормативные документы, которые разрешали бы промышленную эксплуатацию ТВС в 4-х годичных топливных циклах.

По инициативе Госкоматома Украины в 1996 г. был организован и проведен международный семинар (г. Ржеж, Чехия) по надежности эксплуатации топлива и гибкости топливных циклов ВВЭР-1000 и PWR. На основании результатов этого семинара, анализа накопленного опыта по эксплуатации топ-

лива и активных зон реакторов ВВЭР-1000 и PWR, анализа результатов послереакторных исследований ТВС ВВЭР-1000 Госкоматом Украины обосновал допустимость промышленной эксплуатации ТВС в 4-х годовичных топливных циклах.

На основании этого в 1997 г. Госкоматом Украины и продавец топлива АО "ТВЭЛ" с привлечением научных и проектных организаций реакторной установки и ТВС подготовили обоснованное техническое решение по изменению проектных условий и пределов эксплуатации ТВС.

Суммарное время эксплуатации ТВС в активной зоне реактора было увеличено с 21000 до 28000 ч.

Разрешенное количество ТВС, оставляемое в активной зоне на 4-й год эксплуатации, было определено равным 36 шт.

На рис.2,3 показано распределение выгорания выгруженных ТВС. Среднее выгорание на украинских АЭС с ВВЭР-1000 на 4...10 % больше, чем на АЭС с ВВЭР-1000 в других странах (Россия, Болгария).

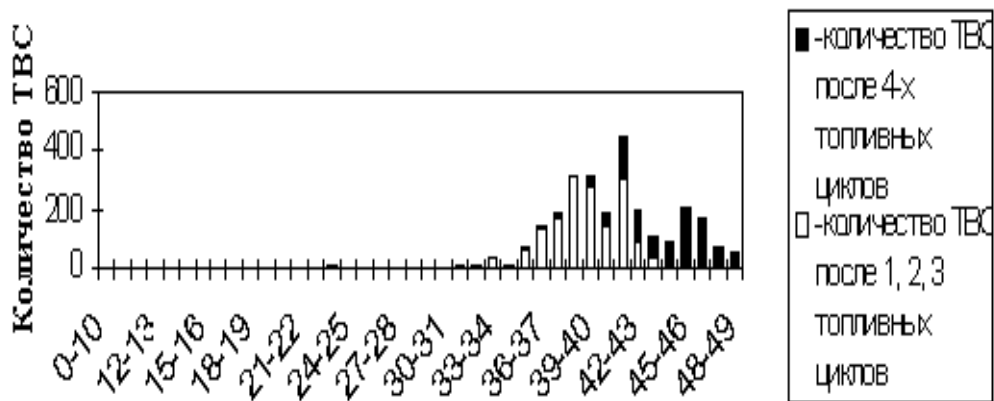


Рис. 2. Распределение выгорания в выгруженных ТВС обогащения (3,6+4,4) % и 4,4 % за все время их эксплуатации в ВВЭР-1000 Украины. Количество топливных циклов 89, количество ТВС 2694. 1045 ТВС использовались на протяжении 4-х Т.Ц.

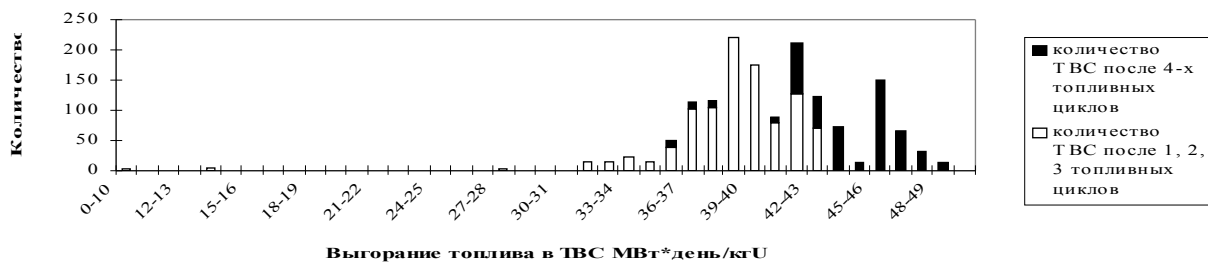


Рис. 3. Распределение выгорания в выгруженных ТВС обогащения (3,6+4,4) % и 4,4 % за все время их эксплуатации в ВВЭР-1000 ЗАЭС (1988-2000). Количество топливных циклов 48, количество ТВС 1517. 531 ТВС использовались в 4-х Т.Ц.

Анализируя топливные загрузки украинских ВВЭР-1000, можно утверждать, что использование части ТВС на 4-й год эксплуатации позволило увеличить среднее выгорание топлива в выгружаемых ТВС, с 38...39 МВт.сут/кг урана до 41,5 МВт.сут/кг урана. Это позволяет снижать объем отработанного топлива и соответственно стоимость «заднего края» топливного цикла. Сравнительные характеристики реализованных топливных циклов ВВЭР-1000 АЭС Украины приведены в табл. 1.

Для расчета стоимости ТВС, расхода природного урана и стоимости "переднего края" топливного цикла использованы следующие данные:

Стоимость:	
природного урана.....	30 US\$/кг
конверсии.....	6 US\$/к
обогащения ¹	95 US\$/кг

фабрикации.....275 US\$/кг
Технологические потери урана при переделах составляют 2,5 вес. %.

Стоимость «заднего края» топливного цикла оценивается в разных странах по разным методикам, в зависимости от уже существующих капиталовложений, состояния экономики, уровня жизни, политического и общественного отношения к атомной энергетике и т.д.

Немецкие эксперты оценивают минимальную стоимость топливного цикла следующим образом:

Природный уран и конверсия.....	19 %
Обогащение.....	19 %
Фабрикация ТВС.....	12 %
Хранение и окончательное захоронение....	50 %.

Другими словами, стоимость «переднего края» топливного цикла (1000...1300 US\$/кг.урана в ТВС) принята равной стоимости «заднего края» топливно-

¹ Остаточное содержание U-235 в отвале 0,3 мас. %

го цикла. По более консервативным оценкам для условий Германии после 1999 г. стоимость «заднего края» топливного цикла может составлять 115...170 % стоимости «переднего края» топливного цикла.

Шведские эксперты, имея большой опыт в области сооружения и эксплуатации центрального мокрого хранилища (CLAB), установки по компактированию отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и контейнеров (канистр) для захоронения ОЯТ, оценивают стоимость «заднего края» топливного цикла (включая транспортирование, хранение, компактирование и захоронение ОЯТ) на уровне 700...800 US\$/кг.

Эксперты OECD/NEA рекомендуют базовые цены и "чувствительный" диапазон цен на услуги по отдельным составляющим топливного цикла при оценке стоимости топливного цикла в целом.

Рекомендованные данные по стоимости компонент топливного цикла экспертами OECD/NEA в 1994 г. [8] и представленные экспертами фирмы "Cogema" (Франция) [9] в Красноярске -26 (Железнодорожск) в феврале 1996 представлены в табл.2. Значение стоимости «заднего края» топливного цикла для украинских ВВЭР принято равным 610 US\$/кг.урана.

Таблица 1
Сравнительные характеристики реализованных топливных циклов ВВЭР- 1000 АЭС Украины

Топливный цикл	Среднее обогащение урана в ТВС, %	Масса урана в ТВС, кг	Среднее выгорание топлива, МВт.сут/ кгU	Удельный расход природного урана, кг/ МВт.сут	Стоимость "заднего края" топливного цикла, цент/кВт.ч*	Стоимость "заднего края" топливного цикла/стоимость всего топливного цикла, цент/ кВт.ч
2-годовой	3,3	429,5	28,5	0,263	0,437	0,287/0,723
3 -годовой	4,31	401,6	39	0,256	0,416	0,211/0,627
3-годовой **	4,31	401,6	41,5	0,240	0,383	0,193/0,576

* Первичная загрузка и сервис не учитываются;

** Цикл с использованием части ТВС на 4-й год эксплуатации

Таблица 2
Стоимость компонентов «заднего края» топливного цикла для PWR (базовые цены)

Компонента	OECD/ NEA (BNFL/ Объединенное Королевство)		Cogema, Франция
	Рекомендованная цена за единицу, US\$/кг.U	Чувствительный диапазон, US\$/кг.U	Рекомендованная цена за единицу, US\$/кг.U
Опция с переработкой:			
- транспортировка ОЯТ	62	25...99	54
- переработка (включая захоронение низко и средне активных РАО, остекловывание и последующее хранение высокоактивных РАО	893	670...893	640
- захоронение остеклованных ВАО	109	109...719	60
Ценность извлеченных UO ₂ и PuO ₂	130	120...140	133
Итого	1064 (934*)	804...1711 (684...1571*)	754 (621*)
Опция прямого захоронения ОЯТ:			
- капсулирование транспортировка и хранение ОЯТ	285	74...359	
- (кондиционирование) и захоронение	755	173...829	
Итого	1040	247...1188	

* Учитывается ценность (стоимость) регенерированных (извлеченных)UO₂ и PuO₂

1.2. НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ТВС

Повышение выгорания топлива необходимо рассматривать в контексте с надежностью топлива.

На начало 1999 г. общее количество ТВС, выгруженное за все время эксплуатации 11 украинских ВВЭР-1000, составило 5819 (реализовано 110 топливных циклов). 194 ТВС были идентифицированы как негерметичные.

- 34 из них (17,5 %) были возвращены в активную зону для продолжения их эксплуатации в следующих топливных кампаниях.
- 138 из них (71,1 %) были выгружены в плановом порядке (т.е. они достигли планового выго-

рания и для использования в дальнейших топливных кампаниях не планировались).

- 4ТВС (2,1 %) достигли критерия досрочной выгрузки.
- 18 ТВС (9,3 %) не достигли критерия досрочной выгрузки, но по решению технических руководителей АЭС были выгружены досрочно (консервативный подход).
- 9 ТВС были выгружены досрочно из-за механических повреждений, случившихся в результате перегрузочных операций (табл.3).

Таблица 3

Сводные данные по всем выгруженным ТВС украинских АЭС

АЭС	Номер блока	Кол-во реализованных топливных циклов	Кол-во выгруженных ТВС	Кол-во тестируемых ТВС/средняя доля (%) тестируемых ТВС	Кол-во негерметичных ТВС после 1/2/3/4 года эксплуатации/всего	Кол-во ТВС, достигших критерия досрочной выгрузки/кол-во ТВС, которые были выгружены досрочно по консервативному решению /всего	Кол-во ТВС, выгруженных по причине механических повреждений
ЗАЭС*	1	11	590	939/ 52,4	0/ 1/ 8/ 15/ 24	0 / 2/ 2	3
	2	11	560	884/ 49,3	1/ 4/ 5/ 0/ 10	0 / 1/ 1	0
	3	11	589	1245/ 69,4	2 / 11/ 10/ 0/ 23	1/ 4 / 5	0
	4	11	550	706/ 39,4	4/ 1 / 7 / 0/ 12	1/ 0/ 1	0
	5	9	418	726/ 49,5	0/ 2/ 4 / 0/ 4	1/ 0/ 1	0
	6	2	102	0 / 0	0/ 0/ 0/ 0/ 0	0/ 0/ 0	0
Всего по ЗАЭС		55	2809	4500/ 50,2	22/ 26/ 27 / 0/ 75	3/ 7/ 10	
ЮУАЭС**	1	14	801	1083/ 47,5	5/ 11/ 11 / 1/ 28	1/ 0 / 1	0
	2	11	580	1121/ 62,5	7/ 9/ 9 / 1/ 26	0/ 4 / 4	2
	3	9	455	280/ 19,1	0/ 2/ 0 / 0/ 0	0/ 0/ 0	1
Всего по ЮУАЭС		34	1836	2484/ 44,8	12/ 22/ 19/ 2/ 55	1/ 4 / 5	
ХАЭС***	1	10	529	1210/ 74,2	3/ 6/ 6 / 7/ 22	0/ 6 / 6	0
РАЭС****	3	11	645	882/ 49,2	5/ 11/ 24/ 2/ 42	0/ 1 / 1	3
Итого:		110	5819	9076/ 50,6	42/ 65/ 76/ 11/ 194	4/ 18/ 22	9

* Запорожская АЭС; ** Южно-Украинская АЭС; *** Хмельницкая АЭС; **** Ровенская АЭС

Количество негерметичных ТВС после 1, 2, 3, 4 года эксплуатации распределяется следующим образом:

- после первого года эксплуатации 42/194 = 21,6 %;
- после второго года эксплуатации 65/194 = 33,5 %;
- после третьего года эксплуатации 77/194 = 39,2 %;
- после четвертого года эксплуатации 11/194 = 5,7 %.

Однако использовать представленную статистику для определения влияния выгорания на негерметичность² ТВЭЛ некорректно, потому что средняя доля тестируемых ТВС составляет после первого и второго годов эксплуатации 30...50 %, после третьего года – 60...80 % и после четвертого – 90...100 %.

Объем КГО во время планово-предупредительного ремонта (ППР) энергоблока, включающего перегрузку топлива, определяется в соответствии с требованиями "Инструкции по контролю герметичности оболочек тепловыделяющих элементов реакторов типа ВВЭР-1000 во время работы и после остановки аппарата".0401.00.00.000 ДНГ (ОКБ "Гидропресс"):

1) КГО ТВЭЛ всех ТВС, эксплуатировавшихся в составе данной топливной загрузки, является обязательным при выполнении двух условий:

² Критерий негерметичности ТВС соответствует активности йода -131 равной $1 \cdot 10^{-4}$ Ки/л в воде испытательного контейнера системы контроля герметичности оболочек (КГО)

- если значение суммарной активности изотопов йода ($^{131}\text{I} + ^{132}\text{I} + ^{133}\text{I} + ^{134}\text{I} + ^{135}\text{I}$) в какой-либо период превышало величину $2 \cdot 10^{-4}$ Ки/кг;

- если значение удельной активности ^{131}I за тот же период превышало величину 10^{-5} Ки/кг;

2) КГО ТВЭЛ ТВС во время ППР может не проводиться, если значения удельной активности ^{131}I и ^{134}I в теплоносителе I контура за весь период эксплуатации топливной загрузки одновременно не превышали уровень 10^{-6} Ки/кг.

3) Если превышались значения п.2, но не превышались значения п.1, то требуется проведение КГО только для отработавших, планово выгружаемых ТВС.

В большинстве топливных циклов суммарная активность изотопов йода в теплоносителе 1-го контура составляла $(1...5) \cdot 10^{-5}$ Ки/л. Рис.5,6,7,8 показывают изменение активности теплоносителя по изотопам йода для некоторых энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000. На украинских АЭС с ВВЭР-1000 суммарная активность изотопов йода в теплоносителе 1-го контура никогда не достигала значения предела безопасной эксплуатации $1,5 \cdot 10^{-2}$ Ки/л. При достижении предела безопасной эксплуатации реактор должен быть остановлен досрочно.

В 1998 г. Главный конструктор реакторной установки и ТВС "ужесточил" в три раза предел безопасной эксплуатации реактора по суммарной активности изотопов йода в теплоносителе 1-го контура от $1,5 \cdot 10^{-2}$ Ки/л до $5 \cdot 10^{-3}$ Ки/л.

Также впервые в эксплуатационной практике был введен эксплуатационный предел $1,0 \cdot 10^{-3}$ Ки/л. (При возрастании суммарной активности изотопов

йода в теплоносителе 1-го контура до эксплуатационного предела персонал АЭС должен предпринимать действия, направленные на недопущение дальнейшего увеличения активности йода).

Критерий отбраковки негерметичных ТВС (активность воды в измерительном контейнере по $^{131}\text{I} \geq 1 \cdot 10^{-4}$ Ки/л не был изменен. При указанных условиях технические руководители АЭС должны чаще прибегать к практике консервативных решений относительно досрочной выгрузки ТВС, не достигших критерия досрочной выгрузки.

На рис.4,5,6,7,8 показано изменение во времени доли негерметичных ТВЭЛ (FPFR) для украинских ВВЭР -1000.

Средняя доля негерметичных ТВЭЛ FPFR определяется следующим образом:

$$FPFR = NTBC / NA \cdot 312,$$

где NTBC - количество негерметичных ТВС выяв-

ленные в течение в течение одного года; NA - общее количество ТВС в активных зонах реакторов; 312 - количество топливных стержней в ТВС.

Принимается, что негерметичная ТВС имеет только один негерметичный ТВЭЛ. Предположение только одного негерметичного ТВЭЛ соответствует методике, применяющейся для "западных" проектов реакторов с водой под давлением PWR. Однако в современных проектах PWR обеспечены инспекция, выявление и замена дефектных ТВЭЛ при помощи разборной конструкции ТВС, наличия в бассейне выдержки реактора специального стенда инспекций. Проект реактора установки и ТВС ВВЭР -1000 не предусматривал выявление и замену дефектных ТВЭЛ.

Анализируя имеющиеся данные, можно утверждать, что повышение выгорания топлива ВВЭР-1000 не ухудшило надежность топлива.

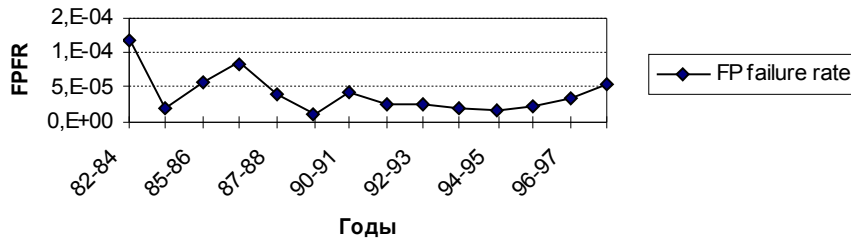


Рис. 4. Средняя доля негерметичных ТВЭЛ для ВВЭР-1000 Украины



Рис. 5. Изменение активности теплоносителя по изотопам йода и доли негерметичных ТВЭЛ для энергоблока № 1 ХАЭС



Рис. 6. Изменение активности теплоносителя по изотопам йода и доли негерметичных ТВЭЛ для энергоблока № 5 ЗАС

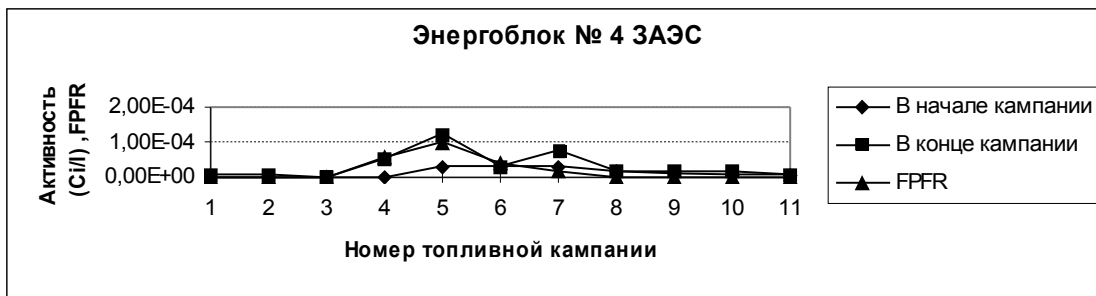


Рис. 7. Изменение активности теплоносителя по изотопам йода и доли негерметичных ТВЭЛ для энергоблока № 4 ЗАЭС



Рис. 8. Изменение активности теплоносителя по изотопам йода и доли негерметичных ТВЭЛ для энергоблока № 3 РАЭС

1.3 ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ АКТИВНЫХ ЗОН ВВЭР-1000 С ИСКРИВЛЕННЫМИ ТВС

Основная проблема эксплуатации активных зон ВВЭР-1000 в последние годы заключалась в искривлении ТВС в активной зоне реактора, которая приводила к превышению времени относительно проектного значения (4 с) погружения в активную зону или застревания в промежуточном положении отдельных кластеров ОР СУЗ.

В связи с этим консервативно было предположено образование увеличенных водяных зазоров между ТВС и, как следствие этого, возможное превышение энерговыделения в ТВЭЛ периферийного ряда отдельных ТВС над допустимым проектным значением:

- 448 Вт/см в средней и нижней части ТВЭЛ ((0...80) % высоты активной зоны);
- 360 Вт/см в верхней части ТВЭЛ ((80...100) % высоты активной зоны). На основании прогнозных расчетов величины межкассетных зазоров в 1996-1997 гг. вводились эксплуатационные ограничения (снижение мощности реактора на (5...10) %).

1.3.1. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ КРИВИЗНЫ ТВС

На начало перегрузочных кампаний 1998 г. выполнены измерения кривизны ТВС в активных зонах ВВЭР-1000 Украины, России, Болгарии. Измерения проведены в 2350 ТВС, т.е. имеются результаты для оценки более чем 10000 зазоров. Только в одном случае величина искривления ТВС (определяется как усредненное в ТВС отклонение центра от-

верстия направляющего канала от вертикали) составила 18,6 мм, в двух - 15 мм и во всех остальных - до 12 мм [10].

"Вырисовывается" следующая схема искривления ТВС: при достижении средней величины искривления ТВС \sim (8...10) мм (можно уверенно утверждать, что на момент обнаружения некомплектного срабатывания ОР СУЗ искривление ТВС на эксплуатируемых блоках достигло этой величины) и скручивании ТВС вокруг своей центральной вертикали в условиях жестко закрепленной нижней головки - вектора искривлений выстраиваются в одном направлении, т.е. происходит вращение векторов в одну сторону вокруг центра активной зоны, что отображено на рис.9.

Представленные ОКБ ГП значения зазоров для ТЦ энергоблоков Украины в 1998 г. приведены в табл.4,5.

Реализация технических мероприятий:

- 1) корректировка (на некоторых энергоблоках дважды) положения блоков защитных труб реакторов с целью уменьшения сжатия пружинных блоков головок ТВС (осевого поджатия ТВС) (1993-1997 гг.);
- 2) сверление отверстий в штангах приводов поглощающих стержней с целью уменьшения силы гидродинамического торможения при вводе в активную зону ОР СУЗ (1993 -1998 гг.);
- 3) утяжеление штанг приводов СУЗ или использование утяжеленных ПС СУЗ новой конструкции с использованием в нижней части ПЭЛ гафния или титаната диспрозия (РАЭС, ЗАЭС) (1993 -1999 гг.);
- 4) использование ТВС с циркониевыми (сплав

110 - на РАЭС -3, сплав 110 и сплав 635 - на ЗАЭС -3, ЗАЭС-6) направляющими каналами и дистанционирующими решетками и головкой ТВС с увеличенным ходом пружины - многократно уменьшить частоту (вероятность) случаев с временем сброса кластера превышающим 4 с и постепенно уменьшать величину искривления ТВС в активной зоне.

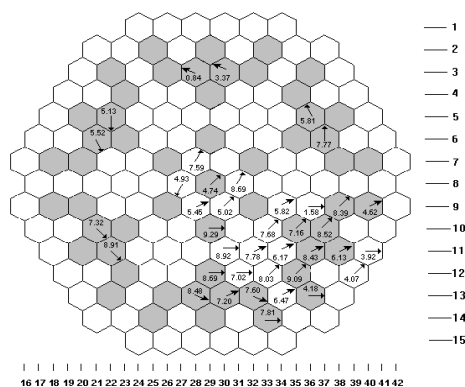


Рис.9. Направление и величина прогибов в ТВС (в сечении 0,5 Н активной зоны) перед эксплуатацией в 10-й топливной кампании энергоблока №1 ЗАЭС. → - направление прогиба; 3.92- величина прогиба, мм; в затемненных ячейках размещаются ОР СУЗ

Усредненные результаты измерений времени ввода ОР СУЗ в активную зону для всех энергоблоков с ВВЭР -1000 Украины до и после выполнения указанных мероприятий приведены в табл.6.

Таблица 4
Величина превышения зазоров над номинальным значением для 14 ТЦ ЮУ-1 и 11 ТЦ ХАЭС-1

Номер слоя активной зоны по высоте снизу вверх	1	2	3	4	5	6	7
Превышение зазора: на начало кампании, мм	8,7	10,3	12,4	15,9	12,4	10,3	8,7
на конец кампании, мм	17,8	18,7	19,6	21,8	19,6	18,7	17,8

Таблица 5
Величина превышения зазоров для 10 ТЦ ЗАЭС-5

Номер слоя по высоте	1	2	3	4	5	6	7
Превышение зазора: на начало кампании, мм	8,7	10	10	10,2	10	10	8,7
на конец кампании, мм	6,2	9,6	13	16,5	13	9,6	6,2

До реализации указанных мероприятий для украинских ВВЭР-1000 среднее время ввода ОР СУЗ, количество ОР СУЗ с $t > 4$ с, количество застрявших ОР СУЗ составляли: 3,3 с, 200 и 28 (38 с учетом 1992 г.) соответственно, после реализации: 2,49 с, 14 и 0 соответственно.

Всего после начала внедрения компенсирующих

мероприятий в период 1995 - 1 января 2000 г. выполнено 212 измерений времени сброса ОР СУЗ. Из них 36 при уровне мощности реактора (40...50) % $N_{ном.}$, 17 измерений на уровне мощности (20-30) % $N_{ном.}$ и остальные в состоянии "горячий останков". При этом результаты испытаний "на мощности", кроме одного случая, соответствовали проектным требованиям. Общее количество измерений составило 318

Таблица 6
Усредненные результаты измерений времени ввода ОР СУЗ в активную зону для всех энергоблоков с ВВЭР -1000 Украины до и после выполнения технических мероприятий

АЭС/блок	Усредненные результаты ежеквартальных испытаний (сброса) ОР СУЗ / $\tau_{ср}$ /кол-во ОР СУЗ с $t > 4$ с/количество застрявших ОР СУЗ	
	В период до начала внедрения мероприятий 1993-1995	В период после внедрения мероприятий 1995 - 01.01.2000
ЗАЭС 1	3,22 / 34 / 8	2,35 / 0 / 0
ЗАЭС 2	3,18 / 30 / 0	2,25 / 0 / 0
ЗАЭС 3	3,17 / 29 / 6	2,60 / 0 / 0
ЗАЭС 4	3,21 / 11 / 0	2,60 / 0 / 0
ЗАЭС 5	3,28 / 9 / 8	2,82 / 2 / 1
ЗАЭС 6	3,15 / 1 / 0	2,54 / 2 / 0
ЮУ АЭС 1	3,5 / 0 / 0	2,42 / 0 / 0
ЮУ АЭС 2	3,72 / 32 / 1	2,45 / 0 / 0
ЮУ АЭС 3	3,55 / 19 / 0	2,32 / 3 / 0
РАЭС 3	3,465 / 35 / 5	2,61 / 6 / 0
ХАЭС 1	3,72 / 12 / 0	2,46 / 1 / 0

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТРАБОТАВШИХ ТВС В ГОРЯЧИХ КАМЕРАХ

В горячих камерах Государственного научного центра Российской Федерации «Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (ГНЦ РФ НИИАР) были исследованы три ОТВС, отработавшие по 3 и 4 топливных кампании на энергоблоке №1 Запорожской АЭС.

ТВС зав. №№ 0328 и 0329 исследовались в 1994 г. с целью выяснения и устранения причин не проектного срабатывания ОР СУЗ.

Исследования выполнялись для отработки следующих версий причин не проектных (некомплектных) срабатываний ОР СУЗ:

1. Отложения на внутренней поверхности направляющих каналов ПС СУЗ из -за гипотетического кипения теплоносителя.

2. Занос продуктов коррозии в направляющие каналы СУЗ.

3. Механическое искривление пружинных блоков ТВС и штанг приводов.

4. Механическое искривление направляющих каналов ТВС.

5. Радиационная ползучесть конструкционных материалов.

В результате исследований было установлено: тепловыделяющие сборки имеют изгиб сложной

формы с максимальной стрелой прогиба 20 мм, изгибы направляющих каналов (НК) поглощающих стержней повторяют изгибы тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) ТВС; структура и механические свойства материала НК - обычные для облученной стали X18H10T; в головках ТВС отдельные витки пружин соприкасались между собой во время работы ТВС; поджатие пучков тепловыделяющих элементов в дистанционирующих решетках ослаблено вплоть до образования зазоров; тепловыделяющие элементы обеих ТВС имели прогибы в диапазоне 14...19 мм, повторяющие соответствующие формы изгибов ТВС и направляющих каналов.

Состояние ТВЭЛ обеих ТВС - хорошее, контролируемые параметры:

- удлинение (16...17 мм., максимальное);
- изменение диаметра ТВЭЛ (максимальное с 9,1 до 9,05 мм в средней части);
- коррозионное состояние оболочек, их механические свойства;
 - выделение ГПД и топлива и давление газов внутри ТВЭЛ, распухание топливных таблеток и т.д. не противоречили ранее установленным закономерностям, характеризующим заданную работоспособность ТВЭЛ ТВС ВВЭР - 1000 [3,10].

В результате выполнения исследовательских работ версии 1,2,3 не подтвердились. Подтверждение версии 5 (радиационная ползучесть конструкционных материалов), как основной причины изгиба ТВС, не установлено. Однако влияние на формоизменение отдельных элементов (ТВЭЛ, НК, ЦК) и на конструктивную прочность ТВС процессы ползучести и радиационного роста несомненно оказывают. Состояние исследованных кластерных сборок ПЭЛ и СВП удовлетворительное.

Изменений в сборках, которые могли бы привести к нарушениям работы ОР СУЗ - не обнаружено [

10].

Причина некомплектного введения ОР СУЗ в активную зону заключалась в искривлении ТВС в активной зоне реактора. Сложная форма искривления ТВС приводит к возникновению дополнительных сил трения между ПЭЛ и стенкой НК и в итоге к некомплектному вводу ОР СУЗ в активную зону.

ТВС № 0325, имеющая максимально допустимое по проекту выгорание была исследована в период 1997 - 1998 гг. с целью определения состояния топливных стержней и конструктивных элементов после завершения эксплуатации и будет использоваться в дальнейшем для выполнения долгосрочных (10 лет) исследований в обоснование безопасности длительного промежуточного хранения.

Среднее удлинение топливного стержня, уменьшение диаметра стержня и зазора между топливом и оболочкой для всех исследованных стержней соответствуют ранее определенным зависимостям, полученным в результате исследований топливных стержней с выгоранием от 13 до 46 МВт·сут/кг урана. Это свидетельствует об отсутствии значительной аксиальной деформации в результате взаимодействия топлива с оболочкой, так же как и радиальной деформации вследствие распухания стержня [3]. Результаты исследований облученных до 51 МВт·сут/ кг урана топливных стержней позволяют говорить о возможности дальнейшего повышения выгорания топлива ВВЭР.

Анализируя результаты эксплуатации активных зон ВВЭР-1000 и РWR с искривленными ТВС и внедряемые компенсирующие мероприятия, направленные на доработку БЗТ, конструкций ТВС и ОР СУЗ, можно утверждать, что повышение выгорания топлива ВВЭР-1000 при выполнении компенсирующих мероприятий не является фактором, который может сдерживать дальнейшее повышение выгорания топлива.

Таблица 7

Итоговые результаты послереакторных исследований ТВС (№№ 0325, 0328, 0329)

Параметры	ТВС № 0325	ТВС №№ 0328, 0329
Номер топливных кампаний, в которых отработала ТВС	4а,4б,5,6,7	4а,4б,5,6
1.Среднее выгорание топлива в ТВС/наиболее напряженном ТВЭЛ, МВт.сут./ кг урана	48.9/ 51,3	44.0/ 46,5
2. Параметры ТВЭЛ:		
2.1.Удлинение, мм	12.3-18.6	11.0-17.3
2.2.Уменьшение диаметра, мм	0.05-0.08	0.04-0.07
2.3. Зазор между топливом и оболочкой, мкм	3-43	Нет данных
2.4. Свободный объем газа под оболочкой, см ³	31.5-33.6	31.0-34.0
2.5. Доля выделившихся газов, %	0.19-2.50	0.52-1.94
2.6. Остаточное давление газа под оболочкой, МПа	2.46-2.72	2.39-2.64
3. Максимальная толщина окисной пленки на оболочке, снаружи, мкм	7-10	5-7
внутри, мкм	5-10	5-10
4. Содержание водорода в оболочке, %	(0.88 - 1.6)·10 ⁻²	(0.3 - 1.2)·10 ⁻²
5. Параметры топливной таблетки:		
5.1. Диаметр центрального отверстия, мм	2.3-2.4	2.3-2.4
5.2. Средний размер зерна, мкм	3.8-5.8	~ 10
5.3. Плотность топлива, г/см ³	10.21-10.52	10.39-10.47

3. ДАЛЬНЕЙШИЕ УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВА ВВЭР-1000

Дальнейшее повышение технико-экономических характеристик топлива ВВЭР-1000 обеспечивается использованием уран-гадолиновых топливных таблеток (UO₂-Gd₂O₃ топливо) и заменой стальных

конструктивных элементов (направляющие трубы и дистанционирующие решетки) на циркониевые. При этом обеспечивается повышение размерной стабильности ТВС и повышение эффективности использования топлива (снижение расхода природного урана на единицу выработанной энергии).

В соответствии с нейтронно-физическими расчетами замена стальных конструктивных элементов на циркониевый сплав повышает эффективность использования топлива на 8,2 %. Использование уран-гадолиниевого топлива $UO_2-Gd_2O_3$ (топливные стержни с интегрированным выгорающим поглотителем IFBA) вместо ТВС со стержнями выгорающего поглотителя и уменьшение диаметра центрального отверстия топливной таблетки от 2,4 до 1,4 мм позволяют повысить эффективность использования топлива на 2,4 и 4 % соответственно. Внедрение усовершенствованного топлива позволит увеличить выгорание топлива на (5...7) % при снижении обогащения топлива на (5...7) %.

4. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕЖДУНАРОДНЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ПРОГРАММ

В середине 80-х годов были выполнены оценки развития энергетики и ядерной энергетики, в частности. Конкурентоспособность атомной энергетики (АЭС) в условиях возросших

требований по безопасности, снижения радиационного воздействия на окружающую среду и надежности функционирования, определялась в первую очередь снижением стоимости ядерного топливного цикла, сокращением сроков сооружения и степенью унификации эволюционных водоохлаждаемых реакторов.

Эволюционные водоохлаждаемые реакторы в условиях снижения цены на природный уран, избытка мощностей заводов по обогащению урана оказались наиболее технологичными и конкурентоспособными. Программа развития быстрых реакторов в силу указанных причин была замедлена или отложена по крайней мере на 30 - 40 лет.

При ужесточении требований по снижению воздействия на окружающую среду и, как следствие, увеличении стоимости заднего края топливного цикла, стало очевидно, что снизить стоимость топливного цикла можно путем увеличения выгорания топлива и соответственно снижением количества отработанного ядерного топлива (ОЯТ) на единицу выработанной Э/Э.

Были разработаны и приняты соответствующие «Программы...» исследований в обоснование допустимости повышения выгорания топлива и улучшения характеристик, потребительских и эксплуатационных качеств топлива.

Это прежде всего исследования в международных европейских центрах HALDEN - Норвегия, Институт трансураниевых элементов в Karlsruhe - Германия, французский центр с реактором CABRI, японский институт ядерных исследований с реактором NSRR, Государственный научный центр Российской Федерации «Научно-исследовательский

институт атомных реакторов» (ГНЦ РФ НИИАР) с "высокопоточными" реакторами CM-2, МИР, BOR-60 и материаловедческим комплексом. (Кроме того, исследования выполнялись американскими или международными фирмами при использовании для инспекции ТВС и ТВЭЛ стендов инспекций и дальнейшего изучения отдельных выборочных ТВЭЛ в горячих камерах лабораторий Chalk -River AECL - Канада или Grenoble - Франция).

Исследовалось поведение и изменение свойств матрицы топлива, кинетика газовой выделености, механические характеристики оболочки, взаимодействие топлива с оболочкой и т.д. как при стационарных - ресурсных испытаниях, так и при переходных процессах (скачки мощности) и авариях, связанных с потерей теплоносителя (LOCA) и "выбегом" реактивности и мощности (RIA). Кроме того, используя качество разборности ТВС, стенды инспекций в бассейне выдержки АЭС, устоявшуюся законодательную базу в области получения и использования лицензий, инженерно-аналитический подход регулирующего органа к оценке безопасности, фирма SIEMENS в коммерческом реакторе произвела опытно-промышленную эксплуатацию отдельных топливных стержней штатных используемых в настоящее время ТВС до выгорания 75 МВт.сут./кг. урана.

4.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ВАЖНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ЯВЛЕНИЙ ПРИ ГЛУБОКОМ ВЫГОРАНИИ ТОПЛИВА

4.1.1.КОРРОЗИЯ ОБОЛОЧКИ (ОКИСНАЯ ПЛЕНКА), ГИДРИРОВАНИЕ (НАВОДОРАЖИВАНИЕ) ОБОЛОЧКИ

Отмечается недостаточное коррозионное сопротивление топливной оболочки на основе сплава типа циркаллоу - 4 (толщина окисной пленки может достигать 100 и более микрон). Указанный недостаток преодолевается использованием Duplex-оболочек (SIEMENS), разработкой и внедрением в качестве материала оболочки новых сплавов на основе циркония, ниобия, железа (SIEMENS, Westinghouse, Framatome; JAERI - Mitsubishi, Япония; АО "ТВЭЛ", Россия).

4.1.2. ВЫДЕЛЕНИЕ ИЗ МАТРИЦЫ ТОПЛИВА ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТОПЛИВА

Накопление газообразных продуктов деления - атомов Хе, Кг в матрице топлива происходит пропорционально выгоранию топлива. Доля выделяющихся под оболочку газов с ростом выгорания увеличивается за счет растрескивания структуры таблетки, образования пор во внешнем слое таблетки.

В исследовательском BWR реакторе Halden - центра были проведены испытания рефабрикованных и инструментированных датчиками ТВЭЛ. Исходные ТВЭЛ были предварительно облучены в коммерческом LWR до 59 МВт.сут/кг урана. Газовыделение оказалось меньше, чем ожидалось по ре-

зультатам экстраполяции данных, полученных для среднего выгорания (40 МВт.сут/кг урана).

Аналогичная тенденция была зафиксирована

для температуры центральной части таблетки, температура оказалась меньше прогнозируемой [12].

Согласно уточненным данным теплопроводность топлива ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$) составляет:

- при температуре 1000 К 2,8; 2,6 и 2,3 для выгорания 20, 40 и 60 МВт.сут/кг урана соответственно;
- при температуре 1500 К 2,3; 2,15 и 1,9 для выгорания 20, 40 и 60 МВт.сут/кг урана соответственно;
- при температуре 2000 К 2,15; 2,0 и 1,8 для выгорания 20, 40 и 60 МВт.сут/кг урана соответственно.

4.1.3. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВНЕШНЕЙ ЧАСТИ ТОПЛИВНОЙ ТАБЛЕТКИ (RIM- СЛОЙ)

RIM-слой образуется при глубоких выгораниях топлива. Хотя это явление интенсивно исследуется в течение последних 10 лет, причины, и следствия еще не полностью поняты. Четыре этапа этого явления были идентифицированы:

- прогрессивное исчезновение Хе;
- начальное зарождение пор от 0,5 до 1 мкм;
- разукрупнение зерна вокруг пор (размеры (0,1...0,2) мкм);
- общее разукрупнение зерна в зонах между порами (размеры (0,4...0,5) мкм);

Образующаяся пористость, очевидно, приводит к снижению теплопроводности, но не в такой мере, как ожидалось. Структура пористой периферийной зоны противостоит дальнейшему растрескиванию. Исследователи считают, что RIM-слой способен уменьшить местные напряжения в течение изменений (скачков) мощности. Получено экспериментальное доказательство идеи уменьшения механического взаимодействия топлива с оболочкой (PCMI) при высоком выгорании топлива за счет образования "рыхлого" RIM-слоя [13].

Анализируя данные исследований можно утверждать, что образование RIM-слоя не является препятствием для дальнейшего повышения выгорания топлива коммерческих реакторов.

4.1.4. ВЛИЯНИЕ ВЫГОРАНИЯ НА ПОВЕДЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВА ПРИ «РЕАКТИВНОСТНЫХ» АВАРИЯХ (RIA) И АВАРИЯХ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ (LOCA)

Исследование топлива при «реактивных» авариях получило дальнейшее развитие после аварии на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС в 1986 г.

Эксперименты со свежими модельными ТВЭЛ проводились на импульсных реакторах (70-е годы: SPERT и PBF - США, 80-90-е годы: CABRI - Франция, NSRR - Япония, ИГР - Россия-Казахстан (Семипалатинск-21), БИГР – Арзамас-16 - Россия), обеспечивающих режимы (регулируемых или нерегулируемых) самогасящихся нейтронных вспышек с

введением избыточной положительной реактивности от $1 \beta_{эф}$ до $4 \beta_{эф}$.

Полуширина импульса энерговыделения в экспериментах с топливом PWR составляла в большинстве случаев (10-20) мс и только в одном случае 64 мс.

Для топлива ВВЭР проведены эксперименты с короткими вспышками, полуширина импульса (2...10) мс (БИГР) и длинными вспышками, полуширина импульса - 700 мс (ИГР) [5].

После отработки методик и определения основных закономерностей проведено несколько дорогостоящих экспериментов с рефабрированными модельными ТВЭЛ, имеющих выгорание до 55...65 МВт.сут/кг урана.

Основным параметром определяющим сохранение первого - второго барьера безопасности матрица-оболочка при выбегах реактивности и мощности, является допустимая величина энтальпии (кал/г топлива).

Для необлученного топлива эта величина принимается:

- 280 кал/г - в США;
- 230 кал/г - Япония, Европа (200 кал/г –Франция);
- 230 кал/г - Россия, топливо ВВЭР.

Для топлива с глубоким выгоранием этот параметр еще требует уточнения, хотя некоторые страны (фирмы) уже оценили значение этого параметра, например SIEMENS:

100 кал/г - для ТВЭЛ с неокисленной оболочкой и локального гидрирования (оболочка с отсутствием коррозионного растрескивания);

60 кал/г - для ТВЭЛ, имеющего окисленную оболочку и локальное гидрирование [11].

Проведенные на реакторе БИГР эксперименты с рефабрированными ТВЭЛ ВВЭР-1000, имеющими выгорание 48 и 61 МВт.сут/кг урана при выделении энергии в диапазоне 144...189 кал/г, показали отсутствие разгерметизации оболочки.

Термофизическое поведение топливной оболочки с глубоким выгоранием оказалось аналогичным необлученному топливу.

Из-за наличия центрального отверстия и большей коррозионной стойкости топливной оболочки топливо ВВЭР более устойчиво к авариям с выбегом реактивности и мощности (оболочки топлива ВВЭР сохранили герметичность при энтальпии по крайней мере в 1,5-2 раза больше, чем для топлива PWR).

Для оболочки ВВЭР характерно раздутие и образование аксиальной трещины, для оболочки PWR разгерметизация оболочки происходит из-за взаимодействия с таблетками.

Хотя допустимая величина энтальпии для топлива PWR с высоким выгоранием как минимум в 2 раза меньше, чем для свежего топлива, не имеется веских однозначных оснований ограничивать выгорание топлива по этому критерию, поскольку, во-первых, должна быть сведена до минимума вероятность реактивной аварии. Во-вторых, из-за физических характеристик активной зоны сценарии с быстрым введением соответствующей положительной реактивности маловероятны.

Реакторы типа PWR и BWR, как правило, имеют отрицательные мощностный и температурный эффекты реактивности. Положительный пустотный эффект реактивности присущ реакторам типа РБМК и CANDU, в которых не используется глубокое выгорание топлива.

Согласно экспериментальным и расчетным данным поведение оболочки топлива с глубоким выгоранием при параметрах, соответствующих аварии с потерей теплоносителя (ЛОКА), существенно не отличается от поведения оболочки необлученного топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конкурентоспособность атомной энергетики (АЭС) в условиях возросших требований по безопасности, снижения радиационного воздействия на окружающую среду и надежности функционирования определяется в первую очередь снижением стоимости ядерного топливного цикла, сокращением сроков сооружения и степенью унификации эволюционных водоохлаждаемых реакторов.

Снижение стоимости топливного цикла обеспечивается путем увеличения выгорания топлива и соответственно снижением количества отработанного ядерного топлива (ОЯТ) на единицу выработанной Э/Э.

Успешная реализация Программ увеличения выгорания топлива ведущими фирмами производителями топлива, национальными и международными исследовательскими центрами позволяет говорить, что нет серьезных технических препятствий для лицензирования в ближайшем будущем топлива LWR с допустимым выгоранием (среднее по ТВС) 60... 65 МВт.сут/кг урана.

ЛИТЕРАТУРА

1. L.F. Van Svam et.al. BWR and PWR fuel performance at high burnup // *Proceedings of the 1997 ANS international topical meeting on LWR fuel performance*. Portland. Oregon. March 2-6. 1997. (published by American N.S., INS., La Grand Park, ILL 60526, USA). P.455-462.
2. R. Manzel, M. Coquerelle. Fission gas release and pellet structure at extended burnup // *Proceedings of the 1997 ANS international topical meeting on LWR fuel performance*. Portland. Oregon. March 2-6 1997. P.463-470.
3. D. Markov, A. Smirnov et.al. Validation of ВВЭР-1000 fuel rod efficiency at operation during for fuel cycles // *Third International seminar of WWER fuel performance, modeling and experimental support*. Pamporovo. Bulgaria. 4-8 October 1999.
4. A. Smirnov, B.Kanashov et.al. Examination of fission gas release and fuel structure of high burnup under transient condition // *Third International seminar of WWER fuel performance, modeling and experimental support*. Pamporovo. Bulgaria. 4-8 October 1999.
5. Yu. Bibilashvili, I. Smirnov, B. Smirnov, V. Asmolov et.al. Experimental and calculation research of WWER high burnup fuel rod behaviour in pulse test on the BIG // *Third International seminar of WWER fuel performance, modeling and experimental support*. Pamporovo. Bulgaria. 4-8 October 1999.
6. Ralph O. Meyer et.al. A regulatory assessment of test data for reactivity accident // *Proceedings of the 1997 ANS international topical meeting on LWR fuel performance*. Portland. Oregon. March 2-6 1997. P.729-740.
7. J. Banck Mechanical systems, components nuclear waste management, marketing & projects. Siemens. (KWU) // *Proceedings of a Symposium "Storage of spent fuel from power reactors"*. Vienna. 9-13 Nov. 1998. IAEA-TECDOC-1089. P. 207-213.
8. Ray Dodds. BNFL/UK. *Nuclear Fuel Activities, Evaluation of Option, Economics Summary*. The lecture. Paris – Saclay. 1994.
9. "Spent fuel reprocessing and return of nuclear materials in a fuel cycle". Presentation of Cogema at the fuel reprocessing plant construction problems meeting. *Russia*. Krasnoyarsk-26 (Zheleznogorsk). February 1996.
10. А. А. Афанасьев. Сравнение проблем и опыта эксплуатации активных зон с искривленными ТВС ВВЭР -1000 и PWR // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение"*. 1998, вып. 1 (73), 2 (68). с.68-86.
11. H. Gross et.al. (Siemens AG (KWU)). Technical and licensing challenges and their solution for high burnup // *IAEA Technical Committee Meeting on technical and economics limits to fuel burnup extension*. San Carlos de Bariloche. Argentina. 15-19 November 1999.
12. T. Tverbeg, W. Wiesenack (OECD Halden Reactor Project Norway). Fission gas release and temperature data from instrumented high burnup LWR fuel // *IAEA Technical Committee Meeting on technical and economics limits to fuel burnup extension*. San Carlos de Bariloche. Argentina. 15-19 November 1999.
13. Daniel Baron, Jose Spino (CEC Joint research Centre). Does rim microstructure formation degrade the fuel rod performance // *IAEA Technical Committee Meeting on technical and economics limits to fuel burnup extension*. San Carlos de Bariloche. Argentina. 15-19 November 1999.