

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический  
Специальность 140404 Атомные электрические станции и установки  
Кафедра Атомных и тепловых электростанций (АТЭС)

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>ДЕФЕКТЫ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ВВЭР И МЕРЫ ПО ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ</b>

УДК 621.039.546

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5001	Толстолицкий Павел Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АТЭС	Кузьмин А.В.	к.т.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Сергейчик С.И.	к.т.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	Плахов А.М.	к.т.н., доцент		

По разделу «Автоматизация технологических процессов»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры автоматизации технологических процессов	Иванова Е.В.	к.ф.-м.н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель кафедры АТЭС	М.А.Вагнер	-		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой атомных и тепловых электростанций	А.С. Матвеев	к.т.н., доцент		

Томск – 2016 г

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Институт Энергетический**

Специальность подготовки **140404 Атомные электрические станции и установки**

Кафедра «Атомных и тепловых электростанций»

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой АТЭС ЭНИН  
А.С. Матвеев

\_\_\_\_\_  
(Подпись)

\_\_\_\_\_  
(Дата)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

<b>дипломной работы</b>
(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
<b>5001</b>	<b>Толстолуцкому Павлу Александровичу</b>

Тема работы:

<b>ДЕФЕКТЫ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ВВЭР И МЕРЫ ПО ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ</b>	
Утверждена приказом директора	№8671/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:

15 января 2016 года

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Моделируется модель осаждения твердых частиц (дебриса) в первом контуре ВВЭР-1000, которая даст возможность для оценки времени осаждения дебриса.</p>
--	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Реакторная установка ВВЭР-1000</li> <li>2. Дефекты тепловыделяющих элементов на АЭС с ВВЭР-1000</li> <li>3. Меры борьбы по устранению дебрис-повреждений твэл на зарубежных и отечественных реакторах типа ВВЭР-1000</li> <li>4. Модель осаждения твердых частиц (дебриса) в первом контуре ВВЭР-1000</li> <li>5. Заключение</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сборочный чертеж реактора ВВЭР-1000</li> <li>2. Функциональная схема системы контроля герметичности оболочек твэл</li> <li>3. Демонстрационный лист по финансовому менеджменту</li> <li>4. Демонстрационный лист модели осаждения дебриса</li> <li>5. Демонстрационный лист дефектов тепловыделяющих элементов</li> </ol>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p><b>Финансовый менеджмент</b></p>	<p><b>Сергейчик С.И., доцент кафедры менеджмента</b></p>
<p><b>Социальная ответственность</b></p>	<p><b>Плахов А.М., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности</b></p>
<p><b>Автоматизация технологических процессов</b></p>	<p><b>Иванова Е.В., доцент кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов</b></p>

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>10 июня 2015 года</p>
--	--------------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АТЭС	Кузьмин А.В.	к.т.н., доцент		10.06.15

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5001	Толстолицкий Павел Александрович		10.06.15

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сложились хорошие предпосылки для развития атомной энергетики, суть которых сводится к тому, что на объектах традиционной энергетики (порядка 80-ти %) практически выработан проектный ресурс и для ввода замещающих мощностей требуется значительные инвестиции, что в свою очередь потребует увеличения тарифов для потребителей по оценкам РАО "ЕЭС России" в 2-3 раза. Так как базовой отраслью страны является электроэнергетика, рост тарифов на электрическую энергию уменьшит темпы экономического роста в России.

Атомная энергетика имеет потенциал увеличения надёжности, безопасности и экономичности эксплуатации, а так же конкурентоспособности на внешнем рынке за счёт проведения технических мероприятий, не требующих значительных инвестиций, а именно[1]:

- увеличение КИУМ до 80-82 %;
- продление срока службы энергоблока на 12-16 лет при условии соблюдения всех требований безопасности;
- внедрение перспективных топливных циклов для современных и вновь вводимых в эксплуатацию блоков;
- уменьшение стоимости проектирующихся АЭС;
- реновации объектов ядерной энергетики (наиболее возможное пользование производственной и социальной инфраструктуры действующих АЭС для строительства новых).

Кроме того, достройка энергоблоков высокой степени строительной готовности и строительство новых энергоблоков на имеющихся площадках требует меньших капитальных вложений по сравнению с блоками такой же мощности тепловых электростанций.

Изменение государственного и общественного устройства России потребовали существенных преобразований в экономике страны. Энергетика,

					<b>ФЮРА. 693100. 001 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10

в том числе и атомная, безусловно, является одной из самых актуальных сфер реформирования.

В последнее время отечественные АЭС работают в новых условиях, порождаемых либерализацией рынка электроэнергии. Это вызывает реструктуризацию всей отрасли производства и распределения электроэнергии, неизбежно затрагивая и ядерно-энергетическую индустрию, включая сектор ядерного топлива. Снижение затрат становится фактором, вынуждающим разрабатывать новые стратегии бизнеса и пересматривать техническую политику с целью приведения в действие имеющихся резервов повышения экономичности. В частности, чтобы понизить стоимость производства электрической энергии, требуется улучшить эксплуатационные свойства топлива и повысить гибкость режима их эксплуатации. Необходимо также обеспечить безопасность ядерного топливного цикла с тем, чтобы гарантировать его приемлемость населением. Постоянно изменяющиеся условия энергетического рынка вынуждают производителей электроэнергии принимать превентивные меры, направленные если не на снижение, то, по крайней мере, на сдерживание роста тарифов в атомной энергетике. Заинтересованность в этом объясняется не только стремлением остаться конкурентоспособным производителем внутри страны, но и пониманием необходимости снижения энергетических затрат при производстве отечественной продукции, как одного из наиболее реальных путей повышения конкурентоспособности российских товаров на международном рынке.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

# 1. ПРОБЛЕМЫ И ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ РАЗВИТИЕМ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ДЕФЕКТАМИ ТВЭЛ В ДИПЛОМНОЙ РАБОТЕ

Стратегией развития атомной энергетики России предусматривается обеспечение безопасности и вместе с тем эффективности функционирования комплекса ядерной энергетики, разработку проектов, которые усовершенствованы АЭС для постройки в XXI веке. Реактор типа ВВЭР это один из главных типов реакторов для АЭС строительство, которого предусмотрено федеральной целевой программой. Безопасность и рентабельность ядерного энергетического реактора во многом зависит в частности от эффективности потребления топлива. Для увеличения эффективности использования топлива нужно обеспечить работоспособность твэлов - топливных элементов с достижением глубокого выгорания топлива в разных вариантах топливных циклов. Для этого нужно моделирование и исследование различных процессов, в частности, термомеханических и теплогидравлических, коррозионно-химических, диффузионных, процессов связанных с перестройкой микроструктуры топлива и газовыделения из него в режиме работы реактора. В итоге моделирования оговоренных выше процессов находят характеристики состояния твэлов в переходных режимах, а так же при нормальных условиях эксплуатации, и во время проектных аварий. Полученные характеристики состояния сравниваются с теплофизическими, коррозионными, деформационными и так далее критериями приемки твэлов. По имеющейся базе данных детерминистических расчетов выполняется проверка указанных критериев приемки параметров состояния твэлов. Чтобы обеспечить безопасную эксплуатацию применяют самые консервативные оценки. Исполнение доли из обозначенных критериев диктуется нормативными документами высшего

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

уровня, а именно, «Правилами ядерной безопасности реакторных установок атомных станций», [2].

В виде (горючего) топлива в российских энергетических реакторах типа ВВЭР применяются таблетки, которые спечены из обогащенного диоксида урана ( $UO_2$ ) и заключены в оболочки из циркониевого сплава. Помимо этого также применяют таблетки, содержащие кроме топлива урана и гадолиний. Применение гадолиния необходимо для снижения, компенсации избыточной положительной реактивности в начале кампании, а так же для продления длительности кампании для выравнивания энерговыделения в активной зоне и оптимизации выгорания топлива. Гадолиний содержат твэлы – твэги, которые от обычных твэлов не отличаются кроме как конструктивно и составом топлива. Газовый зазор, который располагается между оболочкой и топливными таблетками, заполнен инертным газом. Заглушки, которые приварены к оболочке, герметизируют твэл с торцов. Вверху твэла имеется пространство незаполненное топливом – компенсационный объем, где находится фиксирующий элемент. В нижней и верхней решетках каркаса тепловыделяющих сборок, (ТВС) твэги и твэлы закрепляются и поддерживаются в ряде сечений по высоте (ДР), дистанционирующими решетками, зафиксированными на каркасных уголках или на направляющих каналах. [3, 4].

В реакторах разных типов и в частности в реакторе типа ВВЭР при непрерывной работе твэла в квазистационарных режимах анализируются теплофизические процессы, а так же механические [5, 6]:

1. термоупругое расширение оболочки и топлива;
2. ползучесть оболочки и топлива;
3. при выходе твэла на номинальную мощность, при маневрировании мощности, пластическое деформирование оболочки в случае его реализации;

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

4. радиационное доспекание топливных таблеток;
5. распухание топлива;
6. радиационный рост оболочки;
7. под оболочку твэла выделение газообразных продуктов деления;
8. растрескивание и фрагментация топливных таблеток;
9. перестройка микроструктуры топлива;
10. РИМ эффект (дробление исходных зерен и значительный ростом пористости);
11. механическое взаимодействие оболочки с топливным столбом;
12. контактная, молекулярная, излучательная проводимость газового зазора;
13. трещиностойкость и повреждаемость материала оболочки в условиях коррозии под напряжением;
14. Постоянные колебания твэлов вызванные в результате турбулентного движения теплоносителя, пульсацией давления теплоносителя и вибрацией ВКУ (внутри корпусных устройств), в местах соприкосновения оболочек твэлов с дистанционирующей решеткой возможно появление повреждений, как решеток, так и оболочек. Обычно такое повреждение называют фреттинг-повреждением, а сам процесс – фреттинг-коррозией. Значимое значение изучения процесса фреттинг-коррозии проявляется, когда происходит увеличения времени работы ТВС.

Во время изначального выхода твэла на мощность протекают термические процессы расширения топлива, из-за чего происходит, уменьшение радиального зазора между оболочкой и топливом. Когда температура топлива повышается более  $1000^{\circ}\text{C}$ , происходит процесс релаксации напряжений вследствие возникновения термической ползучести. Повышение мощности, происходит с появлением радиальной трещины в топливе [7, 8]. Квазистационарный режим работы реактора характеризует дальнейшую фрагментацию топлива, на начальной стадии доспеканием, а далее распуханием таблеток. Во время этого происходит снижение величины

					<b>ФЮРА. 693100. 001 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

температуры топлива и радиального зазора. Терморadiационная ползучесть оболочки и растрескивание топлива способствует снижению радиального зазора. При выделении газообразных продуктов деления Хе и Кг, появляются препятствия к повышению проводимости снижающегося зазора. При больших выгораниях происходит увеличение интенсивности газовой выделения и образование РИМ-слоя.

Удлинение твэла в процессе его работы происходит под действием механического взаимодействия оболочки с топливом и происходит радиационный рост оболочки под действием облучения. В периоды подъема мощности реактора происходит заметный процесс по удлинению твэла из-за зацепления расширяющегося топлива за оболочку. Из-за зависания фрагментированного топлива во время снижения мощности появляются осевые зазоры между таблетками. Во время длительного срока эксплуатации твэла четырехгодичной и более наблюдается перекрытие радиального зазора и, следовательно, под действием распухающего топлива происходит деформирование оболочки.

Немало важным является вопрос по изучению поведения твэлов в аварийных режимах. Резкое ухудшение теплоотвода от твэла происходит при авариях, при которых происходит потеря теплоносителя. Поэтому к быстрому разогреву оболочек твэлов приводит остаточное энерговыделение и уменьшению предела текучести материала оболочек. При разгерметизации контура происходит снижение давления в активной зоне, тем временем при разогреве твэла давление под оболочкой твэла возрастает. Из-за разности давлений газов под оболочкой твэла и теплоносителем происходит появление растягивающихся напряжений в оболочке и при достижении определенной температуры наблюдается ее сильное вздутие за счет вязких деформаций и пластических. При увеличении диаметров твэлов при их вздутии блокируется проходное сечение кассеты, а также наблюдается разрушение оболочки твэлов и выброс активных продуктов деления в контур реактора.

Обратная ситуация может произойти при внезапном повышении тепловой нагрузки в твэлах (реактивная авария). Внезапное повышение энерговыделения в топливе никак не редко проходит с мгновенным выделением газообразных продуктов деления под оболочку. Давление газов при этом под оболочкой твэла может оказаться меньше давления теплоносителя, и может вызвать обжатие топливного столба оболочкой. Если имеются существенные осевые зазоры на топливном столбе, то возможна разгерметизация оболочки и схлопывание в области этих зазоров. При аварии с потерей теплоносителя тоже наблюдается схлопывание оболочки. Если при аварии не снижается давление в контуре реактора, или снижается медленно, степень окисления водяным паром тоже влияет на состояние оболочек твэлов. Повреждение оболочек из  $Zr+1\%Nb$  сопровождаются локальным повреждением в месте деформирования, это показали экспериментальные изучения, при этом деформации имеют все шансы быть как осесимметричными, так и несимметричными. Актуальной задачей является определение деформации оболочки, так как на локальное гидравлическое сопротивление форма вздутия оказывает существенное влияние.

На основе расчетно-экспериментальных изучений поведения прочностных, теплофизических и деформационных характеристик топлива и оболочки проводятся обоснования надежности твэлов, а также коррозионное поведение оболочки в разных режимах работы реакторов, причем расчетный анализ занимает основной объем работ. Исполнение установленных критериев приемки контролируются во время проведения обоснования безопасной эксплуатации топливных элементов. От значительного числа параметров зависят поведения топливных элементов в процессе эксплуатации. При изготовлении обозначенных в надлежащих документах значения характеристик могут иметь заблаговременно установленные допуски. С помощью детерминистических методов с использованием соответствующих расчетных кодов проверяется выполнение установленных критериев безопасности, в которых для снабжения безопасной эксплуатации

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

применяются самые консервативные оценки. Для этого определяют такие значения характеристик, которые отвечают этим консервативным оценкам. Впрочем, само такое консервативное сочетание характеристик действительно имеет возможность обладать совсем маленькой возможностью реализации, а время от времени и совсем никак не может быть, в противном случае твэл имеет все шансы не пройти испытание при его производстве. Повышение консерватизма при расчетах уменьшает зону дозволяемых характеристик работающего реактора и снижает его возможности по глубине выгорания, по уровню мощности, по величинам допустимых скачков мощности. Значит, имеется интерес применения вероятностного анализа при моделировании поведения топливных элементов при всевозможных допустимых значениях начальных характеристик. Наибольшие значения критериев приемки составлены с наибольшей степенью консервативности. Поэтому, с помощью некоторых вероятностных функций при проведении исследовательских вычислений, так же могут быть показаны критерии приемки. Представляется занимательным проанализировать выполнение критериев приемки на основе вероятностного подхода. На основе детерминистического подхода должно проводиться обоснование самих расчетных. Но доказать ту либо другую степень консерватизма применяемого детерминистического подхода вероятностными методами имеет большую вероятность. Кроме этого, вероятностные методы имеют все шансы использоваться как исследовательский инструмент, позволяющий обнаружить воздействие, которое оказывает конкретные начальные характеристики твэлов на расчетные параметры при моделировании поведения твэлов в разнообразных режимах эксплуатации. Итогом вероятностного подхода при моделировании поведения топливных элементов считается не только лишь указание границ вероятных значений, которые имеют все шансы брать на себя теплофизические, прочностные и деформационные характеристики топливных элементов при разных возможных сочетаниях начальных характеристик, но и указание вероятностей реализации этих значений. Так,

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

не считая самого факта невыполнения или выполнения какого-либо критерия безопасности, имеет возможность указываться вероятность такого финала.

Кроме рассмотрения прочностных и термодинамических поведений твэлов, при обосновании их работоспособности, надлежит уделять интерес рассмотрению вопросов связанных с фреттинг-коррозией. В атомной энергетике фреттинг-коррозия первый раз была найдена на дистанционирующей решетке твэла PRTR (США) [9] вследствие вибрации и относительного перемещения элементов конструкции. Из-за турбулентности потока и пульсаций давления теплоносителя часто появляется вибрация. К концу 1970-х – истоку 1980-х годов была удачно решена проблема повышения ресурса срока службы ТВС из-за фреттинг-коррозии, путем исключения относительных перемещений твэла и решетки [10]. С тем, что произошло увеличение срока службы, и надежности ТВС в настоящее время появился практический интерес к изучению фреттинг-коррозии. Защита от фреттинг-коррозии с помощью обычных конструктивных решений, предложенных раньше, уже исчерпана, и требуют новые решения.

Эффективный метод исследования фреттинг-коррозии считается сочетание лабораторных экспериментов с расчетными методами моделирования динамики ТВС в активной зоне для определения стойкости металла. Дефекты, вызванные фреттинг-коррозией, очень сильно зависят от эксплуатационных и конструктивных характеристик [11]:

- геометрических и физических свойств узла сопряжения твэл–решетка (геометрия контакта, величина зазора–натяга, площадь соприкосновения и состояние трущихся поверхностей, объемная и поверхностная прочность материалов, динамический коэффициент трения, толщина оксидной пленки на трущихся поверхностях и др.);
- давление в области контакта;
- амплитуды виброускорения и виброперемещения;
- частоты вибрационных колебаний.

Как следует, методики моделирования поведения ТВС, твэлов и дистанционирующих решеток обязаны быть нацелены на расчет данных характеристик.

Для прогнозирования радиоактивного загрязнения теплоносителя и поведения твэлов после разгерметизации разработаны модели и расчетные коды, которые совершенствуются по мере накопления экспериментальных данных. Предварительно установлены критерии допустимого количества негерметичных твэлов в активной зоне и критерии возможности продолжения эксплуатации или досрочной выгрузки ТВС с негерметичными твэлами. Однако к настоящему времени количество исследованных негерметичных твэлов ВВЭР незначительно, соответственно мало данных по их состоянию. Существующие критерии необходимо уточнять по мере накопления результатов послереакторных исследований негерметичных твэлов.

Для уменьшения количества случаев разгерметизации необходимо установление их причин и принятие соответствующих мер. В этом плане наиболее полная и достоверная информация может быть получена в результате послереакторных материаловедческих исследований. К настоящему времени проведены исследования 10-ти ТВС ВВЭР-1000, в каждой ТВС был расположен один негерметичный твэл со средним выгоранием топлива от 13 до 42 МВт·сут/кгU.

Установлено, что в 60% случаев сквозное повреждение оболочек происходит за счет взаимодействия с посторонними предметами (debris), попадающими в пучок твэлов из теплоносителя (эксплуатационная причина); два случая разгерметизации произошли за счет фреттинг-коррозии при взаимодействии твэлов друг с другом, однако коренная причина раскрепления нижнего конца одного из них не установлена; два твэла (20%) разгерметизировались по технологической причине – внутреннее гидрирование оболочки.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Дебрис-дефекты оболочек по сечению ТВС распределены случайным образом, а по высоте регистрируются, преимущественно, в районе опорной решетки пучка или под нижними дистанционирующими решетками. В твэлах с внутренним гидрированием дефекты распределены, практически, по всей высоте, при этом не представляется возможным отделить первичные дефекты от вторичных. Разгерметизация твэлов по механизму фреттинг-коррозии произошла вблизи нижней решетки.

При эксплуатации негерметичных твэлов ВВЭР в оболочках могут образоваться вторичные дефекты вследствие локального гидрирования. Время между образованием первичного и вторичного дефекта меньше, чем длительность топливной кампании. В твэлах ВВЭР-1000 участки вторичного гидрирования оболочек удалены от первичных дефектов, как правило, на расстояние 2500-3000 мм и часто вплотную примыкают к верхним сварным соединениям.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

## 2. РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА ВВЭР-1000

### 2.1. Описание первого контура ВВЭР-1000

Составной частью энергоблока АЭС является реакторная установка с реактором ВВЭР-1000 совместно с турбогенератором использующиеся для производства электроэнергии в базовом режиме.

Контур, где через активную зону с рабочим давлением циркулирует теплоноситель, называется первым контуром, включая систему (КД) компенсации давления. ( Рисунок 1).

Предназначение первого контура это циркуляция теплоносителя и передача тепла, которое, выделилось в активной зоне (а.з.) реактора, воде второго контура в парогенераторах с целью генерации пара во втором контуре для турбоагрегата. После на турбоагрегате происходит преобразование пара, а именно, тепловой энергии пара в электрическую энергию.

В водо-водяном ядерном реакторе роль замедлителя нейтронов для активной зоны играет теплоноситель, для жидкостного управления реактивностью ядерного реактора применяют раствор борной кислоты, также от активной зоны реактора отводит тепло. Контур находится под большим давлением, чтобы теплоноситель не кипел при проектных параметрах. Первый контур имеет рабочее давление которое составляет  $160 \text{ кгс/см}^2$ . Первый контур является герметичным и замкнутым, он также может выполнять функции барьера, мешающего выходу продуктов деления.

Первой контур сам по себе является третьим из четырех барьеров, мешающих проникнуть продуктам деления в окружающую среду. Другими оставшимися барьерами мешающими распространиться продуктам деления в окружающую среду служат:

- оболочка ТВЭЛ;

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

- топливная матрица;
- герметичное ограждение локализующих систем безопасности.

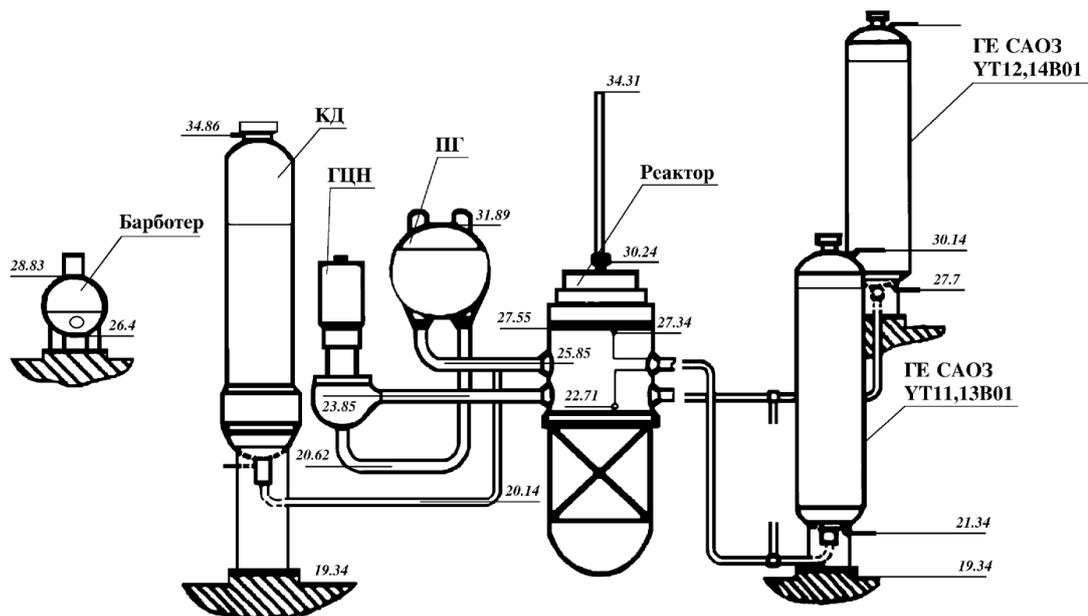


Рисунок 1 – Упрощенная схема I контура реактора ВВЭР-1000 с указанием высотных отметок

Важным барьером безопасности является первый контур, так как при его отказе пропадает один из барьеров, но и образуются негативные условия работы для остальных барьеров: системы локализации ТВЭЛОВ. Первый контур обязан иметь при авариях и аварийных ситуациях, очень надежную стабильность к различным воздействиям.

В составе первого контура ВВЭР-1000 находятся следующие объекты:

- 4-е циркуляционные петли, которые включают главные циркуляционные трубопроводы 990×70, ГЦН, парогенератор в части, содержащей теплоноситель I контура (теплообменные трубки и коллектора);
- система (КД) компенсации (объема) давления теплоносителя;
- реактор;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

- системы нормальной эксплуатации и систем безопасности содержащие трубопроводы, которые присоединены к первому контуру – до первой запорной арматуры.

Полный геометрический объем первого контура составляет 370 м<sup>3</sup>. В состав включается следующее:

- объем реактора – 110 м<sup>3</sup>;
- полный объем КД – 79 м<sup>3</sup>;
- объем парогенераторов – 21×4 = 84 м<sup>3</sup>;
- объем улиток ГЦН – 3×4 = 12 м<sup>3</sup>;
- объем трубопроводов ГЦК – 21×4 = 48 м<sup>3</sup>;
- объем трубопроводов КД и САОЗ – 5 м<sup>3</sup>.

При работе ГЦН теплоноситель направляется от главного циркуляционного насоса через входные патрубки, затем направляется по кольцевому зазору вниз между шахтой и корпусом, потом через отверстия в опорной части конструкции шахты направляется вверх вдоль (ТВС) тепловыделяющих сборок, это в режиме принудительной циркуляции теплоносителя первого контура. В межтрубное пространство блока защитных труб (БЗТ) выходит нагретый теплоноситель из головок ТВС и через перфорированную обечайку блока и шахты отводится по выходным патрубкам в парогенератор из реактора. В режиме ЕЦ можно осуществить расхолаживание реактора, так как расположение его по отметкам и компоновка оборудования первого контура это позволяют. В режимах с отключением всех главных циркуляционных насосов проектом реакторной установки с ВВЭР-1000 предусмотрено для остановленного реактора применение ЕЦ теплоносителя первого контура для охлаждения активной зоны.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

## 2.2. Конструкция реактора ВВЭР-1000

Реакторная установка имеет модернизированный серийный ядерный реактор ВВЭР-1000 корпусного типа с водой под давлением. Предназначение реактора ВВЭР-1000 нужно для того чтобы выработать тепловую энергию полученную за счет цепной реакции деления атомных ядер.

Реактор выполнен в виде вертикального цилиндрического корпуса с эллиптическим дном, внутри которого разместилась активная зона (АЗ) и (ВКУ) внутри корпусные устройства. Верху реактор закрыт герметично крышкой с установленными на ней органами регулирования и привода механизмов, защиты реактора и патрубки для вывода кабелей датчиков внутриреакторного контроля. Шпильки крепят крышку к корпусу.

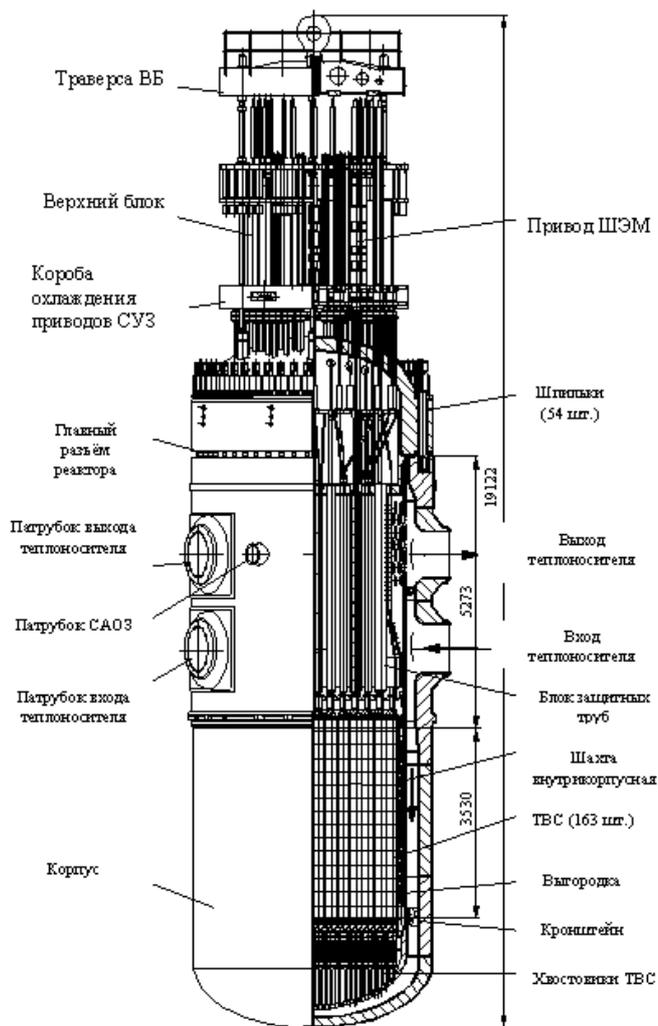


Рисунок 2 – Реактор ВВЭР-1000

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА. 693100. 001 ПЗ

Лист

24

Вверху корпуса есть патрубки для отвода и подвода теплоносителя (на петлю по два патрубка), размещенные в два ряда, кроме этого есть патрубки для аварийного подвода теплоносителя при разгерметизации первого контура. Использование в конструкции реактора ВВЭР-1000 корпуса с двухрядным месторасположением патрубков, позволяет убавить габариты корпуса сообразно патрубкам в сопоставлении с однорядным, а еще упрощает схему циркуляции теплоносителя в реакторе из-за разделения потока теплоносителя сплошной кольцевой перегородкой.

По замкнутым петлям первого контура, а их четыре осуществляется принудительное циркулирование теплоносителя за счет работы главных циркуляционных насосов (ГЦН). Теплоноситель первого контура, охлажденный в парогенераторах, направляется в реактор через нижний ряд напорных патрубков, проходит вниз по кольцевому зазору между корпусом и шахтой внутри корпусной, затем через перфорированное эллиптическое дно и опорные трубы шахты входит в ТВС. Затем из ТВС через нижнюю перфорированную плиту БЗТ теплоноситель оказывается в межтрубном пространстве БЗТ, в кольцевом зазоре между корпусом и шахтой через четыре верхних выходных патрубка корпуса выходит из реактора.

При обесточении или отключении всех ГЦН от активной зоны РУ формируется теплоотвод в первом контуре за счет образования естественной циркуляции теплоносителя (согласно данным ОКБ "Гидропресс" на естественной циркуляции возможен теплоотвод до 10% мощности реакторной установки в отсутствии превышения максимальных характеристик ТВС).

Нагрев воды в активной зоне реализуется за счет тепловыделения топливных элементов (ТВЭЛ). ТВЭЛы наполнены низко обогащенной двуокисью урана-235. В наше время на всех атомных станциях с реактором ВВЭР-1000 реализован трехлетний топливный цикл, то есть каждая ТВС

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

применяется в реакторе в течение трех кампаний, а на кое-каких энергоблоках осуществляется четырёхгодичный топливный цикл.

С помощью перемещения органов регулирования с твердым поглотителем, осуществляется регулирование реактивности и тепловыделения, а также изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе.

В бетонной шахте устанавливается реактор, которая обеспечивает надежное укрепление реактора и биологической защите. Безопасную остановку и расхолаживание гарантирует конструкция реактора и способ его закрепление, а еще системы защиты и управления (СУЗ) и аварийного охлаждения зоны (САОЗ), даже при предельном расчетном землетрясении 9 баллов по шкале MSK-64, также гарантируют прочность конструкции при одновременном действии нагрузок, стимулированных максимальным расчетным землетрясением и разрывом трубопровода Ду-850 по полному сечению.

Назначенное время работы оборудования реактора не менее 30 лет. Расчетный время работы крышки и корпуса реактора – 40 лет. Состоит реактор из следующих главных узлов:

- корпус;
- внутри корпусные устройства (выгородка, шахта, бзт);
- активная зона;
- верхний блок;
- каналы внутриреакторных измерений;
- блок электроразводок.

В таблице 1 приведены основные технические характеристики реактора.

Таблица 1 – Основные технические характеристики реактора

Параметры	Значения
Тепловая мощность, номинальная, МВт	3000
Тепловая мощность, предельно допустимая (с учетом неточности измерения, пределов регулирования, установок защиты и динамической погрешности), МВт	3210
Давление теплоносителя на выходе из реактора, кгс/см <sup>2</sup>	160+3
Количество ТВС в активной зоне реактора, штук из них с ПЭЛ	163 61
Расход теплоносителя через реактор при работе четырёх ГЦН, м <sup>3</sup> /час	84800
Скорость теплоносителя первого контура, м/сек: между ТВЭЛ в патрубках реактора	5,6 10
Среднее время прохождения теплоносителя через реактор при работе четырёх ГЦН, сек	4
Средний подогрев теплоносителя в реакторе °С через реактор при работе четырёх ГЦН, сек	30
Температура теплоносителя на входе в реактор в любой из работающих петель °С, не более	286±2
Тепловые потери от корпуса реактора и чехлов СУЗ в горячем состоянии, КВт	700
Максимальная разность температур в петле первого контура при работе четырёх ГЦН	30,5
Средняя объемная энергонапряженность активной зоны КВт/литр	115
Количество каналов измерения энерговыделения в АЗ реактора, штук	64
Количество каналов измерения температуры в реакторе, штук из них под крышкой реактора	98 3
Рабочая скорость перемещения регулирующих стержней (кластеров) в режиме регулирования, см/сек	2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА. 693100. 001 ПЗ

Лист

27

Продолжение таблицы 1

Наружный диаметр корпуса реактора, мм	4535
Высота реактора в сборе, мм	19137
Площадь поверхности корпуса реактора, м <sup>2</sup>	200
Объем первого контура (без КД), м <sup>3</sup>	300
Объем активной зоны, м <sup>3</sup>	29,2

### 3. ДЕФЕКТЫ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

#### НА АЭС С ВВЭР-1000

Случаи разгерметизации серийных ТВС наблюдались в течение всего периода эксплуатации ВВЭР. Эксплуатация в активной зоне ТВС с негерметичными твэлами приводит к росту активности теплоносителя и иным неблагоприятным последствиям негативно влияющим на безопасность и экономичность АЭС. Несмотря на постоянное снижение уровня разгерметизации твэлов на реакторах ВВЭР-1000, досрочные выгрузки негерметичных ТВС еще случаются. Поэтому актуальным является установление причин, приводящих к разгерметизации ТВС, а так же выявление основных закономерностей состояния и поведения твэлов в зависимости от характера повреждений и длительности эксплуатации после разгерметизации.

#### 3.1. Современные дефекты твэлов

На начальных этапах развития атомной энергетики операторы сталкивались с большим числом инцидентов, связанных с повреждениями ТВС и твэл. По мере совершенствования этих важнейших элементов ядерного реактора изменялись и причины их повреждений. Некоторые дефекты практически сошли к минимуму, например, появляющиеся вследствие взаимодействия топлива с оболочкой или полученные при производстве и транспортировке твэлов. В то же время нужно отметить, что увеличилась доля повреждений твэлов из-за дебрис-частиц и вследствие прочих неопознанных факторов. Также наблюдается множество «вторичных» дефектов, формирующихся под воздействием теплоносителя, проникшего внутрь твэла через первичный дефект: хрупкий отрыв заглушек, сквозные визуально регистрируемые трещины, а также гидридные пятна, распространяющиеся на наружную поверхность оболочек.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

В результате послереакторных обследований облученных ТВС как в наши дни [12], так и по материалам исследования дефектов на ранних этапах развития атомной энергетики [13,14], выделяют следующие механизмы повреждения твэл [15, 16]:

- фреттинг -коррозия (Fretting-corrosion);
- повреждения из-за дебрис-частиц (Debris fretting);
- отложения продуктов коррозии контура на поверхности твэлов (CILC – Cruel-Induced-Localized-Corrosion);
- изменение формы и размеров твэл при эксплуатации (Rod bow);
- вторичные дефекты.

Рассмотрим основные особенности этих дефектов.

### 3.2. Фреттинг-коррозия

Это разрушение (Fretting-corrosion) проявляется чаще всего в таких узлах сборок, где под действием потока теплоносителя и вибраций возможны взаимные перемещения твэлов скрепляющих деталей или направляющих элементов. В таких случаях происходит непрерывное истирание поверхности оксидных плёнок, в том числе при участии абразивных твёрдых частиц в контуре, причём процесс не сводится только к простому истиранию слоев, а сопровождается усилением локальной коррозии оболочки на большие глубины. Типичный вид разрушений поверхности твэлов в области дистанционирующих решеток вследствие фреттинг-коррозии, представлен на рисунке 3. Фреттинг – это один из основных эффектов, вызываемых вибрацией конструкции, детали которого имеют возможность относительного перемещения. В ядерных реакторах вибрации всегда возникают вследствие турбулентности потока и пульсаций давления теплоносителя. Таким образом, причиной фреттинг-коррозии чаще всего бывает неудачный выбор способа взаимного дистанционирования твэлов (например, использование проволочных колец или навивка на твэлы проволок).

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

Сейчас в большинстве реакторов используется пружинящие пластинчатые решетки, сотовые трубчатые конструкции, практически устранившие такие явления в массовом порядке, хотя при стечении других обстоятельств фреттинг-коррозия встречается и сейчас в реакторах довольно часто. При конструировании твэлов и их сборок учёт всех факторов, в том числе возможного появления фреттинг-коррозии, очень сложен. Обычно требуются полномасштабные, полностью воспроизводящие все условия реакторные испытания новых конструкций. В реакторах PWR и BWR применяются дефлекторы, которые обеспечивают равномерность распределения потоков теплоносителя в сборке. Если дефлекторы смещаются со своих местоположений, то возможно образование перекрестных потоков, усиление вибраций, вызывающих фреттинг-коррозию, другие гидромеханические эффекты. Методы устранения этих явлений - снижение перепадов давления в таких узлах путём совершенствования дефлекторов.

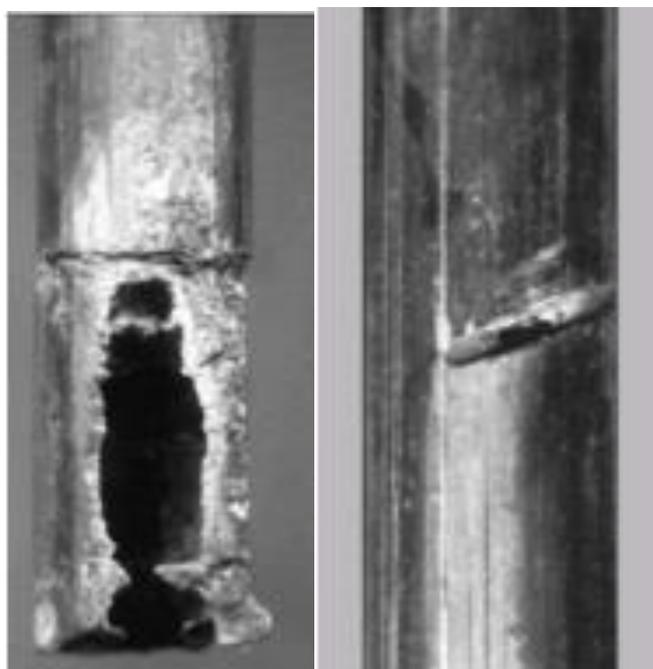


Рисунок 3 – Внешний вид фреттинг-коррозии

### 3.3. Дебризные повреждения

Близко по механизму воздействия на оболочку твэлов фреттинг-коррозии стоит эффект влияния на твэлы мелких твёрдых частиц (дебризов) в теплоносителе, которые могут иметь разное происхождение: это и продукты коррозии материала первого контура, и твёрдые осколки материала керамических фильтров, и остающиеся после ремонта частицы или крупные детали и инструменты. Твёрдые частицы и предметы повреждают оболочку путём создания выбоин, царапин непосредственно путём истирания материала оболочки. Особенно это явление представляет опасность в случае застревания частиц в местах соприкосновения твэлов с дистанционирующими решетками. В этом случае начинают совместно действовать и дебриз-эффекты и фреттинг-коррозия. Такой механизм влияния со стороны теплоносителя на твэлы называется в литературе дебриз-фреттинг-фактор (Debriz-fretting или DF-фактор). Нарушения работоспособности ТВЭЛОВ из-за DF-фактора имеются и в настоящее время при эксплуатации реакторов разных типов.

Дебрис может циркулировать в контуре реактора и зацепиться за топливную сборку. Обычно дебрис застревает между первой дистанционирующей решеткой и твэлами и редко в решетках выше. Дебрис начинает вибрировать в потоке теплоносителя и вызывает эрозию оболочки. Типичное проявление дефекта можно увидеть на рисунке 4.

В отличие от других дефектов, данный вид не зависит от мощности реактора. Дефект может появиться в любой ТВС, в зависимости от размера.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

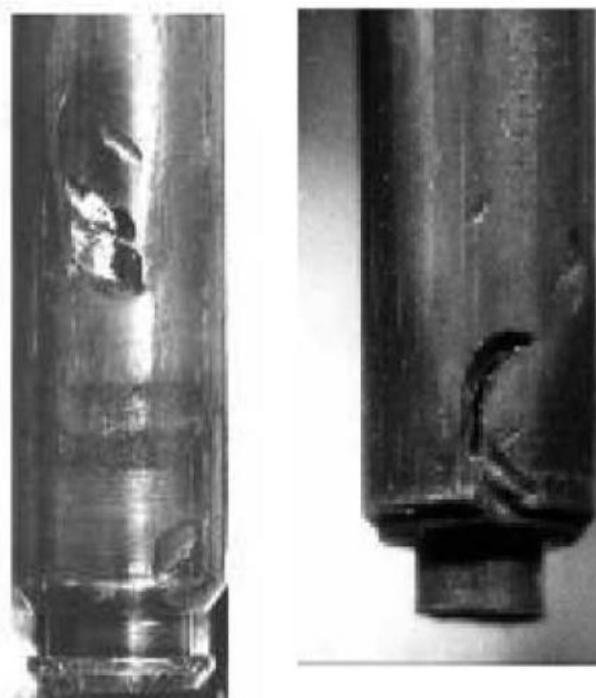


Рисунок 4 – Пример дебрис дефекта

### 3.4. Отложения продуктов коррозии контура на поверхности твэлов

Продукты коррозии, циркулирующие в теплоносителе, оседают на оболочках в местах с большим тепловыделением и, накапливаясь в некоторых случаях в значительных количествах, уменьшают теплопередачу, увеличивают локальную температуру оболочки и ускоряют коррозию.

Определяющими характер механизма повреждения являются совокупность эксплуатационных химических и теплотехнических режимов [16]:

- 1) локальная температура и варианты теплопередачи твэла;
- 2) величина и степень недогретого пузырькового кипения на топливе PWR и скорость отложения на топливе;
- 3) основные источники продуктов коррозии;
- 4) воздействие химического состава теплоносителя на коррозию и отложения;
- 5) скорость коррозии материала оболочки

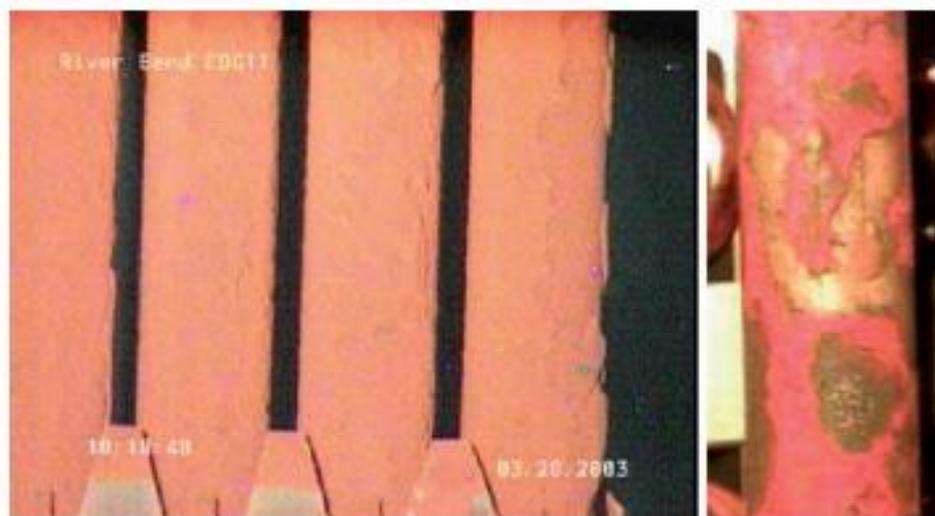


Рисунок 5 – Отложения на оболочке твэла

### 3.5. Изменение формы и размеров твэла при эксплуатации

Под действием совокупности температурных, механических и радиационных факторов в ходе эксплуатации происходит изменение геометрических параметров твэла.

Выделяют следующие нарушения [17]:

- смятие оболочек;
- эффект удлинения твэлов.

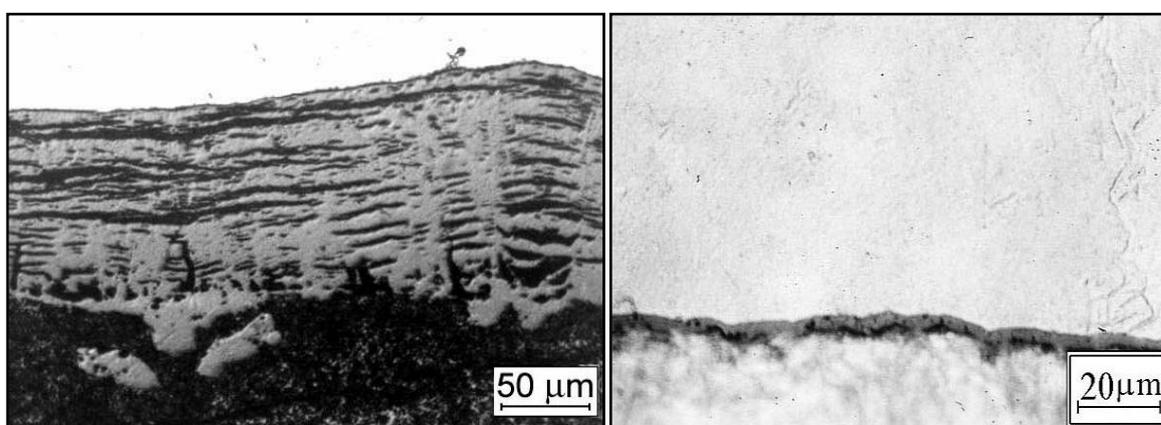
Определяющими характер процесса изменения геометрических параметров твэла причинами являются [16, 17]:

- радиационное уплотнение таблеток;
- форма торцов таблетки;
- исходные производственные допуски в оболочках на овальность и на эксцентриситет;
- технология производства оболочек твэлов – режимы холодной деформации и термообработки;
- давление теплоносителя.

### 3.6. Вторичные дефекты твэл

После образования первичного дефекта теплоноситель проникает под оболочку твэла и вызывает интенсивное окисление внутренней поверхности оболочки.

Окисление внутренней поверхности оболочки проникающим теплоносителем максимально около первичного дефекта (Рисунок 6). При увеличении расстояния до первичного дефекта окисление внутренней поверхности оболочки значительно уменьшается.



а)

б)

Рисунок 6 – Окисление внутренней поверхности оболочки

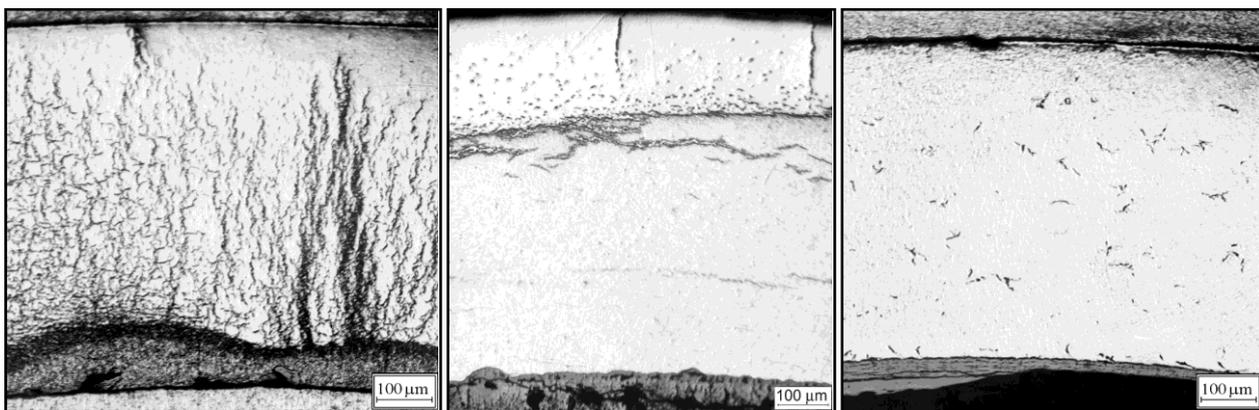
а) в сечении дебрис-дефекта б) на расстоянии 750 мм от него

Через окисленную поверхность не может проходить гидрирование оболочки (Рисунок 7), т.е. под действием градиента температуры, водород диффундирует к внешней более холодной стенке оболочки. Возникающие радиальные гидриды значительно снижают пластичность оболочки. Гидрирование наблюдается обычно на расстоянии 2500-3000 мм от первичного дефекта. Это связано тем, что повышается отношение водорода к воде/пару под оболочкой твэла и снижению толщины окисной пленки. В этих условиях давление распухающего топлива может вызвать сквозные

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

трещины в оболочке (вторичные дефекты). Гидриды могут наблюдаться типа «санбест» или сплошных слоев гидрида.

Термин «вторичный дефект» означает, что оболочка повреждается под действием теплоносителя, который проник в твэл через первичный дефект. Основным процессом является локальное гидрирование оболочки с образованием гидридов, проходящих через всю толщину стенки оболочки, что вызывает охрупчивание и снижение пластичности оболочки.



а)

б)

Рисунок 7 – Гидрирование оболочки негерметичного твэла

а) около вторичного дефекта и б) вдали от него.

Вторичные дефекты оболочки образуются на значительном расстоянии от первичного сквозного повреждения оболочки. Любое напряжение, действующее на оболочку в этом месте может вызвать трещину. Примеры вторичных дефектов можно увидеть на Рисунке 8

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

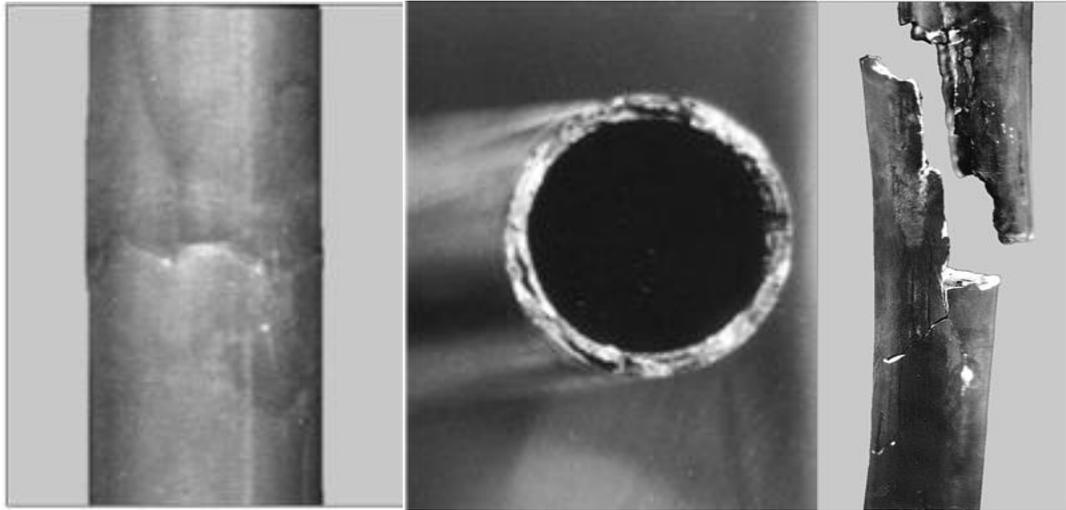


Рисунок 8 – Примеры вторичных дефектов твэл

Стадии процесса образования вторичных дефектов (Рисунок 9):

- 1) Разгерметизация оболочки (первичный дефект).
- 2) Заполнение твэла паром.
- 3) Окисление топлива и оболочки (наработка водорода).
- 4) Увеличение отношения  $H/H_2O$  в зазоре.
- 5) Гидрирование (охрупчивание) оболочки вдали от первичного дефекта.
- 6) Образование вторичного дефекта (трещин) в оболочке.

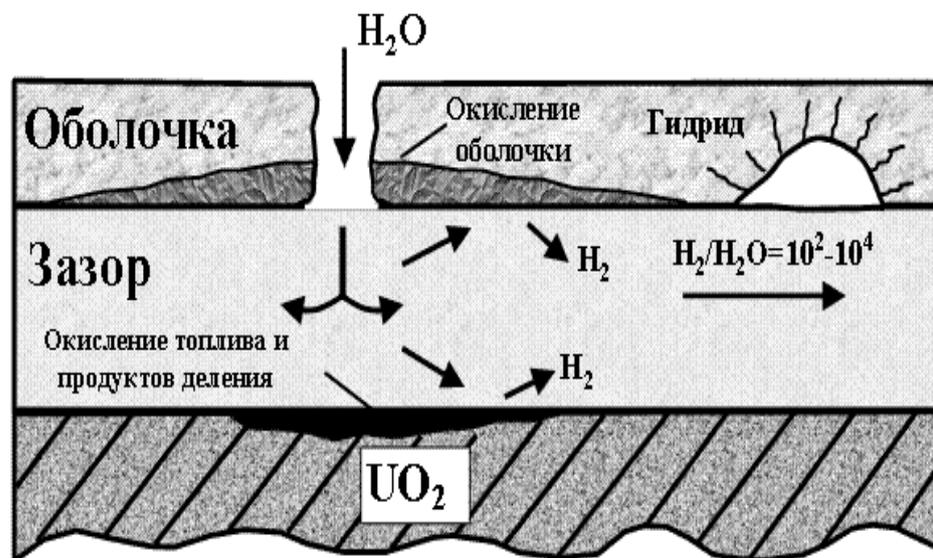


Рисунок 9 – Схема образования вторичных дефектов

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

### 3.7. Статистика по причинам повреждения ТВЭЛОВ

Работы по улучшению эксплуатационных характеристик топлива отразились крупномасштабными работами зарубежных производителей топлива и эксплуатирующих АЭС предприятий [15,16]:

- Robust Fuel Program в 1998 г;
- Fuel Integrity Initiative в 2005 г.

По данным, накопленным на АЭС США за 2000-2010 гг., наиболее часто наблюдаются повреждения топлива, обусловленные такими причинами, как коррозия и отложения продуктов коррозии, фреттинг, взаимодействие топлива и оболочки (рисунке 10) [15]

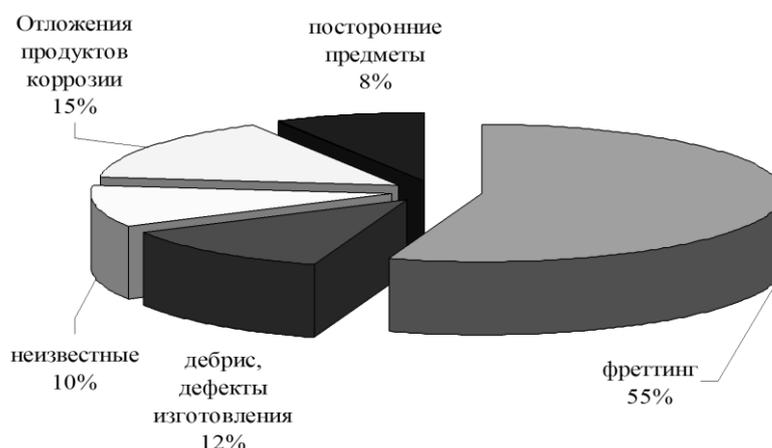


Рисунок 10 – Причины повреждения ТВЭЛОВ на АЭС США 2000-2010гг

В результате функционирования «Программы по надежности топлива» (Fuel Reliability Programm – FRP, Electrical Power Research Institute - EPRI) создана база данных по надежности топлива (Fuel Reliability Database - FRED). По статистике среди механизмов повреждений топлива на PWR США (69 энергоблоков) в период 2000-2008 гг. 77% составляет фреттинг решетка-ТВЭЛ (GTRF), 12% - повреждение из-за дебрис-частиц, дефектов изготовления, коррозии и взаимодействия таблетки с оболочкой (PCI), 11% определены как «неизвестные». По данным FRED, в других странах процент повреждений топлива PWR из-за GTRF (34%) меньше, чем в США. Это различие объясняется быстрым внедрением более стойких топливных

проектов и меньшим числом АЭС с жесткими условиями потока теплоносителя. Повреждения из-за коррозии/отложений, дебрис-частиц и PCI составляют 33%, из-за дефектов изготовления - 8%. Не малый интерес представляет то, что частота повреждений топлива выше на PWR по отношению к BWR. В США отношение PWR к BWR составляет почти 2:1 (BWR -35, PWR -69 энергоблоков), отношение же общего числа PWR с поврежденными ТВС к таким же BWR около 2,6.

Известна статистика, накопленная в ходе эксплуатации реакторов компании EdF (Électricité de France) в период 1997-2008 гг., представлена на рисунке 11 [16].

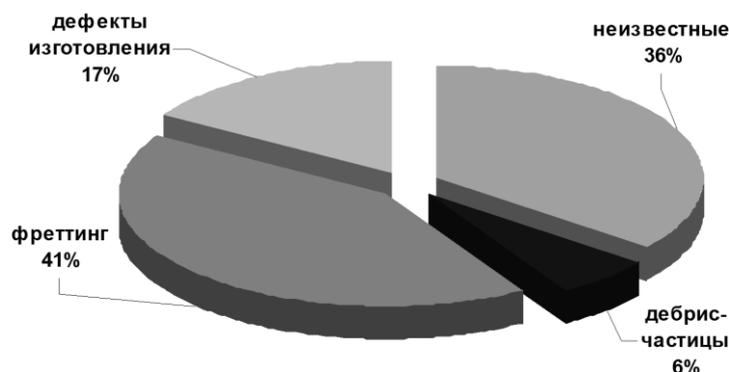


Рисунок 11 – Причины повреждения твэлов на АЭС EdF 1997-2009

Известно так же о результатах после реакторных исследований ТВС в отечественной практике (Рисунок 12) [16].

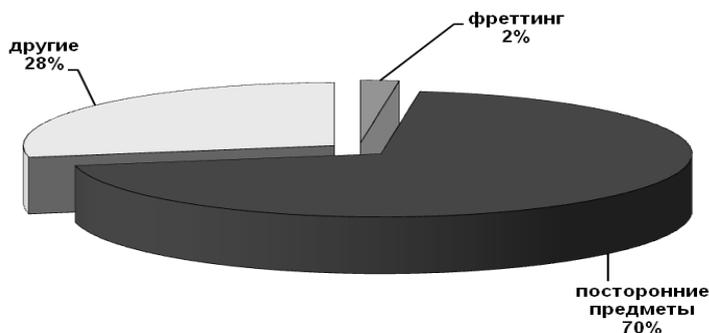


Рисунок 12 – Причины повреждения твэлов на АЭС ВВЭР и РБМК

Высокая конкуренция на энергетическом рынке усиливала внимание энергетических фирм к вопросам надежности топлива АЭС. В результате, на протяжении последних десятилетий шло непрерывное накопление экспериментальных результатов по эксплуатации топлива в стационарных и переходных режимах.

Дальнейшие работы по повышению выгорания и эффективности эксплуатации АЭС предъявляют новые требования к технологиям производства и эксплуатации топлива, чтобы поддерживать, а возможно и снизить уровень его повреждаемости, который существует на сегодняшний день.

Работы по увеличению кампании топлива и номинальной мощности ВВЭР за счет снижения консервативных запасов [18], [19] приводят к необходимости детального рассмотрения стандартных эксплуатационных режимов и операций. В качестве примера приведем гидравлические испытания первого контура, которые проводятся каждый год под давлением 18 МПа и раз в четыре года под давлением 25 МПа, в то время как номинальное давление в 1-м контуре варьируется в пределах 15-16 МПа. В условия испытаний попадают как вновь загруженные в реактор, так и проработавшие в реакторе несколько кампаний тепловыделяющие сборки, отличающиеся по прочностным характеристикам. Отличия обусловлены последствиями облучения и числом переменных тепловых нагрузок, увеличивающиеся с повышением выгорания топлива [11].

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

#### 4. МЕРЫ БОРЬБЫ ПО УСТРАНЕНИЮ ДЕБРИС ПОВРЕЖДЕНИЙ ТВЭЛ НА ЗАРУБЕЖНЫХ РЕАКТОРАХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР-1000

В настоящее время дебрис является основной причиной разгерметизации тепловыделяющих элементов, как на зарубежных реакторах, так и в отечественной практике эксплуатации ВВЭР. Для исключения данного типа повреждений твэлов были предложены следующие корректирующие мероприятия.

1. Прежде всего, для предотвращения попадания дебриса в контур реактора следует повышать культуру проведения монтажных и ремонтных работ с тем, чтобы не допускать попадания строительного, монтажного и ремонтного мусора в первый контур. Если дебрис находится в контуре реактора, то вывести его очень проблематично, а полностью отчистить от него в случае застревания в местах контакта решетки и твэла практически невозможно. Это побуждает формирование вторичных дефектов и может сократить сроки пребывания твэла в реакторе с соответствующим экономическим ущербом.

2. В настоящее время поставлена задача увеличить конкурентоспособность АЭС. Для достижения поставленной задачи необходимо увеличение кампании топлива до 4,5 лет и достижение выгорания 60 МВт/(сут×кгU<sup>235</sup>) и больше. С целью повышения надежности работы блока в условиях увеличения кампании и выгорания топлива, необходимо разрабатывать новые проекты твэл и ТВС с повышенной стойкостью к дебрис повреждениям и фреттинг коррозии. Для этого необходимы исследования в области совершенствования оболочек твэл, дистанционирующих решеток и конструкции ТВС, а так же проводить испытания новых проектов в условиях максимально приближенных к реальным условиям.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

3. Так как дебрис, не смотря на все предпринимаемые меры, все равно попадает в контур реактора, следует устанавливать антидебрисные фильтры (АДФ) в хвостовик ТВС, с целью задержки дебриса на входе в ТВС. На данный момент времени существуют проекты ТВС с данной опцией, примером является ТВС-АЛЬФА. Разработкой и внедрением АДФ в России начали заниматься относительно недавно, поэтому есть смысл развиваться в этом направлении.

#### 4.1. Зарубежные проекты

В прошлом, поставщики топлива разрабатывали проекты топлива с сопротивлением к дебрис износу. Тем не менее, эффективность этих механизмов защиты не завершена, и проекты находятся на стадии разработок.

Для ТВС PWR, Westinghouse ввели хвостовик с дебрис фильтром (ДФ) [20]. По сравнению с прошлым хвостовиком ТВС, хвостовик с ДФ имел отверстия, для входа теплоносителя, меньшего диаметра. Но это не устранило проблему полностью. Для увеличения эффективности фильтрующего устройства была добавлена дополнительная защитная сетка.[21] Эта сетка располагалась вверху хвостовика ТВС и была спроектирована так, что бы пересекать отверстия ДФ.

Для ТВС PWR, Areva разработали хвостовик TRAPPER™ (капкан), оснащенный ДФ (рисунок 13), для топлива AFA-3G, а так же Robust Fuelguard (надежный защитник топлива) (рисунок 14), который обеспечивает лучшую защиту топлива от дебриса. Он представляет собой параллельный колонны искривленных лопастей размещенных таким образом, чтобы поток проходил только через защитную сетку. Такой дизайн обеспечивает очень эффективную фильтрацию дебриса с минимальным сопротивлением для потока теплоносителя. Большой дебрис не проходит из-за близкого расположения лопастей, а длинный и тонкий дебрис не проходит благодаря

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

искривлениям лопастей. Аналогичный проект разработан и для реакторов BWR.

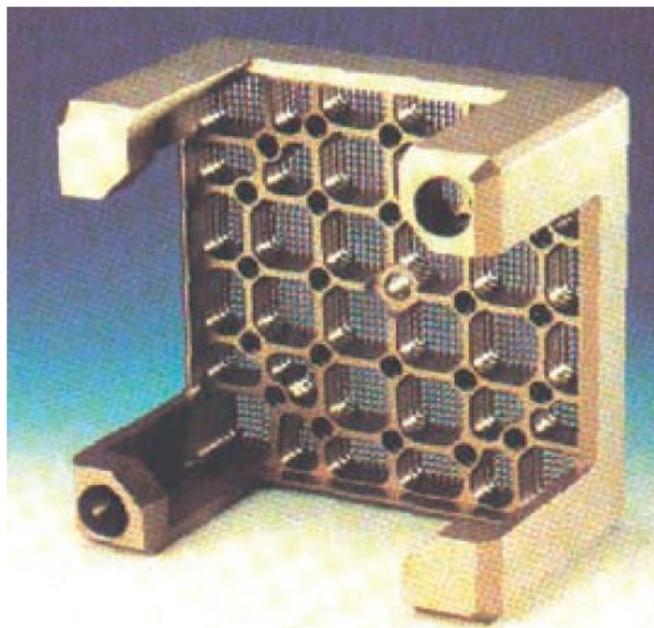


Рисунок 13 – Хвостовик TRAPPER™ от AREVA



Рисунок 14 – Robust Fuelguard АДФ фирмы AREVA для реактора PWR

Дебрис дефекты являются основной причиной повреждения топлива в BWR. Практика показала, что проекты ТВС 10×10 подвержены к повреждению дебрисом больше, чем 9×9 и 8×8, несмотря на реализацию в них ДФ. Проект 10×10 имеет наименьший промежуток для прохода

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

теплоносителя, что повышает шанс зацепиться у дебриса. К тому же, в этом проекте есть две зоны с большим числом ДР, это места где скорость потока достаточна для возникновения фреттинг коррозии. GNF достигли устранения дебрис дефектов в некоторых фронтах. [22] Они разработали испытательный стенд в Японии и Канаде, что бы лучше понять и разработать дебрис защиту. Тесты привели к созданию дебрис фильтра Defender (защитник). Тесты показали, что любые частицы прошедшие через ДФ в конечном счете застрянут и повредят пучок твэлов. Таким образом, цель ДФ Defender была фильтровать дебрис любого размера, который может нанести повреждения твэлам.

С целью уменьшения случаев дебрис повреждений топлива для топлива BWR 10×10, Westinghouse разработали улучшенный ДФ- TripleWave (три волны), показанный на рисунке 15. Новый проект нацелен на устранения дебриса имеющего длинную и тонкую форму. Тесты показали, что ДФ Triplewave снижает попадание в сборку дебриса в два раза, а так же эти фильтры не создают большого сопротивления даже с большим количеством застрявшего в них дебриса.

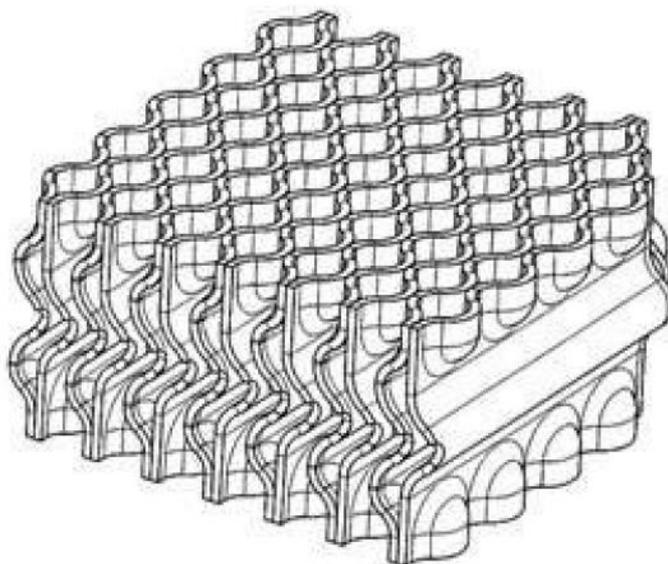


Рисунок 15 – Дебрис фильтр TripleWave от фирмы Westinghouse для реактора BWR

## 4.2. Отечественные проекты с применением антидебрисного фильтра

Одним из способов уменьшения числа отказов ТВС по причине повреждения оболочек твэлов дебрисом является установка специальных устройств – антидебрисных фильтров, предотвращающих попадание посторонних частиц определенной геометрии в ТВС при эксплуатации.

Антидебрисный фильтр должен удовлетворять ряду требований, а именно:

- фильтр должен обладать приемлемым гидравлическим сопротивлением;
- фильтр, как минимум, не должен «ухудшать» поле скоростей на входе в «активную зону» ТВС;
- фильтр не должен засоряться в условиях «залпового» вброса в ТВС дебриса;
- конструкция фильтра должна логично сочетаться с конструкцией ТВС.

На рисунке 16 представлены отечественные антидебрисные фильтры, изготовленные в ОАО «МСЗ» и МИФИ, а именно конусообразный кольцевой, с размером в свету 2 мм, плоский “кольцевой”, с размером в свету 2 мм, плоский “жалюзийный” с размером в свету 0 мм, плоский “решетчатый”, с размером в свету 2,5 x 5,0 мм.

Кроме применения антидебрисных фильтров, рассматривались варианты защиты ТВС от дебриса с помощью:

- дополнительной модернизированной ДР, совмещенной с опорной решеткой;
- измененного положения шплинтовочной проволоки в опорной решетке.

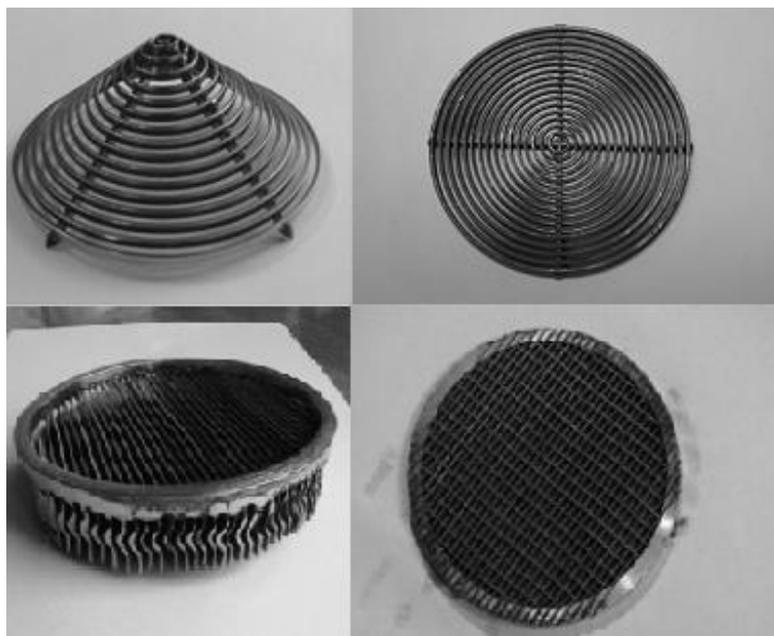


Рисунок 16 – Внешний вид антидебрисных фильтров изготовленные в ОАО «МСЗ» и МИФИ

Результаты испытаний различных конструкций АДФ показали, что нет однозначно “плохих” или “хороших” конструкций АДФ, каждая конструкция имеет свои преимущества и свои недостатки. Тем не менее, для последующих использований были выбраны АДФ конического типа, которые должны быть определенным образом доработаны.

На стенде «Фильтр-1» были представлены антидебрисные фильтры, представляющие собой конус, собранный из колец различного диаметра с толщиной стенки 1,5 мм, изготовленных из нержавеющей стали. Фильтры отличались между собой шириной кольцевых щелей (размерами в свету) 1,15; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0 мм и соответственно высотой конической части (конуса), рисунок 17.

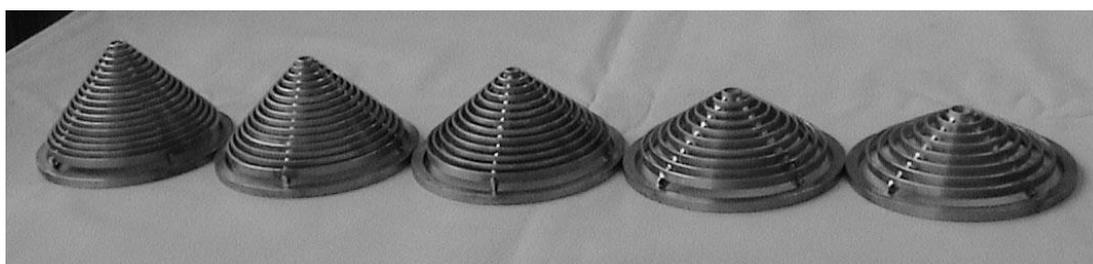


Рисунок 17 – Внешний вид антидебрисных фильтров

Наименее эффективным по задержанию дебриса оказался фильтр с размером в свету 4,0 мм, а наиболее эффективным по задержанию дебриса фильтр с размерам в свету (2,0 мм), это видно из таблицы 2.

Таблица 2 – Эффективность антидебрисных фильтров

Исполнение макета ТВС	Эффективность задержания дебриса, %	Перепад давления, кПа	Перепад давления на фильтре, кПа
Макет ТВС с фильтром 4 мм	44,7	39	8
Макет ТВС с фильтром 2 мм	68,9	52	21

В настоящее время на Калининской АЭС используется антидебрисные фильтры, а именно в составе ТВСА-12 PLUS. В цилиндрической части хвостовика, под опорными ребрами, устанавливается антидебрисный фильтр. АДФ представляет собой перфорированный стальной диск диаметром 224 мм и толщиной 5 мм. Отверстия в диске выполнены в виде V-образных пазов. Ширина сквозных пазов составляет 2 мм, ширина перемычек между пазами 0,6 мм.

В составе ТВСА-12 PLUS, кроме сварной конструкции хвостовика, предусмотрено применение хвостовика, изготовленного из литой заготовки.

Конструкция данного хвостовика представлена на рисунке 18. В отличие от сварной конструкции, в данном хвостовике образующие опору ребра, выполненные в виде шести пересекающихся лучей, отливаются совместно с корпусом как одно целое. АДФ литого хвостовика состоит из 6 пластин, привариваемых к хвостовику при помощи сварки. Геометрия пазов в АДФ хвостовика из литой заготовки аналогична геометрии пазов АДФ сварного хвостовика.

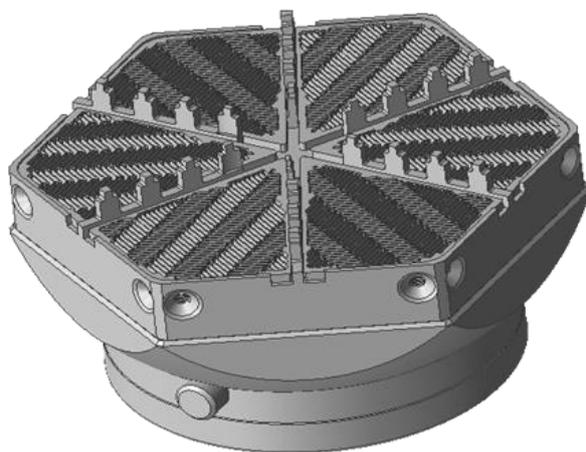


Рисунок 18 – Хвостовик ТВСА-12 PLUS с унифицированной головкой  
(вариант из литой заготовки)

### Заключение

На примере зарубежных проектов ТВС (смотри рисунки выше) можно увидеть, что конструкции АДФ имеют более сложную форму, чем на отечественных. По рекомендации [12] можно посоветовать установку над АДФ сетки, которая пересекала бы проходные сечения АДФ, для повышения вероятности застревания дебриса в хвостовике ТВС.

Полученные результаты имеют важное практическое значение с точки зрения решения вопроса об оснащении ТВС ВВЭР антидебрисными фильтрами. Целесообразно проведение дальнейших работ по совершенствованию конструкций антидебрисных фильтров, направленных на:

- повышение антидебрисной эффективности фильтров;
- несущественное увеличение гидравлического сопротивления ТВС, оснащенных фильтрами;
- сглаживание поля скоростей теплоносителя на входе в сборку; выполнение одновременно нескольких функций (крепления твэлов в опорной решетке, антивибрационного устройства, регулятора полей скоростей теплоносителя и т.д.).

## 5. МОДЕЛЬ ОСАЖДЕНИЯ ДЕБРИСА В ПЕРВОМ КОНТУРЕ

### ВВЭР-1000

В ходе выполнения ремонтных и монтажных работ, невзирая на используемые мероприятия обеспечения чистоты, в первый контур поступают разные предметы, в том числе шлифующих кругов электросварочная масса, куски проволоки и т.д. Данные инородные предметы, получившие обозначение дебрис-частиц, имеют сильную угрозу, связанную с формированием различных повреждений тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), которые приводят к нарушению радиационного барьера – оболочки ТВЭЛ. Острота вопроса защиты от дебриса акцентирует внимание практика эксплуатации иностранных станций с реакторами типа BWR и PWR. Долевое участие данного повреждения в нарушении целостности оболочки (рисунок 19) согласно сведениям МАГАТЭ крайне существенен [12].

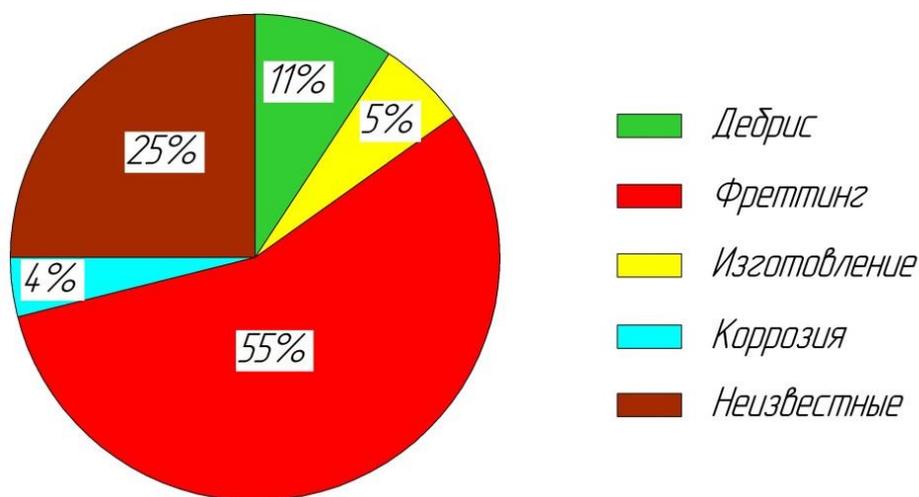


Рисунок 19 – Глобальная статистика дефекта горючего (топлива) PWR за время с 1994-2006 гг

Делая, упор на опытность иностранных атомных станций в российских ВВЭР начали применять антидебрисные фильтры, мешающие попаданию частиц диаметром больше 2 мм в активную зону.

Дебрис-частицы диаметром меньше 2-х мм обладают потенциальной опасностью появления и формирования прочих видов повреждений, вернее всего коррозии. Прежде было установлено, что при фреттинг-коррозии возникают зазоры между твэлом и дистанционирующей решеткой. Это увеличивает вероятность застревания дебриса, что в свою очередь ведет к созданию дебрис дефекта твэла. В течение 3-4 микрокампаний в реакторе в центре активной зоны располагаться тепловыделяющие сборки (ТВС), а кроме того и в иных более нагруженных условиях. Длительное пребывание тепловыделяющей сборки в реакторе и вибрации твэл в потоке теплоносителя приводят к нарушению дистанционирования твэла. Вследствие того что нарушается начальное состояние дистанционирующих решеток повышается вероятность осаждения дебриса либо его застревание.

В каком месте, контура могут осесть и какое длительное время они смогут циркулировать по первому контуру – эти вопросы представляют безусловную заинтересованность.

### 5.1 Постановка задачи

Принятые допущения:

1. Приблизительный размер рассматриваемых дебрис-частиц – 2мм
2. Частицы имеют форму сферы
3. Частицы распределяются равномерно по всей площади поперечного сечения трубы
4. Наиболее возможными местами вывода частиц из воды первого контура станем полагать задержку частиц в зоне контактов твэл и дистанционирующих решеток, а кроме того увод частиц в систему продувки-подпитки первого контура
5. Приняв в качестве наименьшей площади входа в полость, способной «принять» частичку дебриса в 6 мм<sup>2</sup> (выступы дистанционирующих решеток, сформировавшиеся из-за температурных расширений и колебаний твэл)

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Пусть, вначале концентрация дебрис-частиц равна  $C_{\partial}(0)$ ,  $\text{кг}^{-1}$  в первом контуре в текущей микрокампании.

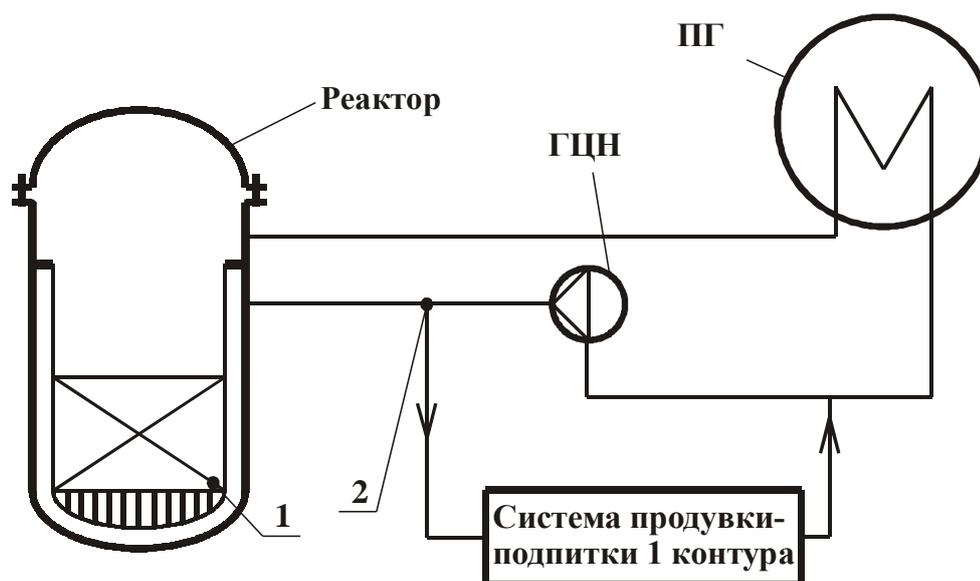


Рисунок 20 – Упрощенная схема первого контура:

Запишем уравнение изменения концентрации дебриса в 1-м контуре в виде:

$$V \cdot \gamma \cdot \frac{dC_{\partial}(t)}{dt} = -P_{\text{а.з.}} \cdot q \cdot \gamma \cdot C_{\partial}(t) - P_{\text{пр}} \cdot q \cdot \gamma \cdot C_{\partial}(t), \quad (1)$$

где

$V$  – объем первого контура,  $\text{м}^3$ ;

$\gamma$  – плотность теплоносителя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$q$  – объемный расход,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$C_{\partial}(t)$  – концентрация частиц в теплоносителе,  $\text{частиц}/\text{кг}$ ;

$P_{\text{а.з.}}$ ,  $P_{\text{пр}}$  – вероятности оседания дебриса в активной зоне и в системе продувки-подпитки.

Несомненное допущение, установленное в уравнении (1), имеет связь с постоянством температуры теплоносителя по всему контуру. С учетом этого преобразуем (1) к виду:

$$\frac{dC_{\partial}(t)}{dt} = -P_{\text{аз}} \cdot \frac{q_{\text{аз}}}{V} \cdot C_{\partial}(t) - P_{\text{пр}} \cdot \frac{q_{\text{пр}}}{V} \cdot C_{\partial}(t)$$

или

$$\frac{dC_{\delta}(t)}{dt} = -\left(\frac{P_{аз} \cdot q_{аз} + P_{np} \cdot q_{np}}{V}\right) \cdot C_{\delta}(t) \quad (2)$$

Очевидно после интегрирования уравнения (2) получим закон выведения дебриса из теплоносителя:

$$C_{\delta}(t) = C_{\delta}(0) \cdot \exp\left(-\frac{P_{аз} \cdot q_{аз} + P_{np} \cdot q_{np}}{V} \cdot t\right) \quad (3)$$

Используя проектные данные, определим необходимые конструктивные и технологические параметры.

При работе четырех главных циркуляционных насосов, согласно [23] расход теплоносителя через реактор ВВЭР-1000, равен  $q_{аз} = 84000 \text{ м}^3/\text{час}$ . Система продувки-подпитки первого контура [24] при всех возможных режимах работы блока гарантирует значение продувки-подпитки в границах 20...60 т/час, что отвечает значениям объемного расхода  $q_{np} = 25...80 \text{ м}^3/\text{час}$ . Примем объем  $V$  теплоносителя в первом контуре равным  $300 \text{ м}^3$  [25].

Сделаем оценку вероятности попадания частицы дебриса в раскрывающуюся по какой-либо причине полость возле контакта с дистанционирующей решеткой и оболочки твэла. ТВС включает 312 твэлов и 15 дистанционирующих решеток. Проходное сечение тепловыделяющей сборки согласно сведениям [26] составляет  $0,0247 \text{ м}^2$ . Выбрав в качестве наименьшей площади входа в полость, способной «принять» частицу дебриса в  $6 \text{ мм}^2$ , определим  $P_{аз} = 10^{-7}$ .

При условии сильно турбулизированного течения воды возле отвода в систему продувки-подпитки проникновение в неё частички дебриса носит вероятностный характер. В случае если принять, то, что внутренний диаметр главного трубопровода равен  $D_2 = 850 \text{ мм}$  и внутренний диаметр

отводящего трубопровода в систему продувки-подпитки равен  $d_{np}=109$  мм [5].

Тогда вероятность попадания дебриса в систему можно определить по формуле:

$$P_{np} = \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{\pi \cdot D_z \cdot d_{np}} = 0,032$$

С учетом последних оценок уравнение (3) запишем в виде:

$$\frac{C_{\partial}(t)}{C_{\partial}(0)} = \exp\left(-\left(282,666 \cdot P_{аз} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot q_{np}\right) \cdot t\right). \quad (4)$$

Графики этой зависимости, представленные на рисунке 21, позволяют провести экспресс-анализ влияния различных эффектов.

На основе полученной формулы можно определить время осаждения дебриса:

$$\ln\left(\frac{C_{\partial}(t)}{C_{\partial}(0)}\right) = \exp\left(-\left(282,666 \cdot P_{аз} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot q_{np}\right) \cdot t\right),$$

$$t = -\frac{\ln\left(\frac{C_{\partial}(t)}{C_{\partial}(0)}\right)}{\left(282,666 \cdot P_{аз} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot q_{np}\right)}$$

Подставим имеющиеся значения в формулу для определения времени осаждения дебриса:

$$t = -\frac{\ln(0,05)}{\left(282,666 \cdot 10^{-7} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot 25\right)} = 1110 \text{ ч}$$

$$t = -\frac{\ln(0,03)}{\left(282,666 \cdot 10^{-7} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot 25\right)} = 1299 \text{ ч}$$

$$t = -\frac{\ln(0,05)}{\left(282,666 \cdot 10^{-7} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot 80\right)} = 350 \text{ ч}$$

$$t = -\frac{\ln(0,03)}{\left(282,666 \cdot 10^{-7} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot 80\right)} = 408,8 \text{ ч}$$

Все варианты расчета сведены в таблице в таблицу 3.

Таблица 3 – Время снижения концентрации дебрис-частиц в первом контуре реактора ВВЭР-1000

$P_{\text{аз}}$	$Q_{\text{пр}}, \text{М}^3/\text{ч}$	$\frac{C_{\text{д}}(t)}{C_{\text{д}}(0)}$	$t, \text{ч}$
$10^{-7}$	25	0,05	1110
		0,03	1299
$10^{-6}$	25	0,05	1014
		0,03	1187
$10^{-5}$	25	0,05	545
		0,03	637,7
$10^{-7}$	80	0,05	350
		0,03	408,8
$10^{-6}$	80	0,05	339,2
		0,03	397
$10^{-5}$	80	0,05	263,4
		0,03	308,2

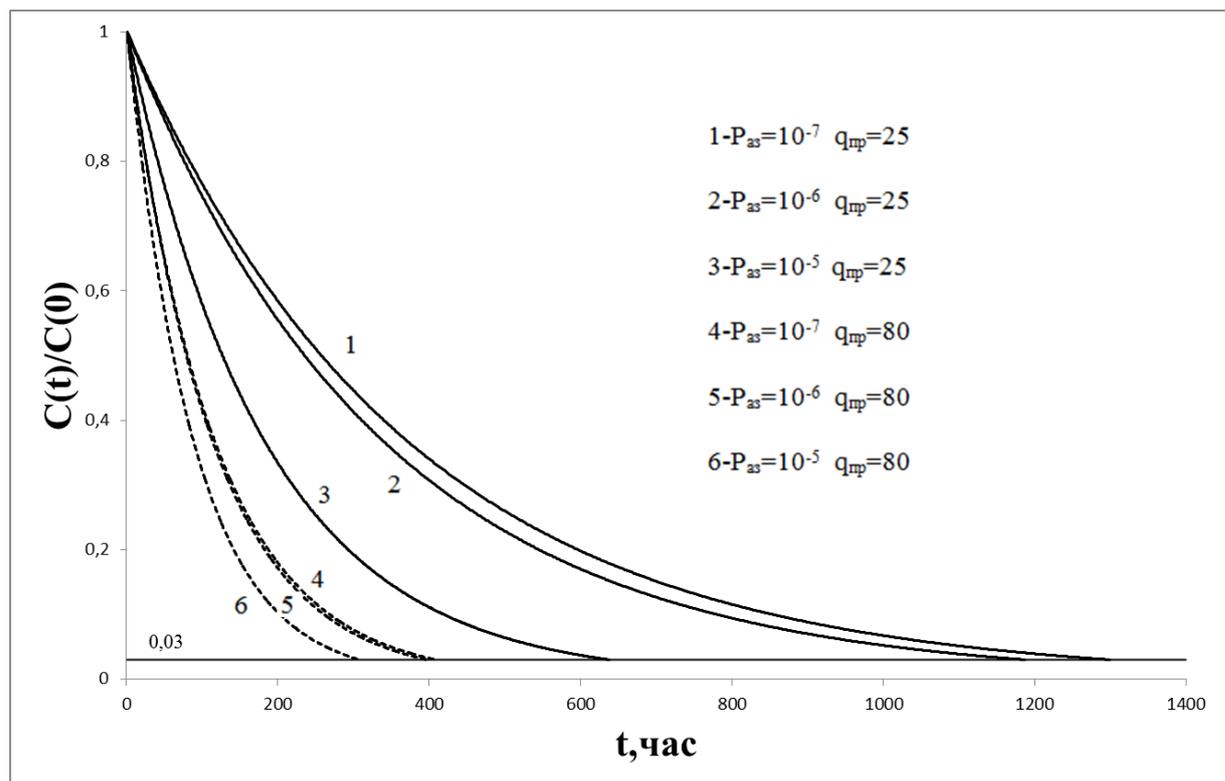


Рисунок 21 – График изменения концентрации дебриса в теплоносителе в зависимости от вероятности осаждения частиц в активной зоне  $P_{аз}$  и величины продувки  $q_{пр}$

Произведем расчет для ВВЭР-1200, так же используя проектные данные, определим необходимые конструктивные и технологические параметры.

При работе четырех главных циркуляционных насосов, согласно [23] расход теплоносителя через реактор ВВЭР-1200, равен  $q_{аз} = 86000 \text{ м}^3/\text{час}$ .

В свою очередь система продувки-подпитки первого контура [24] при всех возможных режимах работы блока гарантирует значение продувки-подпитки, так же как и на ВВЭР-1000 в границах 20...60 т/час, что отвечает значениям объемного расхода  $q_{пр} = 25...80 \text{ м}^3/\text{час}$ . Объем теплоносителя в 1 контуре  $V$ , так же как и на ВВЭР-1000 примем равным  $300 \text{ м}^3$  [25]. В тепловыделяющей сборке (ТВС) находится 312 ТВЭЛОВ и 12 дистанционирующих решеток. Проходное сечение ТВС согласно сведениям [26] составляет  $0,0259 \text{ м}^2$ .

При условии сильно турбулизированного течения воды возле отвода в систему продувки-подпитки проникновение в неё частички дебриса носит вероятностный характер. В случае если принять, то, что внутренний диаметр главного трубопровода равен  $D_2=850$  мм и внутренний диаметр отводящего трубопровода в систему продувки-подпитки равен  $d_{np}=100$  мм [5].

Тогда вероятность попадания дебриса в систему можно определить по формуле:

$$P_{np} = \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot d_{np}} = 0,029.$$

По формуле полученной выше можно определить время осаждения дебриса, с учетом всех изменений:

$$t = - \frac{\ln \left( \frac{C_{\partial}(t)}{C_{\partial}(0)} \right)}{\left( 286,666 \cdot P_{a3} + 9,804 \cdot 10^{-5} \cdot q_{np} \right)},$$

Подставим имеющиеся значения в формулу для определения времени осаждения дебриса:

$$t = - \frac{\ln(0,05)}{\left( 286,666 \cdot 10^{-7} + 9,804 \cdot 10^{-5} \cdot 25 \right)} = 1208 \text{ ч}$$

$$t = - \frac{\ln(0,03)}{\left( 286,666 \cdot 10^{-7} + 9,804 \cdot 10^{-5} \cdot 25 \right)} = 1414 \text{ ч}$$

$$t = - \frac{\ln(0,05)}{\left( 286,666 \cdot 10^{-7} + 9,804 \cdot 10^{-5} \cdot 80 \right)} = 380,5 \text{ ч}$$

$$t = - \frac{\ln(0,03)}{\left( 286,666 \cdot 10^{-7} + 9,804 \cdot 10^{-5} \cdot 80 \right)} = 446 \text{ ч}$$

Все варианты расчета сведены в таблице в таблицу 4.

Таблица 4 – Время снижения концентрации дебрис-частиц в первом контуре реактора ВВЭР-1200

$P_{аз}$	$q_{пр}, M^3/ч$	$\frac{C_d(t)}{C_d(0)}$	$t, ч$
$10^{-7}$	25	0,05	1208
		0,03	1414
$10^{-6}$	25	0,05	1094
		0,03	1281
$10^{-5}$	25	0,05	563,3
		0,03	660
$10^{-7}$	80	0,05	380,5
		0,03	446
$10^{-6}$	80	0,05	368,4
		0,03	431,3
$10^{-5}$	80	0,05	280
		0,03	327,4

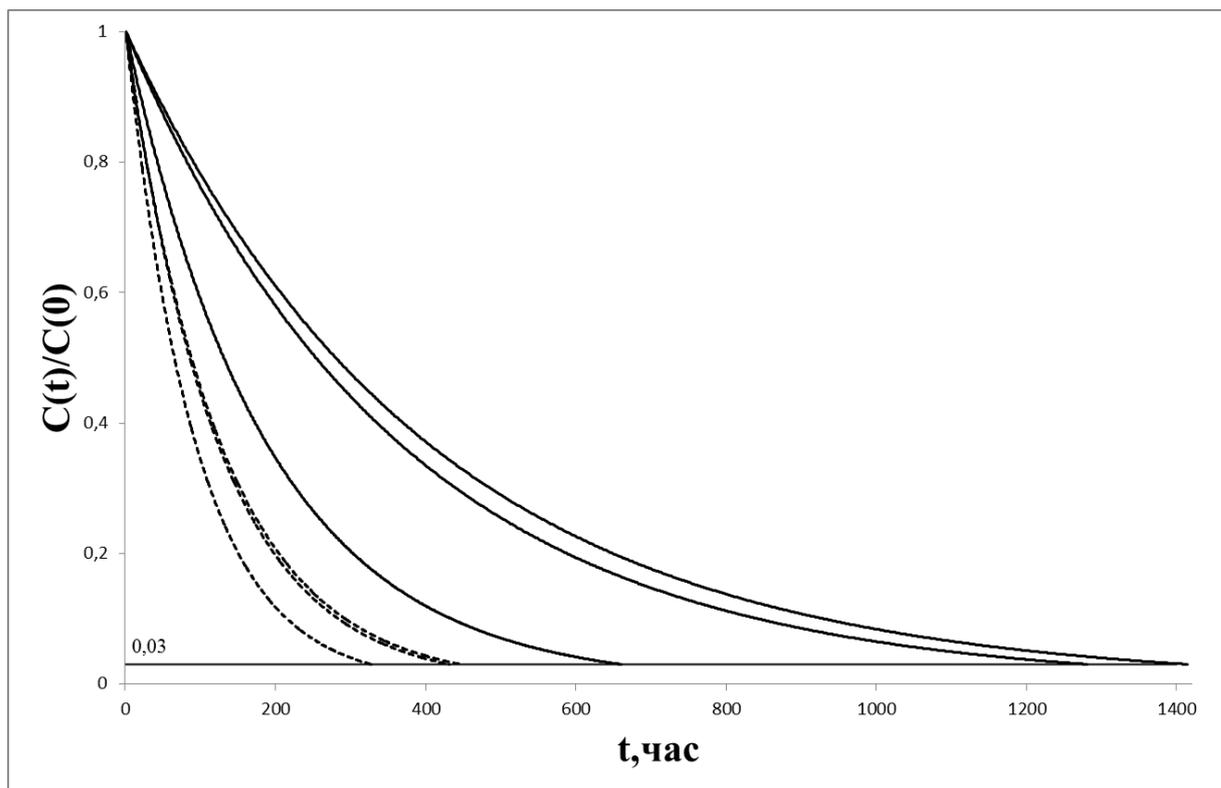


Рисунок 22 – Динамика изменения концентрации дебриса в теплоносителе в зависимости от вероятности осаждения частиц в активной зоне  $P_{аз}$  и величины продувки  $q_{пр}$

Контур, где через активную зону с рабочим давлением циркулирует теплоноситель, называется первым контуром, включая систему (КД) компенсации давления. Так как расчеты выше проводились с учетом того что объем первого контура составлял  $300 \text{ м}^3$  без учета (КД) компенсатора давления а сейчас проведем расчет с учетом (КД) компенсатора давления, тогда полный геометрический объем будет равен  $370 \text{ м}^3$ .

Используя проектные данные, определим необходимые конструктивные и технологические параметры.

При работе четырех главных циркуляционных насосов, согласно [23] расход теплоносителя через реактор ВВЭР-1000, равен  $q_{аз} = 84000 \text{ м}^3/\text{час}$ . Система продувки-подпитки первого контура [24] при всех возможных режимах работы блока гарантирует значение продувки-подпитки в границах  $20 \dots 60 \text{ т/час}$ , что отвечает значениям объемного расхода  $q_{пр} = 25 \dots 80 \text{ м}^3/\text{час}$ . Объем теплоносителя в 1 контуре  $V$  примем равным  $370 \text{ м}^3$  [25].

Сделаем оценку вероятности попадания частицы дебриса в раскрывающуюся по какой-либо причине полость возле контакта с дистанционирующей решеткой и оболочки твэла. ТВС включает 312 твэлов и 15 дистанционирующих решеток. Проходное сечение тепловыделяющей сборки согласно сведениям [26] составляет  $0,0247 \text{ м}^2$ . Выбрав в качестве наименьшей площади входа в полость, способной «принять» частицу дебриса в  $6 \text{ мм}^2$ , определим  $P_{аз} = 10^{-7}$ .

При условии сильно турбулизированного течения воды возле отвода в систему продувки-подпитки проникновение в неё частички дебриса носит вероятностный характер. В случае если принять, то, что внутренний диаметр главного трубопровода равен  $D_2 = 850 \text{ мм}$  и внутренний диаметр отводящего трубопровода в систему продувки-подпитки равен  $d_{пр} = 109 \text{ мм}$  [5].

Тогда вероятность попадания дебриса в систему можно определить по формуле:

$$P_{np} = \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4} / \pi \cdot D_z \cdot d_{np} = 0,032.$$

С учетом последних оценок уравнение (3) запишем в виде:

$$\frac{C_{\partial}(t)}{C_{\partial}(0)} = \exp\left(-\left(282,666 \cdot P_{аз} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot q_{np}\right) \cdot t\right). \quad (4)$$

Графики этой зависимости, представленные на рисунке 23, позволяют провести экспресс-анализ влияния различных эффектов.

На основе полученной формулы можно определить время осаждения дебриса:

$$\ln\left(\frac{C_{\partial}(t)}{C_{\partial}(0)}\right) = \exp\left(-\left(282,666 \cdot P_{аз} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot q_{np}\right) \cdot t\right),$$

$$t = -\ln\left(\frac{C_{\partial}(t)}{C_{\partial}(0)}\right) / \left(282,666 \cdot P_{аз} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot q_{np}\right)$$

Подставим имеющиеся значения в формулу для определения времени осаждения дебриса:

$$t = -\frac{\ln(0,05)}{\left(282,666 \cdot 10^{-7} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot 25\right)} = 1369 \text{ ч}$$

$$t = -\frac{\ln(0,03)}{\left(282,666 \cdot 10^{-7} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot 25\right)} = 1602 \text{ ч}$$

$$t = -\frac{\ln(0,05)}{\left(282,666 \cdot 10^{-7} + 1,066 \cdot 10^{-4} \cdot 80\right)} = 430,758 \text{ ч}$$

Результаты расчета сведены в таблице в таблицу 5.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

Таблица 5 – Время снижения концентрации дебрис-частиц в первом контуре реактора ВВЭР-1000

$P_{аз}$	$q_{пр}, M^3/ч$	$\frac{C_d(t)}{C_d(0)}$	$t, ч$
$10^{-7}$	25	0,05	1369
		0,03	1602
$10^{-6}$	25	0,05	1251
		0,03	1464
$10^{-5}$	25	0,05	671,986
		0,03	786,571
$10^{-7}$	80	0,05	430,758
		0,03	504,21
$10^{-6}$	80	0,05	418,35
		0,03	498,686
$10^{-5}$	80	0,05	324,792
		0,03	380,

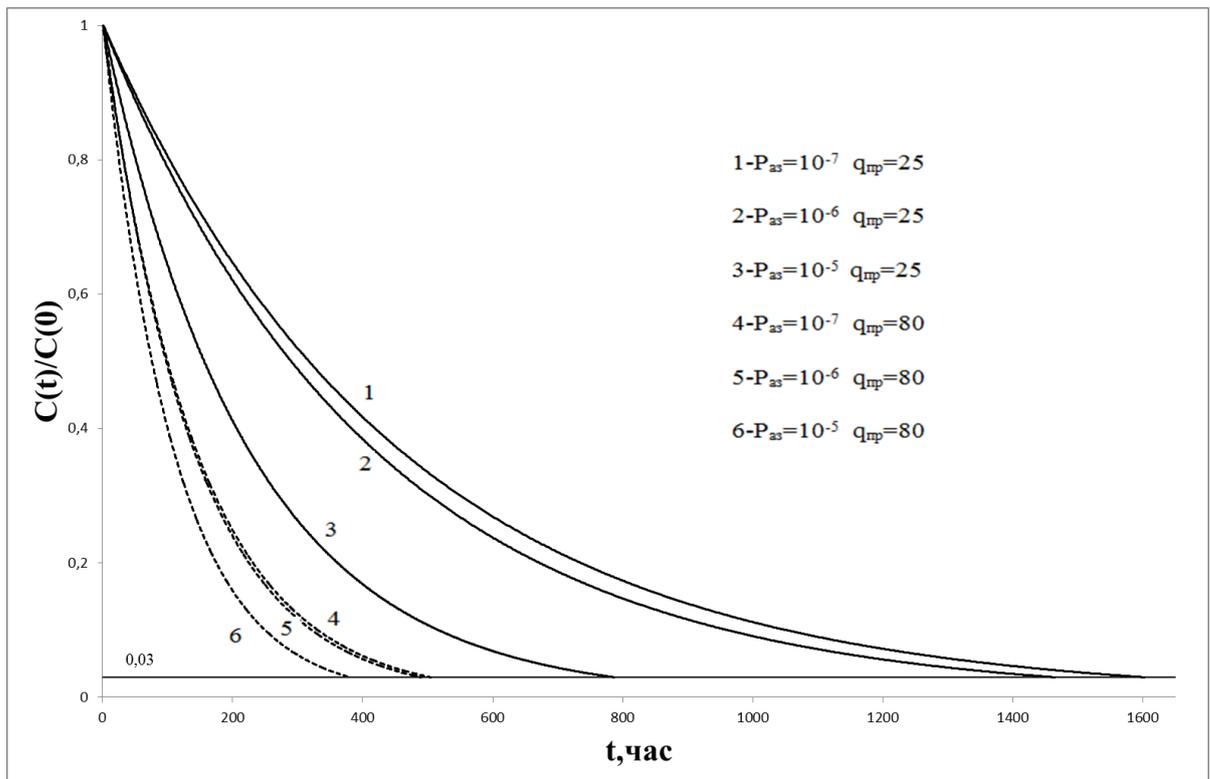


Рисунок 23 – График изменения концентрации дебриса в теплоносителе в зависимости от вероятности осаждения частиц в активной зоне  $P_{аз}$  и величины продувки  $q_{пр}$

Произведем расчет для ВВЭР-1200, так же используя проектные данные, определим необходимые конструктивные и технологические параметры.

При работе четырех главных циркуляционных насосов, согласно [23] расход теплоносителя через реактор ВВЭР-1200, равен  $q_{аз} = 86000 \text{ м}^3/\text{час}$ . В свою очередь система продувки-подпитки первого контура [24] при всех возможных режимах работы блока гарантирует значение продувки-подпитки, так же как и на ВВЭР-1000 в границах 20...60 т/час, что отвечает значениям объемного расхода  $q_{np} = 25...80 \text{ м}^3/\text{час}$ . Объем теплоносителя в 1 контуре V, так же как и на ВВЭР-1000 примем равным  $370 \text{ м}^3$  [25]. В тепловыделяющей сборке (ТВС) содержится 312 ТВЭЛов и 12 дистанционирующих решеток. Проходное сечение ТВС согласно сведениям [26] составляет  $0,026 \text{ м}^2$ .

При условии сильно турбулизированного течения воды возле отвода в систему продувки-подпитки проникновение в неё частички дебриса носит вероятностный характер. В случае если принять, то, что внутренний диаметр главного трубопровода равен  $D_2 = 850 \text{ мм}$  и внутренний диаметр отводящего трубопровода в систему продувки-подпитки равен  $d_{np} = 100 \text{ мм}$  [5]. Тогда вероятность попадания дебриса в систему определяется по формуле:

$$P_{np} = \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{\pi \cdot D_2 \cdot d_{np}} = 0,029.$$

По формуле полученной выше можно определить время осаждения дебриса, с учетом всех изменений:

$$t = - \frac{\ln \left( \frac{C_{\partial}(t)}{C_{\partial}(0)} \right)}{\left( 286,666 \cdot P_{аз} + 9,804 \cdot 10^{-5} \cdot q_{np} \right)},$$

Подставим имеющиеся значения в формулу для определения времени осаждения дебриса:

$$t = -\frac{\ln(0,05)}{(286,666 \cdot 10^{-7} + 9,804 \cdot 10^{-5} \cdot 25)} = 1208 \text{ ч}$$

$$t = -\frac{\ln(0,03)}{(286,666 \cdot 10^{-7} + 9,804 \cdot 10^{-5} \cdot 25)} = 1414 \text{ ч}$$

$$t = -\frac{\ln(0,05)}{(286,666 \cdot 10^{-7} + 9,804 \cdot 10^{-5} \cdot 80)} = 469,363 \text{ ч}$$

$$t = -\frac{\ln(0,03)}{(286,666 \cdot 10^{-7} + 9,804 \cdot 10^{-5} \cdot 80)} = 549,398 \text{ ч}$$

Результаты расчета сведены в таблице в таблицу 6.

Таблица 6 – Время снижения концентрации дебрис-частиц в первом контуре реактора ВВЭР-1200

$P_{аз}$	$Q_{пр}, M^3/ч$	$\frac{C_d(t)}{C_d(0)}$	$t, ч$
$10^{-7}$	25	0,05	1490
		0,03	1744
$10^{-6}$	25	0,05	1350
		0,03	1580
$10^{-5}$	25	0,05	694,807
		0,03	813,284
$10^{-7}$	80	0,05	469,363
		0,03	549,398
$10^{-6}$	80	0,05	454,468
		0,03	531,963
$10^{-5}$	80	0,05	344,986
		0,03	403,813

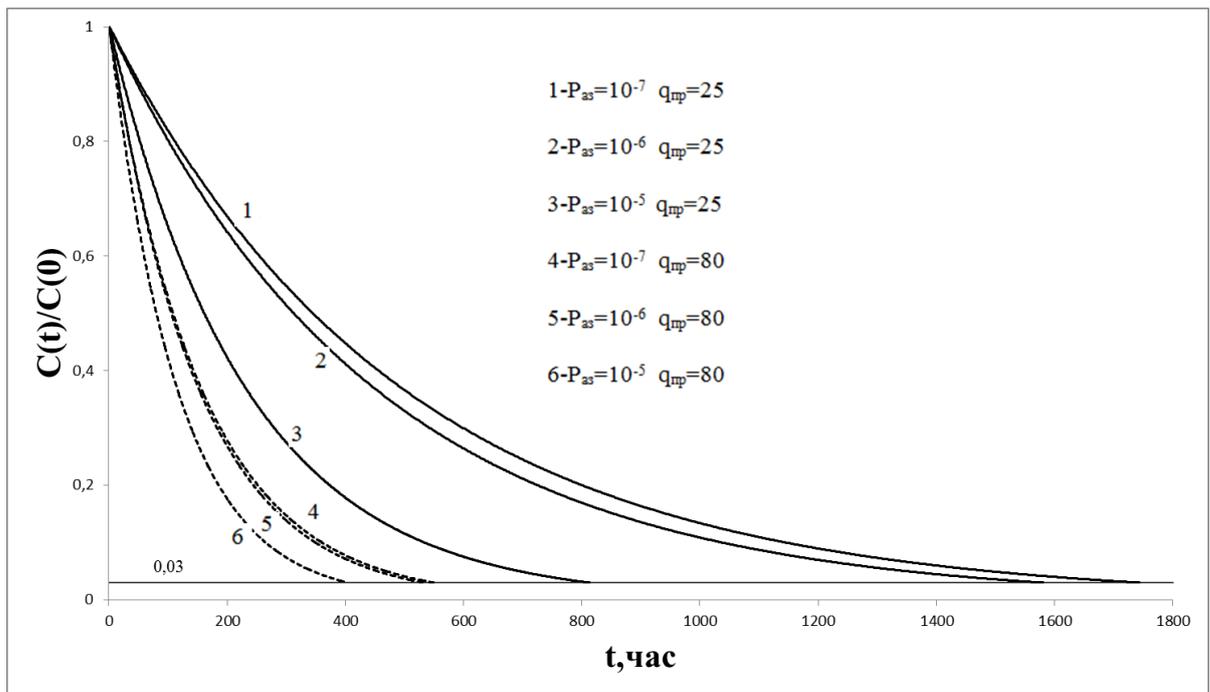


Рисунок 24 – График изменения концентрации дебриса в теплоносителе в зависимости от вероятности осаждения частиц в активной зоне  $P_{аз}$  и величины продувки  $q_{пр}$

### Заключение

1. Исследования оседания дебриса в системе продувки-подпитки 1-го контура и в самом реакторе демонстрирует, то что чем больше будет вероятность  $P_{аз}$ , тем скорее дебрис-частицы осядут в активной зоне реактора (см. кривые 1-3).

2. Повышение величины продувки до наибольшего проектного значения в  $80 \text{ м}^3/\text{ч}$  стремительно повышает утаскивание дебрис-частиц в систему продувки-подпитки первого контура, тем самым уменьшая вероятность возникновения повреждения твэла (см. кривые 1 и 6).

3. Впоследствии выполнения перегрузки, ремонтных работ и планово-предупредительных, можно посоветовать в начале новой микрокампании работу реактора с повышенной величиной продувки с целью сокращения оседания дебриса в активной зоне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была продолжена идея, представленная в работе [34], с некоторым увеличением геометрического объема первого контура, а именно с  $300 \text{ м}^3$  до  $370 \text{ м}^3$  с учетом компенсатора давления. Такое увеличение 1-го контура сказалось на времени осаждения дебриса в первом контуре и в самом реакторе, для ВВЭР-1200 оно увеличилось по сравнению с ВВЭР-1000 (Таблица 3-6). По полученным данным были построены графики динамики изменения концентрации дебриса в теплоносителе в зависимости от вероятности осаждения частиц в активной зоне и величины продувки  $q_{np}$  (Рисунок 21-24) откуда стало видно, что чем больше будет вероятность осаждения дебриса в активной зоне, тем скорее дебрис-частицы осядут в активной зоне реактора.

Прежде всего, для предотвращения попадания дебриса в контур реактора следует повышать культуру проведения монтажных и ремонтных работ с тем, чтобы не допускать попадания строительного, монтажного и ремонтного мусора в первый контур. С целью повышения надежности работы блока в условиях увеличения кампании и выгорания топлива, необходимо разрабатывать новые проекты твэл и ТВС с повышенной стойкостью к дебрис повреждениям и фреттинг коррозии, а так же устанавливать антидебрисные фильтры (АДФ).

В ходе выполнения работы были рассмотрены проекты зарубежных и отечественных антидебрисных фильтров (АДФ) и было установлено то, что зарубежные проекты имеют более сложную конструкцию АДФ и более сложную форму, чем отечественные. Результаты испытаний различных конструкций АДФ показали, что нет однозначно “плохих” или “хороших” конструкций АДФ, каждая конструкция имеет свои преимущества и свои недостатки. Разработкой и внедрением АДФ в России начали заниматься относительно недавно, поэтому есть смысл развиваться в этом направлении.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		98

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев Е. Е. Разработка методов расчета работоспособности твэлов ВВЭР в вероятностной и детерминистической постановке: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. тех. наук.- 2008, 108 с.
2. ПБЯ РУ АС 98 ПНАЭ Г-1-1029-90/ «Атомная энергия». 1990. Т.69 Вып.6.
3. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головнин И.С. и др. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. -М.: Энергоатомиздат, 1995 - 320с, книга 1.
4. Безносков А.В., Зверева Л.А., Фарафонов В.А. Основное оборудование атомных электростанций с реакторами типа ВВЭР. Горький, изд. ГПИ им. А.А.Жданова, 1981, 83 с.
5. Тутнов А.А. Методы расчета работоспособности элементов конструкций ядерных реакторов. М., Энергоатомиздат, 1987, 200 с.
6. Лихачев Ю.И., Пупко В.Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1975, 280 с.
7. Smirnov A., Smirnov V., Kanashov B., et. a. Behavior of WWER-440 and WWER-1000 Fuel in a Burnup 20-48 MWd/kgU. Proc. of the Second Intern. Seminar: WWER Reactor Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Sandanski, Bulgaria, 1997.
8. Утенков С.А., Яковлев В.В.. Исследование особенностей контактного теплообмена между топливом и оболочкой твэлов энергетических реакторов. Препринт РНЦ "КИ" 5408/4, 1991.
9. Уотерхауз Р. Фреттинг-коррозия. Л.: Машиностроение. 1976.
10. Драгунов Ю. Г., Дроздов Ю. Н., Макаров В. В., Влияние сил трения на работоспособность и ресурс тепловыделяющих сборок водоводяных энергетических реакторов. – В сб.: Трение и износ. Ин-т механики

					ФЮРА. 693100. 013 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		99

металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси. Гомель.  
2006. т. 27. №1. с. 54 – 60

11. Ко Р. Wear of zirconium alloys due to fretting and periodic impacting. – In: Wear of Materials. 1979. ASME. p. 388 – 395.

12. Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors. IAEA Nuclear Energy Series Vienna, No. NF-T-2.1, June, 2010. – 175 с.

13. Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors. – Technical Report Series. – International Atomic Energy Agency. – Vienna. – 1998.

14. Proceedings of the 1997 International Topical Meeting on Light Water Reactor Fuel Performance. –Portland. – Oregon. – March 2-6. – 1997.

15. Кидд С. Частота повреждения топлива снижается. // Атомная техника за рубежом.– 2009. –№4.–С.22-24

16. Соколова И.Д. Опыт эксплуатации топлива в реакторах PWR // Атомная техника за рубежом.– 2010. –№6.–С.3-11

17. Калашников В.В., Соляный В.И., Материаловедческие аспекты эксплуатационной надежности твэлов энергетических реакторов с водяным теплоносителем // Атомная техника за рубежом.– 1987. Т44.– Вып.6.

18. ВВЭР-1000. Повышение мощности // Журн. Росэнергоатом.–2008.–№8– С.13-16.

19. Игнатов В.И., Шутиков А.В. Тепло- и нейтронно-физические характеристики энергоблоков АЭС с ВВЭР-100 при эксплуатации на мощности выше номинальной (на примере второго блока Балаковской АЭС) // Атомная энергия за рубежом.– 2009.–Т.107.–Вып.1.

20. WILSON, H.W., MILLER, H., KUNISHI, H., “Westinghouse fuel performance experience”, Proc. Tech. Comm. Mtg on Fuel Failure in Normal Operation of Water Reactors: Experience, Mechanisms and Management, Dimitrovgrad, 1992, IAEA-TECDOC-709, IAEA, Vienna (1993) 138.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		100

21. WILSON, H.W. et al., "Westinghouse fuel performance in today's aggressive plant operating environment", Int. Topical Mtgon Light Water Reactor Fuel Performance, Portland, 1997, ANS, Le Grange, II (1997).
22. SCHARDT, J., "GNF 10X10 Fuel pursuing performance and reliability", Int. Conf. TopFuel 2006, Salamanca, 2006.
23. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность/ Афров А.М., Андрущечко С.А., Украинцев В.Ф. и др. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 488 с. – 16 с. цв. вкл.
24. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1990. – 352 с., ил.
25. Основное оборудование реакторного отделения. Балаковская Атомная Станция. Центр подготовки персонала, 2000. – 180 с., ил.
26. Технологические системы реакторного отделения. Балаковская Атомная Станция. Центр подготовки персонала, 2000. – 348 с., ил.
27. Экономика ядерной энергетики: метод. указания по выполнению организационно-экономического раздела ВКР/ Сост. Сергейчик С.И. – Томск: изд-во ТПУ, 2006. – 24 с.
28. Перспективы повышения эффективности использования топлива в рамках проекта АЭС-2006 Куракин К.Ю., Ананьев Ю.А., Горохов А.К., Васильченко И.Н., Кобелев С.Н.,
29. Синев Н. М. Экономика ядерной энергетики: Основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС: Учеб. пособие для вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 480 с.: ил.
30. Топливная сборка второго поколения ТВС-2М
31. Гусева Т.В., Петрунина С.И., Гуреев С.В. Результаты вероятностного анализа безопасности первого уровня остановленного реактора блока №4 Калининской АЭС: сб.статей- МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 2009.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		101

- 32.В. Баюклин, П. Славягин. Герметичность под контролем// журнал Росэнергоатом- 2004. - №12.
- 33.А.В. Волошенко, Д.Б. Горбунов Проектирование функциональных схем систем автоматического контроля и регулирования: учебное пособие - Томск: изд-во ТПУ, 2008. - 108 с.
- 34.Модель осаждения твердых частиц в первом контуре ВВЭР Кузьмин А.В., Рождествин В.Ю., Юхно К.Г. // «ЭНЕРГЕТИКА: ЭФФЕКТИВНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ, БЕЗОПАСНОСТЬ».- 2012.- №18.- 250-253 с.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		102