

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТВС ИЗ ОСТАНОВЛЕННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ РБМК-1000 ДЛЯ ДОЖИГАНИЯ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭНЕРГОБЛОКАХ АЭС

Канашов Б.А., Кузьмин И.В., Костюченко А.Н., Перепелкин С.О., Чесанов В.В. (ООО НПФ «Сосны»)

ВВЕДЕНИЕ

Проектный срок эксплуатации энергоблоков РБМК-1000, составляющий 30 лет, уже закончился. Комплексный анализ состояния реакторов позволил продлить срок эксплуатации энергоблоков РБМК до 45 лет [1]. Дополнительный срок эксплуатации каждого реактора будет зависеть от его особенностей, однако можно предположить, что на отдельной АЭС реакторы будут выводиться из эксплуатации в том же порядке, в каком вводились (см. таблицу 1).

Таблица 1. График вывода из эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК с учетом продления сроков эксплуатации

АЭС	Блок 1	Блок 2	Блок 3	Блок 4
Ленинградская	2018	2020	2024	2026
Курская	2020	2023	2028	2030
Смоленская	2027	2030	2035	–

Характерной особенностью реакторов типа РБМК является непрерывная перегрузка топлива. В среднем за сутки одна выгоревшая ТВС заменяется на свежую. Иногда в реактор повторно загружаются облученные сборки, не достигшие проектной глубины выгорания. При этом в реакторе находятся сборки с различным выгоранием топлива. Распределение ТВС по выгоранию зависит от длительности предшествующего периода. Если в течение длительного времени в реактор загружалось топливо одного типа с примерно постоянной скоростью, то распределение ТВС в реакторе по выгоранию не меняется. В этом случае говорят о стационарном режиме перегрузки.

За время эксплуатации реакторов типа РБМК обогащение топлива подпитки поэтапно увеличивалось. В настоящее время энергоблоки с реакторами РБМК-1000 практически переведены на уран-эрибиевое топливо обогащением 2,8 % по урану-235 и содержанием эрбия 0,6 %. В частности, на начало 2014 года доля ТВС с топливом обогащением 2,8% составляла 96 % [2].

В остановленном реакторе РБМК-1000 будет находиться много ТВС с глубиной выгорания, значительно меньшей проектной. Это топливо можно использовать в других энергоблоках. Использование топлива остановленного энергоблока позволяет значительно сократить потребность в свежем. Специалистами РНЦ КИ выполнена технико-экономическая оценка эффективности дожигания топлива 1-го энергоблока Ленинградской АЭС в других энергоблоках станции. Показано, что наиболее экономичным с точки зрения капитальных затрат является дожигание ТВС из 1-го энергоблока в реакторе 3-го энергоблока, а из 2-го энергоблока – в реакторе 4-го энергоблока. Не исключаются варианты, когда топливо 1-го энергоблока будет использовано на 4-м блоке, а 2-го – на 3-м, т.е. дожигание на энергоблоках второй очереди.

На Игналинской АЭС в начале 2000-х годов был накоплен положительный опыт использования ТВС, выгруженных из реактора остановленного 1-го энергоблока и перевезенных на 2-ой энергоблок. Успешный опыт Игналинской АЭС, а также отечественный опыт дожигания ТВС в пределах энергоблока позволяют надеяться на то, что планируемая технология дожигания ТВС на российских АЭС с РБМК-1000 будет безопасной и даст значительный экономический эффект.

1. Особенности эксплуатации ТВС на энергоблоках с реакторами РБМК-1000

В среднем за год из каждого блока РБМК-1000 по выработке ресурса извлекают 389 отработавших ТВС (ОТВС). Назначенный ресурс ТВС РБМК-1000 с обогащением топлива 2,8 мас. % (0,6 % эрбия) составляет 3380 МВт сут./ТВС или 30 МВт сут./кгU. Для ТВС с профилированием обогащения по высоте твэлов указанные параметры составляют 4000 МВт сут./ТВС и 35,7 МВт сут./кгU, соответственно. Назначенный срок службы для всех типов ТВС при этом составляет 10 лет при условии продолжительности эксплуатации ТВС на мощности не более 8 лет.

Продолжительность эксплуатации ТВС на мощности (ПЭМ) определяется как:

$$ПЭМ = П_1 - П_2 - П_3,$$

где:

П₁ – календарное время с момента первой загрузки до окончательной выгрузки ТВС (назначенный срок службы), лет;

П₂ – суммарное время нахождения ТВС в бассейне выдержки, лет;

Π_3 – суммарное время нахождения ТВС в технологическом канале остановленного на ремонт реактора, лет.

На рисунке 1 А графически представлена структура назначенного срока службы ТВС РБМК-1000. Рисунок не учитывает время пребывания свежей ТВС на складе и на балконе ЦЗ до ее загрузки в АЗ. Предполагается, что это время меньше, чем 0,3 года.

В случае дожигания ТВС остановленного блока на действующем структура назначенного срока службы ТВС РБМК-1000 меняется (рисунок 1 Б). Назначенный срок службы ТВС при этом включает в себя, кроме указанных выше величин:

- ПЭМ-1 – продолжительность эксплуатации ТВС на мощности на блоке, предназначенном для останова;
- Π_4 – время обязательного расхолаживания ТВС в АЗ остановленного блока (минимум 1 год);
- Π_5 – время пребывания ТВС в АЗ остановленного блока в период выгрузки всего массива ТВС (от 0 до 4 лет);
- ПЭМ-2 – продолжительность эксплуатации ТВС на мощности на действующем блоке.

Время технологического хранения ($\Pi_4+\Pi_5$) ТВС, предназначенных для дожигания, в сумме не должно превышать 5 лет: за это время все ОЯТ, размещенное как в АЗ, так и в БВК, в соответствии с программой вывода остановленного энергоблока из эксплуатации должно быть полностью удалено с энергоблока.

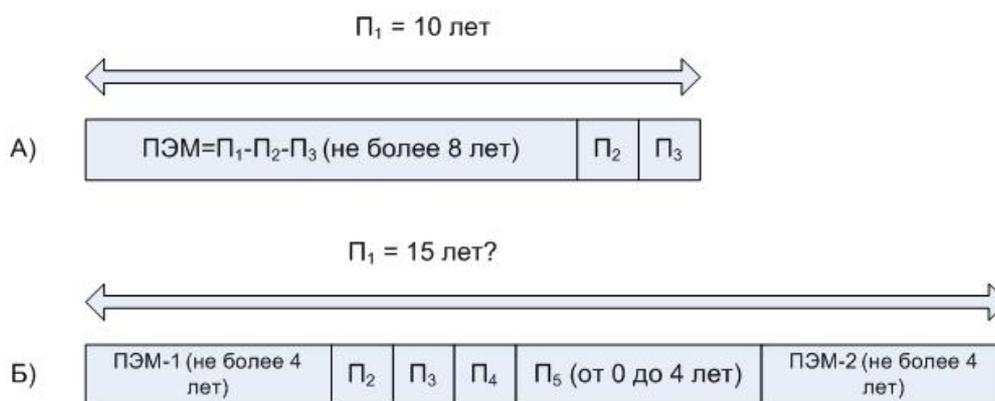


Рис. 1. Структура назначенного срока службы ТВС РБМК-1000 при эксплуатации по штатной схеме (А) и в режиме дожигания на действующем энергоблоке (Б)

Суммируя все интервалы времени и исходя из предположения, что последняя ТВС, извлеченная из реактора остановленного блока, должна полностью выработать проектный ресурс на действующем блоке, получаем, что назначенный срок службы ТВС РБМК-1000 должен составлять 15 лет. В любом случае, если в среднем ТВС будет находиться в реакторе остановленного блока 2,5 года, назначенный срок службы ТВС РБМК-1000 должен быть установлен не менее 13 лет.

2. Оценка количества ОТВС, пригодных для дожигания

Определим количество ТВС, пригодных для дожигания, на энергоблоках Ленинградской АЭС. В настоящее время в реакторах энергоблоков 1-4 в основном загружено топливо с обогащением 2,8 % по урану-235. Количество их по блокам 1-4 в 2014 году было равно 1597, 1449, 1591 и 1609, соответственно [1], что в сумме составляет 6246 ТВС. Предположим, что на момент останова в реакторе каждого блока будет находиться такое же количество ТВС. С учетом отбраковки по разным причинам будем считать, что доля ТВС, пригодных для дожигания на другом блоке, составляет 50 %, т.е. около 2320 ТВС (ТВС 4-го блока не смогут быть дожжены). С учетом того, что каждая «недожженная» ТВС может отработать на мощности в АЗ действующего энергоблока не более 4 лет (1100 эфф. сут.), имеем общий ресурс ~2550 тыс. ТВС*эфф.сут.

Дожигание ТВС с 1-го энергоблока можно начать, в лучшем случае, в начале 2020 года. Использовать 798 «недожженных» ТВС с 1-го энергоблока можно:

- на 2-ом блоке – 1 год (если 2-ой блок будет остановлен в конце 2020 года),
- на 3-ем блоке – 5 лет (если 3-й блок будет остановлен в конце 2024 года),
- на 4-ом блоке – 7 лет (если 4-ый блок будет остановлен в конце 2026 года).

Итого 13 реакторо-лет (или 3575 эфф. сут).

Аналогично, ТВС из остановленного в 2020 году 2-го энергоблока можно дожигать с начала 2022 года.

Имеем следующую возможность использовать 725 ТВС со 2-го энергоблока:

- на 3-ем блоке – 3 года (если 3-ий блок будет остановлен в конце 2024 года),
- на 4-ом блоке – 5 лет (если 4-ый блок будет остановлен в конце 2026 года).

Итого 7 реакторо-лет (или 1925 эфф. сут).

795 ТВС из остановленного в 2024 году 3-го энергоблока с начала 2026 года могут использоваться на 4-ом блоке в течение одного года (если он будет остановлен в конце 2026 года).

Итого 1 реакторо-год (или 275 эфф.сут).

Таким образом, потенциальные возможности 2, 3 и 4-го энергоблоков по дожиганию ТВС с остановленных энергоблоков – 3037,1 тыс. ТВС*эфф.сут. Если учесть, что при загрузке топлива в реактор на действующих блоках будут в равном количестве использоваться свежие и «недожженные» ТВС, то действующие блоки после останова 1-го энергоблока в 2018 году предоставят для дожигания только половину этого ресурса, т.е. 1518,5 тыс. ТВС*эфф. сут.

Сравнение с общим ресурсом «недожженных» ТВС (2550 тыс. ТВС*эфф. сут.) показывает, что количество «недожженных» ТВС примерно в 1,7 раза превышает возможности действующих энергоблоков по дожиганию этих ТВС.

Полученный результат означает, что не все «недожженные» ТВС могут быть использованы на действующих энергоблоках. С другой стороны, у руководства АЭС появляется свобода в принятии решения относительно использования «недожженных» ТВС на том или ином блоке.

3. Требования к состоянию ТВС, предназначенных для повторного использования

К дожиганию на действующих энергоблоках АЭС допускаются как ТВС рабочая (сб. 50), так и ТВС рабочая под гамма-камеру (сб. 49). С учетом результатов эксплуатации и послереакторных исследований предлагается не рассматривать ТВС с циркониевыми дистанционирующими решетками (ДР) в качестве кандидатов на дожигание. К дожиганию допускаются только ТВС с ДР из нержавеющей стали. Предлагается допустить для дожигания ТВС с исходным обогащением топлива 2,8 % и содержанием эрбия 0,6 % (черт. 865.00.000-16-17) и ТВС с обогащением, профилированным по высоте твэлов (черт. 871.00.000-01).

Как будет показано далее, дожиганию на действующих энергоблоках АЭС подлежат ТВС с выгоранием топлива не более 20 МВт·сут/kgU (2300 МВт·сут/ТВС) или с временем работы на мощности ~1100 эфф.сут. (~4 года). Предлагается допустить к дожиганию ТВС после выдержки в АЗ остановленного реактора или БВК в течение не менее одного года. К дожиганию допускаются ТВС с суммарным сроком службы не более 13 лет, в том числе 8 лет на мощности. Послереакторные исследования ОТВС РБМК-1000, хранившихся в условиях водной среды БВК в течение 24 лет, показали, что длительное водное хранение не является ограничивающим фактором для повторного использования ТВС.

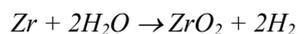
Состояние ТВС оценивается по результатам осмотра. Особое внимание уделяется состоянию ДР и оболочек твэлов; также важно отсутствие посторонних предметов в пространстве между твэлами. В процессе визуального осмотра устанавливается соответствие состояния ТВС образцам качества завода-изготовителя. По результатам осмотра ТВС считается непригодной для дожигания, если обнаружены следующие дефекты:

- видимые повреждения дистанционирующих решеток (задиры, разрывы, вмятины);
- смещение или отсутствие ДР;
- видимые вмятины или повреждения (в том числе, коррозионные) на поверхностях оболочек твэлов;
- отсутствие заглушки у твэла;
- наличие постороннего предмета в межтвэльном пространстве;
- величина осевого зазора между торцами верхнего и нижнего пучков твэлов (ПТ) менее 12 мм.

4. Состояние конструкционных материалов ТВС РБМК после эксплуатации по результатам послереакторных исследований

4.1. Коррозионная стойкость оболочек твэлов

В общем виде коррозия циркония в водных средах протекает по реакции:



Первоначально образующаяся оксидная пленка дефицитна по кислороду, то есть представляет собой соединение ZrO_{2-x} , где $x \approx 0,005$. Такая оксидная пленка обладает высокими защитными свойствами, хорошо сцеплена с металлической подложкой, компактна и имеет глянцевую темную окраску. Специфика коррозии циркония и его сплавов состоит в том, что по мере роста оксидной пленки, по ряду причин, может наступить момент достаточно резкого изменения ее качества и снижения защитных свойств. В этот период оксидная пленка теряет сплошность, в ней развивается система продольных и поперечных трещин, она разрыхляется и проявляет склонность к ее отслаиванию от металла. Оксидная пленка при этом достигает стехиометрического состава и приобретает отчетливо выраженную белую или светло-серую окраску. Описанные явления приводят к перелому в кинетике коррозии от параболической к линейной. Этот тип коррозии наблюдается на участках между ДР. В диапазоне времени эксплуатации 650–3100 эфф. сут. максимальная толщина оксидной пленки на участках между ДР описывается выражением [3]:

$$h = a \times (t - t_0) + b,$$

где t – время работы на мощности, эфф.сут.; $t_0=650$ эфф. сут; $a=0,112$ мкм/сут, $b=32$ мкм.

При выгорании топлива в твэле до 20 МВт сут/кгU (~1100 эфф. сут) максимальная толщина оксидной пленки на участках между ДР не превышает 100 мкм. При этом минимальная остаточная толщина металла составляет 900 мкм (рисунок 2).

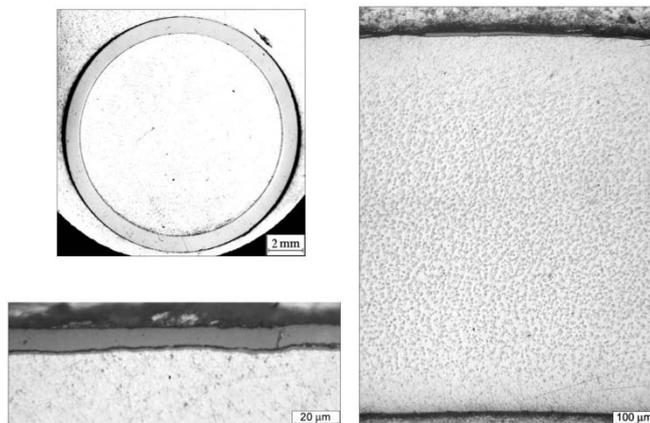


Рис. 2. Структура и состояние равномерной оксидной пленки на участке между ДР на поверхности твэлов РБМК с выгоранием топлива менее 20 МВт сут/кгU

Наряду со сплошной (равномерной) коррозией на оболочках могут наблюдаться специфические виды локальной коррозии. Так называемая нодулярная коррозия проявляется в виде образования на поверхности оболочек мелких отстоящих друг от друга участков белой оксидной пленки – нодулей со средним диаметром от долей миллиметра до нескольких миллиметров. С течением времени участки светлой оксидной пленки могут расширяться и сливаться в сплошную зону окисления с образованием толстой расслаивающейся оксидной пленки.

Результаты послереакторных исследований ОТВС РБМК-1000 после эксплуатации [3, 4, 5] показали, что наряду с общей равномерной коррозией наблюдается локальное окисление и фреттинг-износ оболочек твэлов под дистанционирующими решетками. В диапазоне времени эксплуатации 527–3100 эфф. сут максимальная толщина оксидной пленки на участках под ДР описывается выражением [3]:

$$h = c \times \sqrt{(t - t_0)},$$

где t – время работы на мощности, эфф. сут; $t_0=527$ эфф. сут, $c=10,9$ мкм/сут^{0,5}.

При выгорании топлива в твэле до 20 МВт сут/кгU (~1100 эфф. сут) максимальная толщина оксидной пленки на участках под ДР не превышает 300 мкм (рисунок 3). При этом минимальная остаточная толщина металла составляет 700 мкм.

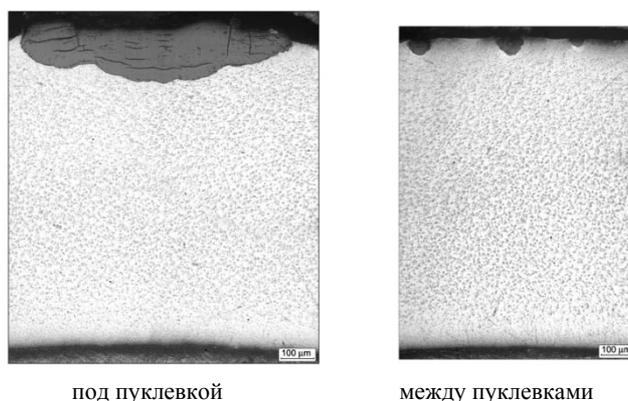


Рис. 3. Структура и состояние локальной (нодульной) оксидной пленки на участке под ДР на поверхности твэлов РБМК с выгоранием топлива менее 20 МВт сут/кгU

В процессе хранения ОТВС в условиях нейтральной воды БВК скорость общей равномерной коррозии оболочек между ДР невелика, а толщина окисной пленки на поверхности твэлов в зависимости от времени хранения описывается уравнением [6]:

$$h=0,9+0,19 \times Bu+0,12 \times \lg t,$$

где Bu – выгорание топлива, МВт сут/кгU.

После 5 лет технологического хранения дополнительная толщина окисной пленки на оболочках твэлов ОТВС с выгоранием 20 МВт сут/кгU не превышает 1 мкм. Этот вывод подтверждается результатами послереакторных исследований ОТВС, хранившейся в БВК в течение 24 лет [7].

Однако на участках с нодулярной коррозией и под ДР коррозия циркониевых оболочек протекает по другому механизму. Участки поверхности твэлов со следами нодулярной коррозии продолжают корродировать и в бассейне, поскольку не имеют защитной окисной пленки. Скорость коррозии на таких участках в ~45 раз интенсивнее, чем на участках с равномерной коррозией, а толщина окисной пленки в зависимости от времени хранения описывается уравнением [6]:

$$h=80+15 \times Bu+5,3 \times \lg t.$$

После 5 лет технологического хранения дополнительная толщина окисной пленки на участках твэлов с нодулярной коррозией и под ДР для ОТВС с выгоранием 20 МВт сут/кгU может достигать 100 мкм. Такие ОТВС нецелесообразно рассматривать в качестве кандидатов на повторное использование на действующих энергоблоках.

4.2. Фреттинг-износ оболочек твэлов

Результаты послереакторных исследований более 20 ОТВС РБМК-1000 с различным выгоранием топлива показывают, что случаи фреттинг-износа оболочек твэлов под стальными ДР носят единичный характер, а глубина фреттинг-износа оболочек для подавляющего большинства исследованных ОТВС не превышает 300 мкм.

Единственный случай, когда глубина фреттинг-износа оболочек достигала нескольких сотен микрон, а количество таких следов насчитывалось до нескольких десятков, наблюдался на ТВС, отработавшей до выгорания ~20 МВт·сут/кгU в течение 1290 эфф. сут [8], которая по результатам реакторного КГО была признана негерметичной и досрочно выгружена из АЗ. Послереакторные исследования показали, что причиной разгерметизации явилось debris-повреждение оболочки одного из твэлов верхнего пучка твэлов.



Рис. 4. Следы взаимодействия стальной ДР с оболочкой твэла РБМК с выгоранием топлива менее 20 МВт сут/кгU

4.3. Изменение механических свойств материала оболочек

При реакторном облучении циркониевых сплавов в процессе эксплуатации происходит увеличение их прочности и снижение пластичности. Результаты испытаний образцов оболочек из сплава Э110 облученных твэлов приведены на рисунке 5.

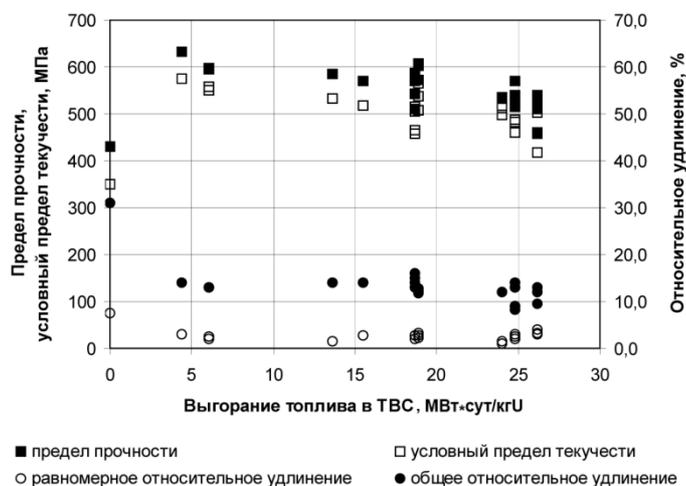


Рис. 5. Механические характеристики образцов оболочек твэлов РБМК-1000 из сплава Э110 при комнатной температуре [10]

При эксплуатации твэлов РБМК-1000 с оболочками из сплава Э110 до проектных выгораний:

- предел прочности увеличивается на 10–20 %;
- предел текучести увеличивается примерно в 1,5 раза;
- общее удлинение снижается в 3–6 раз;
- равномерное удлинение снижается в 3–7 раз.

Наводороживания материала оболочек не наблюдается: содержание водорода в оболочке герметичных твэлов находится в диапазоне $(0,8-1,5) \cdot 10^{-2}$ масс.

Что касается изменения свойств материала оболочек при длительном хранении, прочностные и структурные характеристики материала оболочек твэлов РБМК после хранения в воде в течение 15–20 лет практически не отличаются от соответствующих характеристик твэлов ОТВС, хранившихся в течение 2–3 лет.

4.4. Изменение механических свойств материала несущей и каркасной труб

При реакторном облучении циркониевых сплавов типа Э125 в процессе эксплуатации происходит увеличение их прочности и снижение пластичности. Результаты испытаний образцов облученных изделий из сплава Э125 приведены в таблице 2.

Таблица 2. Механические свойства кольцевых образцов каркасной трубы из сплава Э125 ОТВС РБМК-1000, отработавшей до выгорания 26,16 МВт·сут/кгU [9]

Т _{испытания} , °С	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_0 , %	δ_p , %
20, необл.	440-500	390-490	14,0-31,0	9,8-15,0
20	552-602	512-591	9,6-13,0	1,2-2,8
350	345-423	306-412	12-15	1,4-4,0

Результаты, изложенные в таблице, свидетельствуют о том, что материал каркасной трубы имеет достаточный запас прочности и пластичности для повторного использования ОТВС.

4.5. Изменение механических свойств материала ДР

Материал обода стальных ДР после эксплуатации до выгораний топлива 20 МВт·сут/кгU обладает удовлетворительной пластичностью, о чем свидетельствуют многократные исследования, а также внешний вид задиrow обода, образующихся при транспортных операциях с ОТВС.

Каких-либо заметных деформаций ячеек ДР, приводящих к изменению их конфигурации, в процессе послереакторных исследований не обнаружено. Пластичность материала ячеек стальных ДР остается на высоком уровне. В качестве показателя пластичности ячеек ДР используется предел упругих перемещений ($\Delta d_{упр}$), под которым имеется в виду максимальное увеличение диаметра ячейки без остаточной неупругой деформации при расширении ячейки ДР конусообразным инструментом. Значения $\Delta d_{упр}$ в большинстве случаев находились в интервале от 0,19 до 0,37 мм, т.е. ячейки стальных ДР деформируются упруго. Предел прочности материала ячеек ДР – в диапазоне от 680 до 900 МПа. Нагрузка отрыва ячеек в месте точечной сварки составляет от 1200 до 2000 Н, что сравнимо с нагрузкой отрыва в исходном состоянии.

5. Контроль геометрических параметров ТВС и топливного модуля в целом

Перед постановкой в АЗ действующего энергоблока топливного модуля (ТВС + подвеска) необходимо провести следующий контроль геометрических параметров ТВС:

- расстояние между торцами твэлов верхнего и нижнего ПТ должно быть не менее 12 мм;
- максимальный диаметр ободов дистанционирующих решеток не должен превышать 79 мм.

Контроль геометрических параметров соединения подвески с ТВС имеет целью проверку двух параметров:

- кривизны соединения подвески с ТВС: кривизна в месте стыка не должна превышать 0,6 мм на базе 300 мм. Проверку необходимо производить в трех плоскостях, расположенных под углом 120 градусов;
- соосности подвески с ТВС: допускается смещение подвески относительно оси ТВС на величину не более 0,4 мм.

Перед постановкой топливного модуля в АЗ действующего энергоблока производится контроль состояния подвески и качества соединения ТВС с подвеской. При этом контроль состояния сварного соединения ТВС сб. 50 с подвеской сб. 15 проводится методом визуального осмотра трех сварных точек с помощью лупы шестикратного увеличения. Контроль состояния сварного соединения ТВС сб.49 с подвеской

сб.16 проводится методами визуального осмотра сварного шва и околошовной зоны, гамма-контроля сварного шва и контроля сварного шва на гелиевую плотность.

К повторному использованию допускается топливный модуль, не имеющий каких-либо дефектов сварного шва и удовлетворяющий критериям герметичности.

По результатам контроля геометрических параметров ТВС составляется акт. Результаты измерений заносятся в «Паспорт на ОТВС».

Загрузка ТВС в реактор осуществляется на основании положительного заключения о герметичности твэлов и внешнего вида ТВС, отраженного в «Паспорте на ОТВС». Каждая из повторно загруженных ТВС в течение первых пяти суток подвергается ежесменному индивидуальному контролю с помощью системы поканального КГО для подтверждения ее работоспособности.

ВЫВОДЫ

На основе проведенного анализа количества пригодных для дожигаания ТВС остановленных энергоблоков РБМК-1000, их состояния, оцененного на основе результатов послереакторных исследований и сравнения этих данных с требованиями, которые предъявляются к ТВС, можно сделать следующие выводы:

- Исследования состояния ТВС, отработавших в АЗ остановленных энергоблоков до выгорания 20 МВт·сут/кгU (1100 эфф. сут), свидетельствуют об их существенных ресурсных возможностях с точки зрения повторного использования в АЗ действующих энергоблоков.
- Обращение с ТВС – кандидатами на повторное использование в АЗ действующих энергоблоков требует разработки и выполнения специальных требований на этапах извлечения из АЗ остановленного энергоблока, отбора на дожигание, отделения подвески, транспортирования, формирования топливного модуля и окончательного контроля состояния ТВС на действующем энергоблоке.
- Не менее 2000 ТВС с 1, 2, 3-го остановленных энергоблоков Ленинградской АЭС могут рассматриваться как кандидаты на повторное использование на 2, 3, 4-ом энергоблоках.
- Возможности 2, 3, 4-ого энергоблоков с учетом их сроков останова для вывода из эксплуатации таковы, что они могут принять только часть из указанного выше количества ТВС.
- Поскольку темпы приемки ТВС на действующих блоках для дожигаания меньше, чем темпы поставки «недожженных» ТВС с остановленных блоков, необходимо дополнительно организовать их временное технологическое хранение, которое может привести к превышению назначенного срока службы ТВС РБМК-1000, существующего в настоящее время (10 лет).
- Чтобы избежать частой замены ТВС по причине завершения назначенного срока службы, необходимо продлить этот срок до не менее 13 лет.
- Общее количество «недожженных» ТВС достаточно, чтобы проводить жесткую отбраковку, гарантирующую герметичность ТВС в процессе всего периода повторного использования.
- Транспортно-технологические операции не должны вносить изменения в состояние компонентов ТВС (в первую очередь, твэлов и дистанционирующих решеток).

Список литературы

1. Габараев Б.А., Черкашов Ю.М., Петров А.А. и др. Обоснование продления срока эксплуатации энергоблоков с РБМК. // Атомная энергия, 2006, т.100, вып.4. – С. 328–335.
2. Петров А.А., Черепнин Ю.С., Иванов А.А., Дмитриева И.А. Эксплуатация ТВС на энергоблоках РБМК-1000. // Девятая Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (МНТК-2014), Москва, 21–23 мая 2014 г.
3. А.Н. Костюченко, В.В. Чёсанов, Д.В. Марков, Е.А. Звир, Г.И. Маёршина. Окисление оболочек твэлов РБМК-1000 в процессе штатной эксплуатации. // Девятая российская конференция по реакторному материаловедению, Димитровград, 14–18 сентября 2009 г. – С. 664–669.
4. А.В. Сухих, Г.П. Кобылянский, Г.И. Маершина, Д.С. Неугодников. Состояние оболочек твэлов и дистанционирующих решеток ОТВС РБМК-1000 при проектных и повышенных выгораниях топлива. // Седьмая российская конференция по реакторному материаловедению, Димитровград, 8–12 сентября 2003 г. – С. 170–179.
5. Д.С. Неугодников, Д.В. Марков, Г.П. Кобылянский, Г.И. Маершина. Анализ результатов послереакторных исследований твэлов ОТВС РБМК-1000 с урановым и уран-эрбиевым топливом, достигших повышенного выгорания. // Восьмая российская конференция по реакторному материаловедению, Димитровград, 21–25 мая 2007 г.
6. Н.В. Размашкин, В.Г. Крицкий, И.Г. Березина. Проблемы длительного хранения отработавшего ядерного топлива. // Девятая российская конференция по реакторному материаловедению, Димитровград, 14–18 сентября 2009 г. – С. 478–485.

7. С.В. Павлов, В.Г. Крицкий, П.А. Ильин, Т.М. Шалагинова, Н.В. Размашкин. Материаловедческие проблемы длительного мокрого и сухого хранения ОЯТ ВВЭР и РБМК. // Девятая российская конференция по реакторному материаловедению, Дмитровград, 14–18 сентября 2009 г. – С. 455–477.
8. И.М. Воробей, Д.В. Марков, А.В. Смирнов, В.И. Кузьмин, Г.Д. Лядов, Л.Н. Ступина, А.Ю. Лещенко, Е.Г. Бек, В.В. Рябов. Коррозия оболочек твэлов РБМК-1000, отработавших в штатном режиме до выгораний 6,3–19,5 МВт·сут/кгU. // Шестая российская конференция по реакторному материаловедению. Дмитровград, 11-15 сентября 2000 г. – Т.2. – Ч.2. – С.177–185.
9. Г.П. Кобылянский, А.Е. Новоселов. Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе. Справочные материалы по реакторному материаловедению. / Под ред. В.А. Цыканова. – Дмитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996. – 176 с.
10. Д.В. Марков, С.В. Павлов, А.Е. Новосёлов, В.С. Поленок, В.А. Жителев, Е.А. Звир, В.В. Чёсанов, Г.П. Кобылянский. Топливо ВВЭР и РБМК нового поколения: результаты послереакторных исследований, обоснование надёжности и работоспособности. // Девятая российская конференция по реакторному материаловедению, Дмитровград, 14–18 сентября 2009 г. – С. 24–45.