



# Опытная эксплуатация смешанной топливной загрузки активной зоны ТВСА совместно с ТВС-WR на ЮУ АЭС



**Степан Стойков**  
Главный технолог ОП ЮУАЭС



ENERGOATOM

Южно-Украинский энергетический комплекс – единственное в Украине предприятие с комплексным использованием базых ядерных и маневренных гидроаккумулирующих мощностей, а также водных ресурсов реки Южный Буг. Он расположен на севере Николаевской области.



Энергокомплекс входит в состав Государственного предприятия «Национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом» как обособленное подразделение.

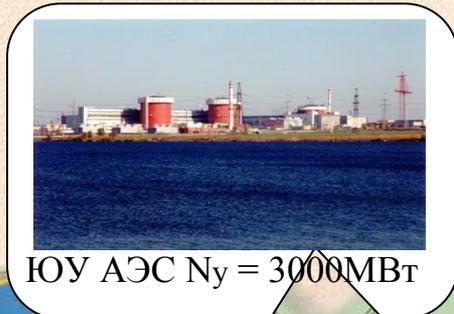
Сегодня в состав энергокомплекса входят Южно-Украинская АЭС, Александровская ГЭС и Ташлыкская ГАЭС.



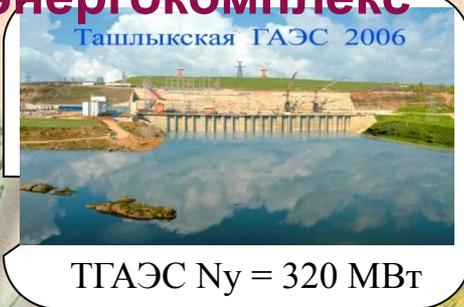


ENERGOATOM

# Южно-Украинский энергокомплекс



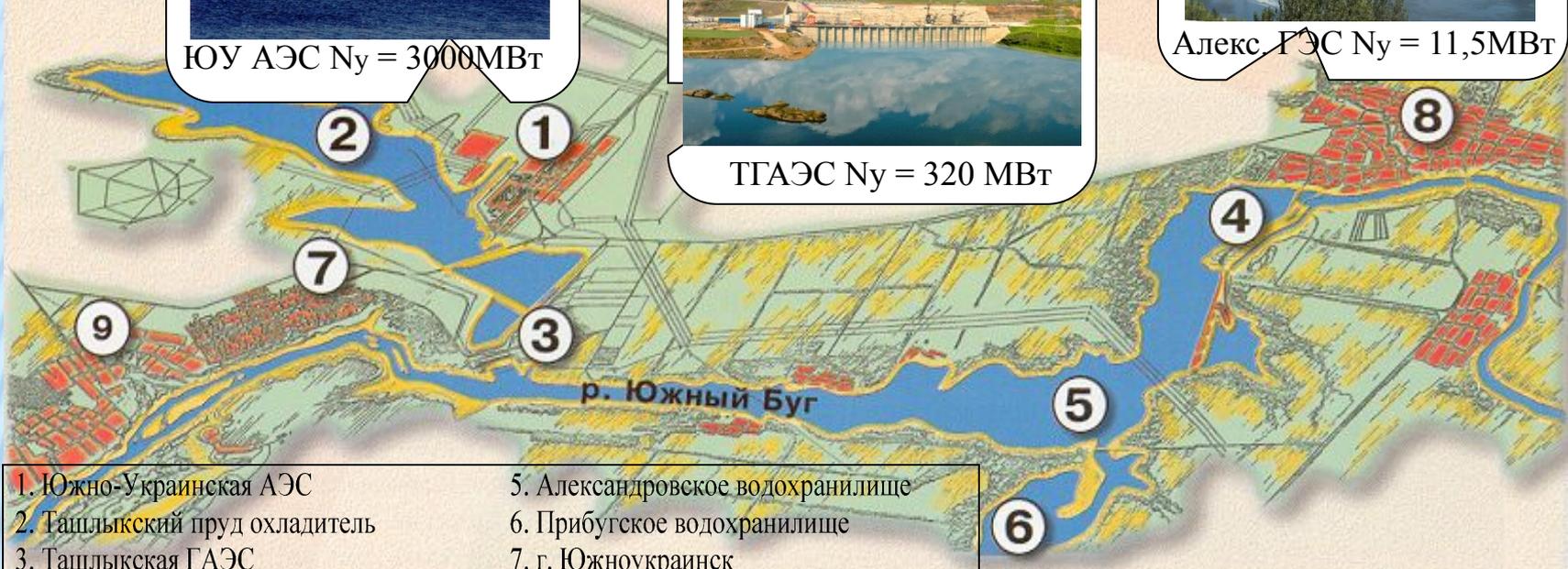
ЮУ АЭС  $N_{y} = 3000$  МВт



ТГАЭС  $N_{y} = 320$  МВт



Алекс. ГЭС  $N_{y} = 11,5$  МВт



- |                               |                                  |
|-------------------------------|----------------------------------|
| 1. Южно-Украинская АЭС        | 5. Александровское водохранилище |
| 2. Ташлыкский пруд охладитель | 6. Прибугское водохранилище      |
| 3. Ташлыкская ГАЭС            | 7. г. Южноукраинск               |
| 4. Александровский гидроузел  | 8. пгт. Александровка            |
|                               | 9. пгт Константиновка            |

Энергокомплексом ежегодно производится 17-20 млрд кВт·час электрической энергии, которая составляет приблизительно 10% общего производства электроэнергии страны и приблизительно 20% ее производства на украинских АЭС.

Электроэнергии произведенной на Южно-Украинской АЭС достаточно для обеспечения нормальных условий жизнедеятельности региона с 5-миллионным населением. С 1982 года Южно-Украинским энергокомплексом произведено



Эксплуатация ТВС компании «Westinghouse» началась в 2005 году на энергоблоке №3 ЮУАЭС в рамках исполнения Проекта квалификации ядерного топлива для Украины. После окончания опытной эксплуатации первых 6-и «пилотных» ТВС на протяжении 4-х топливных кампаний, в 2010 году выполнена загрузка партии из 42 ТВС-W на энергоблоке №3 ЮУАЭС, а в 2011 году на энергоблоке №2 ЮУАЭС. Планировалось также начать опытную эксплуатацию ТВС-W на энергоблоке №5 ЗАЭС начиная с 2012 года.

Во время перегрузки топлива в ППР-2012 были выявлены механические повреждения дистанционирующих решеток ТВС-W, которые эксплуатировались в активных зонах энергоблоков №2 и №3 ЮУАЭС, при этом, все ТВС-W остались герметичными. Расширение опытной эксплуатации на энергоблоки №2 ЮУАЭС и №5 ЗАЭС было приостановлено. Комиссией при участии представителей ГП НАЭК «Энергоатом», компании «Westinghouse», ЦПАЗ и ГИЯРУ выявлено, что коренной причиной повреждения дистанционирующих решеток являются конструктивные недоработки ТВС-W.

На протяжении 2012-2014 годов компанией «Westinghouse» выполнен комплекс работ по доработке конструкции топливной сборки.

В августе 2014 года были выполнены приемочные испытания ТВС-WR усовершенствованной конструкции на заводе компании «Westinghouse» (Швеция) при участии представителя ГИЯРУ.

ТВС-WR первой опытной партии прошли входной контроль и были загружены в активную зону энергоблока №3 ЮУАЭС без замечаний во время ППР-2014.



## Краткое описание усовершенствованной конструкции ТВС-WR

В общем, конструкция усовершенствованной ТВС-WR аналогична конструкции ТВС-W. Модификации коснулись следующих узлов кассеты:

- Дистанционирующие решетки:
  - Модифицированы лепестки обода ДР для увеличения их жесткости и увеличено их количество (выполнены через каждый твэл);
  - Изменен профиль обода, увеличена толщина обода и его ширина в углах, добавлена отбортовка по длине обода;
  - Материал средних ДР заменен на инконель (Alloy 718);
  - Добавлены 8 отсутствующих внутренних полос в средних ДР и верхней решетке;
  - Размер «под ключ» уменьшен на 0,25 мм.
- Головка:
  - Сглажены острые кромки на угловых ребрах;
  - На верхней поверхности опорной плиты добавлены 6 направляющих пластин по периметру плиты для исключения зацепления с хвостовиком соседней ТВС при загрузке в активную зону.
- Хвостовик:
  - Добавлены конусные скосы при переходе шестигранника в цилиндрическую часть на всех 6 гранях;
  - На ребрах и кромках выполнены фаски.



## Влияние использования ТВС-WR на безопасность

Поставщиком топлива на заводе «Westinghouse» после модернизации выполнен ряд механических и гидравлических испытаний, а именно:

- Гидравлические испытания кассеты и ее элементов – в полном объеме;
- Статические испытания решетки на разрушение;
- Динамические испытания решетки на разрушение;
- Вибрационные тесты кассеты;
- Механические испытания ТВС-WR на поперечную жесткость;
- Испытания на сцепляемость контактирующих поверхностей ТВС;
- Имитация ТТО по загрузке/выгрузке активной зоны.

ТВС-WR усовершенствованной конструкции имеет ряд преимуществ относительно предыдущей модификации кассеты производства компании «Westinghouse», которые обеспечат возможность проведения транспортно-технологических операций с ядерным топливом и эксплуатацию его в «смешанной» активной зоне без повреждения.



# Стенд инспекции и ремонта (СИР)

## Назначение

СИР предназначен для проведения инспекции и ремонта топливных сборок ВВЭР-1000 компании Вестингауз. Конструкция СИР, измерительные системы и вспомогательное оборудование обеспечивает выполнение следующих операций:

- визуальный осмотр поверхности ТВС по всей ее длине;
- визуальный осмотр поверхности периферийных твэл и ободов ДР;
- измерение зазора между концевыми заглушками твэл периферийных рядов и опорными плитами головки и хвостовика ТВС;
- измерение межтвэльного зазора для периферийных рядов твэл ТВС;
- измерение длины ТВС и отдельного твэла;
- измерение величины изгиба и скручивания ТВС;
- измерение размера «под ключ» дистанционирующих решеток;
- измерение усилия затирания ПС СУЗ в НК ТВС;
- измерение толщины оксидного слоя на оболочке твэл;
- профилометрические измерения поверхности оболочки твэла;
- визуальный осмотр и дефектоскопия твэла;
- потвэльный контроль герметичности оболочек;
- извлечение негерметичных (поврежденных) твэл/твэг из ТВС и установка на их место вытесняющих вставок (имитаторов твэл).



## Состав и описание СИР

СИР конструктивно состоит из трех основных частей:

- рабочего стенда инспекции топлива (РСИТ);
- рабочей платформы (РП);
- установки трехосного контроля «XYZ»,  
а также тринадцати измерительных стендов (систем) и ремонтного оборудования для извлечения негерметичных (поврежденных) ТВЭЛ/ТВЭГ из ТВС и установки на их место вытесняющих вставок (имитаторов ТВЭЛ).

Инспекция топлива осуществляется с использованием:

- Рабочего стенда инспекции топлива;
- Рабочей платформы;
- Направляющей для ТВС;
- Поворотного инструмента рабочей станции;
- Системы трехосного перемещения «XYZ» (координатное устройство);
- Оборудования для визуальной инспекции ТВС;
- Оборудования для измерения длины ТВС;
- Оборудования для измерения усилия затирания ПС СУЗ в НК ТВС;
- Оборудования для измерения толщины оксидных пленок;
- Оборудования для измерения размера «под ключ» ДР;
- Оборудования для профилометрических измерений поверхности оболочки ТВЭЛА;
- Оборудования для визуальной инспекции и вихретоковой диагностики ТВЭЛА;
- Оборудования ультразвуковой дефектоскопии ТВЭЛОВ;
- Подвески для рабочего инструмента.



Ремонтные работы на СИР, связанные с заменой поврежденных твэл/твэг в ТВС, производятся с использованием следующего оборудования для ремонта:

- Направляющей насадки для ТВС;
- Устройства для демонтажа головки ТВС;
- Стеллажа для хранения фиксаторов;
- Оборудования для обращения с твэл;
- Направляющей плиты для твэл;
- Пенала для хранения твэл.



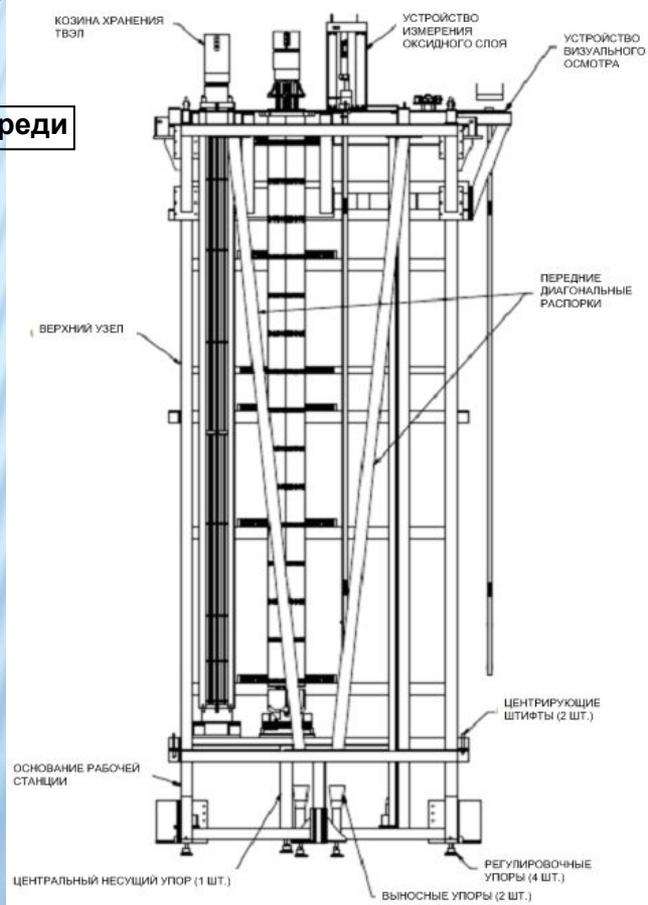
ENERGO  
AATON

## Рабочий стенд инспекции топлива (РСИТ)

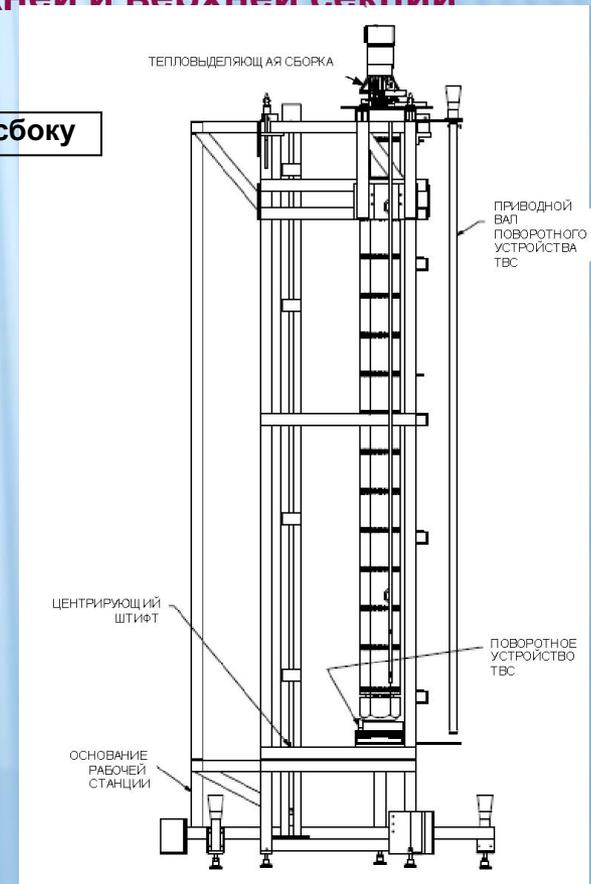
Рабочий стенд инспекции топлива является одним из основных элементов СИР и служит опорой для инспектируемой ТВС и корзины хранения поврежденных твэлов/твэггов, а также для размещения оборудования систем инспекции и ремонта.

РСИТ представляет собой сварную конструкцию, силовой каркас которой выполнен, в основном, из коробчатых труб из нержавеющей стали марки 304 и конструктивно состоит из нижней и верхней секций

Вид спереди

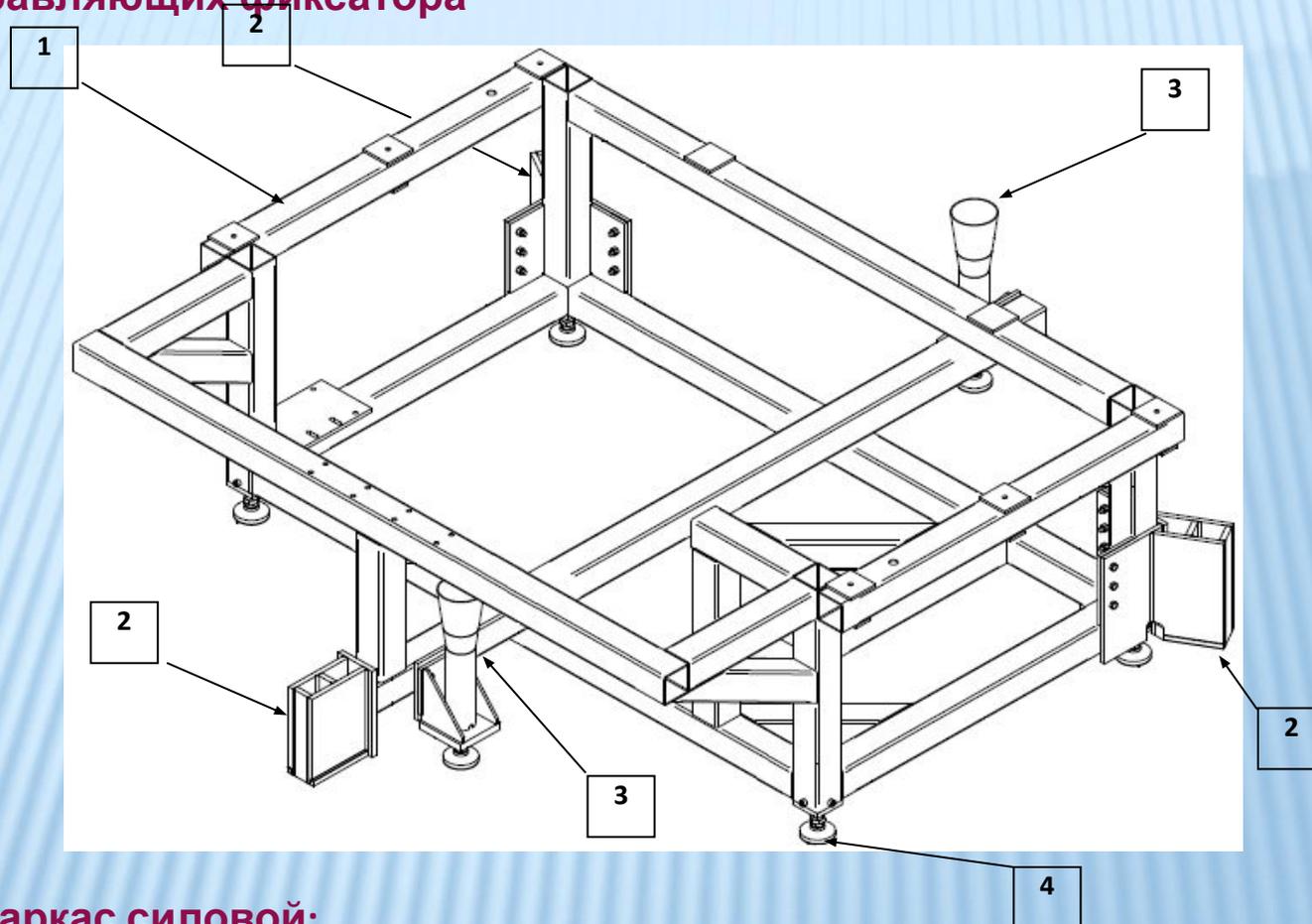


Вид сбоку





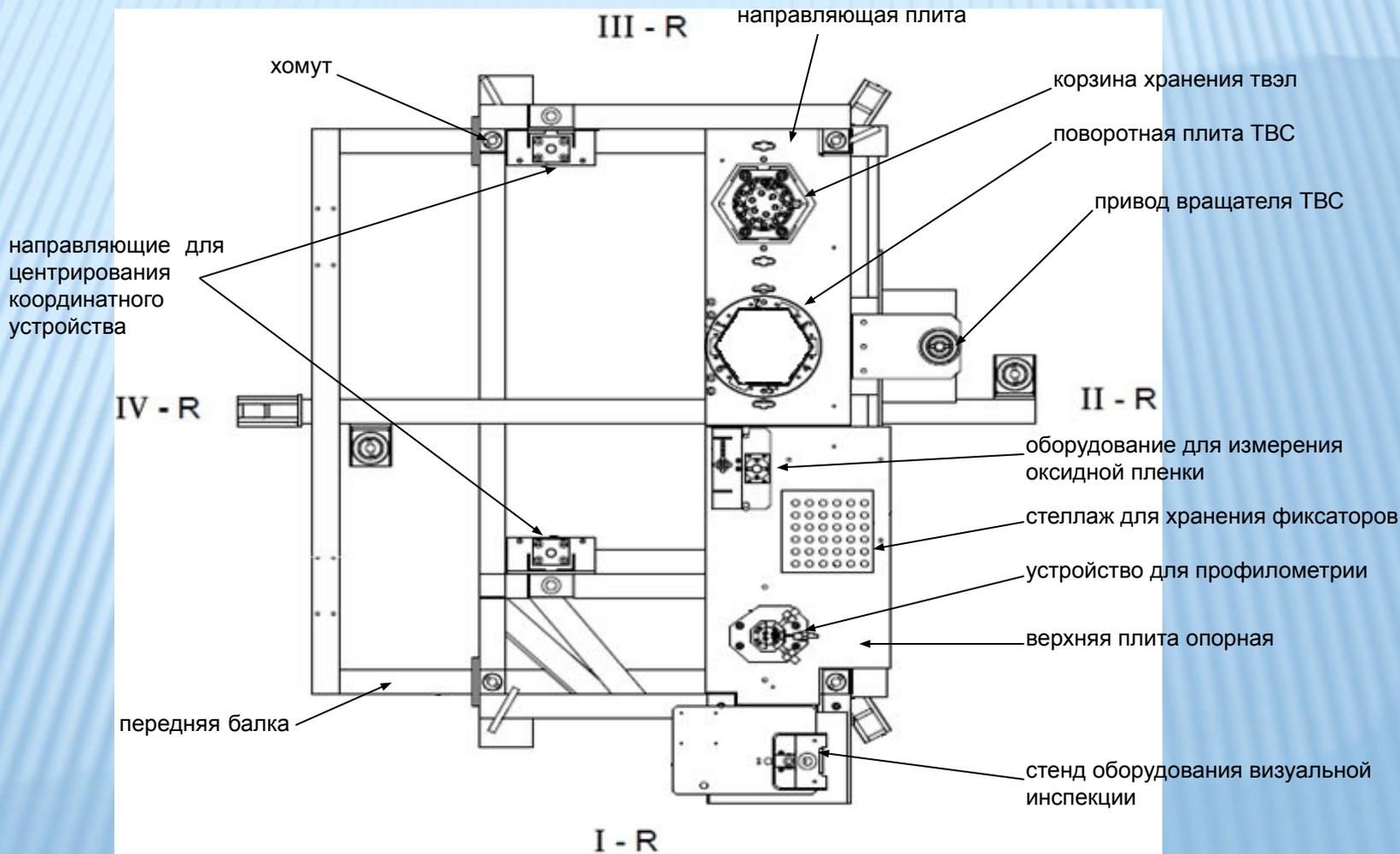
**Нижняя секция** служит опорой для верхней секции РСИТ и плиты, на которой размещается поворотный механизм для вращения ТВС. В нижней части секции располагаются шесть регулировочных упоров и три направляющих фиксатора



- 1- каркас силовой;
- 2- направляющий фиксатор (замок), 3 шт;
- 3- выносные упоры, 2 шт.;
- 4- регулируемые упоры, 4 шт.



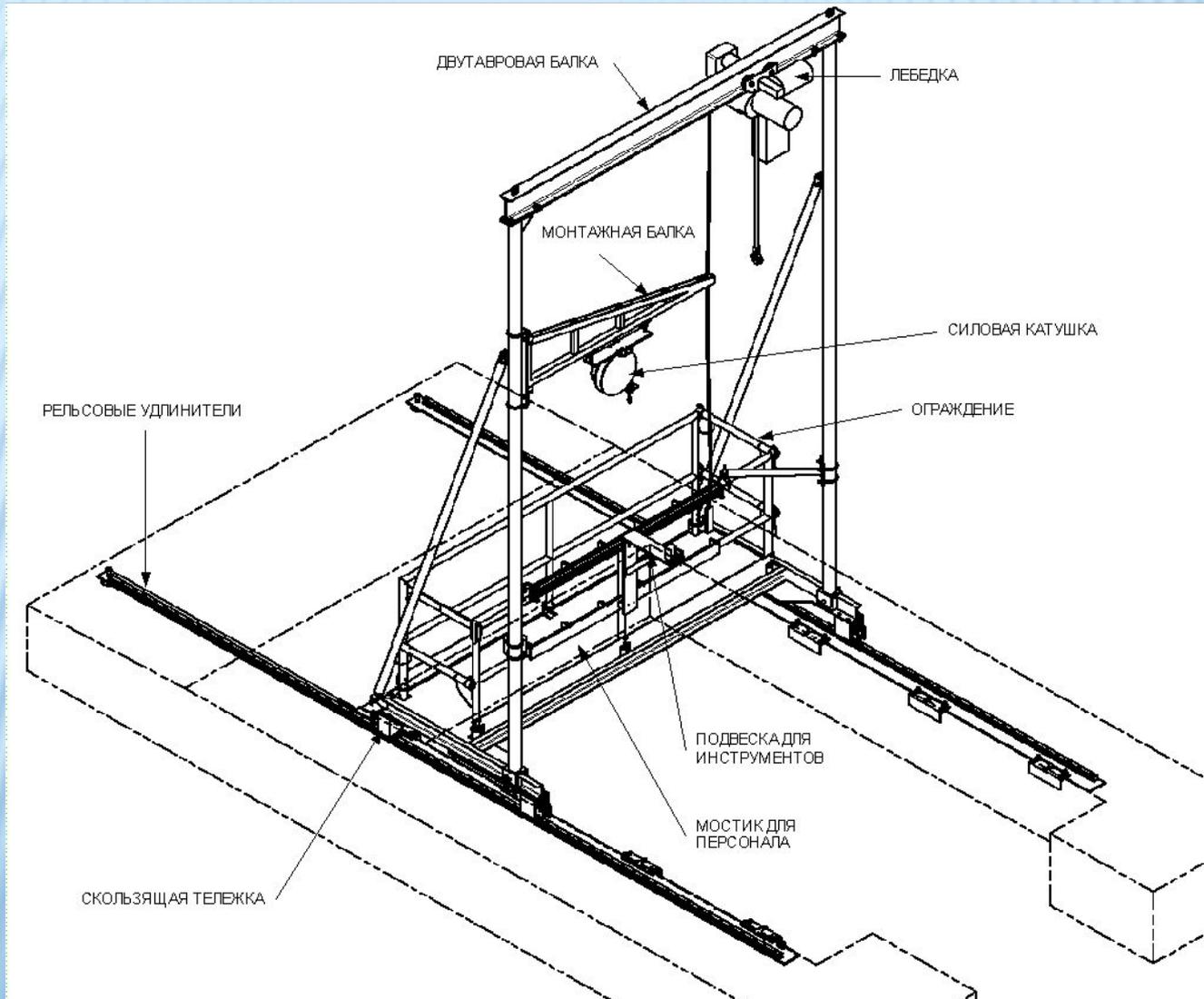
**Верхняя секция РСИТ представляет собой отдельную сварную конструкцию, которая при помощи направляющих штифтов присоединяется к нижней секции и закрепляется болтами. Верхняя часть секции представляет собой рабочую поверхность, на которой закреплены структурные и измерительные элементы Рабочей станции**





## Рабочая платформа (РП)

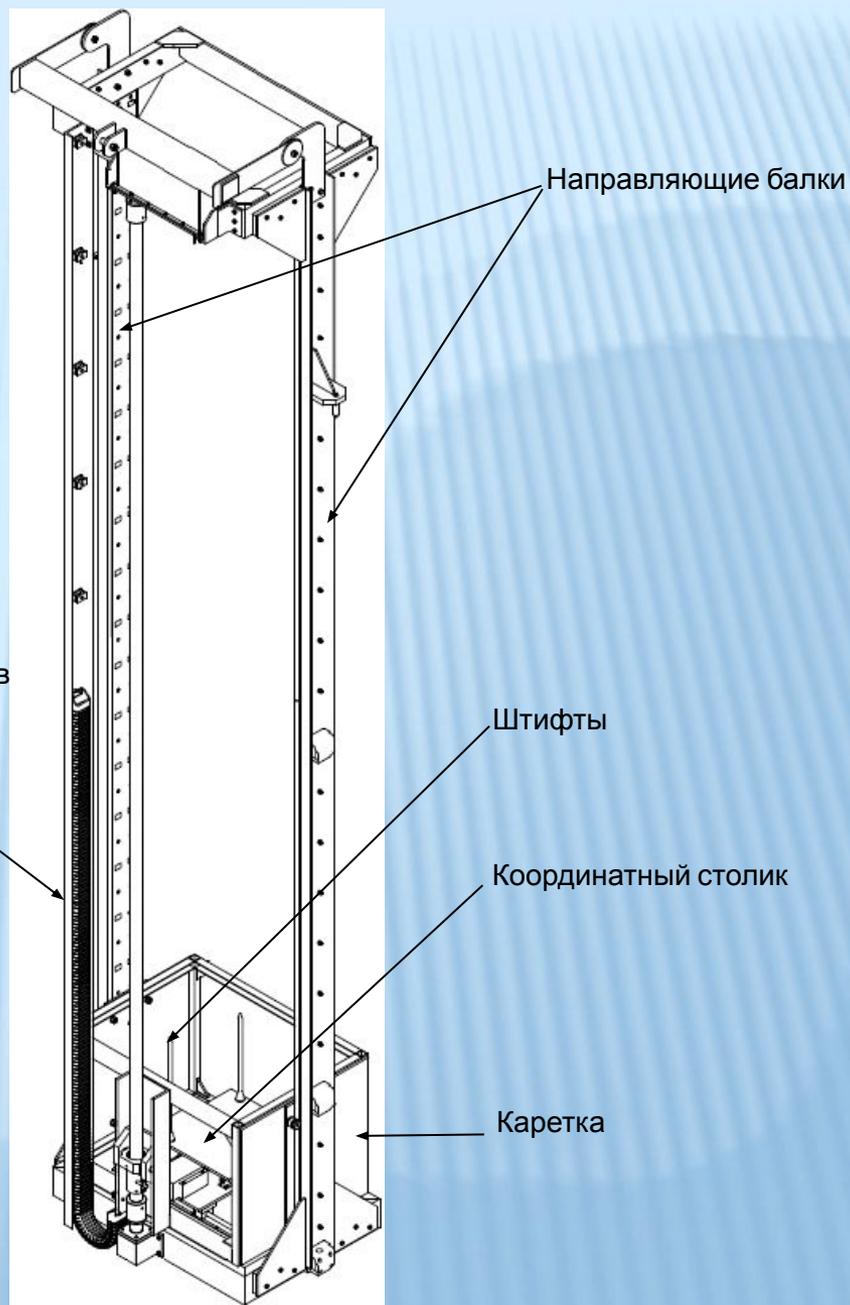
Рабочая платформа – это передвижная конструкция с подъемным механизмом, которая предназначена для доступа рабочего персонала к РСИТ с возможностью выполнения работ непосредственно над ней





## Установка трехосного контроля «XYZ»

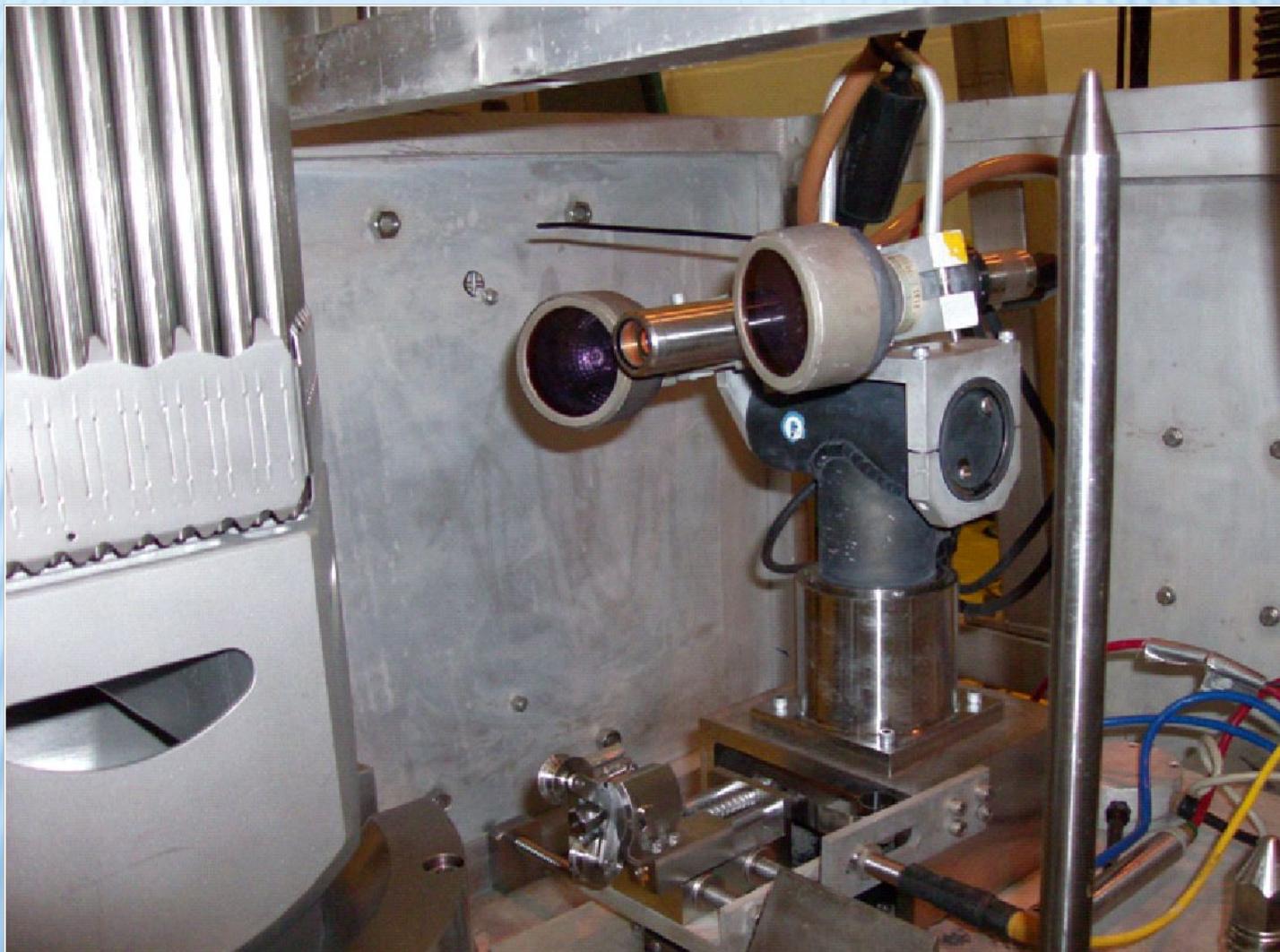
Установка трехосного контроля «XYZ» (или координатное устройство) является самостоятельным элементом СИР и предназначена для выполнения различных операций по инспекции ТВС и для размещения на нем соответствующего оборудования.





## Стенд визуальной инспекции ТВС

Стенд визуальной инспекции предназначен для выполнения наружных проверок тепловыделяющих сборок, видеообзора и видеозаписи состояния элементов конструкции ТВС.





## Система измерения длины ТВС

Система измерения длины ТВС предназначена для измерения изменения длины ТВС в процессе эксплуатации.



- 1- головка со встроенным в корпус LVDT-датчиком;
- 2- направляющая плита;
- 3- измерительный стержень;
- 4- хомут.



## Система измерения изгиба и скручивания ТВС

Система измерения изгиба и скручивания ТВС предназначена для определения величины осевого прогиба ТВС и угла скручивания ТВС.

Система измерения изгиба и скручивания ТВС включает:

- о систему визуальной инспекции (видеокамера D40);
- о система трехосного перемещения «XYZ».

## Система измерения усилия протяжки ПС СУЗ

Система измерения усилия протяжки ПС СУЗ является самостоятельным элементом СИР и предназначена для измерения величины усилия затирания ПС СУЗ в направляющих каналах инспектируемой ТВС.

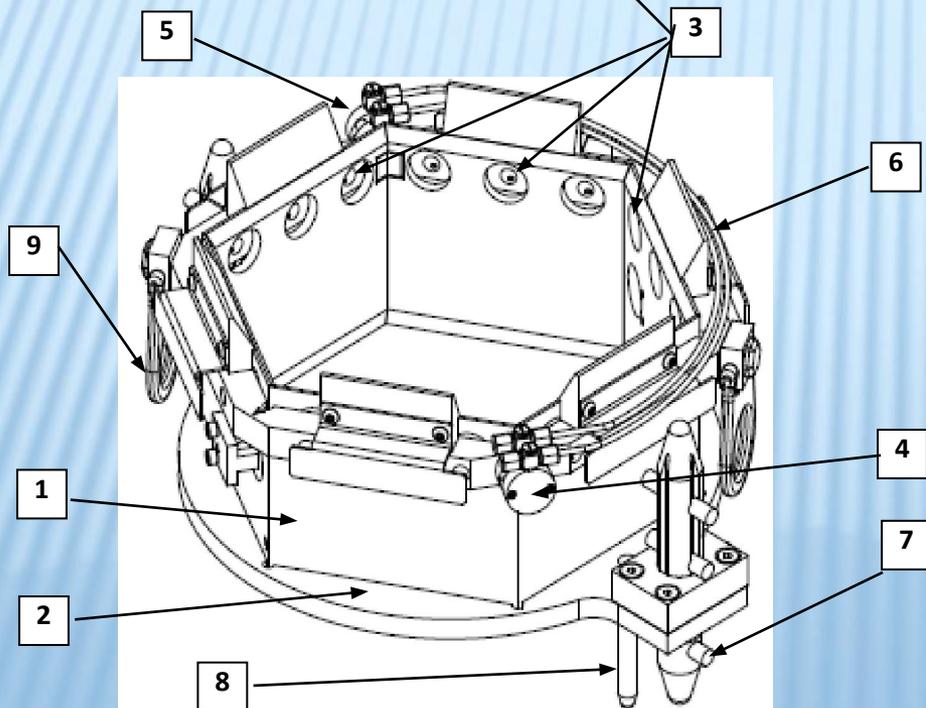
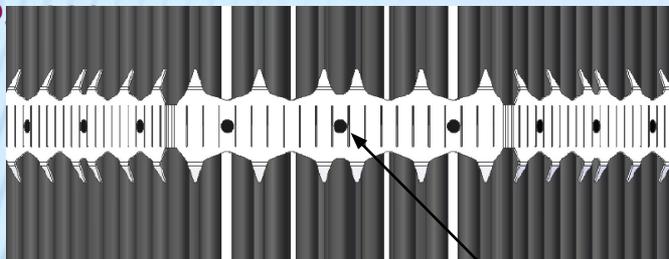
Оборудование для измерения усилия затирания ПС СУЗ в НК ТВС включает:

- о ПС СУЗ;
- о подъемное устройство с захватным инструментом для ПС СУЗ;
- о калиброванный тензодатчик;
- о откалиброванная система измерения нагрузки в диапазоне 0-255 кг;
- о пост контроля и электронный регистратор данных.



## Система измерения размера «под ключ» дистанционирующих решеток ТВС

Система ультразвуковой диагностики габаритов дистанционирующей решетки является одним из элементов инспекции СИР и предназначена для измерения размеров «под ключ» шестигранной ДР облученной ТВС ВВЭР

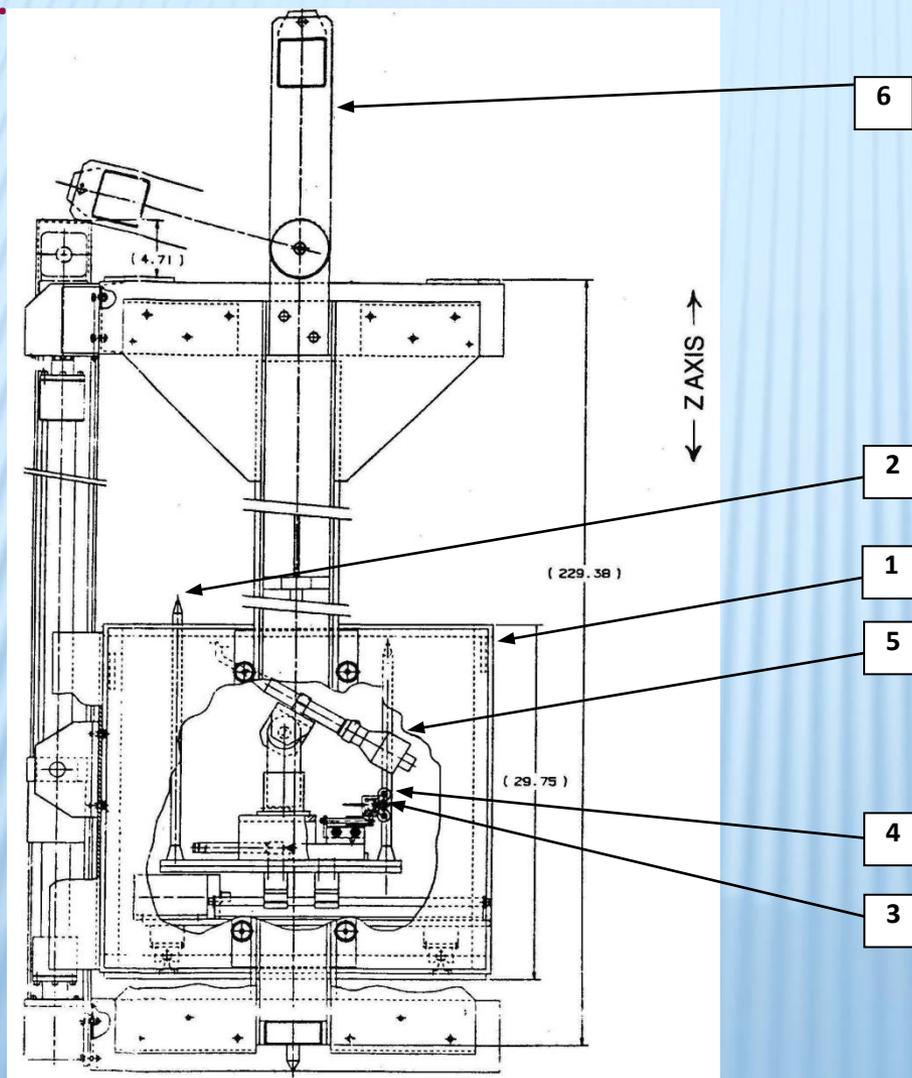


- 1- шестигранный пневматический хомут;
- 2- основание;
- 3- ультразвуковой датчик;
- 4- пневматический зажимной цилиндр;
- 5- пневматический задний упор;
- 6- шланги для сжатого воздуха;
- 7- фиксирующий штифт;
- 8- направляющий штифт;
- 9- хомут.



## Система измерения толщины окисной пленки

Система измерения толщины оксида является самостоятельным элементом СИР и предназначена для измерения толщины окисной пленки на оболочке периферийных твэлов ТВС или на твэлах, извлеченных из ТВС.



1- каретка координатного устройства «XYZ»;

2- установочные штифты;

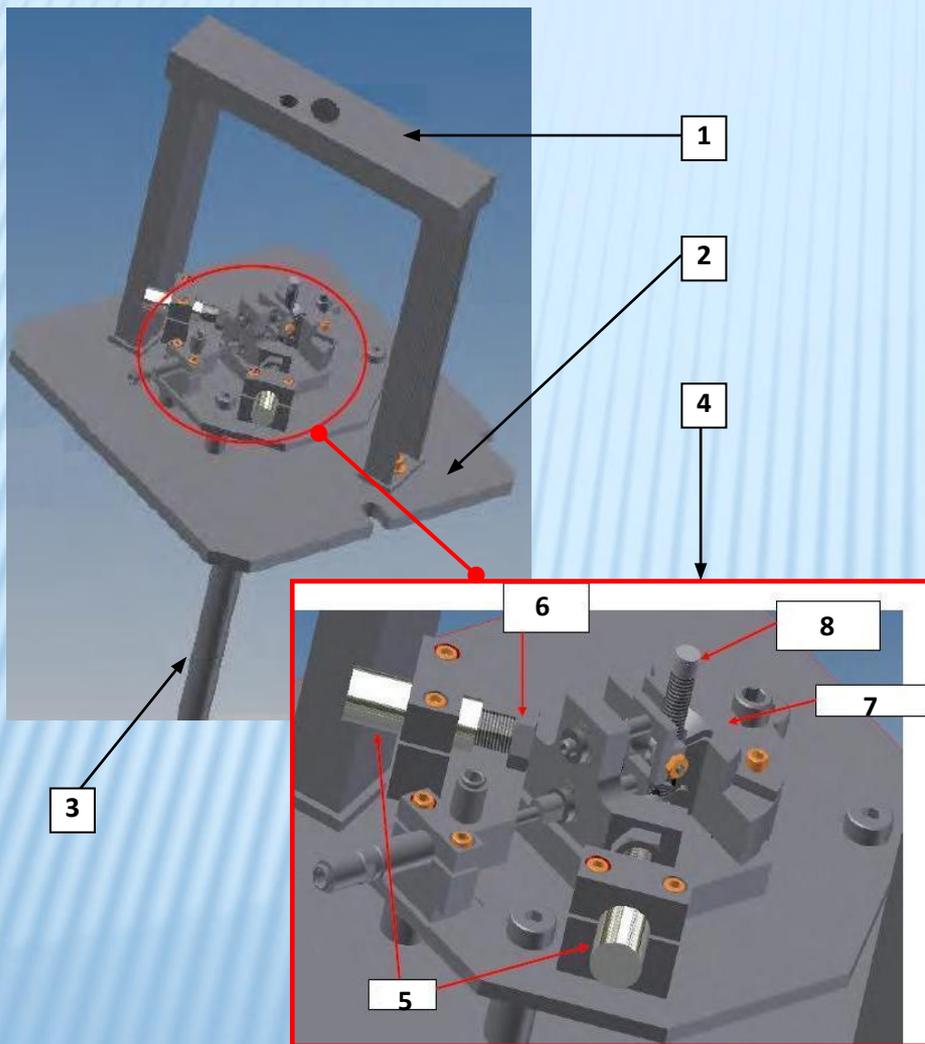
3- вихретоковый зонд, расположенный на измерительной головке;

4- направляющие ролики;

5- видеокамера Diakont D40; 6- подъемная серьга (перекладина)



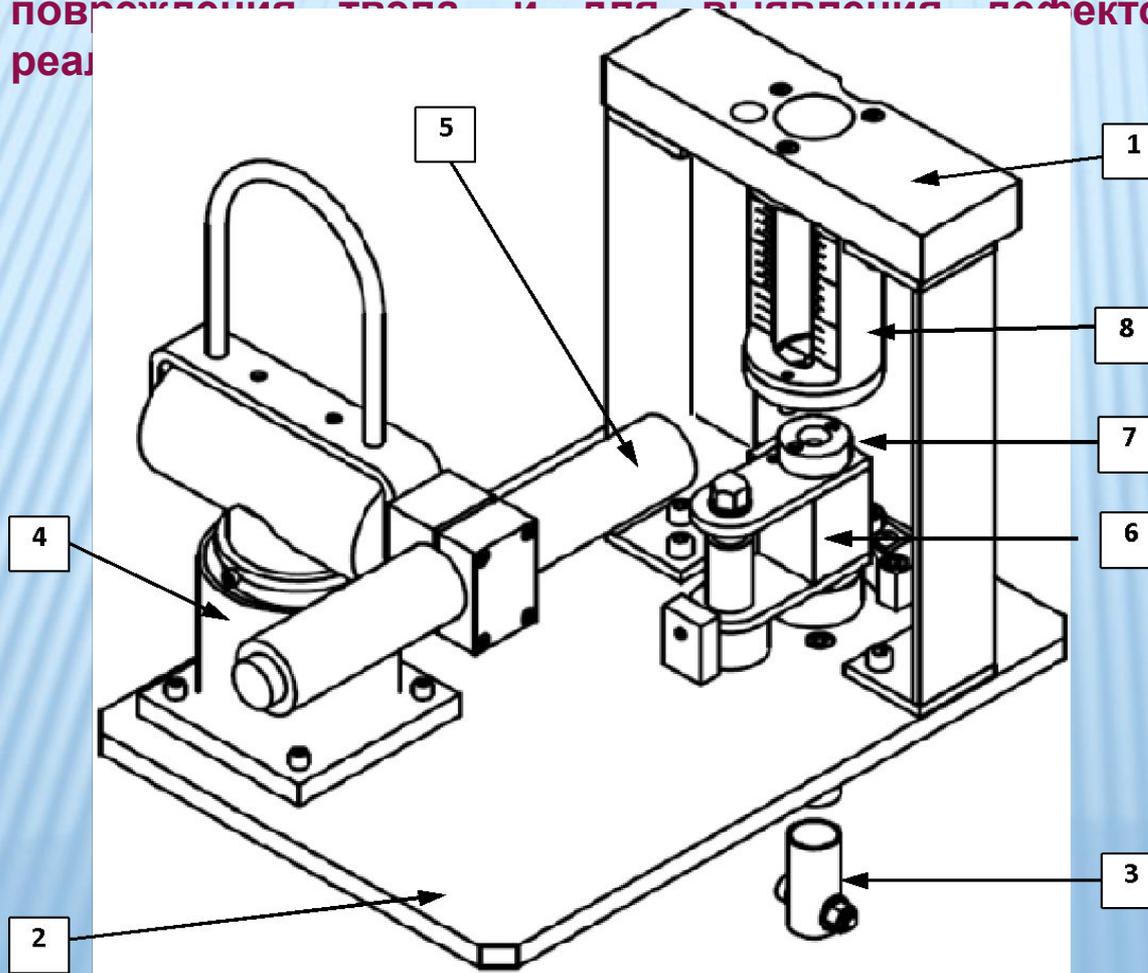
**Система профилометрии поверхности оболочки твэла**  
Система профилометрии является самостоятельным элементом СИР и предназначена для измерения диаметра оболочки облученного твэла по всей его высоте.



- 1- стойка  
(профилометрическая консоль);
- 2- плита опорная;
- 3- труба-пенал;
- 4- профилометрическая головка;
- 5- LVDT-датчики;
- 6- стопорная гайка;
- 7- направляющий блок;
- 8- эталонный образец.

# Система визуальной инспекции и вихретоковой диагностики твэла

Система визуальной инспекции и вихретоковой диагностики (дефектоскопии) твэла является самостоятельным элементом СИР и предназначена для анализа состояния поверхности оболочки и сварочных узлов концевых заглушек твэла, с целью идентификации характера повреждения твэла и для выявления дефектов



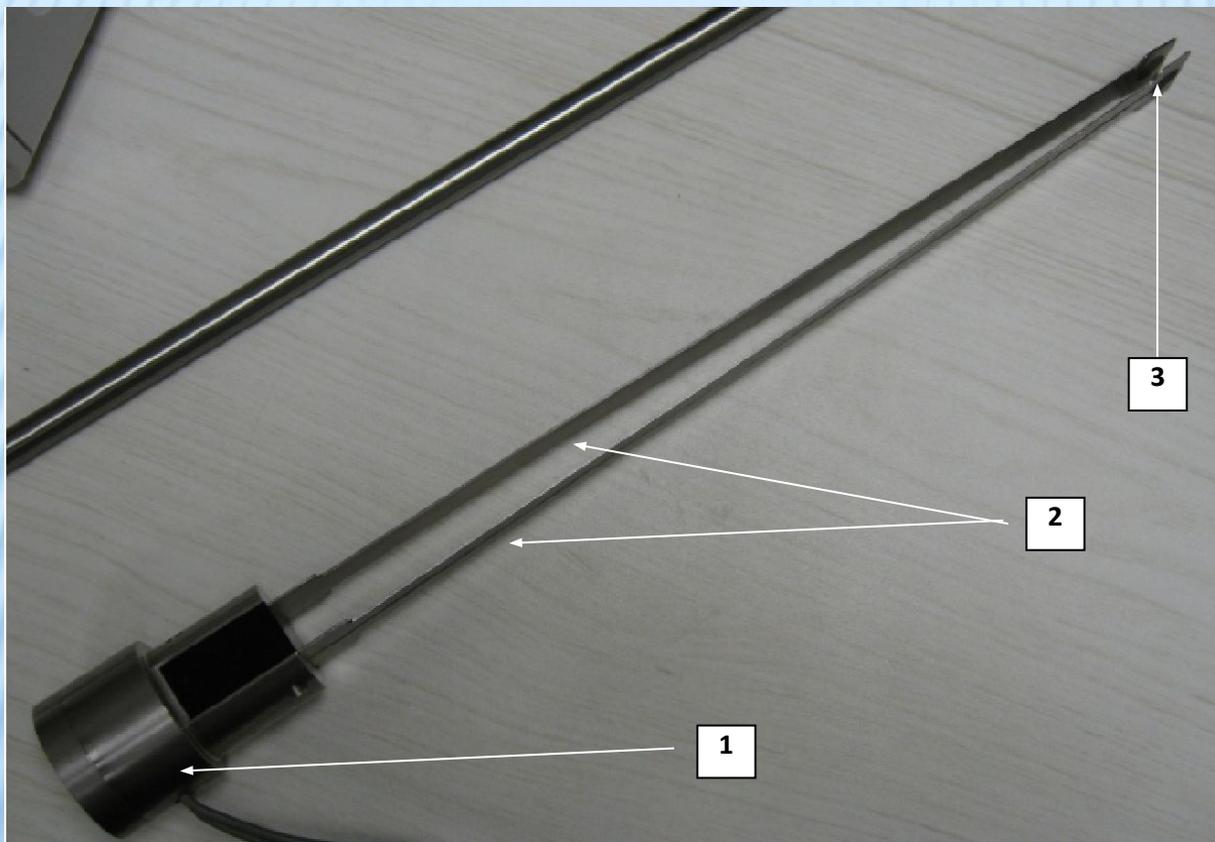
- 1- стойка (консоль);
- 2- плита опорная;
- 3- труба-пенал;
- 4- опорный стакан видеокамеры;
- 5- видеокамера (D-40);
- 6- головка для вихретоковых измерений;
- 7- измерительная катушка;
- 8- направляющий цилиндр с разметкой





## Система автоматической инспекции топлива (AFIS)

Система автоматической инспекции топлива (AFIS) предназначена для проведения быстрой ультразвуковой дефектоскопии топлива, локализации и определения негерметичного твэла(ов) в ТВС, которая выявлена как негерметичная по результатам инспекции в пенале КГО.



- 1- головка ультразвукового датчика;
- 2- пластинчатый держатель пьезоэлектрического зонда;
- 3- пьезоэлектрический зонд.



## Комплект инструмента для ремонта ТВС

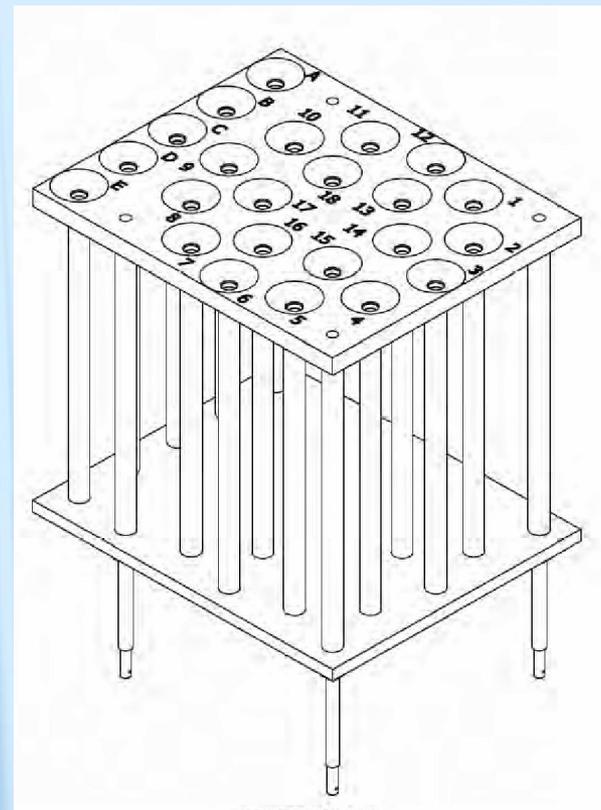
Комплект инструмента предназначен для демонтажа головки ТВС с целью извлечения твэл из ТВС для пострадиационной инспекции твэл или ремонта ТВС посредством замены негерметичных твэл на имитаторы и последующей установки головки ТВС.

В комплект инструмента для ремонта облученной ТВС СИР входит следующий инструмент:

- Инструмент для демонтажа и установки съемной головки ТВС;
- Инструмент для демонтажа и установки стопорных труб;
- Корзина для хранения стопорных труб;
- Инструмент для обращения с твэлом;
- Корзина для хранения твэл;
- Кронштейн для крепления и хранения длинномерного инструмента;
- Отрезной инструмент лепестков втулок НК;
- Манипулятор головки ТВС;
- Система видеоконтроля.



**Общий вид инструмента для демонтажа и установки стопорных труб**



**Общий вид корзины для хранения стопорных труб**

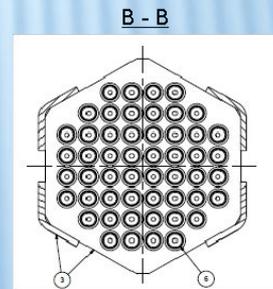
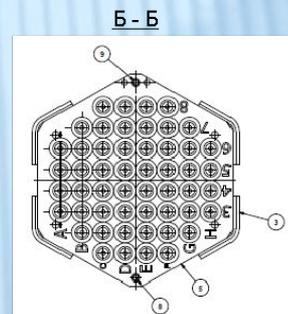
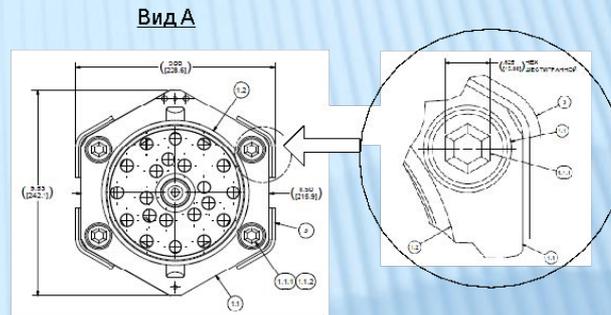
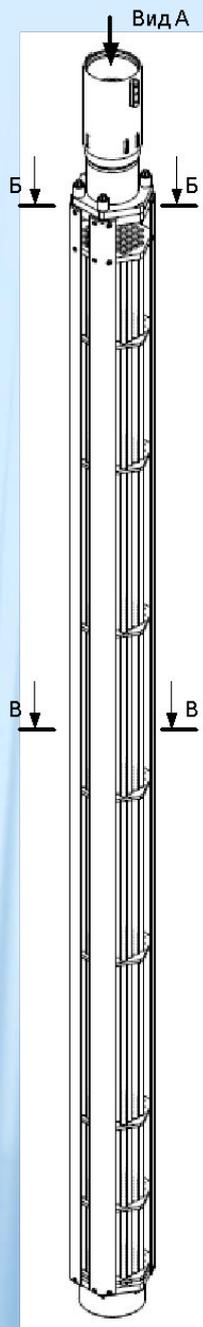


**Общий вид цанги инструмента для обращения с ТВЭЛОМ**



## Корзина для хранения облученных ТВЭЛ

В корзине для хранения облученных ТВЭЛ хранятся ТВЭЛы, извлеченные из облученной ТВС после операции демонтажа головки ТВС. В корзине ТВЭЛы могут храниться, как временно, во время проведения пострадиационных инспекций, так и постоянно. Постоянно хранятся поврежденные ТВЭЛы.

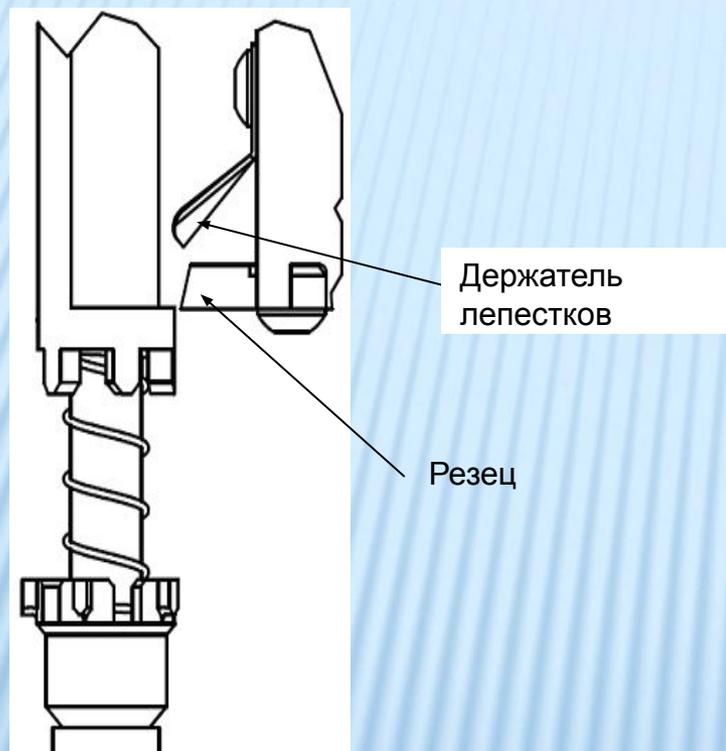


- 1.1 – основание головки
- 1.1.1 – болт
- 1.1.2 – пружина
- 1.2 – головка
- 3 – каркас
- 5 – верхняя плита
- 6 – труба
- 8 – соединительный штифт короткий
- 9 – соединительный штифт длинный



## Отрезной инструмент лепестков штулок съёмной головки ТВС

Используется для демонтажа головки ТВС и  
срезания изогнутого (поврежденного) лепестка  
разрезной штулки.

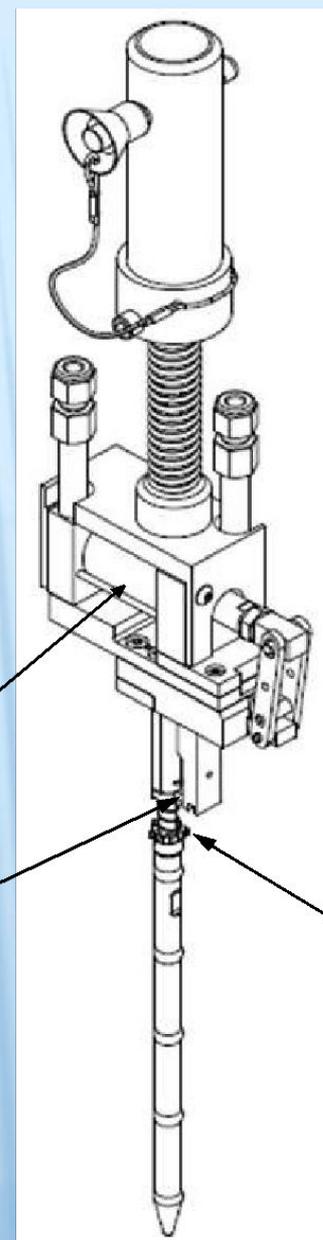


**Отрезающая  
часть  
инструмента**

Гидроцилиндр резца

Резец

Установочные  
выступы



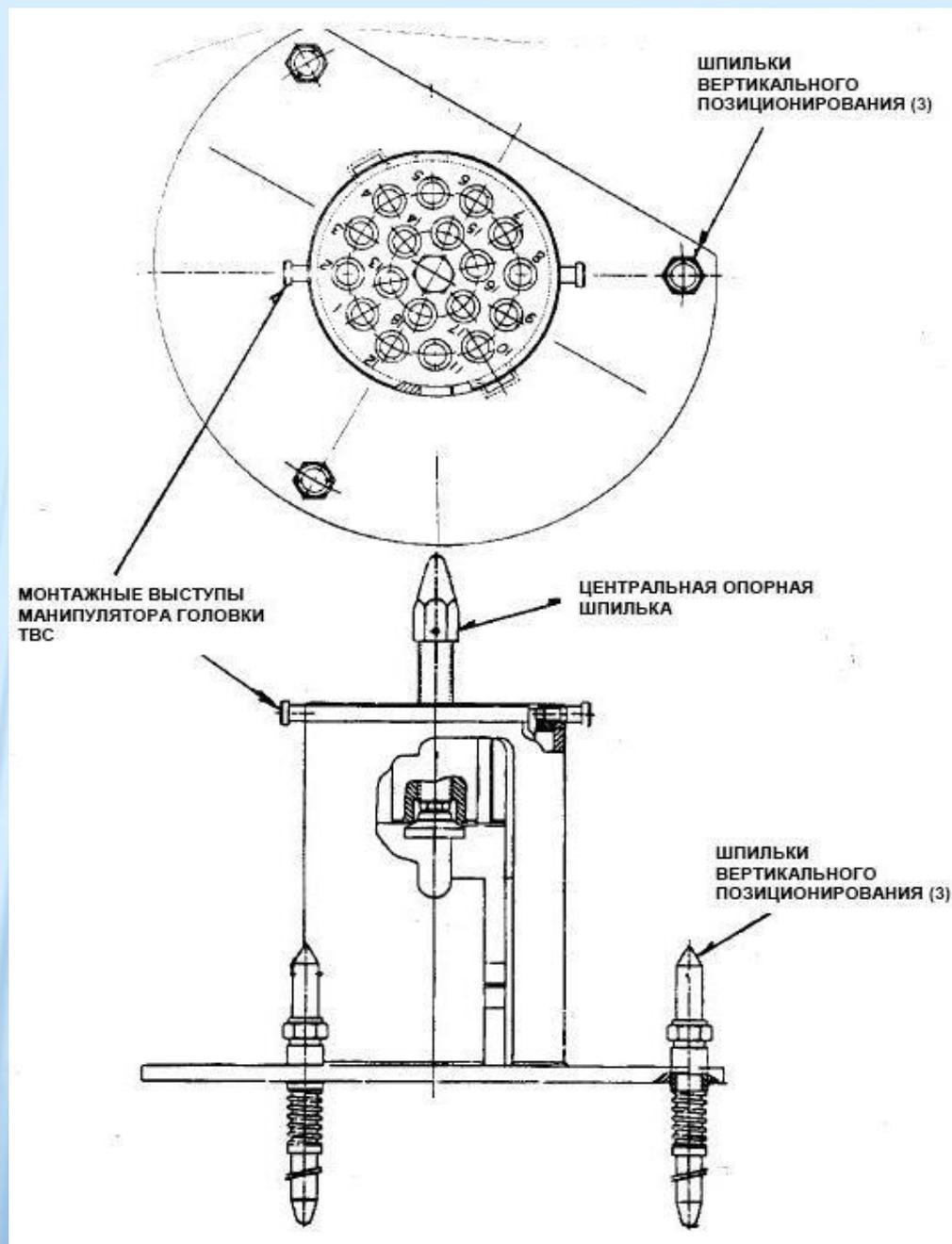
**Общий вид инструмента  
для отрезания лепестков  
штулок**



## Манипулятор головки ТВС

Манипулятор предназначен для демонтажа и установки головки ТВС ВВЭР-1000 производства компании "Вестингауз" и используется для удержания и перемещения головки ТВС после демонтажа стопорных труб.

ENERGO ATOM  
ENERGO





## По состоянию на данный момент СИРТ в ППР-2013

- Выполнены работы по сборке, монтажу в БВ энергоблока №3 СИРТ.
- Выполнены предварительные комплексные испытания оборудования в объеме инспекционной части.
- Выполнена инспекция 8 ТВС-В. Отчет о проведении инспекции ТВС-В направлен в Госатомрегулирования.
- Выполнен демонтаж СИРТ из БВ по окончании инспекции ТВС-В.
- Произведена разборка СИРТ и дезактивация оборудования.
- Выполнена упаковка оборудования в транспортные контейнеры и установлена на место хранения



## Проблемные вопросы

С целью ввода в эксплуатацию ремонтной части СИРТ, оборудование которого уже поставлено на ЮУАЭС, необходимо выполнение коррекции технических документов и, возможно, внесения изменений в конструкцию ремонтной части в соответствии с результатами экспертизы специалистов ГНТЦ ГИЯРУ.

1. В процессе конструирования и изготовления СИРТ не было учтено требование пункта 4.2.9. Приложения 4 контракта SMS11-564:

«...конструкция стенда должна исключить возможность попадания конструктивных элементов ТВС (в том числе и при разрушении оболочки ТВЭЛ, подверженных внутреннему гидрированию вследствие разгерметизации, разрыва ТВЭЛа в любой его части и высыпания топливных таблеток) в бассейн выдержки. Должно быть предусмотрено оборудование для сбора и извлечения посторонних предметов, которые могут образоваться при разборке ТВС...»

На основании рекомендаций, изложенных в отчете государственной экспертизы ГНТЦ ЯРБУ № 13-09-7150 требуется:

- Внести необходимые изменения в конструкцию СИРТ для обеспечения выполнения требований пункта 4.2.9. Приложения 4 контракта SMS11-564.

- На основании внесения изменений в конструкцию СИРТ, Вестингауз совместно со специалистами ЦПАЗ, выпустить откорректированную редакцию ТС, согласовать ее в ЦПАЗ, компании «Вестингауз» и направить на ЮУАЭС для рассмотрения и согласования в НАЭК «Энергоатом».

- Доработать документацию на СИРТ.

2. Доработать ОАБ в части проведения анализа надежности конструкции СИРТ (относящейся к 1 категории сейсмостойкости) при сейсмическом воздействии от МПЗ. Приведенный в последней редакции ОАБ расчет с учетом 5% затухания специалисты ГНТЦ ЯРБ



3. Доработать ОАБ в части обоснования безопасности работ при обращении с радиоактивными отходами, могущими возникнуть при проведении ремонта ТВС-В (включая фрагменты ТВЭЛ), а также при хранении в БВ негерметичных ТВЭЛ в корзине хранения, которая не исключает их контакта с водой БВ.

4. Дополнить ОАБ анализом напряжений, которые возникают в оболочке ТВЭЛ и в сварном соединении «оболочка твэла-верхняя заглушка» при извлечении ТВЭЛ из ТВС-В, в сравнении этих напряжений с допустимыми значениями.

5. Дополнить ОАБ анализом безопасности последствий, возникающих в результате ошибочных действий персонала при эксплуатации, проведении опробований и техническом обслуживании СИРТ

6. Подготовка и проведение обучения персонала ЮУАЭС работе на СИРТ, как того требует контракт SMC-11-564

На телеконференции между ГП «НАЭК «Энергоатом», ЮУАЭС, ЦПАЗ, и «Вестингауз» были заявлены сроки:

- направления на ЮУАЭС программы проведения обучения – конец апреля – начало мая 2014;
- проведение базового обучения сборке-разборке оборудования и презентации функциональных возможностей – в конце мая- начале июня 2014 года.

7. Определить дальнейшие подходы по применению СИРТ как на ЮУАЭС так и в Украине

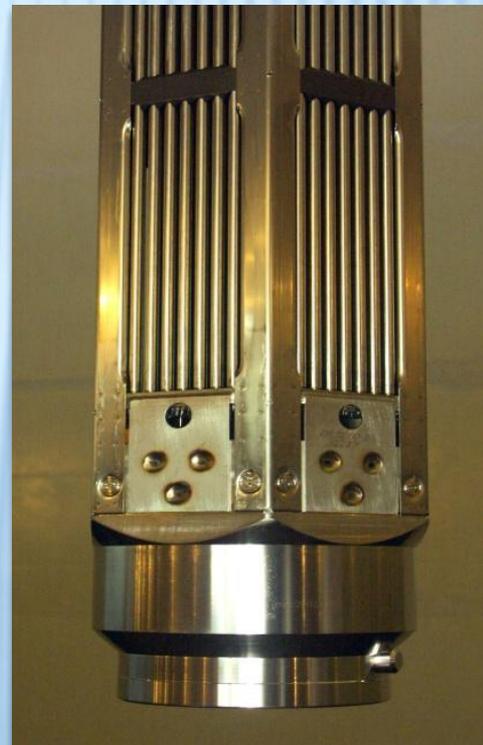
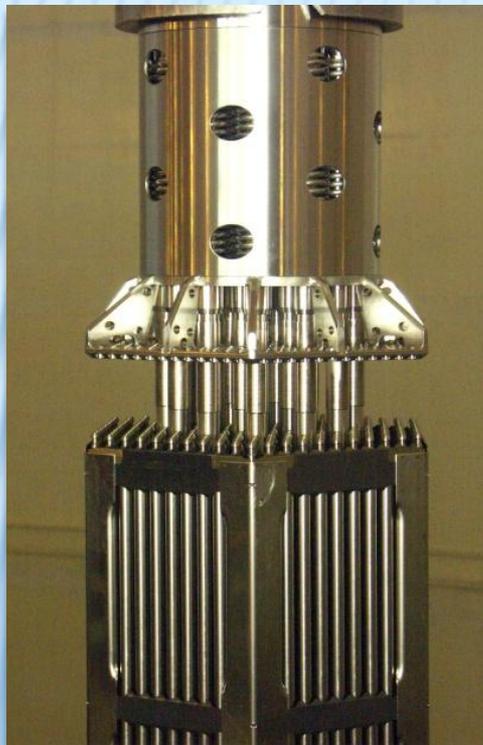
В частности требуют конкретизации следующие вопросы:

- Определение критериев целесообразности применения СИРТ.
- Определение персонала, выполняющего работы на СИРТ.
- Места хранения СИРТ на ЮУАЭС.
- Процедуры транспортировки СИРТ на другие АЭС (при необходимости).



## ТВСА (ТВСА альтернативной конструкции)

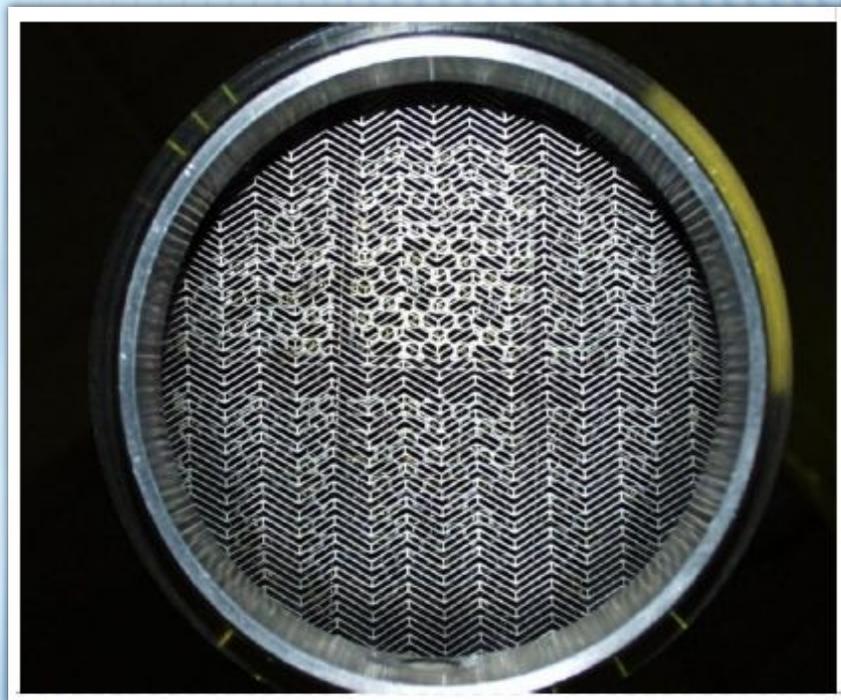
- Жесткий скелет (каркас);
- Центральное отверстие ТТ = 1.4 (1.5) мм;
- ДР и НК из циркониевого сплава;
- Выгорающий поглотитель  $Gd_2O_3$ ;
- Выгорание (среднее по ТВС) до 55 МВт/кгU;
- Выгорание ТВЭЛ до 59.1 МВт/кгU;
- Антидебрисный фильтр (опционально).





## Антидебрисный фильтр (АДФ)

Все ТВСА поставок с 2013 г. комплектуются АДФ. АДФ улавливает частицы размером более 2 мм.





## TBC-W

- Разработана как аналог TBC-M
- ДР: 13 циркониевых и 3 стальных
- Бланкеты из природного урана
- Топливные таблетки без центрального отверстия
- Выгорание (среднее по TBC) – до 45 МВт·сут/кгU
- Выгорание ТВЭЛ/ТВЭГ – 62 МВт·сут/кгU
- Повышенное гидравлическое сопротивление





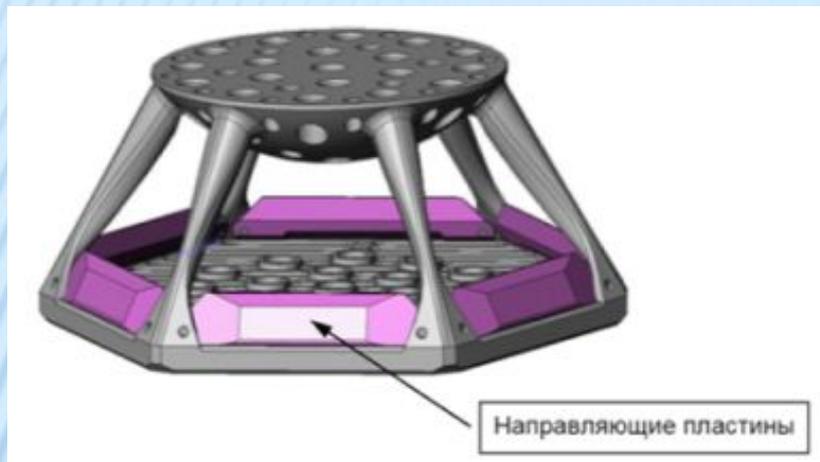
## Конструктивные особенности ТВС-WR

- ТВС-WR (Robust) - модифицированная конструкция ТВС-W (упрочненная)
- НК, ЦТ, ТВЭЛ и ТВЭГ без изменений (материал оболочки – сплав ZIRLOTM)
- Модифицированы:
  - головка
  - ДР
  - ХВОСТОВИК



## Головка

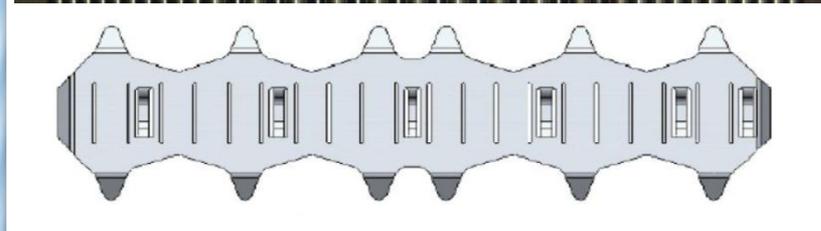
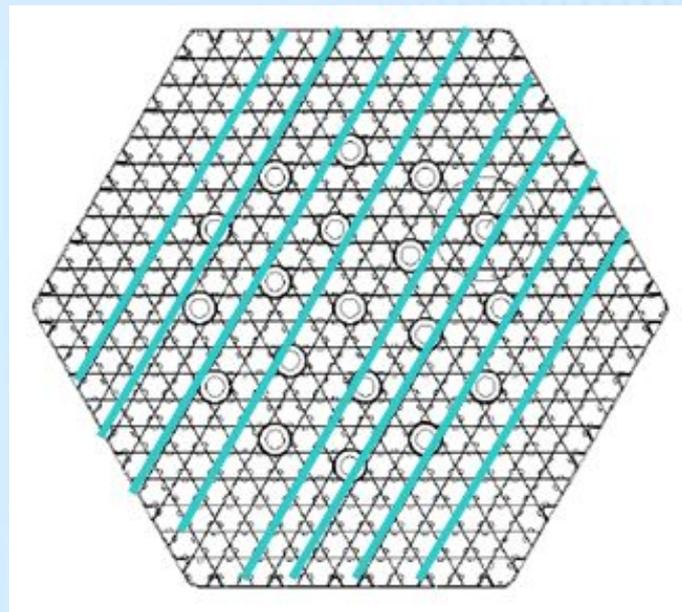
- Добавлены 6 направляющих пластин (для исключения зацепления с хвостовиком соседней ТВС при загрузке в а.з.)
- Сглажены острые кромки на угловых ребрах



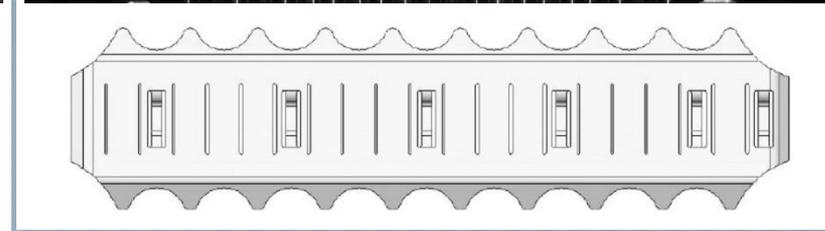


## Дистанционирующие решетки

- Модифицированы лепестки обода ДР и увеличено их количество
- Изменен профиль обода
- Материал ДР заменен на сплав из нержавеющей стали (Alloy 718)
- Добавлены 8 внутренних полос



**TBC-  
W**



**TBC-W  
R**

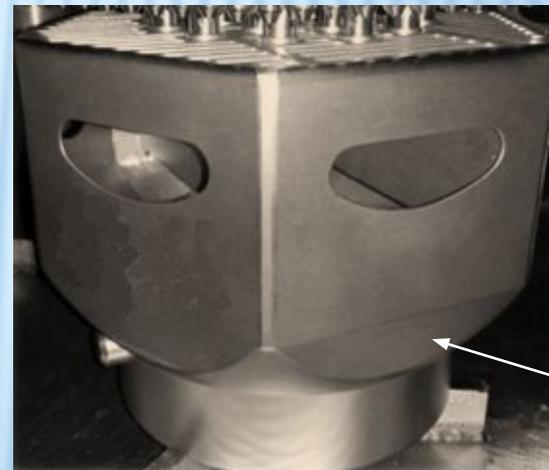


## Хвостовик

- Добавлены конусные скосы на всех 6 гранях
- На ребрах и кромках выполнены фаски



**ТВС-  
W**



**ТВС-  
W  
R**

Конусный скос



## Конструктивные особенности ТВС-WR

	ТВСА	ТВС-W	ТВС-WR
Топливо ТВЭЛ (ТВЭГ)	UO <sub>2</sub> (UO <sub>2</sub> +Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		
Масса топливной сборки, кг	713	755	760
Масса топлива (двуокиси урана), кг	494.5±4.5	550.4±5	550.4±5
Высота топливного столба, мм	3530		
Диаметр центрального отверстия ТТ, мм	1.4 (1.5)	нет	
Длина blankets, мм	нет	2 зоны по 152.4	
Обогащение blankets по урану-235, %	---	0.714	
Длина ТВС, мм	4570	4583	
Размер ТВС "под ключ", мм	235.1	234	
Количество ДР в сборке	16 сплав Э110 (Zr+1%Nb)	16 (13 - Zr+1%Nb, 3 - сплав 718)	16 (сплав 718)
КГС (Re=500 000)	11.5+0.3 (ТВСА+АДФ)	14.6	16.19
Максимальное выгорание, МВт·сут/кгU			
• ТВС	55	45 (гарант.)	58 (гарант.)
• ТВЭЛ	59.1	62 (ТВЭГ- 62)	62 (ТВЭГ- 62)



## Особенности проведения транспортно технологических

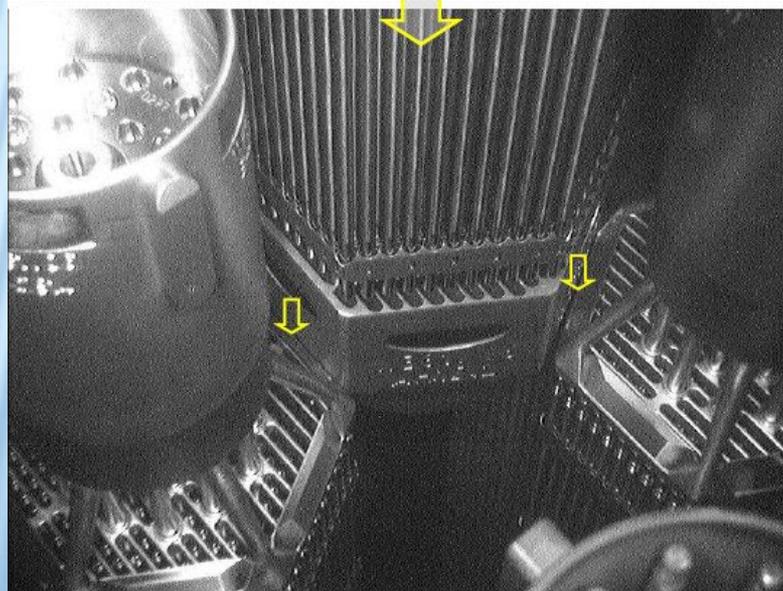
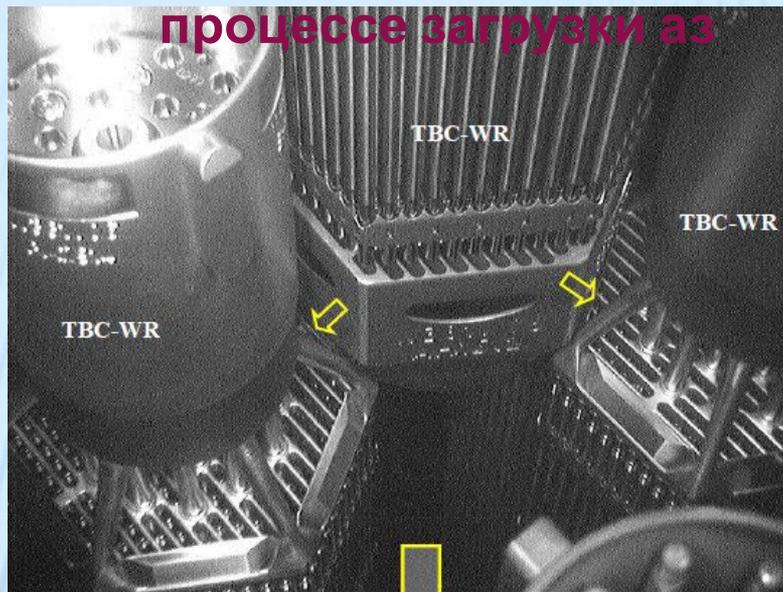
Вид ТТО	Максимальная скорость перемещения	
	ТВСА	ТВС-W/WR
Перемещение ТВС в а.з. реактора, м/мин	4.0 (окружение ТВСА или без окружения)	0.9 (без окружения)
	0.3 (окружение ТВС-W/WR)	0.3 (окружение ТВСА или ТВС-W/WR)
Перемещение ТВС в ячейках СУХТ, ТК-13, м/мин	6.0	0.9
Перемещение ТВС в пенале КГО, ГП, ЧСТ, ячейке неуплотненного хранения топлива, м/мин	3.0	0.6

Предельное изменение веса в результате трения о соседние кассеты при перестановках в реакторе и в результате трения об элементы технологического оборудования при перестановках в стеллаже БВ, чехле ТК-13, пенале КГО, пенале герметичном и чехле СЯТ, кгс

ТВС-WR	ТВС-W	ТВСА
225	150	300



# Взаимодействие хвостовика ТВС-WR с направляющими пластинами опорных плит головок соседних ТВС в процессе загрузки аз





## Состав активной зоны энергоблока №2 ЮУАЭС в 29-ю – 32-ю топливные кампании

Топливная кампания	ТВСА с АДФ	ТВС-WR
29	121	42
30	79	84
31	37	126
32	–	163

### Расход теплоносителя через реактор, м3/ч

	Номинальное значение	Отклоненное значение
29-я топливная загрузка (121 ТВСА с АДФ + 42 ТВС-WR)	91860	87970
30-я топливная загрузка (79 ТВСА с АДФ + 84 ТВС-WR)	91330	87450
31-я топливная загрузка (37 ТВСА с АДФ + 126 ТВС-WR)	90720	86850
32-я топливная загрузка (163 ТВС-WR)	90110	83530



# Максимальная температура топлива и оболочки твэла и твэга TBC-WR

Номер топливной загрузки	29-я	30-я	31-я	32-я
Температура наружной/внутренней поверхности оболочки твэла, °С	350/402	350/404	350/406	350/406
Температура наружной/внутренней поверхности оболочки твэга, °С	349/394	349/395	349/397	349/397
Температура в центре топливной таблетки твэла/твэга, °С	1788/1676	1828/1715	1883/1767	1893/1776
Максимальная линейная тепловая нагрузка на твэл/твэг, Вт/см	424/364	436/375	453/390	456/392

Коэффициент неравномерности распределения энерговыделения по твэлам, не более	
Для ТВСА во всех топливных загрузках	1,500
Для TBC-WR в 29-й топливной загрузке	1,447
Для TBC-WR в 30-й топливной загрузке	1,488
Для TBC-WR в 31-й топливной загрузке	1,544
Для TBC-WR в 32-й топливной загрузке	1,554

# КГС в приведенном виде при $Re=500000$ для ТВСА и ТВС-WR

Наименование параметра	ТВСА	ТВСА с АдФ	ТВС-WR
<b>КГС частей ТВС</b>			
Вход в ТВС (хвостовик + необогреваемая часть твэлов)	0,71	1,01	1,03
Активная часть ТВС (обогреваемая часть твэлов + 13 решеток)	8,58	8,58	12,67
Выход из ТВС (головка + 2 решетки + необогреваемая часть твэлов)	2,58	2,58	2,49
<b>ТВС в целом</b>	<b>11,87</b>	<b>12,17</b>	<b>16,19</b>
<b>КГС компонентов ТВС</b>			
ДР	0,31	0,31	0,61
Количество ДР	15	15	15
Нижняя ДР	-	-	0,63
Хвостовик	0,67	0,98	0,32
Головка	1,65	1,65	0,90
Пучок стержней	4,90	4,89	5,19
<b>ТВС в целом</b>	<b>11,87</b>	<b>12,17</b>	<b>16,19</b>
Коэффициент сопротивления трения пучка твэл	0,01374	0,1371	0,01516
Проходное сечение ТВС	0,02538	0,02538	0,02537
Доля протечек через направляющие каналы	0,010	0,010	0,016





## Ограничения по значениям подогрева теплоносителя на ТВС-WR и ТВСА на 29-ю – 32-ю топливные кампании

Параметр	29-я	30-я	31-я	32-я
Максимально допустимый подогрев теплоносителя в реакторе, °С	30.5	30.7	30.9	31.9
Максимально допустимый подогрев теплоносителя в петле, °С	32.6	32.9	32.9	33.8
Максимальный допустимый подогрев теплоносителя по показаниям СВРК с учетом погрешности измерения подогрева $\pm 1.5$ , °С:	не более	не более	не более	не более
- ТВС-WR с ПЭЛ	44.6	43.0	41.4	40.9
- ТВС-WR без ПЭЛ	44.1	42.5	40.8	40.4
- ТВСА с ПЭЛ	38.0	36.6	35.1	-
- ТВСА без ПЭЛ	37.0	35.6	34.2	-
Максимальная допустимая температура теплоносителя на выходе из ТВС по показаниям СВРК с учетом погрешности измерения температуры $\pm 1$ , °С:	не более	не более	не более	не более
- ТВС-WR с ПЭЛ	333.1	331.5	329.9	329.4
- ТВС-WR без ПЭЛ	332.6	331.0	329.3	328.9
- ТВСА с ПЭЛ	326.5	325.1	323.6	-
- ТВСА без ПЭЛ	325.5	324.1	322.7	-



## Расчетные длительности кампаний без работы с использованием МЭР составляют:

- 29-я кампания: 266.9 эфф.сут.;
- 30-я кампания: 294.6 эфф.сут.;
- 31-я кампания: 283.6 эфф.сут.;
- 32-я кампания: 288.9 эфф.сут.;
- Стационарный цикл: 289.0 эфф.сут.



## Сравнение НФХ проектных топливных загрузок с предельными значениями

Параметр	Наихудшее расчетное значение		Критерий
	TBCA	TBC-WR	
Минимальный запас по линейной тепловой нагрузке твэла, НРГ - 80%, Вт/см	25.1	47.6	> 0
Минимальный запас по линейной тепловой нагрузке твэга, НРГ - 80%, Вт/см	93.0	117.3	> 0
Максимальная относительная мощность ТВС в а.з. (Kq)	1.315	1.328	≤1.350
Максимальная относительная мощность твэла в а.з. (Kr)	1.461	1.457	≤1.500
Максимальное по ТВС выгорание топлива, выгружаемого после завершения кампании, МВт*сут/тU	50811	46167	≤55000
Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя, 1/°C	-3.05*10 <sup>-5</sup>		< 0
Коэффициент реактивности по плотности теплоносителя, 1/(г/см <sup>3</sup> )	1.75*10 <sup>-2</sup>		> 0
Эффективность рабочей группы ОР СУЗ на номинальной мощности, %	0.76		≥0.69
Эффективность АЗ (с учетом «застрявшего» ОР СУЗ) на номинальной мощности, %	6.70		≥5.50



ENERGO  
ATOM

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

SUNPP  
2017