

На правах рукописи

ВАСИЛЬЧЕНКО
Иван Никитович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ
НА ДЕФОРМАЦИЮ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ ВВЭР-1000
И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ С УЛУЧШЕННОЙ
ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ**

Специальность: 05.14.03- Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ – 2007

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии "Опытное конструкторское бюро "Гидропресс", г. Подольск, Московской обл.

Научный руководитель:

– доктор техн. наук, член-корр. РАН *Драгунов Юрий Григорьевич*

Официальные оппоненты:

– доктор техн. наук, профессор *Тутнов Александр Александрович*

– канд. техн. наук *Орлов Валерий Иванович*

Ведущая организация: *ФГУП "Государственный научный центр Российской Федерации Научно-исследовательский институт атомных реакторов"*
(Дмитровград, Ульяновская обл.).

Защита диссертации состоится 24 апреля 2007 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
в аудитории 507 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан "23" марта 2007 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812)5521630

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь

диссертационного совета

К.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Атомные реакторы ВВЭР-1000 в настоящее время являются наиболее конкурентоспособными в атомной энергетике России. Это обусловлено не только совокупностью прогрессивных исходных конструкторских решений, но и убедительным опытом эксплуатации.

Технические и экономические показатели работы блоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000 (так же как и с другими типами реакторов) значительно зависят от надежности и экономичности работы активных зон.

Специфика и трудность проектирования активных зон заключается в учете большого количества эксплуатационных факторов, в чувствительности конструкции к воздействию этих факторов.

С начала эксплуатации реакторов, когда использовалась нержавеющая сталь для конструкционных материалов тепловыделяющих сборок (ТВС), принципиально не удавалось достичь хороших показателей топливоиспользования.

Последовавшая замена конструкционного материала на циркониевые сплавы в сочетании с увеличенными кампаниями выявила несколько серьезных проблем в эксплуатации активных зон, связанных с надежностью срабатывания аварийной защиты и образованием увеличенных зазоров между ТВС вследствие их искривления.

Устранению этих проблем и созданию конструкции активных зон, которые не лимитировали бы физические возможности уранового топлива разрешенного обогащения, и посвящена данная работа.

Цель работы.

1. Исследование влияния конструкционных и эксплуатационных факторов на работу активной зоны.
2. Разработка методов экспериментальных исследований и создание основ для разработки расчетных кодов, описывающих поведение отдельных ТВС и активной зоны в целом.
3. Разработка на основе выполненных исследований конструкторских решений и рекомендаций по проектированию активных зон ВВЭР на базе бесчехловых ТВС с экспериментальной проверкой макетов и опытных образцов.

Научная новизна

1. Установлены коренная и сопутствующие причины, вызывающие деформации ТВС в активной зоне и замедление срабатывания аварийной защиты как для ВВЭР, так и для PWR.
2. Выявлены и исследованы закономерности поведения конструкционных элементов в области параметров, определяющих стабильность конструкции в проектных пределах, таких как пружины, направляющие каналы (НК), дистанционирующие решетки (ДР) и ее элементы, пучок твэл и ТВС в целом.
3. Разработана и реализована методология дореакторных и реакторных экспериментов, всесторонне обосновывающих ресурс ТВС.
4. Обоснована безопасность и надежность активных зон с новыми ТВС.

Практическая ценность

1. Усовершенствован проект предшествующей модификации конструкции ТВС и внедрен в эксплуатацию.
2. Разработана конструкция усовершенствованной активной зоны на базе ТВС-2. Конструкция внедрена в производство и эксплуатацию на 5-ти блоках АЭС.

Основные положения, выносимые на защиту

Результаты анализа влияния конструкционных и эксплуатационных факторов на ресурс ТВС.

Результаты работ по обоснованию выполнения критериев проектирования активных зон в части обеспечения надежности аварийной защиты и охлаждения активной зоны при повышенных межкассетных зазорах.

Результаты исследования закономерностей поведения конструкционных элементов.

Результаты внедрения методологии проектирования на примере ТВС-2.

Степень обоснованности научных положений. Научные положения обоснованы комплексом поверочных стендовых испытаний в ОКБ «Гидропресс» и результатами проверки конструкции по программам опытно-промышленной эксплуатации в реакторах Балаковской АЭС.

Личный вклад автора заключается в: разработке базового проекта активной зоны ВВЭР-1000; руководстве работами по созданию дальнейших модификаций, включая ТВС-2 и ТВС-2М; разработке технических заданий на расчеты и эксперименты, в обсуждении программ и методик экспериментов, результатов расчетов и экспериментов, в принятии решений по внедрению этих результатов в конструкцию.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научно-техническом совете № 4 Минатома России 09.07.2002 и заседании секции № 1 НТС № 4 Росатома России 31.08.2005; научно-технических конференциях ОАО «ТВЭЛ» (2002, 2003); научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (2003); на международных научно-технических конференциях по топливу в Албене, Болгария (2003, 2005); техническом комитете в Кадараше, Франция (2004).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 патентов, 9 статей и докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 74 наименований; содержит 105 страниц текста, в том числе 62 рисунка и 13 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана специфика решения поставленной задачи, общий подход к работе, к содержанию диссертации.

В главе 1 приводятся характеристики активной зоны базового проекта реактора ВВЭР-1000 для двухгодичной кампании в нержавеющей варианте исполнения НК и ДР ТВС. Характерными являются: низкий уровень выгорания топлива ($28 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кгU}$) и, соответственно, высокий удельный расход природного урана ($0,295 \text{ кг/МВт}\cdot\text{сут}$).

Особенности этого проекта, которые отличают его от зарубежных, в частности, заключаются в более компактном размещении поглотителей по пучку твэл; в повышенном усилии зажатия в реакторе, вызванном большой скоростью теплоносителя; в относительно небольшом весе регулирующего органа. В варианте двухгодичной кампании эти особенности никак не проявляли себя, но уже при переходе на 3-х годовичную кампанию, когда после перегрузки в реакторе присутствует $1/3$ часть (а не $1/2$) "свежих" кассет, проявились искривления ТВС.

Результаты эксплуатации 2-х и начала 3-х летнего топливного цикла демонстрировали низкую повреждаемость твэл. Средняя активность теплоносителя по всем блокам существенно уменьшилась к 1991 году и не превышала $5\cdot 10^{-5} \text{ Ки/кг}$ по йоду. На основе этих результатов осуществлялся перевод на 3-х летнюю кампанию.

После перевода активных зон на 3-х годовичную кампанию, достижения выгорания более $30 \text{ МВт}\cdot\text{сут/кгU}$ были отмечены случаи нештатного срабатывания аварийной защиты (АЗ). Они заключались в превышении проектного времени ввода регулирующих стержней, а в некоторых случаях наблюдался недоход стержней до конечного положения.

Также были установлены случаи нештатного ввода стержней в активную зону на западных реакторах. Таким образом проблема оказалась системной, связанной с увеличением срока эксплуатации ТВС в реакторах.

Анализ безопасности по обобщенным аномалиям, которые провели российские и зарубежные специалисты для определяющих аварий, показал наличие запасов безопасности реакторных установок с точки зрения обеспечения эффективности аварийной защиты, однако это не означало, что надо идти по пути использования этих запасов и встала задача по доведению режима АЗ до проектного сценария.

С этой целью были приняты первоочередные компенсирующие меры, направленные на исключение застревания органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ). К ним относятся следующие:

1. Снижение осевого усилия на кассеты за счет внедрения "мягкой" головки, а в дальнейшем и переход на циркониевые НК, обеспечивающие сниженные усилия за счет отличий температурного расширения стальных внутрикорпусных устройств (ВКУ) и циркониевых каналов кассеты.

Эта конструктивная мера стала четвертым компенсирующим мероприятием для обеспечения проектного срабатывания АЗ.

К компенсирующим мерам можно отнести также установку под ОР СУЗ кассет только первого и второго года эксплуатации. Эту меру широко применяли на АЭС при выборе загрузок.

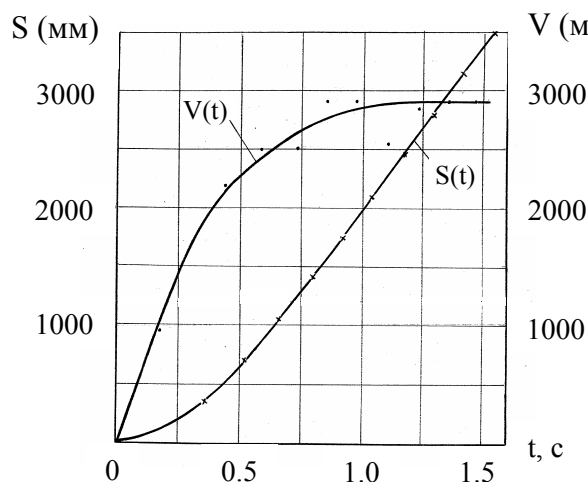


Рис. 2. Зависимость пути S и скорости V во времени, полученные при сбросе серийного ПС СУЗ с утяжеленной штангой и серийной кассетой при перепаде давления на кассете $\Delta P = 1,45 \text{ кгс/см}^2$

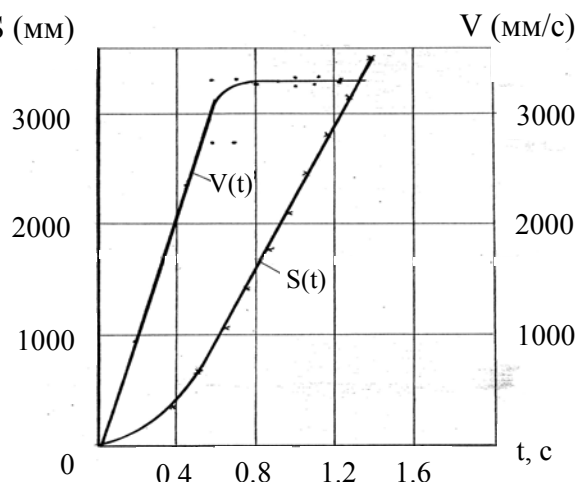


Рис. 3. Зависимость пути S и скорости V во времени, полученные при сбросе утяжеленного ОР СУЗ во время ресурсных испытаний привода с усовершенствованной кассетой при $\Delta P_{\text{кас}} = 1,45 \text{ кгс/см}^2$

Аналогичный подход применялся на АЭС Ringhals. Там был установлен критерий по выгоранию: под ОР СУЗ устанавливаются кассеты с выгоранием не более 30 МВт сут/кг U.

Побочным, но важным эффектом искривления ТВС явилось появление увеличенных полостей в активной зоне.

Повышенные зазоры приводят к локальным всплескам энерговыделения на периферийных ТВЭлах. Для измерения кривизны кассет непосредственно в реакторе разработаны специальные датчики гравитационного типа.

Измерение кривизны кассет в реакторе явилось беспрецедентной практикой. Ввиду ее сложности, зависимости результатов от большого количества параметров ее нельзя рекомендовать для единичных измерений, однако большое количество измерений дает статистический результат, подтверждающий состояние активной зоны, определенное по таким процедурам, как измерение времени падения стержней, усилия их перемещения, усилие загрузки-выгрузки кассет.

По полученным векторам кривизны и их направлениям определяется результирующая кривизна оси ТВС – годограф. Из геометрических сопоставлений вычисляются все зазоры, имеющие место в активной зоне.

В общей сложности на блоках с ВВЭР-1000 выполнено более трех тысяч измерений кривизны НК.

По результатам измерений определены гистограммы межкассетных зазоров в активной зоне при работе реактора на мощности.

Учет всплесков энерговыделения осуществляется по штатной методике путем введения увеличенного инженерного коэффициента.

На основании анализа сложившейся ситуации на блоках и эффективности первоочередных мер в конструкцию ТВС были внесены соответствующие изменения: НК выполнены из сплава Э-635 (вместо Э-110) с увеличенным наружным диаметром с 12,6 мм до 13,0 мм, толщина стенки увеличена с 0,8 мм до 1,0 мм; уменьшены дроссельные отверстия; конструкция головки, включая изменение материала пружин на ХН77ТЮР с обеспечением мягкой характеристики нагружения; новая конструкция ПЭЛ с композитным поглотителем (в верхней части карбид бора, в нижней-титанат диспрозия) и другие менее значительные изменения.

В главе 2 приведен анализ влияния эксплуатационных факторов на деформацию ТВС. Эти факторы делятся на внутренние и внешние. К внутренним факторам относятся конструктивная схема ТВС.

В процессе эволюции конструкции ТВС ВВЭР-1000 имели место три схемы взаимодействия элементов пучка твэл с точки зрения компенсации различий термомеханических изменений элементов ТВС.

В первой схеме твэлы и каналы свободно проходят через ДР. Фиксация решеток осуществляется только на центральной трубе.

В этой схеме предполагалось, что пучок твэл оказывает существенное подкрепляющее влияние на каналы через ДР.

Вторая схема отличается от первой наличием упорных втулок на каналах, которые позволяют перемещаться пучку твэл вместе с решетками примерно первые два года, когда обеспечен натяг твэл в решетках. В дальнейшем, при ослаблении натяга втулки препятствуют перемещению решеток.

В третьей схеме решетки жестко крепятся к каналам кассеты. В отличие от первых двух, где каналы свободно проходили через решетки, в этой схеме обрзован жесткий каркас. Испытания показали, что такой каркас в состоянии противостоять коллективному воздействию твэл при температурных и радиационных изменениях.

Таким образом, исходная жесткость кассет при переходе от нержавеющей стали к циркониевым уменьшилась, а при переходе к сварному каркасу увеличилась. Однако жесткость в процессе эксплуатации для последнего варианта исполнения, несмотря на ослабление натяга твэл в решетках, изменяется незначительно из-за наличия постоянной составляющей-каркаса.

Получена база данных по изгибной жесткости ТВС различного исполнения, полученная при испытаниях и подтверждающая приведенный анализ.

К внутренним факторам также можно отнести радиационный рост и радиационную ползучесть.

Подавляющее большинство данных по количественным оценкам радиационного роста и радиационной ползучести относятся к оболочкам ТВЭЛ.

Характер и количественная зависимость радиационного роста от флюенса, а также радиационной ползучести, соответственно, от флюенса и напряжения для сплавов Э-110 и Э-635 хорошо изучены.

Если рассчитать по этим данным радиационный рост ТВЭЛ и НК, то получаются значения, которые для ТВЭЛ являются заниженными, а для НК завышенными. Это объясняется, соответственно, вкладом процесса взаимодействия топлива и оболочки в удлинение ТВЭЛ и тормозящим воздействием терморadiационной ползучести для НК.

Из литературных данных для PWR следует, что измеренное значение удлинения ТВС после 4-х циклов облучения около 0,3 %, что составляет примерно 15 мм для ТВС сопоставимой длины с ТВС ВВЭР, в то время как удлинение ТВЭЛ составляет около 1 %, т.е. в 3 раза выше. Сравнение графиков радиационного роста ТВЭЛ ВВЭР и PWR показывает, что, несмотря на отличающийся характер зависимостей, имеется совпадение в области высоких выгораний.

Из сопоставления указанных данных и данных по циркулою следуют важные для проектирования ТВС выводы.

Первый заключается в том, что сплав Э635, примененный для НК, обладает существенно большей стабильностью по отношению к другим сплавам (включая циркулой) как с точки зрения радиационного роста, так и с точки зрения радиационной ползучести в сопоставимых условиях эксплуатации.

Второй вывод заключается в том, что, несмотря на относительно высокий темп радиационного роста сплава Э-110, радиационный рост ТВЭЛ ВВЭР меньше, чем в PWR с циркулом. По-видимому, это объясняется конструкцией ТВЭЛ в целом (величина зазора топливо-оболочка для PWR меньше), а также режимами эксплуатации.

Третий вывод заключается в том, что удлинение ТВС ВВЭР существенно меньше, чем PWR. По-видимому, это связано с более высоким усилием зажатия ТВС в ВВЭР, в случае НК из Э-110 большей радиационной ползучестью (отрицательное удлинение), а в случае НК из Э-635 стабильностью сплава при облучении.

Общая схема влияния радиационного роста ТВЭЛ на термомеханику ТВС заключается в том, что имеет место неравномерность его по сечению ТВС. Это подтверждается тем фактом, что наибольшие искривления кассеты имели место в 2-4 ряду от периферии активной зоны, где наряду с большими абсолютными значениями нейтронные потоки имеют большие градиенты, что предопределяет направление и величину прогибов (см. рис. 4).

Существенное влияние на формоизменение кассет оказывают ползучесть оболочек ТВЭЛ от внешнего воздействия теплоносителя, а также исходное усилие снаряжения пучка (натяг ТВЭЛ в ДР).

Эти два фактора объединены, т.к. увеличение выгорания сопровождается ослаблением натяга ТВЭЛ в ячейке. Этот фактор действует намного эффективнее, чем изменение свойств материалов в процессе облучения.

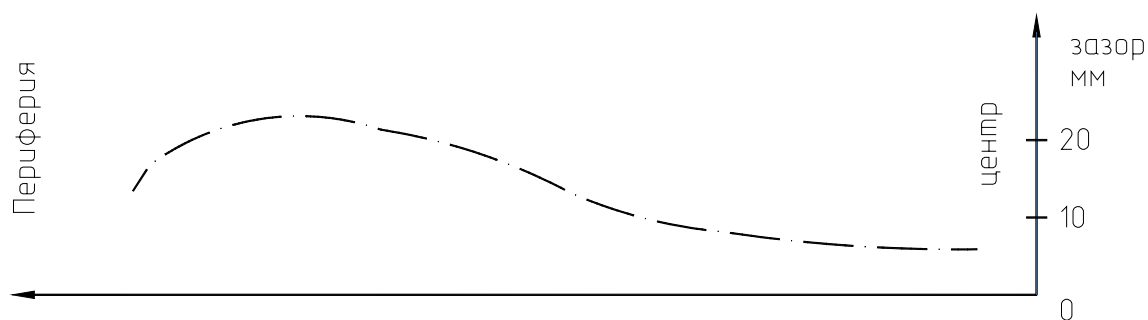


Рис. 4. Распределение максимальных межкассетных зазоров по радиусу активной зоны

На основе данных, полученных в процессе эксплуатации, анализе результатов по сдвигке ДР в УТВС, которые имели место при эксплуатации, установлена граница по выгоранию 27-30 МВт·сут/кгU, до которой суммарное трение твэлов в ДР удерживает ДР в исходном положении. В дальнейшем сопротивление ТВС падает.

В общем виде можно перечислить следующие факторы, влияющие на результаты: усилие снаряжения пучка ТВС; материал ДР и НК; схема работы пучка (наличие жесткого каркаса или его отсутствие); расположение ДР; геометрия ДР; конструкция соединения пучка с головкой.

Из совокупности данных по изгибной жесткости кассет можно выбрать некоторые группы, которые дадут качественные параметрические зависимости изгибной жесткости. Например, выберем результаты для трех групп кассет, отличающиеся указанным конструктивным исполнением.

На рис. 5 все результаты соответствуют одинаковым условиям испытаний: при 20°C; без предварительного поджатия; поперечное усилие прикладывается к 8-ой ДР.

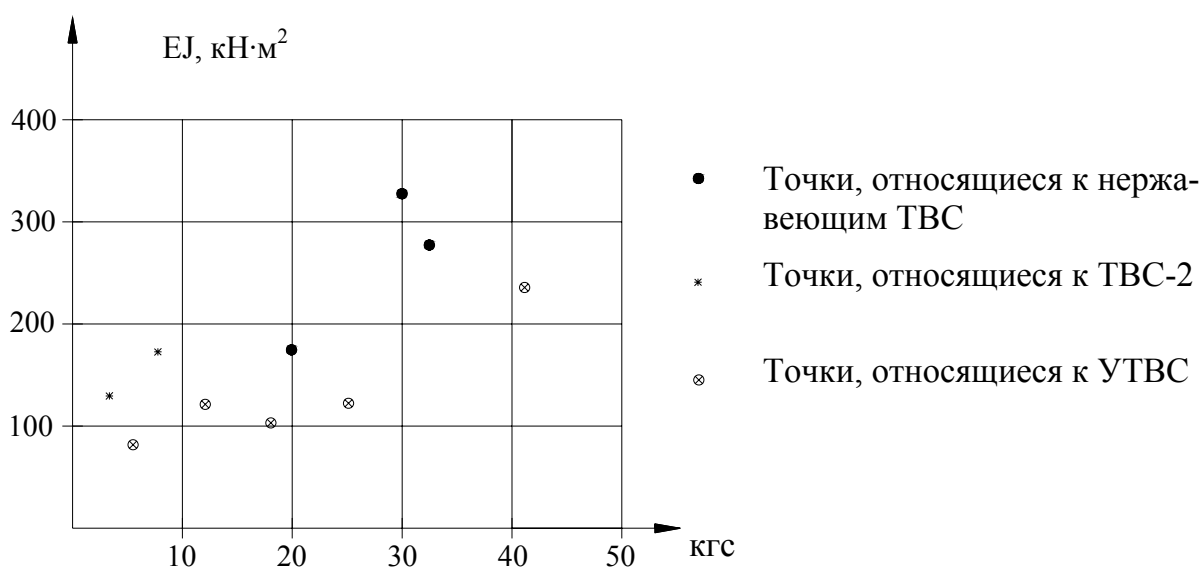


Рис. 5. Зависимость изгибной жесткости кассет от усилия снаряжения пучка

Из рисунка видно, что, во-первых, повышение усилия снаряжения приводит к увеличению исходной изгибной жесткости, во-вторых, при равных усилиях снаряжения у нержавеющей ТВС и ТВС-2 изгибная жесткость выше.

Если проэкстраполировать значения изгибной жесткости до нулевых усилий снаряжения, получим величину порядка 60–70 кН·м². Это примерно соответствует значению изгибной жесткости, полученному прямым измерением на макете УТВС, в котором искусственно были раздорнованы ячейки до получения люфтов твэл. Этот результат также подтверждается измерениями изгибной жесткости УТВС, отработавшей 3 года в реакторе, проведенными в горячей камере ГНЦ НИИАР.

Таким образом, можно сказать, что испытания макетов собранных по штатной технологии являются далеко не консервативными. Для моделирования состояния кассеты при повышенных выгораниях необходимо исключать натяг твэл в ячейках. При этом, конкретное значение люфтов от нуля и выше, по-видимому, мало сказывается и не уменьшает изгибную жесткость ниже предельной, указанной выше.

Большая осевая сила является коренной причиной искривления кассет. В случае жесткого соприкосновения витков пружин происходит быстрая потеря устойчивости при установке БЗТ на активную зону и при уплотнении реактора от дополнительного зажатия БЗТ. При наличии запаса хода пружин перенагрузка вызывает постепенное формоизменение ТВС.

Прямое измерение критической силы для кассет сопряжено с опасностью существенного повреждения. Поэтому, как правило, они не доводятся до такого состояния с целью обеспечения возможности получения максимального объема информации с одной ТВС. Однако несколько кассет типа УТВС (Н7671, 00700002, 0001Б) доведены до потери устойчивости при осевой силе более 35 кН.

Характерной картиной диаграммы поперечного нагружения ТВС является гистерезис, из которого, в частности, виден невозврат кассеты при снятии прямой и обратной поперечной нагрузки, приложенной к ДР вследствие проскальзывания твэл в ДР. При этом, чем выше нагрузка, тем шире петля гистерезиса. При осевой силе в 1 тс (номинальная проектная и фактическая нагрузка) обеспечивается проектный ресурс для 4-х годичного цикла эксплуатации в базовом режиме. В случае осевой критической нагрузки имеет место катастрофическое изменение формы ТВС.

Ограничение пространства для деформирования кассеты дает большее значение критической силы.

При проведении испытаний двух макетов с первоначальным изгибом, соответствующим зазору 2 и 9 мм получено соответствующее уменьшение критической силы в 1,25 раз.

Влияние плотности упаковки активной зоны на возможности формоизменения можно оценить также компьютерным моделированием геометрии активной зоны. Увеличение размера «под ключ» на 1 мм, как было принято в даль-

нейшем, уже само по себе дает существенное снижение максимального меж-кассетного зазора.

По результатам данных анализов размер «под ключ» кассет увеличен на 1 мм. Эффективность мер по снижению осевой нагрузки и увеличению размера «под ключ» продемонстрировал положительный опыт эксплуатации 1-го блока Волгодонской АЭС, где успешно эксплуатируются УТВС в пределах выгорания 50 Мвт сут/кг урана.

Одним из важнейших факторов, влияющих на формоизменение ТВС, также являются циклические нагрузки, связанные с изменением температуры элементов ТВС, которая, в свою очередь, зависит от изменений мощности. Причем процессы изменений мощности реализуются двух типов: медленные изменения, связанные с выгоранием топлива и относительно быстрые изменения, связанные с набором мощности, регулированием и ксенонными процессами.

Результаты испытаний различных кассет на циклические температурные нагрузки показывают, что кассета, содержащая жесткий каркас за счет приварки ДР к НК, существенно более устойчива к воздействию этих нагрузок.

Максимальный накопленный прогиб за 15 циклов серии испытаний составил 0,77 мм, с дальнейшим снижением темпа деформации. То есть, имеет место «насыщение» прогиба, что важно для маневренного режима работы активной зоны.

С самого начала проектирования реакторов ВВЭР и активных зон была принята и реализована конструкция узла установки кассет в шахту типа «шар по конусу».

Проверка на первом блоке Волгодонской АЭС показала наличие большого количества неправильно ориентированных стаканов, которые были доработаны для обеспечения возможности строго вертикальной ориентации кассеты. Это мероприятие в совокупности с другими, такими как более плотная упаковка активной зоны, оптимизированное усилие зажатия, дало положительные результаты, и кассеты типа УТВС отработали 5 топливных циклов без замечаний и активная зона вошла в режим стационарных перегрузок.

Существенное влияние на обеспечение геометрической стабильности кассет оказывает количество решеток и их размеры.

Начиная от конструкции первой кассеты для реактора 5 блока НВАЭС, пучок ТВЭЛ кассеты ВВЭР-1000 содержал 15 ДР. Это количество было выбрано на основании опыта эксплуатации топлива ВВЭР-440 с учетом данных по кризису теплообмена (формула для определения критических тепловых потоков работает в области теплогидравлических и геометрических параметров, среди которых есть и диапазон изменения шага решеток в пучке).

На стадии выбора основных параметров новой конструкции тщательному и всестороннему анализу и обсуждению был подвергнут вопрос о влиянии количества и параметров ДР на жесткость ТВС. Для выбора этих параметров были проведены следующие основные работы в ОАО НЗХК, ГНЦ ФЭИ и ОКБ "Гидропресс".

1. Исследования, связанные со смещениями ДР на УТВС.
2. Исследования по влиянию увеличенного шага расположения ДР на кризис теплообмена.

3. Расчетные параметрические исследования влияния количества и параметров ДР на прогиб кассет.

4. Экспериментальные исследования влияния параметров ДР на жесткость и работоспособность ТВС в целом.

(Результаты работ по п.п. 1 и 2 не приводятся, т.к. они имеют самостоятельное значение и не оказали влияния на вопрос выбора количества и размеров ДР ТВС-2. Результаты работ по п. 4 будут приведены далее).

Результаты расчетов по п.3, проведенные в ФЭИ, содержат прямые рекомендации для конструирования новой ТВС и позволили ограничить количество вариантов для дальнейшего рассмотрения и проведения серии экспериментов. Для ТВС-2 выбрано 12 ДР.

В главе 3 приводятся результаты экспериментального и расчетного подтверждения выбранных основных конструктивных параметров ТВС-2.

Если жесткость нержавеющей кассеты проверялась практически одним видом нагружения – осевой силой, то по мере совершенствования конструкции расширялась и программа экспериментального обоснования. Кроме поверочных экспериментов на полномасштабных образцах, при разработке проекта ТВС-2 проведены следующие эксперименты на отдельных фрагментах ТВС:

определение усилий протягивания твэл в ячейках ДР в воздухе и в воде (с целью получения исходных данных в термомеханических расчетах);

определение усилий продавливания НК (отрыва) через ДР (для использования в расчетах прочности);

определение характеристики поворота имитатора НК в ДР, заполненной имитаторами твэл (используется в программе термомеханического расчета);

определение характеристики поворота имитатора твэла в ДР, заполненной имитаторами твэл (используется в программе термомеханического расчета);

определение изгибной жесткости укороченного макета каркаса и пучка твэл (два пролета) в поперечном направлении (для тестирования программы);

проталкивание пучка имитаторов твэла через ДР в укороченном макете ТВС с имитацией изгиба пучка (с целью доказательства незакусывания твэл в ДР);

продавливание 18 НК через ДР (для изучения процесса деформации ДР);

механические испытания на сжатие ДР (для получения исходных данных в сейсмических расчетах).

Консервативный эксперимент по проталкиванию пучка твэл через ДР, вошел в практику проектирования других типов ТВС. Положительный результат этого эксперимента заключается в том, что при проталкивании пучка должна отсутствовать деформация ДР.

Проведены статические испытания каркаса и двух полномасштабных макетов ТВС-2. Макеты отличались между собой натягами в узлах «ячейка ЦДР - твэл» (прослабленные – у макета № 1, штатные – у макета № 2). Макет № 1

имитирует выгоревшее состояние ТВС-2 с прослабленными натягами твэлов в ЦДР.

На рис. 6 наложены диаграммы поперечного перемещения сечения в районе ДР 8 каркаса макета № 1 и макета № 2 в сопоставимых условиях (без поджатия, при температуре 20 °С), а также макета УТВС.

Этот рисунок показывает, насколько более упруго деформируется ТВС-2 по сравнению с УТВС. (Петля гистерезиса намного уже).

Для размаха перемещений ДР7 ± 10 мм выполнены расчетно-экспериментальные оценки изгибной жесткости каркаса и макетов при 20 °С.

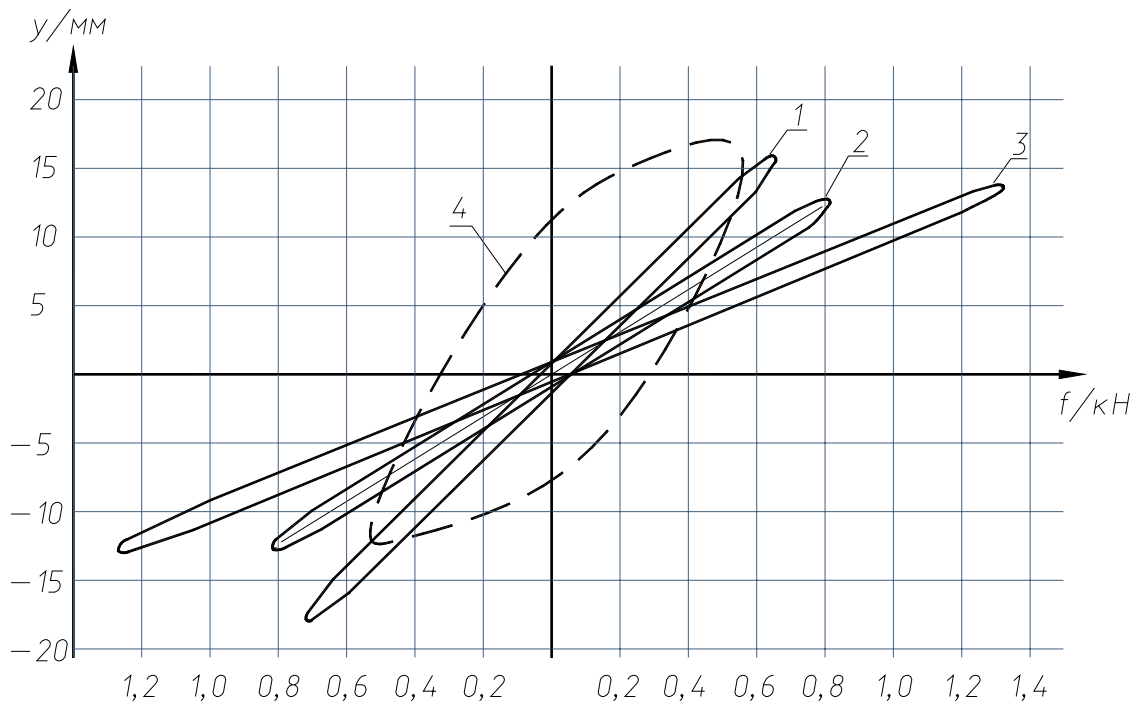


Рис. 6. Зависимость поперечного перемещения сечений каркаса (1) и макетов ТВС-2(2,3), а также макета УТВС (4)

Установлено, что:

- преобладающим механизмом деформирования макетов ТВС-2 при поперечном изгибе является упругое деформирование;
- факторами, влияющими на механические характеристики макетов и каркаса, являются продольное поджатие и температура. При продольном поджатии происходит увеличение изгибной жесткости каркаса и макетов на величину от 2,5 до 18 %. При температуре 320 °С происходит снижение жесткости каркаса и макета № 2 на величину от 15 до 24 %;
- сварной каркас ТВС-2 вносит существенный вклад в характеристики сопротивления поперечному изгибу;
- величина натяга в узлах «ячейка ЦДР – твэл» оказывает заметное влияние на характеристики сопротивления изгибу. Изгибная жесткость макета № 2, имеющего штатные натяги, выше изгибной жесткости макета № 1, прослабленного по твэлам, на 64 % без поджатия и на 61 % при поджатии 9 мм;

На базе полученных данных по механическим испытаниям кассет и их фрагментов, результатов измерений в реакторах разработаны и верифицированы расчетные коды для обоснования термомеханической стабильности активных зон с ТВС-2. К ним относятся РАНДЕВУ, ТЕРЕМОК (ГНЦ РФ ФЭИ), УЗОР (РНЦ КИ), ТМ ТВС (ОКБ "Гидропресс").

Для ТВС-2 выполнено расчетное обоснование термомеханического поведения в составе активной зоны в установившемся 4-х годичном топливном цикле (подпитка 42 ТВС-2 в год).

Основной результат термомеханического обоснования заключается в том, что на всех этапах эксплуатации прогнозируются межкассетные зазоры, не более указанных в табл. 1.

Таблица 1 - Значения межкассетных зазоров в загрузках ТВС-2

Тип топливной загрузки	Межкассетный зазор, мм
$0 < N_{\text{ТВС-2}} \leq 54$	9,0
$54 < N_{\text{ТВС-2}} \leq 135$	7,0
$N_{\text{ТВС-2}} > 135$	5,5

Прогнозируемый прогиб в 5,5 мм соответствует проектному состоянию активной зоны, при котором можно отменить консервативную "обобщенную" методику обоснования безопасности и вернуться к уменьшенным инженерным коэффициентам неравномерности энерговыделения. Это, в свою очередь, позволяет отменить наложение дополнительных ограничений на физические коэффициенты неравномерности формирования активной зоны. Более того, с учетом возможности снятия других консервативных предпосылок в теплогидравлических обоснованиях перейти к новым проектным ограничениям, позволяющим более экономичное формирование топливных загрузок (in-out).

В главе 4 приводятся основные результаты опытно-промышленной эксплуатации (ОПЭ) ТВС-2.

Внедрение в эксплуатацию связано с решением многочисленных вопросов нейтронно-физической, гидравлической и термомеханической совместимости для переходных загрузок.

Проведенные расчеты для каждой загрузки, а также выполненные измерения показали хорошее совпадение для результатов активной зоны 1-го блока Балаковской АЭС в конце 12-й загрузки, предшествующей первой загрузке ТВС-2, а также в начале 13-й кампании на той же высоте активной зоны. Сравнение дало качественное представление о положительном эффекте уже первой загрузки «жестких» кассет.

На рис. 7 и 8 показан пример совпадения расчетных и измеренных данных для конца 14-й кампании первого блока Балаковской АЭС.

В качестве базового блока для опытной эксплуатации ТВС-2 выбран 1 блок Балаковской АЭС. Опытная эксплуатация на 1 блоке Балаковской АЭС осуществляется по программе, основные разделы которой определяют:

физическую идентичность ТВС с точки зрения нейтронно-физических характеристик;

соответствие теплогидравлических параметров;

механическую надежность конструкции.

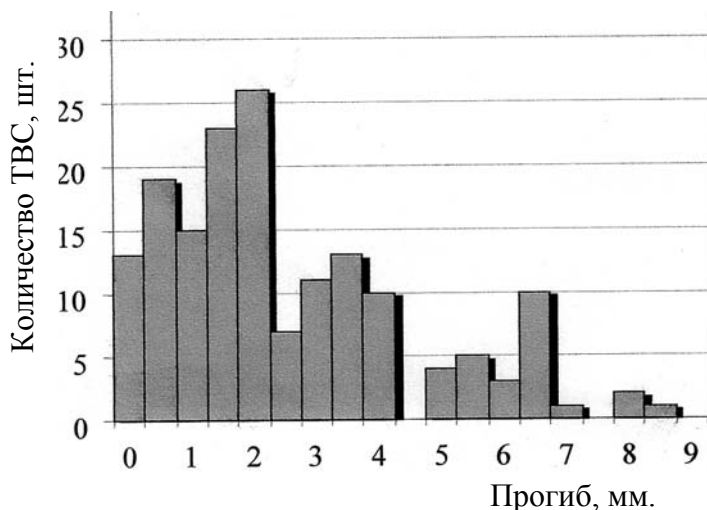


Рис. 7. Расчетные значения прогибов кассет

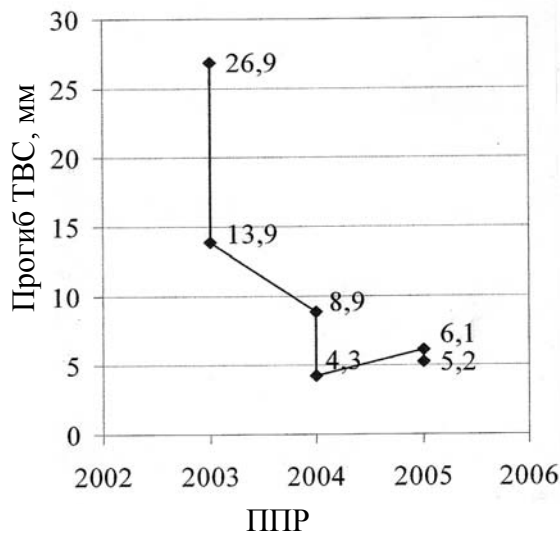


Рис. 8. Измеренное среднее значение прогибов кассет

Блок 1 БалаАЭС работает в базовом режиме с наложением диспетчерских ограничений в пределах разрешенных техническими условиями на топливо.

Специфика многоблочной станции заключается в том, что для блоков таких АЭС решающим показателем является КИУМ, поэтому востребованными являются топливные циклы с большой продолжительностью между перегрузками.

Продолжительность кампании.....~ 350 эфф. сут.

Количество загружаемых ТВС54 / 55 шт.

Среднее обогащение загружаемого топлива4,12 %

Достигаемое выгорание топлива

- среднее~ 44,5 МВт·сут/кг U

- максимальное~ 47,5 МВт·сут/кг U

Опытно-промышленная эксплуатация ТВС-2 на Балаковской АЭС началась в 2003 году с загрузки в активную зону реактора опытной партии в количестве 54 шт. и эксплуатации в течение 13 топливной кампании.

Динамика внедрения ТВС-2 на 1 блоке Балаковской АЭС такова:

В ППР-2003- 1 партия (54 шт.) ТВС-2 с 15 ДР;

В ППР-2004- 2 партия (54 шт.) ТВС-2 с 12 ДР;

В ППР-2005- 3 партия (55 шт.) ТВС-2 с 12 ДР.

В процессе ОПЭ проводились, в частности, следующие проверки и измерения:

- проверка времени падения ОР СУЗ. Регламентное значение времени падения ОР СУЗ составляет 1,2–4 с. Результаты измерений показывают, что время падения ОР СУЗ не превышает 2,1 мм;

- измерение усилий протяжки ОР СУЗ. Изменение усилий протяжки ОР СУЗ с уплотненного верхнего блока в начале топливной кампании по регламенту не должно превышать ± 10 кгс. Установка двух партий ТВС-2 позволила войти в этот диапазон усилий не только после перегрузки активной зоны, но и до перегрузки;

- измерения прямолинейности ТВС-2. На рис. 9 приводятся результаты измерения среднего значения прогиба ТВС в активной зоне 1 блока Балаковской АЭС после перегрузки. Из приведенных данных следует, что к 2005 году активная зона пришла практически к исходному состоянию с точки зрения прямолинейности. Это подтверждают также данные по времени срабатывания и усилия протяжки ОР СУЗ;

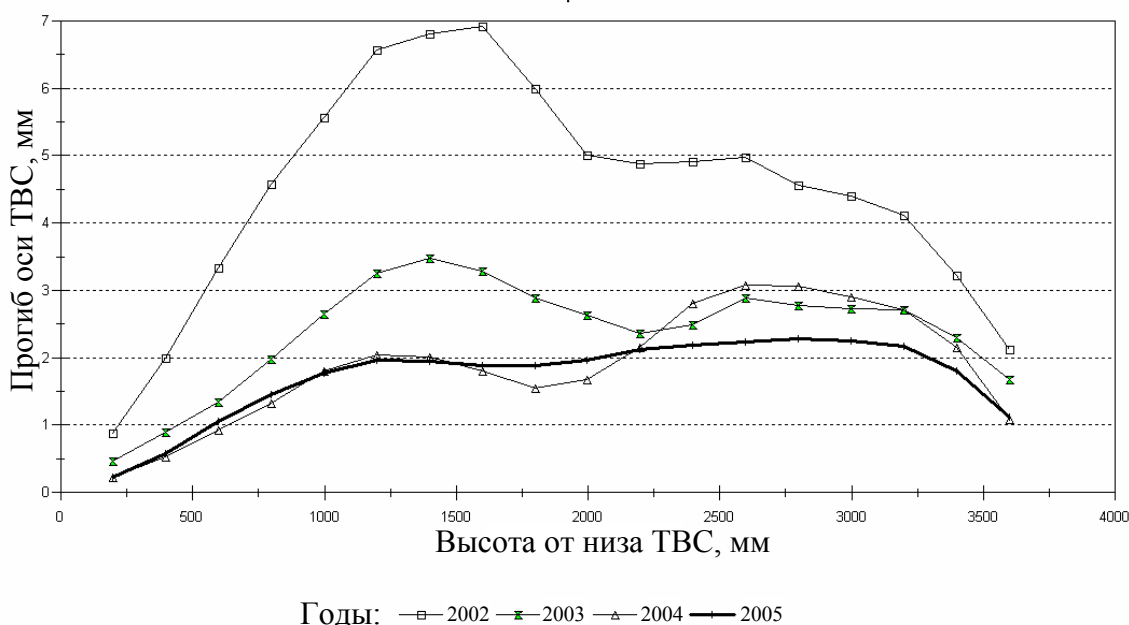


Рис. 9 - Изменение среднего значения прогиба оси ТВС-2

- транспортно-технологические операции (ТТО) при перегрузке. Параметры, установленные для ТТО при перегрузке ТВС, не отражают непосредственно состояние безопасности РУ, однако они определяют удобство и скорость перегрузки топлива, что, в конечном счете, влияет на КИУМ. Деформация ТВС приводила не только к превышению установленных критериев перегрузки (усилие трения ТВС – 75 кгс, ПС СУЗ – 13 кгс), но и к проблемам с установкой ТВС или ПС СУЗ в заданную ячейку. Для каждого такого случая требовалось принимать нестандартное решение или по увеличению уставки, или по изменению обстановки вокруг устанавливаемой ТВС. Более 50 % случаев установки или извлечения проходили не штатно. В процессе эксплуатации активных зон на базе ТВС-2 от перегрузки к перегрузке происходило улучшение условий и выполнение установленных параметров. Об этом говорит положительная статистика, проведенная по результатам ППР-2005 на 1 блоке Балаковской АЭС.

Таким образом, созданы условия для увеличения скорости вертикального перемещения;

- анализ состояния пружин и НК ТВС-2. Учет величины релаксации пружин и радиационного роста НК является важным для невсплываемости ТВС и исключения их пережатия. В конструкции ТВС-2 применены пружины из сплава ХН77ТЮР, которые по результатам дореакторных и реакторных испытаний в составе УТВС показали стабильность силовых характеристик. В поведении же НК из Э110 и Э635 установлены существенные отличия.

По результатам послереакторных исследований установлено, что в пределах выгораний 50 МВт·сут/кгU, НК из сплава Э-110 не только не имеют радиационного роста, но под действием осевых сил укорачиваются в среднем на 4 мм, в то время как центральная трубка без нагрузки удлиняется на ~ 4 мм. Аналогичные измерения для НК из сплава Э-635 показывают, что они сохраняют свою первоначальную длину, а точнее «вырастают» на 0,7 мм. Схематично это показано на рис. 10.

Этот факт позволяет сделать несколько важных для ТВС выводов.

Первый заключается в том, что в пределах выгораний 50 МВт·сут /кгU при расчете пружин можно не учитывать радиационный рост НК из сплава Э-635.

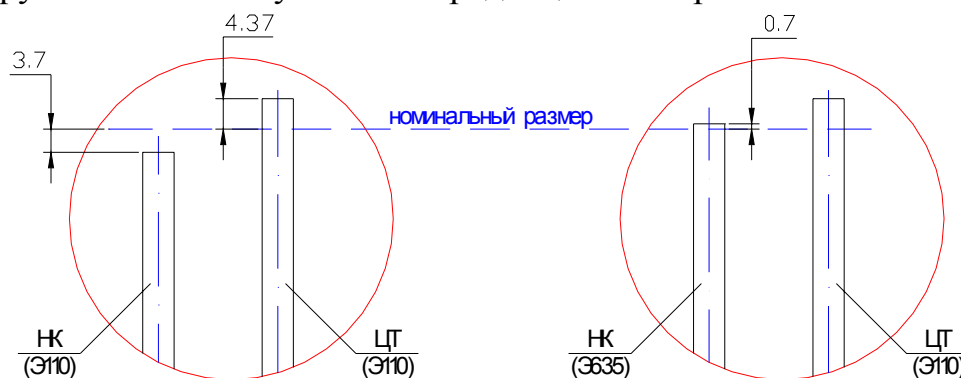


Рис. 10. Схема изменения размеров НК и ЦТ

Можно предположить, что два противоположных процесса: радиационный рост и радиационно-термическая ползучесть под напряжением, взаимно уравновешивают друг друга и дают этот важный для конструирования результат. Можно также предположить, что и за пределами таких выгораний, по крайней мере до 70 МВт·сут/кгU, на основе данных по радиационному росту не следует ожидать ощутимого увеличения длины каналов, так как это будет сопровождаться увеличением осевой нагрузки и, соответственно, большим напряжением, сдерживающим радиационный рост.

Следующий вывод вытекает из изучения данных по положению БЗТ на активной зоне до и после перегрузки. Конструкция реактора такова, что БЗТ устанавливается на головки кассет, которые при доказанном условии сохранения исходных характеристик пружин имеют суммарное усилие предварительного поджатия около 87 т. В реальности кассеты имеют разновысотность, поэтому головки некоторых кассет поджимаются выше предварительного поджатия. В

результате устанавливается состояние равновесия, при котором БЗТ занимает определенное положение, которое по регламенту контролируется как выступание платиков БЗТ относительно фланца корпуса реактора.

На рис. 11 показано изменение положения БЗТ, установленного на кассетах реактора для двух вариантов кассет: УТВС (Волгодонская АЭС) и ТВС-2 (Балаковская АЭС).

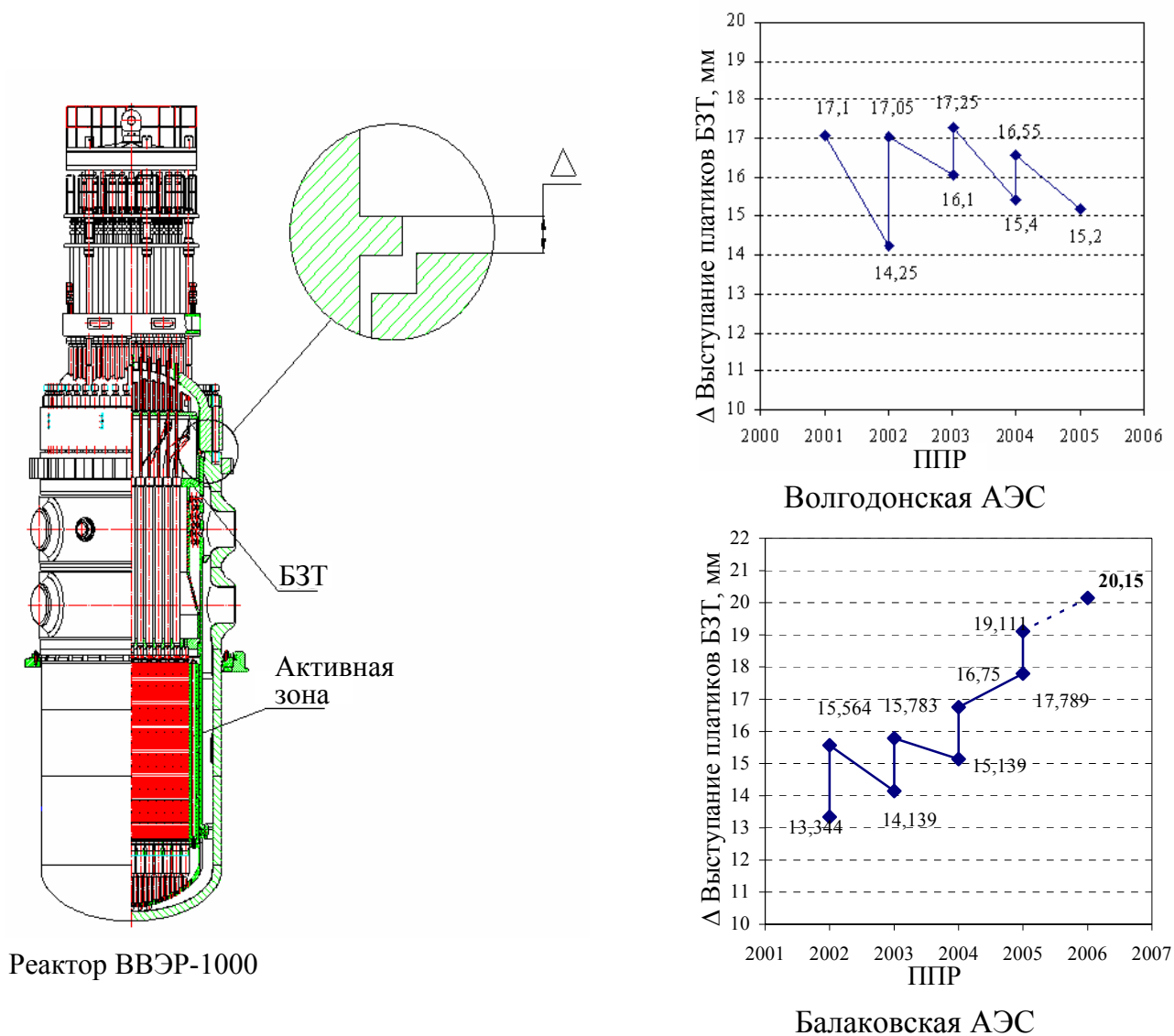


Рис. 11. Изменение положения БЗТ в процессе эксплуатации

Из рисунка следует, что для реактора с УТВС за счёт уменьшения длины каналов за цикл эксплуатации положение БЗТ меняется в сторону снижения уровня. После подгрузки партии свежих кассет осуществляется подъем до прежнего уровня. Таким образом реализуется неравномерная нагрузка на кассеты. Свежие кассеты несут большую нагрузку, кассеты 2-4 годов меньшую.

Для реактора с ТВС-2 диаграмма размеров подтверждает свойства НК сохранять свою длину за время эксплуатации. До загрузки ТВС-2 в цикле 2002-2003 года положение БЗТ менялось аналогично 1 блоку Волгодонской АЭС.

После загрузки первой партии ТВС-2 в 2003 году снижение уровня БЗТ уже было не столь значительным. После загрузки партии ТВС-2 в 2004 году тенденция снижения уровня вообще переломлена и происходит его незначительный подъём на величину роста каналов. Далее следует прогнозировать обратное по сравнению с УТВС поведение уровня БЗТ. После догрузки новых кассет он должен снижаться, а после отработки цикла кампании подниматься на ту же величину.

В результате этого все кассеты будут примерно одинаково нагружены. Это создаёт предпосылку для дальнейшего снижения осевой нагрузки на ТВС. Из этих данных следует интегральное доказательство стабильности формы ТВС-2 в реакторе.

Из сказанного просматривается также диагностическая функция БЗТ в реакторе ВВЭР-1000. Свободная установка на активную зону, измерение его положения и, при необходимости, корректировка этого положения создает благоприятные условия для работы ТВС в реакторе.

В главе 5 приведена дальнейшая информация о модернизации конструкции ТВС-2

На рис. 11 показаны все типы бесчехловых кассет, которые были разработаны для реактора ВВЭР-1000, включая последнюю модификацию ТВС-2М, разработанную в 2005 году.

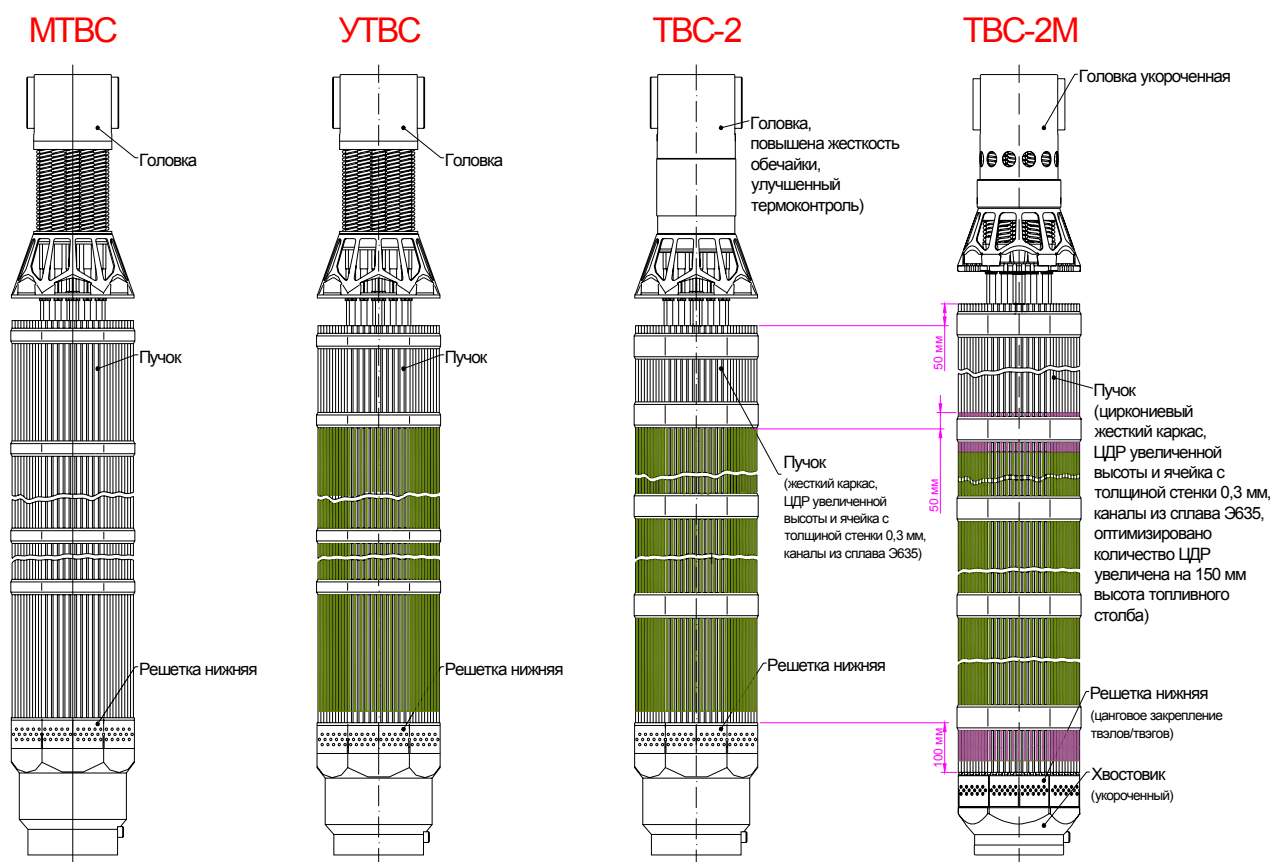


Рис. 11 - Модификации бесчехловых кассет ВВЭР-1000

После решения вопроса геометрической стабильности конструкции активной зоны ограничения на время и эффективность работы могут накладываться два параметра: загрузка кассет двуокисью урана и исходное обогащение двуокиси урана.

В связи с тем, что исходное обогащение для ВВЭР и РWR ограничено пятью процентами U^{235} , дальнейшая возможность продления кампании связана с увеличением загрузки.

В этом случае топливные циклы реализуются с большей продолжительностью (18 месяцев и более) и, соответственно, увеличением КИУМ.

Для циклов с годичной продолжительностью увеличивается кратность перегрузки и уменьшается удельный расход урана. Снижение количества поставляемых кассет снижает затраты на их производство, относительную металлоемкость.

Учитывая также складывающуюся конкуренцию на рынке топлива, следует ожидать, что все запасы, имеющиеся в конструкции, будут уменьшаться до разумного предела.

С точки зрения влияния на термомеханику ТВС и активной зоны первый этап, связанный с удлинением топливного столба на 150 мм, практически не вносит изменений в обеспечение ресурса ТВС-2М. Реализация этого этапа с учетом возможного изменения размеров топливной таблетки (без изменения параметров оболочки) позволяет обеспечить более экономичные топливные циклы.

Заключение

1. Выполнен анализ влияния конструкционных и эксплуатационных факторов на ресурс ТВС. К ним относятся: схема взаимодействия элементов ТВС (ТВЭЛы, ДР, НК); усилие зажатия ТВС в реакторе; длительность эксплуатации и, соответственно, выгорание; исходные технологические натяги ТВЭЛ в ДР; плотность формирования активной зоны; режимы эксплуатации, неравномерность температур; состояние опорных поверхностей в реакторе.

2. Установлено, что модернизированная конструкция УТВС может работать в 4-х годичном топливном цикле до выгорания ~ 50 МВт·сут/кгU при условии, что номинальное рабочее осевое усилие зажатия будет составлять ~ 1000 тс, а исходный зазор между кассетами будет составлять ~ 1 мм.

В то же время конструкция ТВС-2 мало зависит от внешних факторов и может работать в 5-ти годичном топливном цикле до выгорания 70 МВт·сут/кгU, т.е. обеспечить ресурс, обусловленный физическими возможностями ядерного топлива разрешенного 5 %-ного обогащения.

3. В процессе эксплуатации пружины, выполненные из стали ХН77ТЮР сохраняют свою характеристику, НК из сплава Э-635 практически сохраняют свою первоначальную длину, ДР и их шаг расположения обеспечивают отсутствие фреттинг-износа оболочек ТВЭЛ в течение всего срока эксплуатации.

4. На базе новой конструкции с жестким каркасом успешно могут быть созданы новые конструкции с удлиненным топливным столбом, одна из которых ТВС-2М успешно работает на 1 блоке БалАЭС, а новая создается для РУ АЭС-2006.

Список работ по теме диссертации

1. Пат. 2209475 России. Тепловыделяющая сборка ядерного реактора / В.В.Рожков, И.Г.Чапаев, И.Н.Васильченко и др. 2003. Бюл. № 7.
2. Пат. 2101788 России. Регулирующий стержень корпусного водоохлаждаемого ядерного реактора / В.М. Чернышов, В.И. Ряховских, И.Н. Васильченко и др. 1998. MIMOSA RFD.
3. Пат. 2079171 России. Тепловыделяющая сборка ядерного реактора / И.Н. Васильченко и др. 1997. Бюл. № 13.
- 4 Пат. 2221289 России. Съёмная головка тепловыделяющей сборки / И.Н. Васильченко и др. 2004. Бюл. № 1.
5. Пат. 2223557 России. Тепловыделяющая сборка ядерного реактора / В.В. Рожков, И.Г. Чапаев, И.Н. Васильченко и др. 2004. Бюл. № 2.
6. Пат. 2254624 России. Тепловыделяющая сборка ядерного реактора / И.Н. Васильченко и др. 2005. Бюл. № 17.
7. Конструкция ТВС как итог модернизации и база для перспективных ВВЭР / Ю.Г. Драгунов, И.Н. Васильченко и др // Конференция «ВВЭР – Технические инновации в следующем столетии». Чехия, Прага. 17–20 апреля 2000.
8. Результаты исследований механических свойств необлученных кассет ВВЭР-1000 / В.В. Макаров, И.Н. Васильченко и др. // Международная конференция «Атомная энергетика на пороге XXI века». г. Электросталь, 8-10 июня 2000.
9. Экспериментальные и расчётные исследования жёсткости и формоизменения необлучённых ТВС ВВЭР-1000 / Ю.Г. Драгунов, А.В. Селезнёв, И.Н. Васильченко и др. // ВАНТ, 2005. Вып. 5. С. 65–74.
10. Возможность повышения эффективности использования топлива в активной зоне ВВЭР-1000 / С.Б. Рыжов, Г.Л. Пономаренко, И.Н. Васильченко и др. // 3-я научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 26-30 мая 2003. С. 223–245.
11. Экспериментальные исследования жесткости и формоизменения необлученных ТВС ВВЭР-1000 / В.В. Макаров, А.В. Афанасьев, И.Н. Васильченко и др. // 3-я научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС ВВЭР». Подольск, 26-30 мая 2003. С. 142–154.
12. New Requirements for the WWER Fuel and Their Consideration in Designing the Fuel Assemblies./I. Vasilchenko, Yu. Ananyev. //Proceedings of the Forth International Conference. 29 September – 3 October 2003. Albena Congress Center, Bulgaria, p. 153–163.

13. Design measures for providing geometrical stability of WWER reactor cores / I.N. Vasilchenko, and others // Technical meeting held in Cadarache, France, November 2004.

14. Trial operation of TVS-2 at Balakovo NPP. Analyzis of results and further modernization / I.N. Vasilchenko, S.B. Ryzhov, U.G. Dragunov, and others. // 6th International Conference on WWER Fuel Performance, Modeling and Experimental Support. 19-23 September 2005, Congress Center Albena, Bulgaria, p. 98–106.

15. R&D Results for a New Generation of the TVS-2 Fuel Assemblies for a WWER-1000./V. Troyanov, A. Enin, I. Vasilchenko and others // Proceedings of the 2004 International Meeting on LWR Fuel Perfomans. September 19-22, 2004, Orlando, Florida.

16. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций / В.Д. Шмелев, Ю.Г. Драгунов, В.П. Денисов, И.Н. Васильченко. М.: ИКЦ "Академкнига", 2004.