

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРОВ С ВОДОЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

В.В. Макаров, А. В. Селезнёв, А.В. Афанасьев, И.В. Матвиенко  
АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

## Аннотация

Работа представляет собой описание комплексного подхода к обоснованию прочности, целостности ТВС, основанного на анализе результатов нескольких циклов экспериментальных дореакторных (статических, термомеханических, ударных, вибрационных, сейсмических и др.) испытаний. В работе представлены подходы, методики испытаний и экспериментальные результаты, полученные в ОКБ ГИДРОПРЕСС за, более чем, 20 лет исследований в области прочности ТВС. Таких как УТВС, ТВС-2, ТВС-2М, ТВС-2006, ТВС-1500, ТВС-КВАДРАТ и др., которые создавались для повышения экономических показателей и устранения проблемы термомеханической устойчивости ТВС.

Исследования для решения проблемы термомеханической устойчивости ТВС включали испытания макетов ТВС на поперечный изгиб, чистый изгиб, термоциклические воздействия. Обобщены результаты исследований собственных и вынужденных колебаний нескольких полномасштабных макетов ТВС ВВЭР, РWR и отдельных твэлов. Получены оценки влияния конструкционных и эксплуатационных факторов на частоты, формы, коэффициенты демпфирования собственных и вынужденных колебаний ТВС и твэлов, отстройку от резонанса. Проанализированы сейсмические испытания нескольких макетов ТВС с приводом СУЗ, в которых определены изгибные формы ТВС, сила удара о выгородку активной зоны в воде, время падения ОР СУЗ при имитации МРЗ 7 баллов на опорах ТВС и привода СУЗ. Получены зависимости этих параметров от конструктивных особенностей ТВС. Представлены методики и результаты экспериментальных исследований сил трения и их влияния на прочность ТВС. Силы трения проявляются при сборке ТВС, в узлах сопряжения «твэл-ячейка» как фреттинг-коррозия в узлах ДР, при термомеханическом взаимодействии твэлов и ДР и др. Исследованы влияние конструкционных, эксплуатационных параметров на силы и коэффициенты трения образцов оболочек твэлов и ДР. Оценки сил трения необходимы для расчётов, в которых необходимо учитывать взаимодействие твэла с ДР, например, термомеханической либо вибрационной прочности ТВС. Представлены результаты исследований ударной прочности при сбросах ОРСУЗ в ТВС различных конструкций, выполнено обоснование ударной и циклической прочностидеталей ТВС и ОРСУЗ. Проанализированы результаты испытаний ТВС на прочность в аварийных режимах с потерей теплоносителя и пр.

Показана необходимость всестороннего анализа прочности при улучшениях конструкции ТВС.

## Введение

В процессе эксплуатации в нормальных условиях (НУЭ) и нарушений нормальных условий эксплуатации (ННУЭ) тепловыделяющие сборки (ТВС) атомных реакторов подвергаются силовым, нейтронным, температурным, гидравлическим, нагрузкам и воздействиям. Эти нагрузки и воздействия приводят к процессам:

терморадиационного распухания топлива; вибрации твэлов; трению твэлов в ячейках дистанционирующих решеток (ДР) при проскальзывании в них удлиняющихся или укорачивающихся твэлов; термомеханической и радиационной ползучести; пластических деформаций и механических разрушений элементов ТВС от статических, циклических, ударных, силовых, кинематических, температурных и др. воздействий.

Два первых барьера обеспечения безопасности АЭС относятся к ТВС: спечённая матрица топливных таблеток и оболочка твэла. Федеральными нормами и правилами НП 094-15 требуется обоснование прочности и работоспособности твэлов и ТВС, которое должно показать, что предельные состояния твэлов и ТВС не будут достигнуты в течение всего проектного срока их службы во всех предусмотренных проектом РУ режимах НУЭ, ННУЭ и ПА. Правила требуют от методов расчёта напряженно-деформированного состояния твэлов и ТВС учёта всех действующих на твэлы и ТВС нагрузок в режимах НУЭ, ННУЭ и ПА. А при обосновании численных значений коэффициентов запаса необходимо учитывать не только опыт эксплуатации твэлов и ТВС аналогичной конструкции (при его наличии), но и результаты экспериментов на стендах.

Доклад освещает вопрос: как реализовать вышеприведённые требования федеральных норм в экспериментальной части обеспечения механической прочности проекта ТВС.

Из НП 094-15 следуют два направления экспериментальных работ:

- получение экспериментальных данных (локальные характеристики и коэффициенты, исследование механизма и параметров деформирования и т.д.) для верификации расчётов прочности;

- стендовое обоснование прочности ТВС в случае отсутствия методов расчёта.

Основное требование к методикам исследований - они должны обеспечивать подобие, модельность и переносимость результатов стендовых испытаний на штатное изделие в рамках выбранных границ моделирования штатного процесса, регламентировать порядок, условия, объём проведения испытаний и обработки результатов.

В основном, представленные результаты получены в рамках работ по договорам с АО «ТВЭЛ».

Изменения конструкции ТВС ВВЭР-1000 были вызваны необходимостью реализации следующих направлений развития:

1) повышение экономических показателей (форсирование мощности действующих реакторов, увеличение глубины выгорания, удлинение топливных циклов)

2) повышение надежности эксплуатации (исключение термомеханического искривления ТВС и обеспечение проектного времени падения ОР СУЗ).

Эволюция механической части конструкции ТВС ВВЭР-1000 условно состояла из следующих наиболее значимых для механической прочности изменений: замена стальных деталей на циркониевые, сварное соединение НК и ДР, увеличение высоты ДР и толщины стенки ячейки и снижение длины линии контакта ячейки ДР, уменьшение количества решёток и увеличение длины пролёта твэла между ДР, введение перемешивающих решёток и антидебризного фильтра, замены несъёмной на съёмную головку ТВС, применение цангового нижнего узла крепления твэла, исключение нижнего крепления твэла. Следует отметить, что вносимые изменения контролируются нагрузками и воздействиями, которые не всегда бывают достаточно точно известны. При этом недостаток экспериментальных знаний по нагрузкам, деформациям, механизмам деградаций и свойствам материалов не может быть компенсирован расчётным моделированием какой угодно сложности, успех которого зависит от наличия и качества верифицирующих экспериментальных знаний. А консервативное повышение запасов прочности на степень незнания отягощает конструкцию и снижает экономические показатели и конкурентоспособность. Таким образом, наличие исчерпывающего объёма систематизированных экспериментальных знаний и опытных специалистов является необходимым условием обеспечения эксплуатационной надёжности новых ТВС и обеспечения безопасности АЭС. Это общее правило подтверждается начальным этапом развития атомной энергетики прошлого столетия (примерно до середины 70<sup>-х</sup> годов). По опубликованным к 70-летию юбилею ОКБ ГИДРОПРЕСС материалам с 1966 по 1970 гг. в ОКБ ГИДРОПРЕСС было построено 160 стендов, на которых было проведено большое

количество исследований и получены ответы на вопросы в областях прочности, гидравлики, теплофизики, технологии теплоносителя, коррозионной стойкости, механики. Это позволило успешно реализовать основные проекты РУ ОКБ ГИДРОПРЕСС.

В рамках экспериментального обоснования проектируемой конструкции ТВС исследуются деформационные характеристики головок ТВС, вибрационные параметры твэлов и ТВС, устойчивость твэлов к фреттинг-коррозии, характеристики прочности ТВС при падении с высоты и ударе о жесткую поверхность, сейсмическая прочность ТВС и т.д. Испытания ТВС при воздействии одного фактора предпринимались для получения количественной оценки чувствительности конструкции к этому фактору. Оценки усталостной, вибрационной, статической, ударной прочности и т.д., полученные при воздействии одного фактора являются необходимыми, но недостаточными для обоснования работоспособности, надёжности, целостности ТВС. Поскольку на ТВС действуют множество факторов одновременно, которые в полной совокупности невозможно воспроизвести на стенде и которые могут дать синергический эффект, т.е. взаимно усилить влияние. Многофакторное воздействие оценивалось расчётным путём, либо на стенде «горячей обкатки», либо на АЭС при опытно-промышленной эксплуатацией опытных образцов новых ТВС. Одним из наименее изученных факторов является сила трения. Силы трения проявляются на всех этапах жизненного цикла тепловыделяющей сборки (ТВС): при сборке на заводе -изготовителе, в режимах нормальных условий и нарушений нормальных эксплуатации, в процессе сборки активной зоны реактора и выгрузки ТВС из реактора. Силы трения учитывают при обосновании термомеханической прочности ТВС, вибропрочности ТВС. Они тормозят падение ОРСУЗ и влияют на время падения ОРСУЗ и обоснование сейсмической стойкости канала регулирования реактивности реактора и т.д. Силы трения могут играть как положительную роль (конструкционное демпфирование), так и отрицательную. В отечественной и зарубежной практике они приводили к фреттинг-повреждениям оболочек твэлов и чехлов ТВС, застреванию ОРСУЗ, чрезмерным силам при сборке ТВС и разрушению ободов ДР при загрузке-выгрузке ТВС из реактора, депланации ДР и пр.

Для ТВС ВВЭР-1000 задача повышения термомеханической устойчивости возникла после перехода от двух к трём годичным кампаниям, в результате чего возникло термомеханическое искривление «серийных» ТВС и в следствие этого превышение проектного времени падения ОРСУЗ. Задача обеспечения стойкости к фреттинг-износу возникла после замены стальных ДР циркониевыми ДР и после увеличения длины пролётов твэлов. Авария на АЭС «Фукусима» выдвинула более жесткие требования к обоснованию сейсмической прочности ТВС.

В идеализированном представлении можно сказать: при увеличении нагрузок и воздействий на элемент ТВС, для сохранения прочности на том же уровне необходимо либо применить другой материал с более высокими свойствами сопротивления, либо увеличить количество материала, либо показать, что запасы не исчерпаны

Объектом исследования является тепловыделяющая сборка реактора с водой под давлением. Предмет исследований: прочность, целостность, работоспособность ТВС под действием нагрузок и воздействий в нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) и при нарушении нормальных условий эксплуатации (ННУЭ) и проектных авариях (ПА).

Выполненные работы условно можно распределить по проблемам:

#### **Термомеханическая прочность и устойчивость ТВС**

Статические механические испытания ТВС на поперечный изгиб (исследование процесса деформирования и определение изгибной жесткости);

Испытания ТВС на продольное сжатие, определение критической силы потери устойчивости ТВС;

Испытания ТВС на термомеханические (циклические) воздействия с имитацией режимов «пуск-останов» и маневрирования 20% мощности;

Испытания ТВС на чистый изгиб (определение чувствительности прогиба ТВС к температурному перекоосу по противоположным граням ТВС);

Испытания ОРСУЗ на «застревание» в искривлённой ТВС. Измерение влияния кривизны ТВС на силы трения и время падения ОРСУЗ;

Испытания на прочность при падении утяжелённого ОРСУЗ;

Испытания образцов узла «твэл-фрагмент ДР» на трение.

Исследования процессов трения ТВС при проверке собираемости активной зоны.

### **Вибропрочность ТВС при гидродинамических нагрузках**

Модальный анализ ТВС, определение характеристик собственных колебаний ТВС, твэлов;

Определение характеристик вынужденных колебаний ТВС, твэлов в потоке теплоносителя,

Испытания фрагментов ТВС на гидродинамическую вибрацию и фреттинг-износ с оценкой запаса вибропрочности оболочек твэлов;

Испытания материалов ТВС на износ с оценкой коэффициентов износа материалов ТВС в условиях штатного ВХР.

### **Прочность ТВС при сейсмических воздействиях.**

Определение модальных характеристик ТВС при сейсмическом (кинематическом) возбуждении колебаний опор ТВС;

Исследование процесса удара ТВС о выгородку в потоке воды при МРЗ 7 баллов;

Сейсмические испытания ТВС в составе канала регулирования реактивности на сейсмостойкость при МРЗ 7 баллов с определением динамической характеристики и времени падения ОРСУЗ.

### **Прочность ТВС при аварийных воздействиях**

Определение сил, действующих на модель ТВС при моделировании максимальной проектной аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода;

Испытания ТВС на падение с высоты при нарушении ТТО;

Испытания ТВС на термомеханические нагрузки при МПА до температуры 650°C;

## **1. Термомеханическая прочность и устойчивость ТВС**

Продемонстрируем комплекс экспериментального обоснования конструкции проектируемой ТВС на примере разработки ТВС нового поколения – ТВС-2.

### **1.1. Механические испытания ТВС на поперечный изгиб и на продольное сжатие**

Наиболее значимыми для выбора решений и обоснования проекта ТВС-2 были 3 цикла экспериментальных исследований. Это испытания в ОКБ ГП около двух десятков полномасштабных макетов ТВС различных конструкций на поперечный изгиб /1/ и термоциклические воздействия, испытания фрагментов ТВС на продольное перемещение 312 образцов твэлов относительно сварного каркаса и исследования характеристик жёсткости ДР (так определения так называемых локальных характеристик узлов сопряжений твэлов и НК), выполненные НЗХК и ФЭИ.

Деформирование ТВС при поперечном изгибе не удовлетворяет основным гипотезам сопротивления материалов, таким как сохранение плоскостности сечений при изгибе, однородности, изотропности материала. Тем не менее, первоначально за неимением лучшего, для оценки изгибной жёсткости ТВС использовались модели сопромата для изгиба двухопорной балки. Была разработана методика для исследования процесса поперечного изгиба ТВС, реализующий циклическое квазистатическое знакопеременное нагружение ТВС сосредоточенной поперечной силой и регистрацией процесса в виде петли гистерезиса в координатах «сила-перемещение». В отличие от существовавшей до того методики с односторонним способом нагружения ТВС

поперечной силой, дававшей значительную погрешность, обусловленную остаточным прогибом ТВС от предыдущего нагружения, новая методика на основе способа попеременного нагружения, симметричного относительно нейтральной оси ТВС, позволила различать упругое и неупругое сопротивление изгибу.

Способ исключает погрешность оценки жёсткости ТВС от нелинейности характеристики и унифицирует методику испытаний на поперечный изгиб для всех конструкций ТВС. Именно петли гистерезиса сфокусировали внимание исследователей и конструкторов на механизмах конструкционного трения УТВС и термомеханического накопления прогиба. Экспериментально было показано на макете ТВС, что в процессе поперечного изгиба, после смещения середины ТВС на величину порядка 1 мм жёсткость УТВС резко падала примерно в 5 и более раз, а затем оставалась постоянной. Результаты исследований использованы при создании «жёсткой» ТВС, разработке математического описания механизма сопротивления ТВС изгибу для программ расчёта накопления прогиба ТВС при термомеханических воздействиях в процессе эксплуатации. Механизм сопротивления ТВС поперечному изгибу был теоретически описан сотрудниками ГНЦ ФЭИ д.т.н. Ю.И. Лихачёвым и д.т.н. В.М. Трояновым /3/ с использованием модели ТВС в которой возникают угловые моменты реакции опоры твэла в ячейке ДР. А.П. Устименко (НЗХК) /2/ на модели твэла получил резкое снижение угловой жёсткости (на поворот) твэла в ДР после поворота твэла на небольшой угол (~0,1 градус). Таким образом, общими усилиями был описан механизм нелинейного сопротивления при поперечном изгибе ТВС, характеризующийся тем, что при увеличении поперечной силы и перемещении ДР, наряду с переизгибающей силой возникает упругий момент реакции опоры твэла в ДР. Далее, после достижения некоторого порогового момента происходит страгивание и переход от начальной упругой деформации опоры твэла в ячейке ДР к скольжению и повороту твэла вследствие резкого снижения момента реакции опоры и переходе от покоя твэла относительно опорных выступов (пуклевки) ячейки ДР к угловому скольжению. Резкое падение момента реакции опоры, на наш взгляд, объясняется переходом от сил упругого сопротивления (условно называемое трением покоя) к силам трения скольжения и снижению плеча между парой сил, образующих момент реакции опоры (пуклёвки ячейки) с ростом угла поворота. Аналогично деформируются направляющие каналы в УТВС. В результате испытаний более 20 макетов различных конструкций установлено, что изгибная жёсткость ТВС определяется материалами, способом соединения НК и ДР, натягом в соединении твэл-ДР, толщиной стенки ячейки, длиной линии контакта пукли с твэлом. В результате исследований коренными причинами формоизменения ТВС и застревания ОРСУЗ были признаны чрезмерное поджатие ТВС плитой БЗТ и низкая индивидуальная изгибная жёсткость «серийной» ТВС с каркасом из направляющих каналов и дистанционирующих решёток, соединённых силами «трения покоя». Для повышения индивидуальной жёсткости в ОКБ ГИДРОПРЕСС был создан проект ТВС-2 с жёстким каркасом из направляющих каналов и ДР, соединённых сваркой вместо сил трения, как было в прототипе- «серийной» ТВС. Изгибная характеристика ТВС-2 имеет значительно большую изгибную жёсткость и меньшее неупругое сопротивление, выраженное в меньшей ширине петли гистерезиса.

Головка новой ТВС-2 имела более мягкий пружинный блок с большим рабочим ходом. Решение, обеспечившее «жёсткую» ТВС-2 было впоследствии развито в ряде модификаций, таких как ТВС-2М, ТВС-1500, ТВС-2006, ТВС-АЭС ТОИ. Это решение было создано усилиями ОАО ОКБ ГИДРОПРЕСС, ГНЦ РФ ФЭИ, ГНЦ РФ КИ, ОАО НЗХК, ОАО МСЗ, организованных ОАО ТВЭЛ. Методика испытаний ТВС на поперечный изгиб была передана в НЗХК. Результаты исследований поперечного изгиба ТВС были использованы для верификации расчётных кодов ОКБ ГП, РНЦ КИ, ГРНЦ ФЭИ, позволили обосновать изменения конструкции ТВС и решить задачу обеспечения термомеханической прочности ТВС в конструкциях ТВС-2, ТВС-2М и всех последующих ТВС со сварным каркасом.

## **1.2. Испытания на продольное сжатие**

Испытания проводили для получения оценки критической силы потери устойчивости новых модификаций УТВС, как Эйлера стержня. Ранее, процесс деформирования «серийной» ТВС описывался с приемлемой для практики точностью формулой для Эйлера стержня, и значение критической силы потери устойчивости определялось по резкому изменению наклона кривой в координатах «продольное усилие - поперечный прогиб ДР8». Всего, на продольное сжатие до потери устойчивости испытаны три макета УТВС и, для сравнения, макеты серийной и гибридной ТВС нагружались примерно до 80 кН по одному разу без потери устойчивости. Наибольшей критической силой (более 100 кН) обладали макеты серийной ТВС со стальным каркасом. Выходным контролем макетов ТВС повреждений не было обнаружено. Прослабленные макеты УТВС с имитацией выгоревшего состояния имели критическую силу потери устойчивости около 30 кН. Установлена линейная зависимость критической силы потери устойчивости от изгибной жёсткости ТВС.

## **1.3. Термомеханические испытания ТВС на чистый изгиб.**

Испытания были проведены на стенде максимальных проектных аварий (МПА). Стенд МПА состоит из воздушного циркуляционного контура, включающего колонку с макетом ТВС, высокотемпературного насоса-вентилятора, двух электропечей мощностью около 700 кВт, автоматизированных систем измерений и управления воздушным циркуляционным контуром нагрева ТВС, измерений перемещений ДР автоматизированной системой измерений (АСНИ) с  $30^{-10}$  датчиками перемещения, несколькими десятками датчиков температуры и динамометрами для измерений силы поджатия ТВС и поперечной силы. На стенде МПА определялась чувствительность прогиба макета ТВС 2М к температурному перекосу (термоградиенту) на параллельных гранях, который реализовал условия чистого изгиба. Были испытаны несколько макетов разных конструкций. В процессе испытаний макета со сварным каркасом ТВС-2М перепад температуры между противоположными гранями менялся от минус 42 до плюс 42 °С со скоростью 40°С/час при средней температуре макета 320 °С и выдержкой 1 час на максимуме и минимуме температуры. В результате получены максимальные изгибные деформации ТВС в сторону более нагретой грани на уровне ДР9 с размахом до 11,4 мм, что соответствует средней чувствительности макета к термоперекосу между противоположными гранями 13,6 мм/100°. При разнице температур 40° С на гранях периферийной в активной зоне ТВС максимальный прогиб ТВС будет 5,4мм. Механизм образования необратимого искривления ТВС может контролироваться последующими за этим процессами терморadiационной ползучести и удлинения твэлов, которые переводят обратимые деформации в необратимые. В отличие от петель гистерезиса при поперечном изгибе, на термопетлях гистерезис проявляется слабо – остаточный прогиб не превышает 1 мм, поскольку поворота и проскальзывания твэла относительно опор-пуклёвок ячейки ДР не происходило. Остаточный прогиб после снятия термоперекоса не превысил 1 мм.

## **1.4. Испытания ТВС на термомеханические (циклические) воздействия с имитацией режимов «пуск-останов» и маневрирования 20% мощности (определение накопленного прогиба).**

Создана методика и проводились испытания различных макетов ТВС на циклические изменения температур, имитирующих колебания мощности реактора в пределах 100- 80% и 20- 100% на стенде МПА. В ходе термоциклических испытаний измеряли зависимости поперечных перемещений ДР и температуры ТВС от времени. Зависимости перемещений имели периодическую составляющую, изменяющуюся синхронно с температурой, и аperiodическую составляющую (накопленный прогиб).

Результаты показали, что испытанные макеты условно можно разделить на две основные группы. Макеты «серийной» и УТВС относятся к группе с наибольшим накопленным прогибом, причем накопление прогиба ТВС с каркасом, «собранным на трении», происходило в течение всех циклов испытаний.

Макеты со сварным каркасом ТВС-2 и макет УТВС с ограничительными втулками в соединении ДР и НК образуют вторую группу и имели накопленный прогиб около 1 мм. В ходе испытаний этих макетов процесс роста накопленного прогиба прекращался после 1-3 циклов нагрева-охлаждения. Испытания подтвердили гораздо большую, по сравнению УТВС, стойкость макета ТВС-2М к формоизменению при циклических изменениях температуры и поперечных термомперекосах, имитирующих реакторные условия эксплуатации. Для макетов с малой изгибной жесткостью существенным фактором процесса накопления прогиба в термоциклических испытаниях является изменение продольной силы, составляющее заметную долю критической силы потери устойчивости. Для макета серийной ТВС (со стальными ДР и НК) фактором, определяющим формоизменение, является различие коэффициентов термического расширения конструкционных материалов (нержавеющая сталь и сплав циркония) и высокие силы трения в узлах сопряжения твэлов и НК с ДР. Статистической обработкой результатов маневренных испытаний «серийной» ТВС получено регрессионное уравнение зависимости модуля главного вектора перемещений  $R_8$  ДР ( $R_8$ ) от основных значимых безразмерных параметров (незначимые отброшены): количества циклов ( $n$ ), времени ( $t/24$ ), продольной силы ( $N_t/14$ ), относительного среднего перепада температур между противоположными гранями 5 и 2 ( $dT_{52}/T$ ). Модель выбрана перебором, из нескольких построенных вариантов по двум критериям: максимальному коэффициенту корреляции и минимальной стандартной ошибке.

$$R_8 = 9,15 \cdot n^{0,18} \left( \frac{t}{24} \right)^{0,13} \left( 1 - \frac{N_t}{14} \right)^{1,26} \left( \frac{dT_{52}}{T} \right)^{0,32} \quad (1)$$

Модель описывает 96,3 % разброса данных, все факторы модели значимы с вероятностью 99 %, стандартная ошибка оценки  $R_8$  равна 0,05 мм, количество обработанных наблюдений вектора  $R_8$  и параметров представлено матрицей  $770 \times 5$ .

Модель учитывает все основные влияющие факторы. Полезность такой феноменологической модели состоит в получении статистических доказательствах того, что определены все значимые факторы, определяющие процесс термомеханического деформирования макета данной конструкции в данных условиях (без моделирования эффектов радиационной и температурной ползучести).

### **1.5. Испытания ОРСУЗ на падение в искривлённой ТВС. Измерение влияния кривизны ТВС на силы трения и время падения ОРСУЗ**

В рамках решения проблемы обеспечения проектного времени падения ОР СУЗ исследовали зависимости времени падения и силы трения ОРСУЗ от кривизны ТВС на стенде живучести с полномасштабным макетом ТВС в стоячей воде. ТВС искривляли по первым трём синусоидальным формам. Экспериментально было установлено [4], что критическим параметром, определяющим силу трения и застревание ПС СУЗ, являются не прогиб, а величина, обратная радиусу кривизны тепловыделяющей сборки и количество полуволн формы ТВС. К этой силе трения добавлялись локальные силы трения («горбы») при прохождении концов ПЭЛов (скользящая опора балки) участков перегибов. На этих участках происходила смена знака кривизны и образовывалась пара противоположно направленных сил на конце ПЭЛа с малым плечом. Изгиб тепловыделяющей сборки по П форме (типа «S») с амплитудами отклонения ДР №№12 и 4 на – 25 и 20 мм, близких к максимальной обнаруженной на АЭС амплитуде прогиба 25 мм почти не повлиял на время падения ПС СУЗ, хотя сила трения при перемещении ПС СУЗ в направляющих

каналах достигала 146 Н. А изгиб по III форме с амплитудой прогиба ~13 мм привел к недопустимому замедлению падения и застреванию ПС СУЗ. Максимальная сила трения ПССУЗ при этом превысила вес ОРСУЗ в воде (около 270 Н).

Следует отметить, что по причине методической сложности динамических измерений в потоке теплоносителя исследования выполнены в стоячей воде без моделирования гидравлического сопротивления падению ОРСУЗ от перепада давления и встречного скоростного напора теплоносителя. Сила сопротивления движению 18 ПЭЛов от перепада на активной зоне 176 кПа равна ~160Н. Вклад скоростного напора неизвестен. Поэтому результаты имеют относительную ценность, в частности, они пролили свет на механику торможения ОРСУЗ в искривлённой ТВС. Падение ОРСУЗ имеет два участка: разгонный-с положительным ускорением, и тормозной- с отрицательным ускорением. В точке перехода от одного участка к другому скорость падения максимальна и постоянна, т.е. силы торможения равны движущей силе-весу ОРСУЗ в воде 270Н. На участке торможения силы сопротивления превышают вес. Застревание происходит, когда в результате торможения скорость ОРСУЗ падает до нуля в точке, расположенной выше нижнего положения. Величина недохода определяется максимальной скоростью, набранной на участке разгона и величиной отрицательного ускорения на участке торможения, которое определяется величиной превышения силы торможения над весом ОРСУЗ. Моделирование гидравлического сопротивления приведёт к более раннему достижению этой точки перехода и меньшей максимальной скорости падения и, соответственно, увеличению времени падения. Результаты исследований использованы в решении задач обеспечения проектного времени падения ОРСУЗ и обоснования сейсмостойкости канала регулирования реактивности (КРР).

Проблема обеспечения проектного времени падения ОР СУЗ для ВВЭР-1000 была решена устранением причин накопления деформаций ТВС: повышением индивидуальной жёсткости ТВС за счёт сварного каркаса ТВС-2, снижением силы поджатия ТВС подрезанием платиков плиты БЗТ и увеличением веса ОРСУЗ.

### **1.6. Испытания ТВС на прочность при падении утяжелённого ПССУЗ**

Одним из способов решения проблемы застревания ОРСУЗ является повышение его веса, для чего были исследованы разработанные ТВС конструкции утяжеленного ПССУЗ. При этом, в связи с увеличением ударных нагрузок в процессе контакта с ТВС возник вопрос обоснования ударной прочности ОРСУЗ с утяжелённым ПССУЗ и ТВС.

Целями исследований являлись:

- сравнение демпфирующих свойств головок ТВС различных конструкций;
- оценка ударной и циклической прочности деталей ПС СУЗ и ТВС;

– получение оценок ударной прочности ПС СУЗ при испытаниях с различными ТВС. В ходе выполненных на стенде-«сухое гнездо» исследований в стоячей воде и воздухе была разработана методика автоматизированных испытаний и проведены испытания тепловыделяющих сборок и ПС СУЗ различных конструкций. Разработана методика испытаний и измерены максимальные величины напряжений в корнях ребер захватной головки, оболочек ПЭЛов, в направляющих каналах, величины ударных сил на захватной головке ПССУЗ, перемещений подвижной плиты головки ТВС, скоростей подлёта ОРСУЗ. Статистической обработкой получены регрессионные зависимости динамических параметров от скорости подлёта ОР СУЗ в воздухе и воде. Получены коэффициенты демпфирования пружинного блока головки ТВС для испытанных вариантов. Описаны стадии процесса соударения ОРСУЗ и ТВС. Процесс удара ОР СУЗ с ТВС является сложным и представляет последовательность соударений (около 6<sup>-ти</sup>) деталей ОР СУЗ (захватная головка, ПЭЛы, штанга) и ТВС (шток, подвижная плита, пружинный блок) в процессе фазы торможения и фазы отскока ОРСУЗ.



Скорость деформации элементов ПС СУЗ при ударе о ТВС приблизительно равно 1е.о.д./сек. Ударная прочность захватной головки ПССУЗ с высотой ребра 25 мм не была обеспечена и, поэтому высота ребра головки была увеличена до 35 мм. Показано, что ударная и циклическая прочность элементов ПС СУЗ и ТВС, испытанных конструкций обеспечена. Утяжеление ПССУЗ с 16 до 18,5 кгс было реализовано затем в УТВС и последующих проектах ТВС.

Эффективными средствами снижения напряжений в элементах ПС СУЗ, ТВС и обеспечения их ударной и циклической прочности, реализованными в проектах модернизированной ТВС и УТВС являлись:

– введение в головку ТВС демпфирующего пружинного блока с увеличенным рабочим ходом с пониженной жёсткостью;– снижение массы подвижной плиты головки ТВС;– снижение скорости подлета ПС СУЗ, увеличение высоты ребра захватной головки.

### **1.7. Испытания образцов узла «твэл-фрагмент ДР» на трение**

В процессе проектирования ТВС-2 возникло опасение, что сварка ДР с НК в ТВС-2 приведёт к нагружению ДР (приваренных к НК) силами трения твэлов, удлиняющихся от терморационного роста, направленными перпендикулярно плоскости ДР со стороны твэлов в процессе их удлинения может привести к прогибу (депланации) и разрушению ДР ТВС. Эксперименты НЗХК с имитацией удлинения твэлов в состоянии поставки и их скольжения относительно сварного каркаса, состоящего из НК и ДР, путём синхронного продольного перемещения 312 образцов твэлов через каркас двухпролётного макета ТВС привели к депланации и разрушению ДР нескольких различных конструкций силами, достигающими до 120 кН. Эти экспериментальные результаты «подтвердили» феномен «закусывания» твэла в ячейке, который явился следствием взаимозависимых процессов с положительной обратной связью: увеличения продольной силы трения и роста угловой несоосности ячейки и способствовали кардинальным изменениям конструкции. Таким как, -уменьшению высоты пуклёвки ячейки ДР с 12 до 4мм для снижения вероятности «закусывания», увеличению высоты ДР с 20 до 30 мм для увеличения жёсткости ДР. Опыт эксплуатации ТВС-2 показал, что с ее помощью проблема обеспечения проектного времени падения ОР СУЗ была решена в течение 2 кампаний и в дальнейшем можно оптимизировать характеристики (жесткость каркаса, гидравлическое сопротивление, масса топлива в ТВС), что привело к уменьшению количества ДР с 15 до 12 для снижения коэффициента гидравлического сопротивления и увеличению длины пролёта твэл с 255 до 340 мм.

Эти изменения породили достаточно большую серию расчётно-экспериментальных исследований в области обоснования термомеханической, вибрационной, статической прочности ТВС 2 и весьма существенно обогатили практику конструирования ТВС экспериментальными и расчётными знаниями. Однако, эксперименты, породившие столь значительные изменения конструкции ТВС вызывали сомнения и вопросы в части модельности и подобия условий испытаний реакторным в области трибологии. Для прояснения этих вопросов были выполнены исследования зависимостей коэффициентов трения в паре оболочка твэла- ДР от конструкционных и эксплуатационных факторов: состояния поверхностей образцов, вибрации, скорости относительного скольжения на специально разработанном устройстве (трибометре) с возвратно-поступательным относительным скольжением образца оболочки твэла относительно трёх фрагментов (пуклёвках) ячейки ДР /5/.

Толчком к этим работам послужили результаты исследований влияния окисных плёнок на циркониевых деталях на коэффициент трения, полученные с помощью токарного станка сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана. Результаты систематических испытаний ОКБ ГП, выполненных впервые в отрасли выявили следующие закономерности: при трении образцов оболочек твэлов и ячеек ДР в состоянии поставки

(как было реализовано в испытаниях НЗХК) коэффициент трения в среднем составлял 0,5-0,6. Трение автоклавированных образцов, покрытых прочной окисной плёнкой (как в реакторе) характеризовалось коэффициентами трения в диапазоне 0,1-0,2.

В реакторе поток теплоносителя возбуждает вибрационное поперечное перемещение оболочки твэла относительно пуклёвки ячейки ДР, которое может влиять на коэффициент трения при продольном удлинении твэла. Для оценки этого влияния выполнены испытания образцов с одиночным контактом пуклёвки ячейки с оболочкой на трибометре УМТ-3 в условиях вибрации в поперечном направлении по отношению к направлению поступательного движения вдоль оси образца твэла. Испытания показали существенное снижение усилия продольного перемещения в одиночном контакте твэльной оболочки относительно ячейки ДР, которое соответствовало эффективному коэффициенту трения порядка 0,03. Эта величина характерна только для режимов испытаний автоклавированных образцов с поперечной вибрацией на частоте 16 герц и продольной скоростью скольжения 1 мкм/с. В ТВС твэл контактирует с тремя пуклёвками ячейки ДР, поэтому встал вопрос: как повлияет на  $K_{тр}$  вибрация в сопряжении твэла с ячейкой ДР? В результате испытаний на трибометре УМТ-3 получено снижение усилия при продольном перемещении твэльной оболочки относительно штатной ячейки ДР на 30% от поперечной вибрации при продольной скорости скольжения 1 мкм/с. Температура и среда статистически значимого влияния на коэффициент трения не оказывают.

Следует отметить, что в нормальных условиях эксплуатации ТВС в реакторе не бывает условий без окисной плёнки на твэлах и ДР, без вибрации, с синхронным перемещением всех 312 твэлов относительно ячеек ДР со скоростью 10 мкм/с. Средняя скорость радиационного роста твэла при удлинении 30 мм за 3 года равна  $3 \cdot 10^{-4}$  мкм/с.  $3 \cdot 10^{-4}$  мкм - величина, на несколько порядков меньшая характерного размера шероховатости. В условиях такой низкой скорости, неравномерного нейтронного потока и с учётом упругости контакта следует ожидать, что процесс скольжения каждого твэла относительно каждой из ДР каркаса будет прерывистым, скачкообразным и индивидуальным, а не синхронизированным с другими твэлами.

Т.е. невероятно, чтобы 312 твэлов двигались относительно ДР с одинаковой скоростью одновременно и синхронно, как в экспериментах по продвижению 312 твэлов через каркас. Очевидно, что одновременное движение твэлов даёт завышенные оценки суммарной силы трения за счёт эффекта положительной обратной связи ансамбля твэлов по сравнению с индивидуальным квантованным проскальзыванием каждого твэла. Под обратной связью понимается увеличение момента реакции опоры твэла в ДР («трение покоя») при продольном перемещении твэла и прогибе (депланации) ДР от сил трения и, соответственно поворот ячейки вследствие чего проявляется рост этих сил реакции опоры («депланация»). Таким образом, можно предположить, что в экспериментах НЗХК применение оксидированных оболочек твэлов существенно снизило бы максимальную силу трения. Приложение вибрации в сочетании с малой скоростью перемещения дало бы снижение её ещё на 30%. А несогласованное перемещение 312 твэлов тоже понизило бы силу трения до безопасной величины. Таким образом, измеренная максимальная сила трения до 120 кН была получена созданием одновременно четырёх маловероятных условий и является следствием недостатка знаний на тот момент и методических ошибок. Что привело к консервативным конструкторским решениям со значительным запасом.

## **2. Вибропрочность ТВС при гидродинамических нагрузках**

Фреттинг-износ твэлов в контакте с ДР на протяжении многих лет занимает лидирующие места в статистике причин отказов зарубежного топлива, по видимому, связанному с особенностями их конструкции. В связи с опасностью фреттинг-износа оболочки твэла в контакте с ДР во время перехода на циркониевый каркас ТВС были выполнены сначала исследования устойчивости твэлов к фреттинг-износу на

однотвэльных моделях ТВС, а в недавнее время-комплекс исследований собственных и вынужденных колебаний ТВС, твэлов.

В процессе эксплуатации вследствие радиационной ползучести материала ДР происходит релаксация упругих сил, обеспечивающих начальный натяг в сопряжении твэла с ячейкой ДР и уменьшение наружного диаметра твэльных оболочек. Исходные натяги в сопряжении твэл-дистанционирующая решётка (ДР) исчезают, и появляются зазоры, которые создают условия для трения скольжения твэла относительно фиксирующих выступов ячейки ДР в процессе колебаний твэлов.

## **2.1. Модальный анализ ТВС**

Целью модальных исследований является проверка отстройки от резонансов твэлов ТВС ВВЭР (АЭС-2006, ТВС-2М), РWR (ТВС-К). А также получение динамических характеристик твэлов и ТВС (частоты, формы, коэффициенты демпфирования колебаний) при гидравлическом, необходимые для для верификации расчётов.

Исследования модальных характеристик выполнены на стенде собираемости и стенде сейсмических и вибрационных испытаний (ССВИ) /6/. Как было показано исследованиями 6 макетов различных конструкций в воздухе собственные частоты ТВС определяются изгибной жесткостью и массой ТВС. Наши экспериментальные и расчётные оценки, выполненные сотрудниками РНЦ КИ под руководством А.А. Тутнова, имели хорошее совпадение.

Крутильные колебания были предсказаны РНЦ КИ и обнаружены в экспериментальных исследованиях. При штатных натягах в пролете длиной 255 мм собственная частота твэла составляет от 140 до 260 Гц, в пролете 340 мм – от 90 до 150 Гц, в пролете 510 мм – от 48,5 до 66 Гц. В пролете длиной 510 мм ТВС-К при наличии зазора в узлах “твэл – ячейка ДР” 0,2 мм происходит снижение собственных частот твэла до 39,5-64,5 Гц. Отстройка от резонанса тем лучше, чем меньше длина пролёта твэла. Факторами, влияющими на собственную частоту пролета твэла, являются его длина, погонная масса и условия опирания твэла в ДР (величина натяга или зазора). С достаточной для практики точностью экспериментально подтверждается теоретическое соотношение для оценки частоты собственных колебаний твэла по схеме двухопорной балки как:  $f \sim l^{-2}$ , где  $l$ -длина пролёта твэла между соседними ДР.

Модальный анализ ТВС в воде выполнен на стенде ССВИ. Стенд воспроизводит идентичные штатным условия закрепления ТВС в колонке стенда и штатный перепад давления холодной (до 40-80° С) воды на ТВС. Стенд воспроизводит сейсмические акселерограммы в реальном масштабе времени на 6<sup>-ти</sup> опорах ТВС и привода СУЗ ШЭМ 3 по двум ортогональным горизонтальным осям. Современные цифровые АСНИ и АСУТП позволяют проводить измерения ускорений, виброскоростей лазерными виброметрами через прозрачные окна в колонке с ТВС. При переходе от воздуха к стоячей воде собственные частоты снижаются в среднем на 14 % вследствие «утяжеления» ТВС за счет присоединенной массы теплоносителя. В воздухе и стоячей воде коэффициенты демпфирования собственных колебаний ТВС не превышают 5 % от критического.

## **2.2. Испытания ТВС на гидродинамически возбуждаемую вибрацию**

При переходе от стоячей воды к потоку происходит снижение собственных частот колебаний ТВС еще на 6 %, по сравнению со стоячей водой. В потоке теплоносителя коэффициенты демпфирования собственных колебаний возрастают по сравнению с воздухом до 30% от критического /7/.

В спектрах колебаний в потоке теплоносителя можно идентифицировать: колебания твэлов на частотах пульсаций давления теплоносителя (частотах циркуляционного насоса: оборотной 24,8 Гц, лопаточной 148,8 Гц). А также колебания на

собственных частотах длинных пролётов твэлов и широкополосный шум, вызванный турбулентным режимом течения теплоносителя. Увеличение виброскорости резонансных колебаний твэла ТВС-К на частоте 33 Гц с увеличением расхода теплоносителя описывается квадратичной зависимостью с коэффициентом корреляции, близким к 1. Резонансные колебания твэлов с длиной пролёта 255 мм не отмечались.

Коэффициент демпфирования резонансных колебаний твэлов в потоке составляет 30 % от критического и практически не зависит от амплитуды колебаний, тогда как на воздухе он максимален при амплитуде около  $1 \text{ м/с}^2$ . Что касается колебаний твэлов на частотах, близких к собственным частотам, определенным на воздухе, то в потоке воды с номинальным расходом они наблюдались только в пролетах, имеющих длину 340 мм и выше, т.е. пролёты твэлов меньшей длины отстроены от резонанса.

Проведённые исследования привели к выводу, что фреттинг-износ оболочек твэлов в контакте с ДР контролируется механизмом резонансных колебаний твэлов, а не колебаниями ТВС, как двухопорной балки.

### **2.3. Испытания фрагментов ТВС на гидродинамически возбуждаемую вибрацию и фреттинг**

Исследования процесса гидродинамически возбуждаемой вибрации твэлов 9-стержневой модели продольно-поперечным потоком холодной воды в гидравлическом контуре стенда выполнены для оценки зависимостей виброускорения твэлов от факторов. Таких, как скорость продольно-поперечного потока воды, натяг-зазор в контакте твэл-ДР и др. Полученные амплитудные и частотные характеристики вынужденных колебаний твэлов использовались как исходные данные для исследования процесса фреттинг-коррозии с целью экспериментального определения влияния конструкционных, технологических, эксплуатационных параметров на износостойкость узлов сопряжения «твэл-ДР» ТВС ВВЭР-1000.

В качестве материалов образцов дистанционирующих решеток использовались сплав циркония Э110 и нержавеющая сталь 08Х18Н10Т. Основная методическая задача состояла в воспроизведении в стендовых условиях процесса фреттинг-коррозии идентичного штатному, кроме облучения /8/. Задача обеспечения модельности, подобия воспроизводимого процесса и переносимости результатов на штатную ТВС решалась созданием модели твэла с необходимым количеством опор-фрагментов ДР, акселерометра, встроенного в образец твэла, для точного измерения вибрации, герметичного корпуса, штатных параметров водно-химического режима теплоносителя, бесконтактного электромагнитного вибратора. На модель было получено авторское свидетельство о изобретении. На специально построенных стенде и 10 моделях твэла впервые было проведено два этапа ресурсных испытаний на фреттинг-износ, каждый в объеме 750 часов. На первом этапе проводились сравнительные испытания циркониевой и нержавеющей решеток. В каждую модель твэла устанавливался образец нержавеющей решетки серийной ТВС в паре с образцом циркониевой ДР с толщиной стенки ячейки 0,3 мм и длиной линии контакта пуклевок ячеек с твэлом 12 мм усовершенствованной ТВС. Для испытаний выбраны частоты вынуждающей силы, действующей на образцы твэлов равные 32, 64, 210 Гц. Амплитуды виброускорений задавались в диапазоне  $5 - 30 \text{ м/с}^2$ . В процессе ревизии на 9 образцах твэлов и ДР износа не было обнаружено. На одном образце твэла с параметрами испытаний: ускорение  $30 \text{ м/с}^2$ , частота 32 Гц, зазор 0,1 мм наблюдался фактически полный износ образца, как со стороны нержавеющей ДР, так и со стороны циркониевой ДР. Образец циркониевой ДР был изношен до разрушения (центральная ячейка), на образце нержавеющей ДР наблюдался также большой износ. Площадки износа на оболочке повторяют геометрию пуклевок. На втором этапе испытаний в модели были установлены образцы нержавеющей ДР в парах с образцами циркониевых ДР толщиной 0,25 мм с длиной линии контакта пуклевок ячеек с твэлом 12

мм. Комбинации условий при которых был получен износ на первом этапе были воспроизведены с уменьшенной амплитудой виброускорений в два раза (ускорение  $15 \text{ м/с}^2$ , частота 32 Гц, зазор 0,1 мм) в одном варианте и с отсутствием зазора (ускорение  $30 \text{ м/с}^2$ , частота 32 Гц, зазор 0 мм) в другом.

После ресурсных испытаний в объеме 750 часов износа не обнаружено. Таким образом технически неприемлемые фреттинг-повреждения образцов оболочек твэлов получены только при уровне виброускорений, превышающем  $30 \text{ м/с}^2$  и наличии зазоров в сопряжениях «твэл-ДР». Отсутствие износа на 19 парах образцов при сопряжении «твэл-ДР» как с зазорами, так и с натягом показывают, что даже очень высокие уровни вибрации (до  $30 \text{ м/с}^2$ ) не привели к фреттинг-повреждениям в условиях беззазорного сопряжения, а в сопряжении с зазором 0,1 мм износа не было при  $15 \text{ м/с}^2$ . С учетом измеренных на АЭС с ВВЭР-1000 амплитуд, не превышающих  $6 \text{ м/с}^2$  пришли к выводу, что испытанные образцы узлов сопряжения УТВС с пролетами твэлов по 255 мм обладают не менее, чем  $2^x$  кратным запасом износостойкости в наиболее консервативном варианте сопряжения-с зазорами между твэлом и ДР. Для других конструкций ТВС ВВЭР-1000 он неизвестен, хотя по опыту эксплуатации фреттинг-износ в них отсутствует. Известные проблемы с массовыми фреттинг-повреждениями были на ТВС ВВЭР-440 и вызваны они были аномальными вибрациями твэлов от повышенной вибрации ВКУ, порождённой ослаблением крепления ВКУ. Вибрация и износ твэлов вызывались также грязью, вынесенной из парогенератора и осевшей на твэлах, что увеличило КГС ТВС на 70% и, соответственно, уровень вибрации твэлов. На ВВЭР-1000 (АЭС Козлодуй) фреттинг-износ твэлов был инициирован потерей поперечной фиксации в НР. Для исключения фреттинг-износа твэлов в контакте с ДР путём повышения устойчивости ТВС к повышенной вибрации, предпочтительны длина пролёта твэлов не более 255 мм, длинная линия (12 мм) контакта твэла с выступами ячейки ДР, гарантированный натяг в узлах «твэл-ДР». Более подробные рекомендации могут быть определены в процессе разработки конкретной конструкции ТВС.

В процессе работы также была разработана методика оценки передаточных характеристик твэлов, таких как импеданс и динамическая податливость, которые, как было показано анализом динамических характеристик конструкций являются критериями динамического подобия модельных и штатных твэлов. На основании сравнения передаточных характеристик как критерия подобия твэлов макета ТВС и твэлов одно-, трёх-, пятипролётных моделей был сделан выбор трёхпролётной модели.

Кроме того, исследованиями колебаний одиночных твэлов ТВС, возбуждаемых вибратором было показано, что если возбуждать пролёт твэла с некоторой амплитудой, то в соседнем пролете возбуждается меньшая (примерно на порядок) амплитуда колебаний. А в пролете, расположенном через один, она не превышает уровень шума, т.е. ДР являются хорошими виброизоляторами. Поэтому колебания твэлов можно рассматривать как независимые колебания отдельных пролетов между ДР. Этими исследованиями ещё раз подтверждено то, что трёхпролётная модель твэла, использованная в исследованиях фреттинг-износа, обладает достаточным динамическим подобием штатному твэлу.

Используя вышеописанную методику были проведены испытания  $8^{\text{ми}}$  моделей твэлов ТВС-КВАДРАТ для реактора РWR и проводятся испытания 4-х моделей ТВС с незакреплёнными твэлами на фреттинг-коррозию. Методика позволяет определить требуемый НП094-15 запас вибропрочности твэла по механизму фреттинг-износа.

#### **2.4. Испытания образцов материалов ТВС фреттинг, определение коэффициентов износа**

Материалы элементов тепловыделяющих кассет в виде образцов твэла и ячейки ДР испытывались на фреттинг-коррозию на шести моделях, которые последовательно были включены в гидравлический контур стенда с штатным ВХР. Модель содержит автоклав

высокого давления и реализует контролируемое относительное возвратно-поступательное трение образцов с заданными частотой, амплитудой виброперемещений и нормальной контактной силой. Полученные параметры износа пересчитывались по формуле Хрущёва-Арчарда в коэффициент износа. Сравнение результатов (с учетом разброса) позволяет сделать выводы о том, что средние оценки коэффициентов изнашивания образцов оболочек твэлов испытанных в парах с контрообразцами из сплавов 08X18N10T и Э110 равны. А средняя оценка коэффициента износа контрообразцов из нержавеющей стали в 14 раз меньше, чем средняя оценка коэффициента износа контрообразцов из циркониевого сплава Э110. Следует отметить, что так же, как и в зарубежных исследованиях получен достаточно большой разброс результатов испытаний относительно среднего. Результаты использованы в расчётной методике оценки фреттинг-износа оболочек твэлов /9/.

### **3. Испытания ТВС на сейсмические воздействия**

В соответствии с нормативными требованиями НП-031 в случае МРЗ АЭС должна быть остановлена и переведена в безопасное состояние с возможностью разборки активной зоны. К оборудованию 1 категории сейсмостойкости, в том числе и к ТВС, при МРЗ предъявляется требование сохранить функцию обеспечения безопасности. Что означает, в частности, обеспечение возможности введения ПЭЛов в направляющие каналы (НК) ТВС за проектное время (не более 4 сек). В связи с чем возникает задача оценки деформаций и остаточного формоизменения ТВС в процессе и после МРЗ. Это требование порождает задачи оценки деформации ТВС, НК и сил удара ТВС о выгородку в процессе МРЗ.

#### **3.1. Сейсмические испытания ТВС с определением модальных характеристик**

##### **3.1.1. Модальные характеристики ТВС в воздухе**

Испытания были выполнены на стенде собираемости кинематическим возбуждением колебаний опор ТВС двумя вибраторами. Исследовались изменения передаточных характеристик в диапазоне частот 5-20 Гц от амплитуды ускорения опор ТВС, которая изменялась от 0,2 до 5 м/с<sup>2</sup>. При амплитудах ускорения опор свыше 1 м/с<sup>2</sup> частоты собственных колебаний по 3 форме снижались от ~13 Гц до ~8 Гц, а коэффициенты демпфирования увеличивались на порядок. Сначала ширина пика (и, соответственно, демпфирование) росли, а затем снижались. ТВС является нелинейной динамической системой. Нелинейность контролируется переходом твэлов от покоя к трению скольжения в соединениях с ДР при увеличении амплитуды колебаний и проявлением механизма сухого трения, реализовавшегося в сопряжении «твэл-ДР» на этапе перехода от «трения покоя» при малых амплитудах к трению углового скольжения. При этом происходит уменьшение изгибной жесткости ТВС, что вызывает снижение резонансных частот, и увеличивается диссипация энергии колебаний за счёт углового трения скольжения в парах твэл-ДР. В стоячей воде и в потоке теплоносителя также наблюдается влияние большой амплитуды воздействия на резонансные частоты. Эти впервые полученные результаты привели к корректировке расчетных моделей для учёта обнаруженных феноменов.

##### **3.1.2. Модальные характеристики ТВС в стоячей воде и в потоке воды**

На ССВИ кинематическим возбуждением колебаний опор ТВС в воде определены передаточные функции ТВС в воде как отношение спектров отклика (перемещений или ускорений ТВС) и воздействия (перемещений или ускорений опор). По временным зависимостям установлено, что колебания всех ДР и опор ТВС близки к синфазным, а размахи перемещений ДР относительно опор составляют менее половины от абсолютных

перемещений опор. Формы колебаний ТВС, построенные через промежутки времени 0,1 с, также свидетельствуют об отсутствии какой-либо преобладающей формы колебаний. Аналогичные результаты получены и в модальных испытаниях ТВС, в частотных диапазонах, где сейсмическое воздействие незначительно. В частотных диапазонах, на которые приходится максимальное воздействие, передаточные функции, как правило, близки к единице, что говорит об отсутствии резонансных откликов ТВС. При этом значения передаточных функций в потоке ниже, чем в стоячей воде, что, является следствием более сильного демпфирования ТВС в потоке.

Результаты проведённых исследований на ССВИ передаточных характеристик ТВС в потоке воды показали, что при кинематическом сейсмическом возбуждении опор ТВС её колебания на собственных частотах как двухопорной балки в потоке не проявляются вследствие демпфирования до 30 % от критического. Этот вывод совпадает с выводом французских исследователей. Этот результат, полученный впервые в России, имеет большое научное и практическое значение для обеспечения вибропрочности ТВС, поскольку ранее в расчётах использовалось представление линейно-спектрально резонансном отклике ТВС на первых собственных частотах.

### **3.2 Определение силы удара ТВС о выгородку в потоке воды**

В начале 2000 гг. были выполнены расчёты деформирования активной зоны при МРЗ на основе линейно-спектрального анализа. ТВС рассматривалась как линейная динамическая система, деформирующаяся преимущественно по первой форме, а коэффициент демпфирования принимался равным 0,02. Результаты независимых предтестовых расчетов сил удара ТВС о выгородку, выполненных двумя организациями для двух конструкций ТВС-2М и ТВСА, имеющих близкие динамические характеристики, отличались в несколько раз, а максимальная сила удара на одну ДР достигала 18 кН. Разница была обусловлена отсутствием экспериментальных данных для верификации расчётных моделей.

Это послужило поводом для экспериментальных исследований процесса удара на стенде ССВИ для верификации расчётных моделей /10/. Колонка стенда была оснащена силоизмерителями для измерения силы удара ДР о выгородку в потоке воды при МРЗ. В экспериментах на одиночной ТВС, выполненных в достаточно консервативных условиях, за исключением отсутствия моделирования соударения с соседними ТВС, максимальная сила удара ТВС не превышала 6 кН. Обоснование прочности ТВС при воздействии горизонтальных сжимающих нагрузок, возникающих в активной зоне при землетрясениях, проводилось на основании расчетов ударных сил взаимодействия между ТВС и ВКУ и их сопоставления с предельными сжимающими усилиями, определенными в испытаниях ДР на статическое сжатие

### **3.3 Испытания канала регулирования реактивности на сейсмостойкость при МРЗ 7 баллов**

Целью испытаний канала регулирования реактивности (КРР) в составе ТВС, БЗТ и привода СУЗ ШЭМ 3 на сейсмостойкость при МРЗ 7 баллов по шкале MSK-64 площадок НВАЭС 2 и ЛАЭС 2 было получение времени падения ОРСУЗ при МРЗ.

Была разработана методика сейсмических испытаний КРР ВВЭР-1000, создан стенд с имитацией сейсмических колебаний КРР /11/. Методика испытаний отличается от стенда-прототипа двухосным возбуждением колебаний опор ТВС и привода на трёх высотных уровнях, воспроизведением низкочастотной длинноходовой части спектра сейсмического воздействия, отсутствием вертикального воздействия, воспроизведением расчётных сейсмограмм в режиме реального времени, наличием АСУТП и ПО TWR, позволяющем воспроизводить целевые сейсмограммы с высокой точностью.

В процессе сейсмических испытаний отдельной ТВС и КРР на опорах ТВС и привода СУЗ ШЭМ 3 воспроизводились расчётные акселерограммы МРЗ до 7 баллов по шкале MSK-64. Проводились измерения колебаний ДР и твэлов макетов ТВС и время падения ОРСУЗ.

Например, проведены испытания привода СУЗ ШЭМ-3 и ТВС АЭС-2006 на сейсмостойкость при имитации землетрясений силой 7 баллов, рассчитанных для площадки НВАЭС-2, было проведено 15 сбросов ОР СУЗ при перепаде давления на ТВС 176 кПа, равном верхнему расчетному значению перепада давления на активной зоне РУ В-392М. В произведенных сбросах с имитацией МРЗ время падения ОР СУЗ составило от 2,46 с до 3,10 с (в среднем 2,80 с), что не превышает проектной основы 4,0 с. Имитация МРЗ (7 баллов) на опорах ТВС и привода СУЗ ШЭМ-3 приводит к увеличению среднего времени падения ОР СУЗ на 0,82 с. Сейсмостойкость КРР обеспечена. Прочность ТВС обеспечена.

#### **4 Испытания ТВС на аварийные воздействия**

##### **4.1. Исследование гидродинамических сил, действующих на модель ТВС при проектной аварии с разрывом трубопровода;**

Целью экспериментальных исследований являлось исследование сил и распределения статических (по Бернулли) давлений во времени во внутреннем пространстве корпуса высокого давления с имитатором ТВС в процессе разуплотнения контура, необходимых для верификации расчётного кода /12/. Моделировалась проектная авария с мгновенным разрывом трубопровода высокого давления. Задача: получение экспериментальных данных по перепаду давлений и сил на торцах при разрыве трубопровода необходимых для верификации расчетной программы.

Была разработана методика исследований, основанная на воспроизведении процесса «гильотинного» разрыва трубопровода и прохождения ударной волны спада давления вдоль модели ТВС, создающего перепад давления теплоносителя штатных параметров на торцах ТВС. Построенный стенд включает в себя гидравлический контур с теплоносителем штатных параметров, модель ТВС в корпусе высокого давления, разрывное мембранное устройство, соединительные трубы с арматурой и автоматизированные системы измерений и управления. Стенд предназначен для испытаний при следующих параметрах:

- |   |              |
|---|--------------|
| -рабочая среда:                                     | вода;        |
| - максимальное рабочее давление среды в модели, МПа | до 16;       |
| - максимальная рабочая температура среды, °С        | до 340;      |
| - внутренний диаметр трубы истечения теплоносителя  | 60 и 100 мм. |

Модель ТВС представляет собой трубный пучок изготовлен с ориентацией труб параллельно направлению истечения. Пучок состоит из 19 труб 76x6 мм с гексагональным расположением, соединенных сваркой через ДР, расположенные с шагом 500 мм. Торцы труб, образующих пучок, не заглушены. Крепление трубного пучка к корпусу осуществляется в четырех точках в районе торцов.

В процессе истечения рабочей среды на трубный пучок действуют силы, обусловленные разностью давлений на противоположных торцах труб. По результатам проведенных экспериментов были изучены характеристики динамических давлений и получены оценки переменной силы, возникающей от перепада давления между торцами пучка. Сила действует на трубный пучок в направлении истечения пара. Частота колебаний продольной силы была около 180 Гц, максимальная сила в реализованных экспериментах в направлении истечения достигала 30 кН.

При этом во всех экспериментах суммарный импульс силы в направлении истечения был больше, чем в противоположном направлении.



Выполнены исследования гидродинамических сил, действующих на модель ТВС при имитации разрыва трубопровода при различных параметрах рабочей среды и модели перед разрывом:  $P = 5,8- 12,3$  МПа;  $T = 135 - 235^{\circ}\text{C}$ .

диаметр канала истечения рабочей среды для всех экспериментов 60 мм.

Получены нестационарные распределения давления в модели при имитации разрыва трубопровода. Установлены закономерности пространственного и временного распределения давлений по модели после имитации разрыва трубопровода.

#### **4.2. Испытания ТВС на падение с высоты при нарушении ТГО**

В соответствии с правилами безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива требуется обеспечить ядерную и радиационную безопасность при транспортировании топлива, в частности необходимы экспериментальные данные по деформированию ТВС при падении с высоты и падении предметов в бассейн выдержки ТВС. Испытания проведены с целью получения экспериментальных данных для верификации программного комплекса LS-DYNA. Задачами испытаний были: измерения ускорений, сил, динамических деформаций при падениях моделей ТВС на жесткие основания и при падении предметов на модели секции стеллажей бассейна выдержки. Впервые разработана методика, стенд, выполнены скоростная видеосъемка, исследованы процессы изменений во времени ускорения, деформации, силы удара при падениях 14 моделей и полномасштабного макета ТВС на жесткое основание, а также на элементы секции бассейна выдержки. Определены динамические и остаточные деформации моделей, возникающих в результате падения; исследован механизм деформирования и разрушения деталей моделей и ТВС. Разработана методика цифрового реалистического моделирования ударного деформирования ТВС. Выполнены расчёт деформирования макета ТВС, верификация программы LS DYNA. Испытания /13/ выполнены на 14 моделях, начиная от мелкомасштабных моделей узлов ТВС и заканчивая полномасштабным макетом ТВС. В результате вертикального падения ТВС с высоты 9 метров у макета произошло разрушение нижней решётки по линиям контакта с опорными ребрами, деформации хвостовика в сферической и нижней части цилиндрической части. Нарушения целостности оболочек твэлов при ударе об основание не произошло. Наибольшие деформации ДР и твэлов отмечены в двух нижних пролетах. В нижнем пролете произошло сближение твэлов. Наименьший прогиб имели угловые твэлы. Показано, что как при вертикальном (с высоты 9 метров), так и горизонтальном (из вертикального положения-стоя) падениях целостность твэлов деформированного макета не нарушается. Показано хорошее совпадение расчётных и экспериментальных оценок параметров деформаций, ускорений, как для 14 испытанных фрагментов ТВС, так и для полномасштабного макета. Разница расчётных и экспериментальных оценок не превышает 1- 8%. Расчётный анализ аварийных ситуаций с облучённым топливом может быть верифицирован с использованием механических свойств облучённых материалов и результатов описанных выше испытаний.

Получено лучшее понимание процесса деформирования ТВС при падении с высоты, позволяющее улучшить расчёты ядерной безопасности, оптимизировать транспортное оборудование. Результаты использованы для верификации ПО LS-DYNA.

#### **4.3. Испытания ТВС на температуру до 650°С**

Для проектных аварий с потерей теплоносителя наиболее опасной является ситуация мгновенного разрыва входного главного циркуляционного трубопровода. По расчётам повышение температуры происходит у всех твэлов, что в сочетании со снижением давления теплоносителя, как показали эксперименты, создает предпосылки к раздутию оболочек твэлов. Раздутие происходит под действием внутреннего избыточного

давления в условиях температурной ползучести конструкционных материалов. Усилия от раздутия оболочек твэлов вызывают деформацию поля ячеек ДР вместе с ободом, что может привести к существенному формоизменению ДР, включая увеличение размера «под ключ» ДР. Увеличение размера «под ключ» ДР может усложнить процесс выгрузки активной зоны после аварии с учётом «запирающего» эффекта после охлаждения зоны вследствие разницы коэффициентов термического расширения циркониевых материалов ТВС и стальных ВКУ. Кроме того повышенная скорость ползучести циркониевых НК по сравнению со стальными снижает устойчивость к продольной силе сжатия ТВС с циркониевыми НК по сравнению со стальными НК. Целью исследований, инициированных после случайного перегрева ТВС, в котором впервые проявился эффект высокотемпературного разупрочнения циркониевых НК, было получение экспериментальных данных, необходимых для расчётной оценки формоизменения ТВС и её элементов в режиме максимальной проектной аварии (МПА) с потерей теплоносителя. Задачами были разработка методики испытаний макета ТВС на температурно-силовые воздействия, методик высокотемпературных нагрева ТВС и измерений перемещений ДР ТВС. Для изучения процессов термомеханического деформирования были выполнены экспериментальные исследования макета УТВС и расчётное обоснование для ТВС АЭС 2006 /14/.

Стенд МПА был специально создан для испытания ТВС на температурную имитацию МПА. Выбранный сценарий испытания в режиме температурной имитации аварии с потерей теплоносителя включал в себя разогрев УТВС от 20 до 320 °С со скоростью 60 С/ч; выдержку при средней температуре ТВС 320 °С в течение 1 ч; разогрев до максимальной температуры штатной УТВС ( $668 \pm 13$ ) С со скоростью от 40 до 50 °С/ч с кратковременным нагружением поперечной силой 0,25 кН для имитации воздействия соседней ТВС; выдержку при максимальной температуре УТВС в течение 6 ч при продольном поджатии от 9 до 30 мм от исходного состояния при 20 °С; расхолаживание до 20 °С без принудительной циркуляции воздуха в контуре. Сценарий нагрева и результаты испытаний показаны на рис. 1. Испытания привели к раздутию оболочек твэлов и увеличению размера ДР «под ключ» вследствие значительно большей скорости ползучести циркониевого сплава Э110 при 650°С, чем при 320° С. Разброс размеров диаметров угловых твэлов в районе ДР8 составлял от 9,99 до 10,72 мм. Максимальное раздутие оболочек твэлов равнялось 10,72 мм (что соответствует окружной деформации 18 %) наблюдалось в средней по высоте части ТВС, где температура оболочек твэлов была максимальной. Максимальный размер ДР «под ключ» равный 244,2 мм наблюдался на ДР7, в районе наибольшего раздутия оболочек твэлов (по сравнению с проектным номинальным размером 235,1 мм).

Расчеты формоизменения ДР ТВС-2006 в процессе МПА. Верификация расчетной модели раздутия оболочек твэлов выполнялась путем моделирования эксперимента по высокотемпературному нагружению УТВС. С точки зрения изменения размеров ДР «под ключ» важным является рассмотрение совместного деформирования твэлов и ДР. Изменение температуры твэлов во время аварии принято для наиболее горячего участка твэльной оболочки. Консервативно принято, что температура ячеек ДР равна температуре оболочек твэлов. Начальный диаметр твэлов принят равным 9,1 мм. Нагружение осуществлялось давлением, прикладываемым к внутренней поверхности твэлов и усилиями на торцах. В результате расчета при проектных и экспериментальных условиях формоизменения ДР для избыточных давлений в твэле от 2-х до 10 МПа получены деформации твэла и ДР. Получено, что в ходе аварии по проектному сценарию не происходит значительного формоизменения ДР, препятствующего процессу выгрузки АЗ после аварии. Так, при избыточном внутреннем давлении под оболочкой твэла, равного 10 МПа, остаточное увеличение размеров «под ключ» ДР ТВС-2006, согласно полученным результатам, составляет порядка 0,06 мм. Результаты использованы в отчётной документации по обоснованию безопасности РУ строящихся АЭС.

## **Выводы**

1. Результаты цикла исследований поперечного изгиба и продольной устойчивости макетов ТВС различных конструкций использованы в конструкторской практике при создании «жёсткой» ТВС, для разработки механизма сопротивления ТВС изгибу и его математического описания, в программах расчёта накопления прогиба ТВС при термомеханических воздействиях в процессе эксплуатации.

2. Исследования термомеханического формоизменения макетов ТВС подтвердили конструкторские решения, обеспечившие гораздо большую стойкость макета ТВС-2М к формоизменению при циклических изменениях температуры, по сравнению УТВС. Стойкость проявилась в прекращении накопления прогиба после 1-3 термоциклов.

3. Статистической обработкой данных по маневренным испытаниям «серийной» ТВС получена модель, которая описывает 96,3 % разброса данных. Это означает, что модель учитывает все основные влияющие факторы, определяющие процесс термомеханического деформирования макета данной конструкции в данных условиях (без моделирования эффектов радиационной и температурной ползучести).

4. В результате испытаний макета ТВС со сварным каркасом на чистый изгиб, созданный перепадом температур на противоположных гранях, получены изгибные деформации со стрелой прогиба в сторону более нагретой грани с размахом перемещений ДР9 9 мм, что соответствует средней чувствительности макета к термоперекоосу между противоположными гранями 13,5 мм/100°С.

5. Испытаниями ТВС в стоячей воде на «застревание» ОРСУЗ показано, что основным критическим параметром, определяющим силу трения и застревание ПС СУЗ, являются не прогиб, а величина, обратная радиусу кривизны тепловыделяющей сборки и количество полуволн изгибной формы ТВС. Т.е. «излом», например в цанговом соединении головки с малой стрелой прогиба, опаснее, чем искривления пучка твэлов по первой форме с большой стрелой прогиба.

6. Испытаниями ТВС на прочность при падении утяжелённого и тяжёлого ПССУЗ обоснованы эффективность конструкторских решений для снижения напряжений в элементах ПС СУЗ, ТВС и обеспечения их ударной и циклической прочности, реализованных в проектах модернизированной и УТВС с утяжелённым до 18,5 кгс ПССУЗ.

7. Трибологические исследования ТВС в некоторой мере стирают «белое пятно» в востребованных знаниях, поскольку в практике проектирования нужно учитывать силы трения. Показано, что эксплуатационные факторы, например, вибрация и образование защитных плёнок значительно снижают силы трения. Эти исследования являются перспективными в плане оптимизации конструкции ТВС.

8. Средние оценки коэффициентов изнашивания образцов оболочек твэлов испытанных в теплоносителе со штатным ВХР в парах с контрообразцами из сплавов 08Х18Н10Т и Э110 равны. А средняя оценка коэффициента износа контрообразцов из нержавеющей стали в 14 раз меньше, чем средняя оценка коэффициента износа контрообразцов из циркониевого сплава Э110.

9. Испытанные образцы узлов сопряжения УТВС с пролетами твэлов по 255 мм обладают значительным запасом износостойкости в наиболее консервативном варианте сопряжения-с зазорами между твэлом и ДР. Эта методика успешно использована для испытаний 8-ми моделей твэлов ТВС-КВАДРАТ и испытаний 4-х моделей ТВС с незакреплёнными твэлами после модернизации с применением современной элементной базы для вибраторов и высокотемпературных пьезоакселерометров.

10. Собственные частоты колебаний ТВС в воздухе определяются изгибной жесткостью и массой ТВС. Полученные экспериментальные оценки и расчётные оценки частот собственных колебаний, выполненные в РИЦ КИ, имели хорошее совпадение.

11. В потоке теплоносителя коэффициенты демпфирования собственных колебаний ТВС возрастают по сравнению с воздухом до 30% от критического.

12. Фреттинг-износ оболочек твэлов в контакте с ДР контролируется механизмом резонансных колебаний твэлов, а не колебаниями ТВС, как двухопорной балки. Резонанс ТВС в потоке воды отсутствует вследствие высокого демпфирования вынужденных колебаний.

13. ТВС является нелинейной динамической системой. При амплитудах ускорения опор свыше  $1 \text{ м/с}^2$  у некоторых конструкций ТВС, испытанных в воздухе резонансные частоты снижались в 2 раза по сравнению с частотами собственных колебаний, а коэффициенты демпфирования увеличивались на порядок. В стоячей воде и в потоке теплоносителя также наблюдается влияние большой амплитуды воздействия на резонансные частоты. Эти результаты были использованы для корректировок расчетных моделей с учётом обнаруженных феноменов.

14. Получены оценки сил удара ТВС о выгородку при МРЗ. По результатам исследований процессов колебаний и удара расчётный линейно-спектральный метод был заменён на метод динамического анализа и верифицированы расчётные программы.

15. Прочность, целостность, работоспособность обоснована испытаниями ТВС на МРЗ 7 баллов обобщённой площадки АЭС-2006. Работоспособность ТВС как части канала регулирования реактивности (КРР) подтверждена временем падения ОР СУЗ, которое, в среднем для двух реакторов АЭС-2006, составило 2,8 с, что не превышает проектной основы 4,0 с. Имитация МРЗ на опорах ТВС и привода СУЗ ШЭМ-3 приводит к увеличению среднего времени падения ОР СУЗ на 0,82 с.

16. Установлены экспериментальные закономерности пространственного и временного распределения давлений теплоносителя по модели ТВС после имитации разрыва трубопровода. Гидродинамическая сила, действующая на ТВС имеет периодический характер с частотой колебаний 170-200 Гц. В зависимости от параметров среды расчетно-экспериментальная оценка максимальной силы, действующей на пучок, находилась в пределах от 16 до 30 кН. Результаты использованы для верификации ПО РАДИУС-3D.

17. Исследованы ускорения, деформации, силы удара при падениях 14 моделей и полномасштабного макета ТВС на жесткое основание, а также на элементы секции бассейна выдержки; исследован механизм деформирования и разрушения деталей моделей и ТВС. Показано, что при вертикальном и горизонтальном падении полномасштабного макета ТВС целостность твэлов деформированного макета не нарушается. Разница расчётных и экспериментальных оценок не превышает 1- 8%. Результаты использованы для верификации ПО LS-DYNA и для расчётов ядерной безопасности при нарушении ТТО с ТВС. Результаты испытаний могут быть использованы для расчётного анализа аварийных ситуаций с облучённым топливом если использовать механические свойства облучённых материалов.

18. Испытания УТВС на температуру выше  $600^\circ \text{C}$  по сценарию, отличающемуся от расчётного значительно большим временем температурного воздействия привели к раздутию оболочек твэлов и увеличению размера ДР «под ключ» вследствие значительно большей скорости ползучести циркониевых сплавов при  $650^\circ \text{C}$ , чем при  $320^\circ \text{C}$  и большего времени нахождения УТВС в перегретом состоянии. Верифицированные на этих экспериментах расчеты ТВС-2006 для проектного сценария МПА показали, что для принятого в сценарии времени протекания аварии с большой течью не происходит значительного формоизменения ДР, препятствующего выгрузке из активной зоны после аварии. Остаточное увеличение размеров «под ключ» ДР ТВС-2006, согласно полученным результатам, составляет порядка 0,06 мм. В ходе аварии не происходит значительного формоизменения ДР, препятствующего процессу выгрузки АЗ после аварии. Результаты использованы в отчётной документации по обоснованию безопасности РУ строящихся АЭС.

## **Обобщающие выводы**

Разработан комплекс методик исследования прочности и целостности ТВС различных конструкций. Результаты исследований использованы в практиках расчётов, конструирования, обоснования всех модификаций ТВС для ВВЭР-1000, АЭС -2006, АЭС ТОИ, разработанных в ОКБ ГП за последние 20 и более лет. Результаты использованы для обоснования соответствия ядерного топлива требованиям нормативных документов Заказчика при воздействии нагрузок и воздействий при НУЭ и ННУЭ.

Обнаружены новые, неизвестные и неучитывавшиеся ранее феномены, результаты, механизмы, характеристики деформирования ТВС в НУЭ и ННУЭ, которые нашли практическое применение.

Результаты использованы в пояснительных записках АО ОКБ ГИДРОПРЕСС к техническим проектам ТВС-2, ТВС-2М, ТВС АЭС-2006, ТВС-ТОИ и тематических отчётах по обоснованию механической прочности ТВС для всех последних технических проектов построенных и строящихся АЭС ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ.

Результаты использованы для верификации расчётных кодов (ТМ ТВС, РАДИУС-3D, FAME, ТЕРЕМОК, РАНДЕВУ, LS-DYNA) и др. Которые применяются в расчетах термомеханического формоизменения отдельной ТВС и ансамбля ТВС в активной зоне реактора при НУЭ, в расчетах на статическую, длительную статическую и длительную циклическую прочность ТВС, в расчетах на устойчивость стержней каркаса и ТВС, в расчётах вибропрочности твэлов, в расчетах на горизонтальное сейсмическое воздействие для ансамбля ТВС в активной зоне, в расчетах формоизменения ТВС и деформаций твэлов в процессе максимальной проектной аварии для ансамбля ТВС в активной зоне, в расчётах деформирования ТВС при нарушении ТТО (падение с высоты) и при МПА.

## **Список литературы**

1. Драгунов Ю.Г., Селезнев А.В., Васильченко И.Н., Кобелев С.Н., Семишкин В.П., Макаров В.В., Афанасьев А.В., Пузанов Д.Н., ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕСТКОСТИ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ НЕОБЛУЧЕННЫХ ТВС ВВЭР-1000, Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2004. № 5.
2. Устименко, А., и др., Механические характеристики тепловыделяющих сборок энергетических реакторов, определяемые в экспериментах на узлах и малых макетах. 2-я Российская конференция «Методы и программное обеспечение расчетов на прочность», Геленджик, с. 102–118, 2002.
3. В.М Троянов, Ю.И.Лихачев, В.И.Фоломеев, Метод расчета продольно-поперечного изгиба бесчехловой ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатационных нагрузках, Ядерная энергетика №2, 2002.
4. И.А. Гущик, В.В. Макаров, А.В. Селезнев, С.Н.Комарова, Расчетно-экспериментальное исследование проходимости гибких стержней в трубчатых каналах в зависимости от деформирования каналов, Сборник РАН, ИМАШ им. А.А. Благонравова, М, 1999.
5. Макаров В.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В., Дроздов Ю.Н., Пучков В.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ И ИЗНОСА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ВОДОВОДЯНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ, 7-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия, 17-20 мая 2011 г.
6. V.V. Makarov, A.V. Afanasyev, I.V. Matvienko, Al.A. Tutnov, Alexander S. Kiselev, Alexey S. Kiselev, S.E. Volkov. WWER FA modal analysis under vibration force and kinematic excitation. Proceedings of the 7th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support Conference, Albena, Bulgaria, September 17-21, 2007. – paper 3A.2.

7. А.В.Афанасьев, В.В.Макаров, И.В.Матвиенко, Экспериментальные исследования собственных и вынужденных колебаний ТВС в потоке теплоносителя, 7-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия, 17-20 мая 2011 г.
8. В.В. Макаров, Ю.В. Егоров, А.В. Афанасьев, И.В. Матвиенко. «Экспериментальные исследования стойкости к фреттинг-износу твэлов ТВС ВВЭР-1000 и ТВС-КВАДРАТ». 11-я международная конференция по топливу ВВЭР. 26.09 – 03.10.2015, г. Варна, Болгария.
9. Dr.Yu.N.Drozdov, Dr. Al.A.Tutnov, Dr. A.A.Tutnov, Dr.E.E.Alexeyev, V.V.Makarov, A.V.Afanasyev, Analytical and experimental studies of fretting-corrosion and vibrations of fuel assemblies of a VVER-1000 water cooled and water moderated power reactor, Topfuel-2006, Salamanka, Spain.
10. V.V. Makarov, A.V. Afanasiev, I.V. Matvienko A.B. Dolgov, S.E. Volkov, Experimental study of FA to core baffles impacts under simulated seismic loadings, TopFuel 2012, Manchester, A0188.
11. Макаров В. В., Лякишев Л. А., Афанасьев А. В., Матвиенко И. В., Пучков М. В., Иванов Д. А., Испытания имитатора ТВС АЭС 2006 с приводом СУЗ ШЭМ-3 на сейсмические воздействия на крупномасштабном стенде, ВАНТ, № 26, 2010г.
12. А.В. Селезнев, В.П. Семишкин, В.В Макаров, А.В. Афанасьев, И.В. Матвиенко, Ю.Н. Дроздов, РЕЗУЛЬТАТЫ ДОРЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ И ИЗНОСА ОБОРУДОВАНИЯ В ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВВЭР, 6-я международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 26-29 мая 2009 г., Подольск, Россия ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».
13. Петкевич П.Г., Абрамов В.В., Юременко В.П., Пиминов В.В., Макаров В.В., Афанасьев А.В. , Верификация расчетных моделей LS-DYNA применительно к задачам анализа деформаций транспортно-технологического оборудования и ТВС, ВАНТ -27, 2010.
14. «Расчетно-экспериментальная оценка возможного формоизменения ТВС-2006 при температурной имитации аварии с потерей теплоносителя», А.В. Афанасьев, В.В Макаров, Матвиенко И.В, Д.Н. Пузанов». 11-я международная конференция по топливу ВВЭР. 26.09 – 03.10.2015, г. Варна, Болгария.