

# Основное оборудование АЭС

*Допущено Министерством образования  
Республики Беларусь  
в качестве учебного пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по специальности  
«Паротурбинные установки  
атомных электрических станций»*

Под редакцией С.М. Дмитриева



Минск  
«Вышэйшая школа»

УДК 621.311.25.039.5(075.8)  
ББК 31.47-5я73  
О-75

Авторы : С. М. Дмитриев, Д. Л. Зверев, О. А. Бых, Ю. К. Панов, Н. М. Сорокин, В. А. Фарафонов

Рецензенты : кафедра тепловых электрических станций Белорусского национального технического университета (заведующий кафедрой доктор технических наук, профессор *Н. Б. Карницкий*); заведующий кафедрой ядерной физики Белорусского государственного университета кандидат физико-математических наук, доцент *А. И. Тимошенко*

*Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.*

**Основное** оборудование АЭС : учеб. пособие / С. М. Дмитриев  
О-75 [и др.]; под ред. С. М. Дмитриева. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. –  
288 с. : ил.

ISBN 978-985-06-2520-5.

Рассмотрены основные конструкционные схемы оборудования АЭС как российского дизайна, так и дизайна ведущих мировых производителей. Значительное внимание уделено сравнительному анализу действующих и перспективных АЭС с точки зрения безопасности и экологического воздействия на окружающую среду.

Для студентов учреждений высшего образования специальности «Паротурбинные установки атомных электрических станций».

**УДК 621.311.25.039.5(075.8)**  
**ББК 31.47-5я73**

Учебное издание

**Дмитриев Сергей Михайлович**  
**Зверев Дмитрий Леонидович**  
**Бых Олег Анатольевич** и др.

## **ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ АЭС**

Учебное пособие

Редактор *Е.Н. Шульганова*. Художественный редактор *Т.В. Шабунько*.  
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*. Корректор *Е.З. Литень*. Компьютерная верстка *И.В. Войцехович*.

Подписано в печать 19.01.2015. Формат 70×100/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Times». Офсетная  
печать. Усл. печ. л. 23,4. Уч.-изд. л. 24,07. Тираж 1100 экз. Заказ 136.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Вышэйшая школа”».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013. Пр. Победителей, 11, 220048, Минск.  
e-mail: market@vshph.com <http://vshph.com>

Открытое акционерное общество «Красная звезда».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, производителя и распространителя печатных  
изданий № 2/7 от 28.10.2013. Юридический адрес: пер. 1-й Загородный, 3, 220073, Минск.

Почтовый адрес: ул. Советская, 80, 225409, Барановичи.

**ISBN 978-985-06-2520-5**

© Оформление. УП «Издательство  
“Вышэйшая школа”», 2015

## СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ALWR	– легководный усовершенствованный реактор
A3	– аварийная защита
АРК	– рабочий орган системы управления и защиты
АТЭЦ	– атомная теплоэлектроцентраль
БЗТ	– блок защитных труб
BWR	– кипящий реактор с водой под давлением
ВБЭР	– водяной блочный энергетический реактор
ВВЭР	– водо-водяной энергетический реактор
ВКУ	– внутрикорпусные устройства
ВРК	– внутриреакторный контроль
ВПБЭР	– водяной повышенной безопасности энергетический реактор
ВХР	– водно-химический режим
ГУПД	– гидроуправляемый пневмораспределитель по давлению
ГУПУ	– гидроуправляемый пневмораспределитель по уровню
ГЦК	– главный циркуляционный контур
ГЦН	– главный циркуляционный насос
ГЦТ	– главный циркуляционный трубопровод
ГЦЭН	– главный циркуляционный электронасос
ДР	– дистанционирующая решетка
ЕЦ	– естественная циркуляция
ЗО	– защитная оболочка
КГО	– контроль герметичности оболочки
КД	– компенсатор давления
КИП	– контрольно-измерительные приборы
КИУМ	– коэффициент использования установленной мощности
КСС	– контроль стыковой сварки
КЭ	– кассета экранная
LGR	– реактор водографитовый
LMFBR	– реактор-размножитель с жидкометаллическим теплоносителем
LWBR	– легководный реактор-размножитель
LWR	– кипящий водо-водяной реактор
МПА	– максимальная проектная авария
МРЗ	– максимальное расчетное землетрясение
НК	– направляющий канал
НУЭ	– нормальные условия эксплуатации
ННУЭ	– нарушение нормальных условий эксплуатации
ПГ	– парогенератор
ПГЭ	– парогенерирующий элемент
ПС	– поглощающий стержень
ПЭЛ	– поглощающий элемент
PWR	– реактор с водой под давлением
РБМК	– реактор большой мощности канальный
РК	– рабочая кассета
РО СУЗ	– рабочие органы системы управления и защиты
РУ	– реакторная установка
СВП	– стержень с выгорающим поглотителем
ТВСА	– альтернативная тепловыделяющая сборка
ТВС	– тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ	– тепловыделяющий элемент
ТК	– температурный контроль
УВР	– усовершенствованный водяной реактор
ЦТ	– центральная труба
ШВК	– шахта внутрикорпусная

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Национальные проекты Союзного государства России и Беларуси требуют надежной топливно-энергетической базы, в которой главная роль в развитии народного хозяйства отводится атомной энергетике.

Программы развития ядерной энергетики России и Беларуси предусматривают строительство АЭС, где в качестве источника тепловой энергии должны использоваться водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР). В связи с этим особое значение приобретает изучение конструкций основного оборудования как действующих, так и вновь проектируемых установок этого класса, обладающих повышенной безопасностью.

В учебном пособии основное внимание уделено вопросам проектирования основного оборудования реакторного «острова» АЭС.

В первой главе представлены принципиальные схемы АЭС, которые являются первоэлементом для проектирования любой установки. Основа реактора – тепловыделяющий элемент и, как следствие, тепловыделяющая сборка.

Во второй главе подробно описываются все известные эксплуатируемые и проектируемые ТВС: как российского дизайна, так и дизайна ведущих мировых производителей.

В третьей главе рассматриваются конструкции корпусных реакторов на тепловых нейтронах типа ВВЭР (PWR) различной мощности: от 300 МВт – установка (ВБЭР-300) до 1500 МВт (УВР-1500), а также реакторы повышенной безопасности (ВПБЭР-600). Особое внимание уделено компоновке оборудования в защитной оболочке, радиационной безопасности, аварийным режимам.

В четвертой главе описываются конструкции парогенераторов горизонтального и вертикального исполнения.

В пятой главе рассматриваются конструкции главных циркуляционных насосов.

В шестой главе приведена концепция проекта Белорусской АЭС – проекта АЭС-2006 с реактором технологии ВВЭР, выполняемого в современной информационной среде в соответствии с требованиями ядерной и радиационной безопасности.

Материал, изложенный в учебном пособии, соответствует современным представлениям о конструкциях реакторов, парогенераторов, насосов и теплообменников АЭС и может быть полезен студентам вузов энергетических и энергомашиностроительных специальностей.

Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору Н.Б. Карницкому за тщательное ознакомление с рукописью, ценные и критические замечания, учтенные при подготовке к изданию.

Все замечания и пожелания, которые будут с признательностью восприняты авторами учебного пособия, могут быть направлены по электронному адресу [dmitriev@nntu.nnov.ru](mailto:dmitriev@nntu.nnov.ru).

# ГЛАВА 1. ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПАЛЬНЫХ СХЕМ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

## 1.1. Схемы АЭС с реакторами типа ВВЭР

На современных атомных электростанциях (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) приняты двухконтурные схемы с генерацией насыщенного или слабонагретого пара, сепарацией и промежуточным перегревом пара перед турбиной. Уровень давления генерируемого в парогенераторе пара обуславливается допустимым нагревом теплоносителя в реакторе и составляет 6–7 МПа.

Первый контур установки предназначен для отвода тепла, выделяющегося в реакторе, и передачи его второму контуру в парогенераторе (ПГ). В состав первого контура кроме реактора, парогенераторов, главных циркуляционных насосов (ГЦН) и главных циркуляционных трубопроводов (ГЦТ) входят система компенсации давления и система очистки первого контура, работающая при давлении первого контура. Для работы первого контура необходимы обслуживающие системы: подпитки и очистки контура, газовых сдувок, организованных протечек и дренажа спецводоочистки и др.

Технический контроль параметров состояния оборудования и трубопроводов, управления и защиты оборудования от повреждений при нарушении в работе первого контура, а также других контуров и систем установки осуществляется системой контроля, управления и защиты.

В состав главного циркуляционного контура установки ВВЭР-1000 (рис. 1.1) входят реактор ВВЭР и четыре циркуляционные петли, состоящие из парогенератора ПГВ-1000, ГЦН и главных циркуляционных трубопроводов Ду850, соединяющих оборудование петли с реактором. Энергия деления ядерного топлива в активной зоне реактора тепловой мощностью 3000 МВт отводится теплоносителем с температурой 322 °С. Расход воды через реактор – 15 800 кг/с, а рабочее давление в первом контуре – 16 МПа. В парогенераторе теплоноситель отдает тепло рабочему телу и с помощью ГЦН возвращается в реактор.

Система компенсации давления теплоносителя – автономная система ядерного реактора, подключаемая к контуру теплоносителя с целью выравнивания колебаний

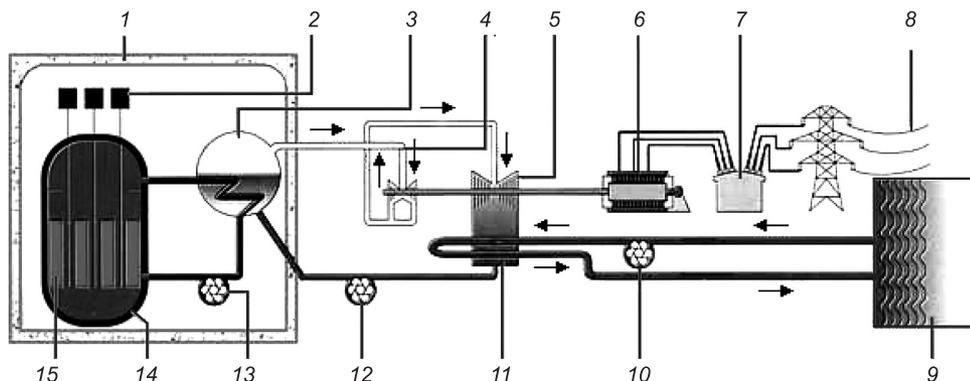


Рис. 1.1. Принципиальная схема первого контура установки ВВЭР-1000:

1 – защитная оболочка (герметичный бокс); 2 – система управления и защиты; 3 – парогенератор; 4 – пар; 5 – турбина; 6 – генератор; 7 – трансформатор; 8 – линия электропередачи к потребителю; 9 – водохранилище-охладитель; 10 – циркуляционный насос; 11 – конденсатор; 12 – питательный насос; 13 – главный циркуляционный насос; 14 – корпус реактора; 15 – топливо

давления в контуре во время работы реактора, возникающих за счет теплового расширения. В атомных энергетических установках применяются следующие системы компенсации: паровая с электронагревателями, паровая с генерацией пара твэлами, газовая, парогазовая. Типовая система компенсации давления в установках с реакторами ВВЭР включает паровой компенсатор давления, барботер, импульсно-предохранительные устройства и трубопроводы с арматурой. Компенсатор давления подключается к реактору трубопроводами без запорной арматуры.

Давление в компенсаторе создается паровой подушкой, т.е. паровым объемом компенсатора, образуемым за счет кипения теплоносителя, нагреваемого электронагревателями, размещенными под свободным уровнем. В переходных режимах при колебаниях средней температуры теплоносителя, связанных с изменением нагрузки или нарушениями в работе оборудования реакторной установки, в первом контуре меняется давление. При этом часть теплоносителя перетекает из компенсатора в контур или из контура в компенсатор по соединительным трубопроводам.

Ограничение отклонения давления от номинального значения достигается сжатием или расширением паровой подушки в верхней части компенсатора. При значительном росте давления открывают регулирующий клапан и по трубопроводу подают воду из «холодной» части контура в сопла, расположенные в верхней части компенсатора. В зависимости от параметров переходного процесса (величины и скорости изменения давления) регулирующий клапан увеличивает подачу холодной воды, прекращая или замедляя рост давления в первом контуре. При дальнейшем росте давления (из-за отказа системы или ее недостаточной эффективности) защита реактора от превышения давления обеспечивается срабатыванием импульсно-предохранительных устройств, из которых пар отводится в бак-барботер и конденсируется.

Система подпитки первого контура обеспечивает подачу подпиточной воды в главный циркуляционный контур для поддержания заданного уровня теплоносителя в компенсаторе давления. Она возвращает воду, отбираемую из контура на очистку, осуществляет заполнение первого контура водой, обеспечивает поддержание давления в первом контуре в аварийных ситуациях, связанных с падением давления (разрыв трубопроводов, обесточивание станции и т.д.), компенсирует расход организованных протечек из контура, а также малых аварийных протечек.

Система очистки теплоносителя – совокупность устройств ядерного реактора, предназначенная для поддержания водного режима, дегазации и очистки теплоносителя в целях ограничения наращивания активности долгоживущих изотопов, примесей, исключения возможности образования пробок от окислов и других химических соединений, возникающих и переносимых в теплоносителе, и предотвращения ухудшения теплосъема и теплопередачи. Несмотря на применение в первом контуре коррозионно-стойких аустенитных сталей и циркониевых сплавов, в теплоноситель переходят продукты коррозии, которую удается регулировать соответствующим подбором водно-химического режима. Применение борного регулирования интенсифицирует процесс коррозии. Источником примесей в первом контуре являются вода первичного заполнения и подпиточная вода, содержащие определенное количество солей, а также случайные загрязнения, попадающие в контур в процессе монтажа и ремонта.

Система очистки, как правило, включает циркуляционный бессальниковый центробежный насос производительностью 10–14 кг/с и напором 1,2–1,5 МПа, теплообменник-холодильник ионообменных фильтров, катионитовый и анионитовый фильтры, трубопроводы и арматуру. Вода отбирается на очистку с напора и циркуляционным насосом системы подается в теплообменник, обеспечивающий нормальную работу фильтров. Охлажденная вода поступает последовательно на катионитовый, а затем анионитовый фильтры и возвращается в реактор.

Система аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) предназначена для обеспечения безопасного снятия остаточных тепловыделений с реактора при авариях, связанных с разрывом трубопроводов первого контура.

Основными критериями обеспечения аварийного расхолаживания являются: исключение плавления оболочек твэлов при разрывах трубопроводов первого контура, включая мгновенный поперечный разрыв главного циркуляционного трубопровода; создание и поддержание подкритичности активной зоны реактора; обеспечение послеаварийного расхолаживания реактора.

Типовая САОЗ состоит из двух узлов: пассивного и активного. Пассивный узел предназначен для первоначального быстрого залива активной зоны водой с добавкой борной кислоты при разрыве трубопровода первого контура, который приводит к быстрому падению давления и обезвоживанию активной зоны. В него входят емкости САОЗ, соединенные трубопроводами с корпусом реактора. Одна половина из них сообщается с выходом активной зоны, другая – с входом в активную зону. На каждом трубопроводе от емкости к реактору устанавливаются две нормально открытые быстрозапорные задвижки, исключающие попадание азота из емкости в реактор при срабатывании системы, и два обратных клапана, отсекающих емкости САОЗ от реактора в процессе нормальной эксплуатации.

Активный узел САОЗ состоит из двух независимых контуров: аварийного расхолаживания и аварийного впрыска бора. Контур аварийного расхолаживания реактора предназначен для расхолаживания реактора после отработки пассивного узла САОЗ. Кроме того, этот контур используется для планового расхолаживания реактора по схеме «реактор – теплообменник расхолаживания – насос – реактор». Контур аварийного расхолаживания включает насосы и теплообменники аварийного расхолаживания, трубопроводы и арматуру. Всас насосов соответствующей перекладкой арматуры может подключаться к трем точкам: баку аварийного запаса раствора бора, приемку реакторного помещения и горячему трубопроводу неотключаемой от реактора части контура. В аварийном режиме контур осуществляет подачу воды в реактор над и под активную зону из бака аварийного запаса раствора бора, а после опустошения бака переходит на работу по схеме «реактор – приемок реакторного помещения – теплообменник расхолаживания – насос – реактор».

Контур аварийного впрыска бора предназначен для создания и поддержания подкритичности активной зоны, а также подпитки при аварийном расхолаживании. В его состав входят насосы аварийного впрыска бора, бак запаса концентрированного раствора бора, трубопроводы и арматура.

## 1.2. Описание и обоснование схемно-конструктивных решений ВПБЭР-600

В данном параграфе приведено описание схемно-конструктивных решений реакторной установки (РУ) с реактором интегрального типа и шестью главными циркуляционными насосами на днище реактора, размещенного в страховочном корпусе.

Описание выполнено в соответствии с принципиальной схемой реакторной установки ВПБЭР-600 (рис. 1.2).

**Реакторная установка** состоит из следующих основных контуров и систем:

- первый контур (реактор и система очистки (КВЕ));
- второй контур (LAV и LBA);
- промежуточный контур охлаждения (КАА);
- система аварийного отвода тепла (JNB);

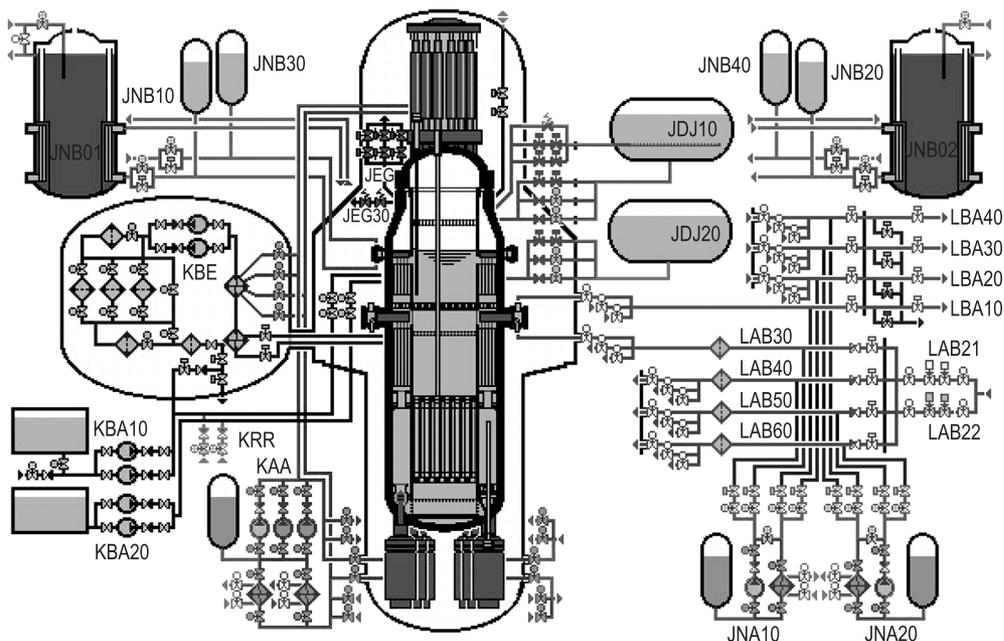


Рис. 1.2. Принципиальная схема ВВЭР-600

- система удержания давления в реакторе;
- система ввода жидкого поглотителя (JDJ);
- система защиты первого контура от повышения давления в запроектных авариях;
- система декомпрессии реактора;
- система подпитки первого контура теплоносителем (KBA);
- система газа;
- система ремонтного расхолаживания (JNA);
- страховочный корпус;
- система вентиляции страховочного корпуса.

Реакторная установка размещена внутри прочноплотной защитной оболочки.

Системы аварийного отвода тепла, удержания давления в реакторе, ввода жидкого поглотителя, защиты первого контура от повышения давления в запроектных авариях, декомпрессии реактора, страховочный корпус, а также защитная оболочка являются системами и устройствами безопасности.

**Первый контур** предназначен для отвода тепла от активной зоны и передачи его второму контуру.

Первый контур включает:

- водо-водяной реактор интегрального типа, в корпусе которого размещены активная зона с рабочими органами СУЗ, секции парогенераторов, контур охлаждения активной зоны, парогазовый компенсатор давления, теплообменники-конденсаторы системы аварийного отвода тепла, шесть главных циркуляционных электронасосов на патрубках, выполненных в днище корпуса реактора;
- систему очистки теплоносителя и борной компенсации реактивности.

Циркуляция теплоносителя в реакторе осуществляется главными циркуляционными электронасосами следующим образом. Теплоноситель первого контура из верхней части реактора поступает в парогенераторы, где отдает тепло второму контуру.

Охлажденный теплоноситель поступает на всас главных циркуляционных электронасосов. С напора электронасосов он подается в активную зону, где нагревается, поднимается сначала по индивидуальным тяговым участкам, а затем по общему тяговому участку блока труб и устройств вновь поступает на вход в парогенераторы.

Циркуляция теплоносителя при аварийных ситуациях, связанных с остановкой главных циркуляционных электронасосов, осуществляется за счет естественной конвекции по той же схеме.

Водно-химический режим первого контура – коррекционный аммиачно-борно-калиевый.

В качестве газа в парогазовом компенсаторе объема используется азот.

Система очистки теплоносителя и борной компенсации реактивности предназначена для поддержания требуемого качества теплоносителя первого контура и вывода из теплоносителя борной кислоты в процессе выгорания топлива в активной зоне.

В состав системы входят:

- рекуператор;
- доохладитель;
- два электронасоса (один резервный);
- фильтр смешанного действия с катионитом в калий-аммиачной форме и анионитом в боратной форме (постоянно находится в работе, обеспечивая очистку теплоносителя от продуктов коррозии, радиоактивных изотопов, хлоридов и поддержание «буферности» водно-химического и газового режима первого контура);
- три анионитовых фильтра с анионитом в ОН-форме (подключаются при необходимости вывода борной кислоты);
- катионитовый фильтр с катионитом в Н<sup>+</sup>-форме (подключается при необходимости вывода избыточной щелочности);
- трубопроводы и арматура.

Очистка теплоносителя первого контура происходит следующим образом. Часть теплоносителя первого контура поступает в систему очистки, где охлаждается сначала в рекуператоре, а затем в доохладителе, поступает на насос системы очистки, после чего очищается в ионообменном фильтре смешанного действия, подогревается в рекуператоре и возвращается в реактор. Циркуляция теплоносителя осуществляется одним из насосов системы очистки. В случае остановки работающего насоса в работу автоматически включается резервный.

Вывод борной кислоты из теплоносителя происходит следующим образом: теплоноситель первого контура, охлаждаясь в рекуператоре, а затем в доохладителе системы очистки, насосом системы очистки направляется на катионитовый фильтр, где осуществляется выведение щелочности, и на один из анионитовых фильтров, где ведется очистка теплоносителя от борной кислоты. Очищенный теплоноситель поступает на ионообменный фильтр смешанного действия, подогревается в рекуператоре и далее возвращается в реактор. Вывод борной кислоты происходит периодически ступенями 15–20 раз за кампанию между перегрузками топлива.

**Второй контур** предназначен для получения пара за счет отвода тепла от теплоносителя первого контура.

В его состав входят:

- двенадцать секций, объединяющихся в четыре ПГ;
- четыре фильтра;
- локализирующая арматура;
- трубопроводы.

Питательная вода из паротурбинной установки подается в ПГ, а перегретый пар из ПГ поступает в паротурбинную установку.

На каждой из двенадцати секций размещена локализирующая электроприводная арматура. На паропроводах каждого из четырех ПГ установлена двойная локализирующая пневмоприводная арматура, одна из которых срабатывает по прямому сигналу снижения уровня в реакторе, а на трубопроводах питательной воды локализирующая пневмоприводная арматура служит для отключения ПГ в случае нарушения герметичности его теплообменной поверхности или трубопроводов.

На трубопроводах питательной воды каждого из четырех ПГ установлены механические фильтры для тонкой очистки питательной воды.

**Промежуточный контур охлаждения** предназначен для отвода тепла от оборудования реакторной установки и передачи его в систему контура технической воды.

Система обеспечивает постоянную подачу воды промежуточного контура на охлаждение:

- шести главных циркуляционных насосов производительностью 70 т/ч;
- 138 приводов системы управления и защиты (СУЗ) производительностью 0,6 т/ч;
- двух доохладителей системы очистки теплоносителя и борной компенсации реактивности производительностью 55 т/ч.

В состав системы входят:

- три насоса (один резервный);
- два теплообменника;
- газовый компенсатор давления;
- ионообменный фильтр смешанного действия;
- фильтр-ловушка;
- арматура и трубопроводы.

Система работает следующим образом. Теплоноситель контура подается насосами на охлаждение оборудования первого контура, после чего идет в теплообменники и далее охлажденный – на всас насосов. Температура воды, поступающей на охлаждение оборудования, – не более 20–45 °С. В случае остановки работающего насоса в работу автоматически вводится резервный.

Давление в промежуточном контуре охлаждения поддерживается на уровне 18 МПа (что выше давления первого контура) с помощью газового компенсатора давления, в котором в качестве газа используется азот.

**Система аварийного отвода тепла** (рис. 1.3) предназначена для отвода тепла от реактора при авариях и аварийных ситуациях в случае отказа систем нормального расхолаживания и включает:

- систему пассивного отвода тепла;
- систему непрерывного отвода тепла;
- два блока теплообменников, каждый из которых представляет собой бак запаса воды с расположенными в нем тремя теплообменниками системы пассивного отвода тепла, тремя теплообменниками системы непрерывного отвода тепла и трубопроводами подвода и отвода технической воды.

**Система пассивного отвода тепла** состоит из двух независимых петель, которые отводят тепло в водяных теплообменниках, расположенных в блоках теплообменников системы аварийного отвода тепла.

В состав каждой петли входят:

- три теплообменника-конденсатора, встроенных в реактор, мощностью 6 МВт;
- три водяных теплообменника мощностью 6 МВт;
- компенсатор давления;
- подключающая арматура, срабатывающая по сигналам от системы автоматизированного управления, а также по сигналам от прямого действия среды (по уровню и давлению в реакторе);
- трубопроводы.

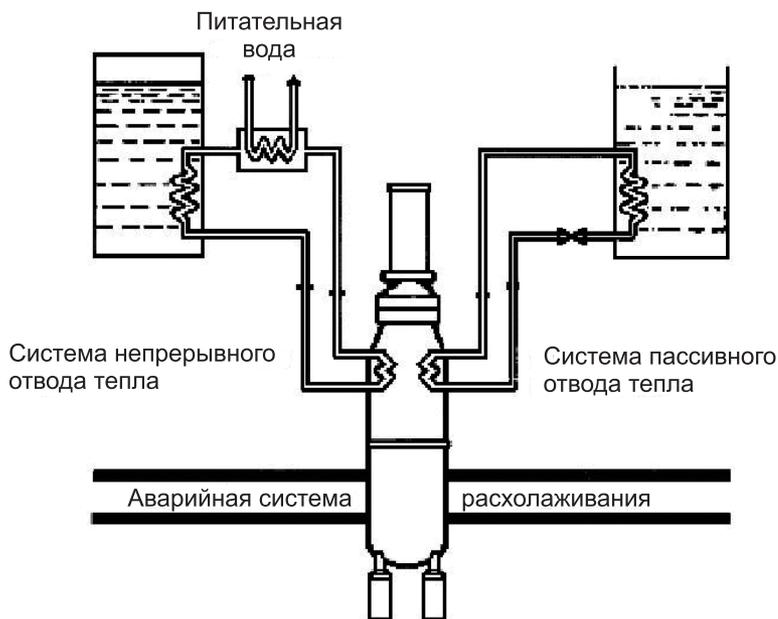


Рис 1.3. Система аварийного отвода тепла

При нормальной работе помимо подключающей арматуры для термостабилизации патрубков в реакторе и трубопроводах предусмотрены протечки.

При расхолаживании тепло, получаемое от первого контура в теплообменниках-конденсаторах, отводится в водяных теплообменниках, расположенных в блоках теплообменников, через которые циркулирует техническая вода. В случае прекращения циркуляции технической воды отвод тепла происходит за счет выпаривания воды из блоков. Запас воды в блоках обеспечивает расхолаживание реактора в течение трех суток. Сброс пара осуществляется в атмосферу.

Ввод системы в действие производится открытием клапанов на трубопроводах слива воды из теплообменников системы пассивного отвода тепла, расположенных в блоках теплообменников.

Давление в системе поддерживается на уровне 18 МПа (что выше давления первого контура) с помощью газового компенсатора давления, в котором в качестве газа используется азот.

Теплообменники-конденсаторы при герметичном первом контуре работают в водо-водяном режиме, а в случае разгерметизации первого контура оказываются в паровом объеме и работают как конденсаторы.

*Система непрерывного отвода тепла* состоит из двух независимых петель, которые отводят тепло в водяных теплообменниках, размещенных в блоках теплообменников системы аварийного отвода тепла.

В состав каждой петли входят:

- три теплообменника-конденсатора, встроенных в реактор, мощностью 6 МВт;
- промежуточный теплообменник, охлаждаемый холодной водой от конденсатных насосов турбогенератора;
- три водяных теплообменника мощностью 6 МВт;
- компенсатор давления;
- трубопроводы.

Система непрерывного отвода тепла работает при естественной циркуляции теплоносителя следующим образом. Тепло, получаемое от первого контура в теплообменниках-конденсаторах, отводится в промежуточные теплообменники и идет на подогрев питательной воды парогенераторов. Вода в блоках теплообменников нагревается до температуры конденсата из конденсатора турбогенератора (постоянная циркуляция технической воды через блоки не предусматривается).

*Блок теплообменников* предназначен для отвода тепловыделений от реактора при работе систем непрерывного и пассивного отвода тепла и представляет собой бак с запасом воды, в котором размещена теплообменная поверхность. Охлаждаемая среда движется внутри трубок теплообменной поверхности, охлаждающая вода – в межтрубном пространстве. Часть теплообменной поверхности подключена к системе пассивного отвода тепла, часть – к системе непрерывного отвода тепла. Объем воды в блоке – 1000 м<sup>3</sup>.

*Система удержания давления в реакторе* используется совместно с системой аварийного отвода тепла для предотвращения роста давления в реакторе свыше 1,15 рабочего (расчетного) давления в переходных режимах при прекращении подачи питательной воды и приема пара за счет прокачки воды из гидроаккумуляторов системы в парогенераторы.

В состав системы входят:

- четыре гидроаккумулятора объемом 8 м<sup>3</sup>;
- арматура и трубопроводы.

При возникновении теплоотводных аварий (например, прекращение подачи питательной воды или приема пара) открывается арматура на сбросе пара в атмосферу, расположенная за пределами защитной оболочки. Вода из гидроаккумуляторов под действием сжатого газа прокачивается через парогенератор, снимая пик давления в реакторе до подхвата системами аварийного отвода тепла.

*Система ввода жидкого поглотителя* предназначена для перевода и поддержания активной зоны реактора в подкритическом и холодном разотравленном состоянии в случае несрабатывания нескольких приводов СУЗ. Кроме того, она используется для подпитки реактора при разгерметизации первого контура.

Система состоит из следующих элементов:

- двух емкостей, содержащих борный раствор, объемом 30 м<sup>3</sup>;
- подключающей арматуры;
- трубопроводов.

Ввод системы в действие осуществляется открытием пневмоприводной арматуры на трубопроводах, соединяющих емкости с борным раствором с реактором и встроенным в реактор парогазовым компенсатором давления. Открытие клапанов производится автоматически при невведении в активную зону реактора нескольких рабочих органов СУЗ после срабатывания аварийной защиты.

Система работает следующим образом. После открытия клапанов борный раствор подается в реактор за счет превышения емкостей над реактором в результате выравнивания давлений в реакторе и емкостях или за счет давления газовой подушки при разгерметизации первого контура. Начальное давление в газовой подушке составляет 10 МПа.

*Система защиты первого контура от повышения давления в запроектных авариях* является страховочной и предназначена для защиты реактора от повышения в нем давления в запроектных авариях, когда постулируются отказы систем безопасности (например, при несрабатывании аварийной защиты). Защита осуществляется за счет сброса теплоносителя из первого контура.

Система включает:

- два предохранительных устройства, каждое из которых состоит из мембранного устройства и предохранительного клапана;
- трубопроводы.

Мембранные устройства расположены до предохранительных клапанов со стороны реактора для предотвращения утечки теплоносителя из первого контура в случае неплотности клапанов и рассчитаны на давление срабатывания 23,5 МПа.

Сброс теплоносителя первого контура при работе системы осуществляется в страховочный корпус.

**Система декомпрессии реактора** предназначена для организации сброса давления из реактора при возникновении ситуации с разгерметизацией первого контура. Она служит средством уменьшения расхода истечения теплоносителя из реактора при разгерметизации его корпуса.

Система включает:

- два мембранных клапана прямого действия;
- два клапана с пневмоприводом, получающие сигнал от прямого действия среды;
- два клапана с пневмоприводом, управляемые дистанционно;
- трубопроводы.

Сброс из реактора осуществляется в страховочный корпус. Два клапана прямого действия срабатывают при повышении давления в страховочном корпусе, а два клапана с пневмоприводом – при снижении уровня давления в реакторе. Клапаны установлены на двух параллельных ветках таким образом, что клапаны прямого действия расположены до клапанов с пневмоприводом со стороны реактора.

**Система подпитки первого контура теплоносителем** используется для ввода в первый контур химических реагентов с целью поддержания требуемого водно-химического режима, а также в качестве страховочной системы для восполнения потерь теплоносителя первого контура в случае возникновения запроектной аварии с разгерметизацией первого контура.

Система является двухканальной и включает:

- два электронасоса производительностью 20 м<sup>3</sup>/ч;
- бак с борсодержащим раствором объемом 120 м<sup>3</sup>;
- трубопроводы и арматуру.

Ввод системы в действие осуществляется дистанционно при уменьшении уровня воды в реакторе ниже допустимого по условиям эксплуатации. Имеется возможность подачи воды из стационарных систем после исчерпания запаса воды бака с борсодержащим раствором.

**Система газа** предназначена для создания исходного давления газа в реакторе, емкостях системы ввода жидкого поглотителя, компенсаторах давления систем аварийного отвода тепла, промежуточного контура охлаждения оборудования и ремонтного расхолаживания, а также для заполнения и подпитки газом страховочного корпуса указанного оборудования реакторной установки и приема газа от оборудования при проведении регламентных работ, связанных со снятием давления или вскрытием перечисленных систем реакторной установки.

Система включает:

- газовые баллоны;
- компрессор;
- арматуру и трубопроводы.

Ввод системы газа в действие осуществляется дистанционно.

**Система ремонтного расхолаживания** предназначена для снижения и поддержания температуры в реакторе после вывода установки из действия на уровне, позволяющем вскрытие первого контура и проведение перегрузочных, а также ремонтных работ.

Система включает:

- два насоса (один резервный);
- два теплообменника;

- фильтр;
- арматуру и трубопроводы.

Система подключена к парогенераторам по второму контуру и отводит тепло от реактора с помощью этих парогенераторов, передавая его в теплообменниках технической воде. В случае выхода из строя одного теплообменника расхолаживание установки производится вторым теплообменником.

**Страховочный корпус** предназначен для размещения внутри него реактора, оборудования и трубопроводов первого контура и служит средством для удержания активной зоны под уровнем теплоносителя, обеспечения расхолаживания реактора и локализации радиоактивных продуктов в случае разгерметизации системы первого контура.

Страховочный корпус представляет собой герметичную металлическую конструкцию, рассчитанную на давление, возникающее при разгерметизации первого контура.

Внутри страховочного корпуса расположены:

- реактор;
- система очистки теплоносителя и борной компенсации реактивности;
- система вентиляции страховочного корпуса;
- арматура и трубопроводы первого, второго и третьего контуров, а также систем аварийного отвода тепла, декомпрессии реактора, защиты первого контура от превышения давления в запроектных авариях и др.

Все проходки трубопроводов и кабелей через страховочный корпус выполнены герметичными. На трубопроводах первого контура, выходящих из страховочного корпуса, установлена локализирующая арматура. Страховочный корпус заполнен азотом.

**Система вентиляции страховочного корпуса** используется для поддержания в нем необходимого температурного режима.

Система состоит из электровентиляторов и холодильников и работает по замкнутому циклу. Газ из верхней части страховочного корпуса поступает на всас электровентиляторов, предварительно охлаждаясь в холодильниках системы вентиляции. С напора электровентиляторов охлажденный газ подается в страховочный корпус.

Реакторная установка размещена внутри прочноплотной **защитной оболочки**, которая предназначена для предохранения РУ как в процессе работы, так и в период перезарядки реактора от внешних воздействий, обусловленных природно-климатическими явлениями (ураганы и т.д.) и деятельностью человека (падение самолета, взрывы на соседнем предприятии и пр.), а также для локализации радиоактивности в процессе перезарядки реактора и при запроектных авариях.

Защитная оболочка представляет собой прочноплотную строительную конструкцию из бетона, внутри которой размещены страховочный корпус, помещения реакторной установки, необходимое оборудование, шахты и помещения для производства перезарядки реактора, профилактических и ремонтных работ.

Защитная оболочка рассчитана на внутреннее давление 0,1 МПа и на воздействия извне.

### 1.3. Принципиальная схема УВР-1500

**Комплекс основных схемных решений** сформулирован с учетом:

- фундаментального мирового опыта разработки и эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами с водой под давлением (PWR);
- внедрения отработанных решений по системам и оборудованию традиционных для реакторных установок ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова» (ОКБМ);
- заимствования систем и оборудования энергоблоков ВВЭР;

- выполнения национальных норм и правил атомной техники;
- следования нормам МАГАТЭ и рекомендациям международных экспертных групп;
- использования мирового и отечественного опыта в области детерминистского и вероятностного анализа безопасности при определении состава и структуры систем безопасности.

Схемные решения направлены на достижение следующих целей:

- организация надежной работы энергоблока в соответствии с требованиями по нагрузке в энергосистеме;

- обеспечение максимального КПД энергоблока за счет параметров рабочего пара, экономичной тепловой схемы, сокращения потерь и энергопотребления собственных нужд;

- обеспечение проектных условий работы основного технологического оборудования;

- возможность включения резервного оборудования взамен вышедшего из строя при сохранении текущего уровня мощности;

- возможность работы на сниженном уровне мощности, в том числе при неполном числе работающих петель теплообмена;

- удержание реактора на мощности при отключении нагрузки от генератора;

- повышение свойств инерционности реакторной установки, сглаживания термосиловых нагрузжений и сокращение их цикличности;

- повышение проектных запасов, включая запасы подкритичности, теплотехнические и прочностные, с усилением свойств самозащищенности и предпосылками для форсирования мощности блока;

- исключение предпосылок и условий для имевших место аварий и типовых отказов;

- сокращение радиоактивных отходов и дозонагрузок персонала;

- обеспечение пределов и условий безопасности, возможность функциональных проверок систем безопасности;

- предотвращение аварийных ситуаций и аварий, их локализация и ограничение последствий.

Применительно к системам безопасности реализуются следующие подходы: простота; эшелонирование в глубину; умеренное резервирование; сочетание активных и пассивных систем с учетом принципов единичного отказа, разнотипности, пространственного разнесения; обособанное совмещение функций, в том числе с функциями нормальной эксплуатации; автоматический ввод в действие, в том числе с помощью устройств прямого действия; обеспечение длительного периода невмешательства (grace period), в том числе в ситуации полного обесточивания; наличие систем и средств по ограничению (до уровня нормативных требований) технических и радиационных последствий тяжелых аварий с повреждением топлива, переводом блока в стабильное состояние и возможностью его долговременного контроля и поддержания вплоть до проведения восстановительных работ.

В состав реакторной установки УВР-1500 входят следующие основные контуры и системы:

- первый контур;

- система компенсации давления;

- вспомогательные системы первого контура, обеспечивающие технологический процесс выработки тепла реактором;

- второй контур;

- система аварийного расхолаживания;

- система аварийного охлаждения активной зоны;

- пассивная система аварийного ввода борной кислоты.

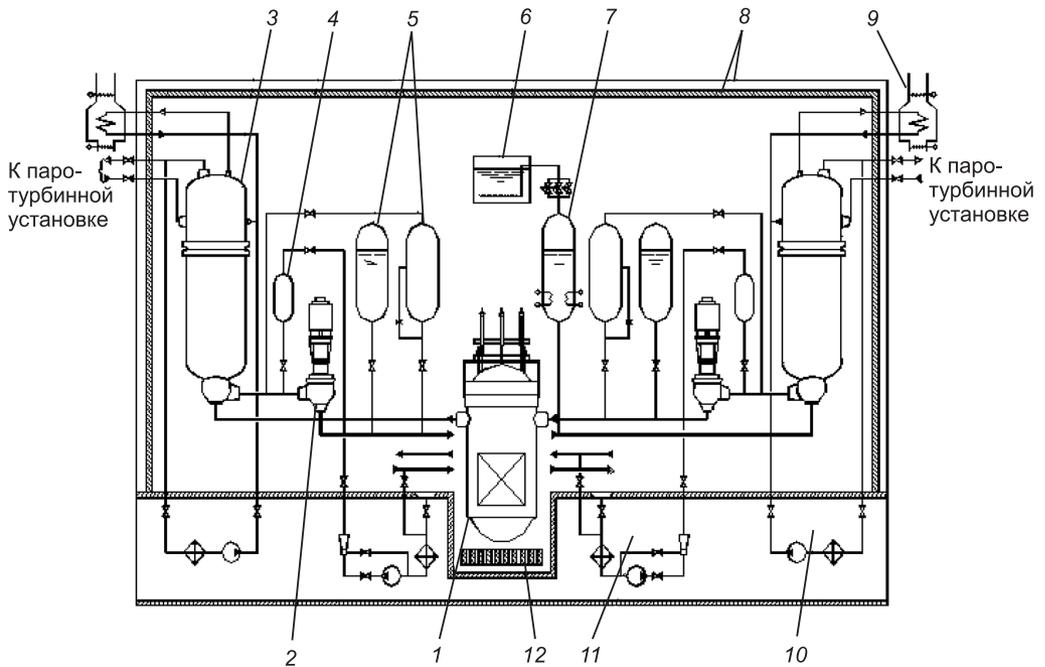


Рис. 1.4. Принципиальная схема УВР-1500:

1 – реактор; 2 – главный циркуляционный насос; 3 – парогенератор; 4 – система быстрого ввода бора; 5 – система аварийного охлаждения зоны (гидроемкости 1-й и 2-й ступеней); 6 – барботер; 7 – компенсатор давления; 8 – защитная оболочка двойная бетонная; 9 – система аварийного расхолаживания и продувки ПГ; 10, 11 – система планового и аварийного расхолаживания первого контура; 12 – ловушка активной зоны

Принципиальная схема реакторной установки УВР-1500 представлена на рис. 1.4 и отражает основные схемно-конструктивные решения по отдельным системам и оборудованию РУ.

**Первый контур.** Четырехпетлевая схема циркуляции в системе охлаждения реактора включает:

- «горячую» магистраль Ду850, связывающую реактор с гидрокамерой ПГ;
- вертикальный парогенератор ПГВС;
- магистраль Ду850, связывающую парогенератор с гидрокамерой ГЦН первого контура в одной плоскости с «горячей» магистралью петли;
  - главный циркуляционный насос первого контура ЦВН-18 с горизонтальным боковым подводом теплоносителя в приемную камеру и отводом его из напорной камеры вертикально вниз;
  - «холодную» магистраль петли циркуляции Ду850, связывающую ГЦН с реактором и выполненную без гидрозатвора по отношению к активной зоне;
  - общие для всех петель опускной («холодный») и подъемный («горячий») участки контура в реакторе.

При проектировании главного циркуляционного контура (ГЦК) учитывались уроки эксплуатации аналогов и прототипов и были исключены предпосылки для имевших место типовых отказов и аварий. Способствуя повышению надежности и безопасности УВР-1500 в целом, предусматриваются следующие компоновочные решения:

- размещение петель ГЦК внутри защитной оболочки (ЗО);
- идентичность компоновки и минимальная металлоемкость циркуляционных петель;

- исключение влияния одной циркуляционной петли на напряженное состояние другой;
- обеспечение возможности свободного перемещения оборудования ГЦК относительно корпуса реактора при разогреве и расхолаживании РУ;
- на ГЦК в местах подключения трубопроводов систем первого контура устанавливаются сузающие устройства с целью ограничения истечения теплоносителя из первого контура при разрывах трубопроводов и др.

В числе первичных измерительных преобразователей, обеспечивающих контроль основных параметров контура, предусмотрены дополнительные средства для измерения в реакторе температуры, давления на случай аварийных ситуаций, контроля ситуации и управления.

Основные достоинства принятых решений:

- простой контур циркуляции;
- высокий уровень естественной циркуляции (ЕЦ), в том числе в пароконденсатном режиме при аварийном снижении уровня воды в первом контуре;
- повышенная надежность охлаждения активной зоны в аварийных условиях, включая аварии с потерей теплоносителя и обесточивание;
- возможность выполнения перегрузки топлива при ЕЦ воды в петлях первого контура и отвода остаточного тепла через ПГ.

**Система компенсации давления.** Традиционным является паровой компенсатор давления (КД), подключенный к одной из «горячих» магистралей первого контура трубопроводом Ду350.

Проектом предусматривается повышенный паровой объем компенсатора (свойство самозащитности – «мягкий» компенсатор давления). В состав системы компенсации давления также входят:

- барботер;
- трубопровод сброса пара после импульсно-предохранительных устройств;
- трубопровод сброса парогазовой смеси с арматурой;
- трубопровод впрыска;
- импульсные трубопроводы, соединяющие КД с прямотекущими устройствами (типа ГУПД, ГУПУ).

В барботере предусмотрены штуцеры для подсоединения трубопроводов подвода пара, подвода и отвода охлаждающей воды, подвода воды для заполнения барботера, подвода азота для срыва вакуума в пароподводящем трубопроводе и вентиляции газового объема барботера, дренажа, штуцеры для замера давления и уровня, чехол под термодатчик.

Перечень **вспомогательных систем первого контура, обеспечивающих технологический процесс выработки тепла реактором**, и их функциональное назначение традиционны для РWR. В их число входят системы:

- очистки теплоносителя от продуктов коррозии и других примесей;
- поддержания и регулирования концентрации жидкого поглотителя в воде первого контура;
- нормальной подпитки и заполнения контура водой;
- газоудаления и дренажа, пробоотбора, коррекции водно-химического режима (ВХР) и др.

Проектирование систем осуществлялось с учетом:

- снижения роли борной системы в регулировании мощности реактора (с ее упрощением и сокращением отходов) за счет повышения эффективности электрохимических РО СУЗ;
- развития бессбросных автоматизированных средств контроля активности и качества воды первого контура с целью сокращения объема отходов;

- повышения надежности отсечения реактора и оборудования петель циркуляции первого контура от вспомогательных систем, включая системы газоудаления и дренажа, с целью предотвращения ошибочного разуплотнения первого контура;
- надежной защиты первого контура от превышения давления со стороны вспомогательных систем;
- технических мер по предотвращению неотключаемых течей через предохранительные устройства на первом контуре и ограничению последствий в таких ситуациях;
- повышенного внимания к стыкам трубопроводов, где возможно смешение разнотемпературных потоков;
- сокращения числа арматуры вспомогательных систем, реализации, по возможности, многоцелевого использования оборудования (насосов, теплообменников, средств контроля), максимальной диагностируемости и простоты обслуживания систем;
- сокращения числа и протяженности импульсных трубопроводов первичных измерительных преобразователей;
- максимального заимствования и стандартизации используемого оборудования, в том числе с оборудованием блоков ВВЭР-1000.

**Второй контур** в границах реакторного отделения выполнен по традиционной для PWR большой мощности четырехпетлевой схеме.

Такое резервирование петель позволяет обеспечить приемлемые скорости воды и пара в магистралях, обеспечить вибро- и эрозионную стойкость трубопроводов в течение длительного срока службы, обеспечить возможность независимого подключения каналов систем нормального и аварийного расхолаживания к парогенераторам, реализовать режимы работы реактора на сниженной мощности с неполным числом петель теплообмена и др.

Предусмотрено повышение локализирующих свойств участков второго контура, образующих границы контура локализации в случае межконтурной течи в ПГ.

Состав и функции **вспомогательных систем второго контура** достаточно отработаны и традиционны на действующих блоках ВВЭР. Для них предусматриваются максимальное использование имеющегося отечественного опыта и заимствование оборудования этих систем, к которым применяются такие же подходы, как и к вспомогательным системам первого контура, более глубокая проработка требований к качеству воды второго контура и системам его поддержания, учитывая влияние этого фактора на ресурсные характеристики трубной системы ПГ.

**Система аварийного расхолаживания (САРХ)** состоит из пассивной и активной частей.

В *пассивной части* структура, мощность, число каналов, запас воды, алгоритм и способ подключения, требования к оборудованию определяются исходя из следующих положений:

- подключение системы к петлям второго контура с использованием теплообменной поверхности ПГ;
- обеспечение проектных характеристик с учетом возможной потери одного канала в результате внешнего воздействия типа «падение самолета»; компоновочное разнесение каналов и другие защитные меры с предотвращением потери более одного канала при падении самолета;
- реализация аварийного теплоотвода после сброса аварийной защиты (АЗ) при ЕЦ по всем контурам и давлению в реакторе и петлях второго контура ниже уставок срабатывания предохранительных клапанов;
- передача тепла от второго контура в теплообменниках-конденсаторах САРХ технической воде с ее выпариванием или атмосферному воздуху;

- длительность пассивного отвода тепла за счет выпаривания технической воды – 12–24 ч (с учетом потери ее запаса в одном из каналов в результате внешнего воздействия) и с неограниченной длительностью при воздушном охлаждении теплообменников-конденсаторов;

- автоматический ввод системы в действие с использованием электрических управляющих систем безопасности (УСБ), устройств прямого действия, разнотипной резервированной арматуры с учетом принципа безопасного отказа;

- равнопрочность оборудования петли второго контура и САРХ с учетом возможного повышения давления при межконтурной течи в ПГ.

Система аварийного расхолаживания (вариант водяного охлаждения) теплообменников-конденсаторов включает:

- число независимых каналов – 4;

- мощность каждого канала –  $0,7 \% N_{\text{ном}}$ ;

- поверхность нагрева теплообменника-конденсатора каждого канала  $\sim 350 \text{ м}^2$ .

В активной части структура, число каналов, алгоритм и способ подключения, требования к оборудованию определяются исходя из следующих положений:

- подключение системы к петлям второго контура с использованием теплообменной поверхности ПГ;

- поддержание проектной мощности системы  $\sim 2 \% N_{\text{ном}}$  с учетом возможной потери обеспечивающих СВ (техническая вода) в одном из каналов в результате внешнего воздействия типа «падение самолета» и отказа активного элемента в любом другом канале системы;

- реализация аварийного теплоотвода после сброса АЗ при давлении в реакторе и петлях второго контура ниже уставок срабатывания предохранительных клапанов;

- надежное энергоснабжение потребителей, обеспечивающих проектные характеристики системы (насосы, подключающая арматура) и связанного с ней контура охлаждающей воды.

При этом пик остаточных тепловыделений сбрасывается через быстродействующие редуцирующие установки либо в главные конденсаторы, либо в атмосферу.

В качестве указанной системы может быть использована система продувки и аварийного расхолаживания парогенераторов, предусматриваемая в проекте В-392.

**Система аварийного охлаждения активной зоны** состоит из пассивной и активной частей.

*Пассивная часть* включает гидроемкости с запасом воды, трубопроводы с арматурой, средства измерения (см. рис. 1.3). Формирование системы осуществляется с учетом следующих положений:

- система должна обеспечивать охлаждение активной зоны с непревышением принятых пределов повреждения твэла в авариях разгерметизации первого контура с масштабом разгерметизации «большая и средняя течь», включая течь Ду850; такие течи характеризуются резким снижением давления в первом контуре и предъявляют высокие требования к быстродействию и производительности САОЗ;

- функционирование системы должно обеспечиваться без потребления энергии и вмешательства персонала;

- размещение системы под защитной оболочкой предотвращает отказы по причине внешних воздействий;

- реализуется эффективное использование запасов борированной воды при пассивном уменьшении ее поступления в реактор (самопрофилирование расхода) по мере снижения параметров и снижения интенсивности истечения и с обеспечением баланса между тепловыделениями активной зоны и теплоотводом за счет парового истечения среды из реактора; одновременно схемой подключения емкостей САОЗ

обеспечивается поступление борированной воды в активную зону и ее охлаждение при любом адресе разгерметизации первого контура;

- запас борированной воды САОЗ позволяет обеспечить пассивное охлаждение активной зоны в авариях с течью первого контура способом проливки реактора в течение ~ 24 ч (с учетом работы САРХ). При этом выполняется требование по ограничению масштаба повреждения твэла, сохраняется конструктивная геометрия активной зоны с обеспечением выгрузки тепловыделяющей сборки (ТВС) после стабилизации реактора в безопасном состоянии.

Давление срабатывания гидроемкостей первой ступени ~ 6 МПа (используется газовое поддавливание); второй ступени ~ 1,5 МПа (используется гидростатический напор). Запас борированной воды в емкостях первой ступени ~ 300 м<sup>3</sup>; в емкостях второй ступени ~ 1440 м<sup>3</sup>.

*Активная часть* включает баки с запасом воды, электронасосы, струйные насосы, трубопроводы с арматурой, средства управления. Формирование системы осуществляется с учетом следующих положений:

- система должна обеспечивать поддержание активной зоны под заливом теплоносителя и ее охлаждение в авариях разгерметизации первого контура во всем детерминистском диапазоне проектных течей, включая малые, средние, большие в диапазоне давления первого контура ниже ~ 8–11 МПа; к ним относятся также ситуации с несанкционированным открытием (и последующей неподачкой или незакрытием) клапанов на первом контуре;

- функционирование системы предусматривается при потреблении электроэнергии с учетом надежного энергоснабжения насосов;

- резервирование каналов выполняется исходя из размещения части оборудования за пределами ЗО, с учетом возможного отказа одного из каналов в результате внешних воздействий;

- резервирование точек подключения каждого канала насосов и подключающей арматуры выполняется с учетом принципа единичного отказа (в том числе с учетом такого исходного события, как разрыв подключающего трубопровода в одном канале и дополнительного отказа насоса или подключающей арматуры в другом канале).

Производительность системы уточняется по результатам анализа аварии разгерметизации на следующем этапе проектирования. В качестве аналога системы может быть использована система планового и аварийного расхолаживания первого контура.

***Пассивная система аварийного ввода борной кислоты*** предназначена для перевода реактора в подкритическое состояние при отказах в электромеханической системе воздействия на реактивность и для поддержания его в безопасном состоянии до восстановления проектной работоспособности отказавших элементов в электромеханической СУЗ. Система обеспечивает также аварийное введение борной кислоты в реактор и восстановление ее рабочей концентрации в запроектных ситуациях, связанных с ошибочным вводом в реактор воды с нулевой концентрацией бора.

Четыре емкости объемом по 10 м<sup>3</sup> для обеспечения самослива высококонцентрированного раствора бора подключаются симметрично к четырем петлям контура с превышением нижней точки емкости над осью холодного трубопровода Ду850 ~ 20 м; при этом обеспечивается превышение емкостей над верхней точкой КД. Концентрация борной кислоты в емкостях ~ 40 г/кг. Схема подключения позволяет использовать выбег ГЦН для интенсификации ввода раствора бора в реактор. Оборудование пассивных каналов ввода бора выполняется равнопрочным с оборудованием первого контура. Диаметр подключающих трубопроводов ~ 300 мм. Подключение каналов автоматическое.

## 1.4. Принципиальная схема АТЭС с реактором ВБЭР-300

В состав реакторной установки ВБЭР-300 входят следующие основные контуры и системы:

- первый контур;
- второй контур;
- промежуточный контур охлаждения оборудования реакторной установки;
- система аварийного отвода тепла;
- система аварийного охлаждения активной зоны;
- система подпитки первого контура;
- система ввода жидкого поглотителя;
- система снижения давления в герметичном ограждении;
- система охлаждения корпуса реактора;
- система рециркуляции.

Принципиальная гидравлическая схема реакторной установки ВБЭР-300 приведена на рис. 1.5.

**Первый контур** представляет собой герметичную замкнутую систему, предназначенную для отвода тепла от активной зоны реактора и передачи его воде-пару второго контура в парогенераторах.

В состав первого контура входят:

- реакторный блок;
- система компенсации давления;
- система очистки и расхолаживания.

**Реакторный блок** предназначен для производства пара требуемых параметров за счет тепла ядерной реакции.

В состав реакторного блока входят:

- реактор с активной зоной;
- четыре парогенератора;
- четыре главных циркуляционных насоса;
- приводы СУЗ.

Циркуляция теплоносителя первого контура в реакторном блоке осуществляется следующим образом. Теплоноситель с напора главных циркуляционных насосов через внутренние насосные патрубки и кольцевую полость парогенератора попадает в реактор. Пройдя кольцевой зазор между корпусом реактора и обечайкой внутрикорпусной шахты, теплоноситель через щелевой фильтр попадает в напорную камеру активной зоны.

Пройдя активную зону, нагретый теплоноситель первого контура попадает в сливную камеру реактора, откуда через внутренние патрубки поступает в кольцевой зазор между обечайкой трубной системы и корпусом ПГ, а затем через переливные окна на трубную систему ПГ.

Из ПГ охлажденный теплоноситель первого контура по кольцевым полостям между главными и внутренними патрубками поступает в гидрокамеры на всас главных циркуляционных насосов.

При нормальной эксплуатации теплоноситель первого контура отводит тепло от активной зоны реактора и в парогенераторах передает его воде-пару второго контура, в аварийных режимах обеспечивает расхолаживание реактора, отводя тепло от активной зоны и передавая его в парогенераторах теплоносителю второго контура или в теплообменнике системы очистки и расхолаживания теплоносителю промежуточного контура.

В реакторном блоке реализована четырехпетлевая схема циркуляции теплоносителя. Циркуляция теплоносителя первого контура принудительная при работе на

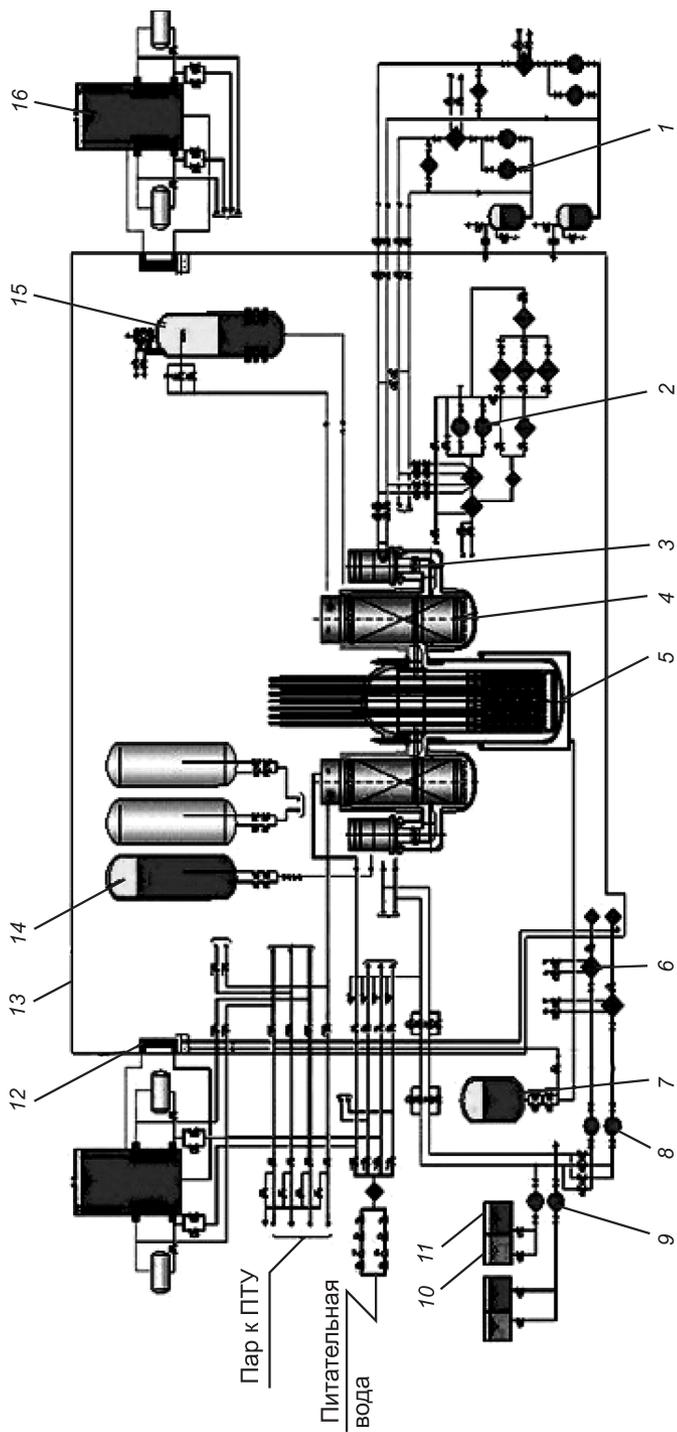


Рис. 1.5. Принципиальная гидравлическая схема реакторной установки ВБР-300:

1 – промежуточный контур охлаждения; 2 – система очистки и расхолаживания; 3 – главный циркуляционный насос; 4 – парогенератор; 5 – реактор; 6 – теплообменники системы рециркуляции; 7 – система охлаждения корпуса реактора; 8 – система рециркуляции и ремонтного расхолаживания; 9 – насосы системы подпитки; 10 – система подпитки и ввода жидкого поглотителя; 11 – бак системы снижения давления в защитной оболочке; 12 – система снижения давления в защитной оболочке; 13 – защитная оболочка; 14 – гидроаккумуляторы САОЗ; 15 – компенсатор давления; 16 – блок теплообменников САОТ

мощности и естественная при аварийном расхолаживании. В качестве теплоносителя первого контура используется вода с содержанием борной кислоты 6,0–7,0 г/кг в начале кампании и не более 0,1 г/кг в конце.

Система компенсации давления предназначена для создания давления в первом контуре реакторной установки, поддержания давления при работе реакторной установки в стационарных режимах в заданных пределах и ограничения отклонений давления в переходных и аварийных режимах.

В реакторной установке использована вынесенная паровая система компенсации давления. В качестве источника пара применяются электрические нагреватели.

Система компенсации давления относится к системам нормальной эксплуатации, важным для безопасности. В состав системы входят:

- паровой компенсатор давления;
- электронагреватели;
- регулирующая и предохранительная арматуры;
- трубопроводы;
- первичные измерительные преобразователи.

Основные технические характеристики системы компенсации давления приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

**Основные технические характеристики системы компенсации давления**

Технические характеристики	Значение
Пар, теплоноситель первого контура	
Давление, МПа: номинальное расчетное	15,7 17,7
Температура в компенсаторе давления, °С	346
Паровой объем, м <sup>3</sup>	10
Полный объем компенсатора давления, м <sup>3</sup>	25
Количество групп электронагревателей, шт.	6
Мощность одной группы электронагревателей, кВт	100
Расход теплоносителя первого контура на душирующее устройство компенсатора давления, т/ч, не более	60
Давление срабатывания предохранительных клапанов, МПа	20,1

Размеры компенсатора давления исключают оголение электронагревателей и превышение максимально допустимого уровня теплоносителя в нем при изменении мощности реакторной установки в диапазоне от нулевой до номинальной. При плановом разогреве и расхолаживании масса теплоносителя в первом контуре компенсируется системами. Компенсатор давления подключен к первому контуру по «горячей ветке» трубопроводом к одному из парогенераторов. Впрыск «холодного» теплоносителя в душирующее устройство компенсатора давления производится с напора главного циркуляционного насоса трубопроводом, на котором установлен регулирующий клапан. Патрубки подключения системы к реакторному блоку снабжены сужающими вставками Ду32.

Работа системы компенсации давления осуществляется следующим образом. При снижении давления в первом контуре производится включение в работу регулирующей группы нагревателей, при повышении давления производится впрыск «холодного» теплоносителя с напора главного циркуляционного насоса в паровую полость компенсатора давления.

Объем компенсатора давления, соотношение пара и воды в нем, производительность впрыска и мощность нагревателей обеспечивают снижение, повышение и поддержание давления в первом контуре в определенных проектом интервалах и с допустимыми скоростями изменения во всех проектных режимах.

В системе компенсации давления предусмотрен постоянный небольшой расход теплоносителя с напора главного циркуляционного насоса параллельно регулирующему клапану, что обеспечивает термостабилизацию основных трубопроводов системы.

На компенсаторе давления установлены два предохранительных клапана Ду32, обеспечивающих защиту первого контура от превышения давления сверхдопустимого в авариях с потерей теплоотвода. На компенсаторе давления установлены быстродействующие пневмоприводные клапаны, по два в двух параллельных ветках аварийного снижения давления Ду32, которые обеспечивают защиту первого контура в авариях типа «малая течь».

*Система очистки и расхолаживания* предназначена:

- для поддержания показателей качества теплоносителя первого контура в заданных пределах;
- вывода из теплоносителя небалансной борной кислоты в процессе выгорания топлива в активной зоне;
- отвода остаточных тепловыделений от активной зоны через промежуточный контур к охлаждающей воде, в том числе и в аварийных режимах.

Система очистки и расхолаживания относится к системам нормальной эксплуатации, важным для безопасности. В состав системы входят:

- теплообменник-рекуператор;
- теплообменник-холодильник;
- два циркуляционных насоса (один резервный);
- ионообменный фильтр смешанного действия;
- три анионитовых фильтра;
- катионитовый фильтр;
- фильтр-ловушка;
- арматура;
- трубопроводы;
- первичные измерительные преобразователи.

Теплообменник-рекуператор предназначен для охлаждения теплоносителя, поступающего из реактора в систему, и подогрева теплоносителя, возвращающегося из системы в реактор.

Теплообменник-холодильник предназначен для охлаждения теплоносителя, поступающего в систему после рекуператора, теплоносителем промежуточного контура до температур, приемлемых для работы ионообменных фильтров. Охлаждение осуществляется одновременно двумя независимыми по промежуточному контуру секциями.

Циркуляционные насосы системы очистки и расхолаживания установлены параллельно и предназначены для организации принудительной циркуляции теплоносителя в системе. Циркуляция теплоносителя осуществляется одним из насосов.

Ионообменный фильтр смешанного действия применяется для поддержания требуемого качества теплоносителя посредством вывода ионитами из теплоносителя растворимых и нерастворимых продуктов коррозии, примесей и продуктов деления. Фильтр в составе системы работает постоянно.

Анионитовые фильтры установлены параллельно и предназначены для выведения небалансного бора из теплоносителя в процессе выгорания топлива в активной зоне. Выведение небалансного бора осуществляется поочередно одним из фильтров. Фильтры в составе системы работают периодически.

Катионитовый фильтр используется для выведения избыточной щелочи (калия) из теплоносителя при снижении концентрации борной кислоты. Фильтр в составе системы работает периодически, одновременно с одним из анионитовых фильтров.

Фильтр-ловушка предназначен для предотвращения выноса ионообменных смол в контур охлаждения активной зоны при прорыве щелевых распределительных устройств ионообменных фильтров посредством их улавливания. Фильтр-ловушка в составе системы работает постоянно.

Арматура с пневмоприводом Ду80 предназначена для отключения системы от реактора при потере ее работоспособности и регламентном обслуживании системы. Для подключения (отключения) к системе одного канала подпитки первого контура теплоносителем и канала поддренирования реактора при разогреве используется арматура с пневмоприводом Ду32. Арматура с ручным приводом и электроприводом предназначена для технологического, регламентного и ремонтного отключения (подключения) оборудования системы.

Основные технические характеристики системы очистки и расхолаживания приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

**Основные технические характеристики системы очистки и расхолаживания**

Технические характеристики	Значение
Теплоноситель первого контура	
Давление, МПа: номинальное расчетное	15,7 17,7
Расход теплоносителя первого контура, т/ч: в режиме очистки в режиме расхолаживания	10–30 55
Температура теплоносителя первого контура, °С: на входе в рекуператор из реактора на выходе из рекуператора в охладитель на выходе из охладителя, не более на выходе из рекуператора в реактор	332 120 60 289
Тепловая мощность, МВт: рекуператора холодильника в режиме очистки холодильника в режиме расхолаживания	5,6 1,5 17

Система очистки и расхолаживания подключена к реакторному блоку ниже уровня патрубков подключения ПГ двумя трубопроводами для отбора теплоносителя и од-

ним трубопроводом к верхней части ПГ для возврата теплоносителя. Патрубки подключения системы снабжены сужающими вставками Ду32.

Подключение системы обеспечивает возможность проведения расхолаживания активной зоны при снижении уровня в реакторе до оси патрубков, при монтаже и демонтаже оборудования реакторного блока и внутрикорпусных устройств в процессе перегрузки топлива.

Очистка теплоносителя происходит следующим образом. Теплоноситель с расходом 20 т/ч поступает из реактора в систему, где последовательно охлаждается в рекуператоре и холодильнике, очищается в фильтре смешанного действия от растворимых и нерастворимых продуктов коррозии, примесей и продуктов деления, проходит через фильтр-ловушку, подогревается в рекуператоре и возвращается в реактор.

Выведение небалансного бора и избыточной щелочи калия из теплоносителя осуществляется так: охлажденный теплоноситель с расходом 10–30 т/ч последовательно направляется на катионитовый фильтр, где происходит выведение избыточной щелочи (калия) для стабилизации кислотно-щелочного состояния теплоносителя, и один из анионитовых фильтров, где происходит выведение борной кислоты. При расходе теплоносителя 10 т/ч через катионитовый и анионитовый фильтры оставшая часть теплоносителя перепускается по байпасу данных фильтров. Далее теплоноситель очищается в фильтре смешанного действия, проходит через фильтр-ловушку, подогревается в рекуператоре и возвращается в реактор. Выведение небалансного бора осуществляется периодически ступенями при достижении рабочими органами СУЗ, выделенными на регулирование параметров теплоносителя в реакторе верхнего положения.

Отвод остаточных тепловыделений от активной зоны через систему очистки и расхолаживания осуществляется следующим образом. Теплоноситель первого контура с расходом 55 т/ч поступает из реактора в систему, где охлаждается в холодильнике, после чего возвращается в реактор.

Система очистки и расхолаживания обеспечивает режим поддержания реактора в горячем состоянии, для чего при работе системы в режиме расхолаживания периодически изменяется расход теплоносителя первого контура: при температуре теплоносителя первого контура 310 °С закрывается клапан на байпасе насоса, увеличивая расход до 55 т/ч, при температуре теплоносителя первого контура 280 °С клапан на байпасе насоса открывается, расход теплоносителя при этом снижается до 10 т/ч.

Система имеет резервирование 100 % по циркуляционным насосам и по охлаждающей поверхности (секциям) холодильника.

В случае остановки работающего насоса в работу автоматически вводится резервный насос. При выходе из строя одной из секций холодильника охлаждение теплоносителя может осуществляться оставшейся секцией.

**Второй контур** предназначен для получения перегретого пара из питательной воды за счет отвода тепла от теплоносителя первого контура в парогенераторах и передачи его в паротурбинную установку. Через второй контур производятся также:

- отвод тепла при вводе в действие и разогреве реакторной установки;
- нормальное и аварийное расхолаживание реактора через технологический конденсатор;
- расхолаживание реактора системой аварийного отвода тепла.

Второй контур является системой нормальной эксплуатации, важной для безопасности. Арматура отключения парогенератора по питательной воде и пару выполняет функции локализирующей системы безопасности при межконтурной разгерметизации, а также при работе системы аварийного отвода тепла.

В состав второго контура входят:

- четыре парогенератора;
  - четыре предохранительных автоматических устройства;
  - трубопроводы питательной воды и пара;
  - арматура;
  - первичные измерительные преобразователи;
  - два питательных комплекса (рабочий и резервный, состоящие из питательного и дроссельного клапанов);
  - механический фильтр тонкой очистки питательной воды.
- Основные технические характеристики второго контура приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

**Основные технические характеристики второго контура**

Технические характеристики	Значение
Температура питательной воды на входе в парогенераторы, °С	185
Температура пара на выходе из парогенераторов, °С	305
Давление питательной воды на входе в парогенераторы, МПа, не более	9,5
Давление пара на выходе из парогенераторов, МПа	6,38

Питательная вода от конденсатно-питательной системы по общему питательному трубопроводу через один из двух параллельно установленных питательных клапанов и механический фильтр тонкой очистки питательной воды подается в парогенераторы по четырем трубопроводам Ду125, на каждом из которых установлена двойная пневмоприводная арматура: первая от реактора – запорная нормально-открытого исполнения, вторая – невозвратно-запорная нормально-закрытого исполнения с дренажом между ними.

На входе в каждый парогенератор питательный трубопровод делится на два трубопровода Ду100, по которым питательная вода подается в секции парогенератора.

Перегретый пар выходит из каждой секции парогенератора по трубопроводам Ду250, объединенным в трубопровод Ду350, на котором установлена двойная пневмоприводная запорная арматура нормально-закрытого исполнения. Перегретый пар по четырем главным паропроводам подается в турбинное отделение.

Из участков паропроводов между двойной запорной арматурой каждого парогенератора предусмотрен отвод пара в технологический конденсатор. К трубопроводам пара до запорной арматуры и питательной воды между двойной запорной арматурой каждого парогенератора подключена система аварийного отвода тепла.

Трубопроводы и арматура парогенераторов рассчитаны на давление первого контура. Контроль герметичности парогенератора производится путем непрерывного измерения активности пара в паропроводах датчиками активности и периодического отбора проб второго контура аппаратами пробы пара после каждого парогенератора. Также предусмотрено измерение активности газа на выхлопе эжекторов главного конденсатора.

В случае межконтурной течи при повышении активности пара в паропроводе после парогенератора дефектный парогенератор автоматически или дистанционно отсекается по пару и питательной воде двойной запорной арматурой. Автоматическое отключение текущего парогенератора осуществляется при достижении актив-

ности пара аварийной установки по сигналам датчиков активности, установленных на паропроводах.

Применение в установке аппаратов пробы пара позволяет обнаружить межконтурную разгерметизацию парогенератора на ранней стадии развития дефекта при повышении активности на выхлопе эжекторов главного конденсатора и дистанционно ее отключить, тем самым практически полностью предотвращая выход активности во второй контур.

Для предотвращения переопрессовки отсеченного по второму контуру парогенератора используются автоматические предохранительные устройства, подключенные к первому контуру и к трубопроводам подачи питательной воды в парогенератор. При повышении давления в полости второго контура отключенного парогенератора сверхдопустимого срабатывает предохранительное автоматическое устройство: полость второго контура соединяется с первым контуром путем разрыва в предохранительном автоматическом устройстве калиброванной шейки наконечника предохранителя с обеспечением гарантированного проходного сечения, через которое происходит сброс избыточного давления. Давление срабатывания устройства – 19,6 МПа.

Для контроля работы второго контура предусмотрена установка следующих первичных измерительных преобразователей:

- на паропроводах после каждой секции парогенератора до запорной арматуры установлены датчики давления;
- на паропроводах после первой запорной арматуры установлены термопреобразователи;
- на паропроводах после первой запорной арматуры и после второй запорной арматуры (объединяющих коллекторах и главном паропроводе) установлены блоки детектирования системы радиационно-технологического контроля;
- на общем трубопроводе питательной воды (до двойной запорной арматуры) установлены датчики перепада давления (на питательных клапанах), датчики измерения расхода питательной воды, термопреобразователи и датчики давления.

**Промежуточный контур охлаждения оборудования реакторной установки** (промежуточный контур) предназначен для охлаждения ее оборудования при работе реактора, а также для отвода тепла в холодильнике системы очистки и расхолаживания в режимах расхолаживания, при нормальном и аварийном выводах из действия реакторной установки.

Промежуточный контур является системой нормальной эксплуатации, важной для безопасности, выполняет функции защитной системы безопасности при аварийном расхолаживании реактора через систему очистки и расхолаживания. Кроме того, арматура, установленная на трубопроводах промежуточного контура со стороны охлаждаемого оборудования, локализует систему безопасности при межконтурной разгерметизации.

Промежуточный контур выполнен двухканальным. В состав каждого канала входят:

- два насоса с подачей 700 м<sup>3</sup>/ч и напором 65 м вод. ст.;
- теплообменник;
- ионообменный фильтр;
- расширительный бак;
- трубопроводы;
- арматура;
- первичные измерительные преобразователи.

Каждый канал промежуточного контура снабжает охлаждающей водой своих потребителей. В случае отказа канала предусмотрена возможность обеспечения

охлаждения всех потребителей реакторной установки одним каналом промежуточного контура в режиме расхолаживания реакторной установки.

Основные технические характеристики промежуточного контура приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

**Основные технические характеристики промежуточного контура**

Технические характеристики	Значение	
	Режим очистки	Режим расхолаживания
Тепловая мощность, отводимая контуром, кВт:		
от главного циркуляционного насоса	4×420	4×420
от холодильника системы очистки и расхолаживания	1500	17 000
общая	3180	18 680
Расход воды промежуточного контура на канал, т/ч:		
на холодильник системы очистки и расхолаживания		300
на холодильник системы рециркуляции		300
на охлаждение главного циркуляционного насоса		2×18
в фильтр промежуточного контура		20
общий		700
Температура охлаждающей воды на входе в оборудование, °С, не более		45

Циркуляция теплоносителя по промежуточному контуру производится по следующей схеме: охлаждающая вода промежуточного контура с напора работающего насоса поступает в теплообменник, где охлаждается технической водой и далее поступает в напорный коллектор. Из напорного коллектора охлаждающая вода промежуточного контура раздается на охлаждение оборудования первого контура, после чего собирается в общий сливной коллектор и возвращается на всас работающего насоса. Часть воды поступает в ионообменный фильтр.

Для компенсации температурных расширений предусмотрен расширительный бак.

Ионообменный фильтр промежуточного контура загружается смешанной обес-соливающей шихтой, состоящей из одной части катионита и двух частей анионита. В качестве дренажного подслоя используется рубка из титановой проволоки.

В промежуточном контуре обеспечена возможность:

- отключения канала в случае межконтурной течи оборудования первого контура (элементы промежуточного контура до локализирующей арматуры включительно должны быть рассчитаны на давление первого контура);
- отключения неисправного оборудования первого контура (каждой секции холодильника системы очистки и расхолаживания, холодильников главных циркуляционных насосов) запорной арматурой;
- поиска негерметичного оборудования первого контура по датчикам давления, установленным на неотключаемых участках трубопроводов на входе в оборудование;
- контроля температуры теплоносителя после каждой секции холодильника фильтра, на выходе из каждого теплообменника, в общем напорном и общем сливном коллекторах;
- контроля активности промежуточного контура с помощью блоков детектирования, установленных в расширительном баке и на трубопроводах после каждой секции холодильника системы очистки и расхолаживания;

- контроля перепада давления на насосах промежуточного контура;
- контроля солесодержания в теплоносителе в напорном коллекторе.

В случае разгерметизации охлаждаемого оборудования и течи первого контура в промежуточный контур повышается активность промежуточного контура (датчики активности установлены на расширительном баке, после секций холодильника системы очистки и расхолаживания), одновременно возможно падение давления и уровня в первом контуре и повышение уровня в расширительном баке промежуточного контура.

При признаках течи первого контура в промежуточный контур принимаются меры по поиску неисправного оборудования: отключаются поочередно секции холодильника системы очистки и расхолаживания, холодильники главного циркуляционного насоса. Неисправное оборудование определяется по повышению давления в отключенном оборудовании (датчики давления установлены на неотключаемых участках трубопроводов третьего контура).

Для предотвращения переопрессовки отсеченного по промежуточному контуру оборудования используются автоматические предохранительные устройства.

При повышении давления в предохраняемом оборудовании сверхдопустимого автоматически срабатывает предохранительное автоматическое устройство: полость промежуточного контура соединяется с объемом герметичного ограждения оболочки путем разрыва в предохранительном автоматическом устройстве калиброванной шейки наконечника предохранителя с обеспечением гарантированного проходного сечения, через которое происходит сброс избыточного давления. Давление срабатывания устройства – 19,6 МПа. Контроль давления в отсеченном оборудовании осуществляется по датчикам давления, установленным на неотключаемых участках трубопроводов третьего контура.

Для защиты не рассчитанной на давление первого контура части промежуточного контура от повышения давления сверхдопустимого установлено предохранительное мембранное устройство, расположенное на расширительном баке промежуточного контура. Давление срабатывания устройства – 0,5 МПа. Сброс избыточного давления после срабатывания устройства осуществляется в герметичное ограждение.

В качестве теплоносителя промежуточного контура используется вода высокой степени чистоты. Водно-химический режим промежуточного контура – нейтральный бескоррекционный.

**Система аварийного отвода тепла** (рис. 1.6) предназначена для отвода остаточных тепловыделений от реактора в случае, когда невозможно расхолаживание реактора через системы паротурбинной установки и систему очистки и расхолаживания.

Система относится к системам безопасности и состоит из двух каналов, каждый из которых делится на две петли теплообмена. Каждая петля теплообмена подключается к парогенератору по питательной воде и по пару.

В состав канала передачи тепла входят:

- блок теплообменников;
- две емкости с запасом воды для парогенераторов;
- арматура;
- трубопроводы;
- первичные измерительные преобразователи.

Каждый блок теплообменников представляет собой бак с запасом воды с размещенными в нем двумя теплообменниками.

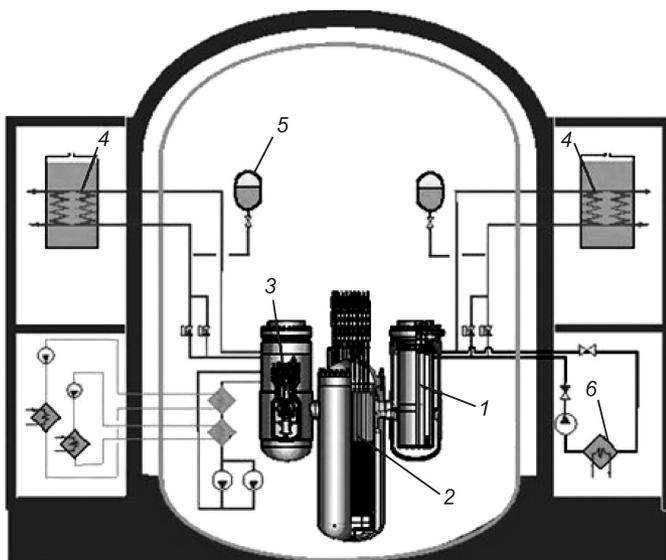


Рис. 1.6. Система аварийного отвода тепла от реактора:

1 – парогенератор; 2 – реактор; 3 – главный циркуляционный насос; 4 – блок теплообменников системы аварийного отвода тепла; 5 – емкость системы аварийного отвода тепла; 6 – система очистки и расхолаживания

Основные технические характеристики системы аварийного отвода тепла в режиме ожидания и расхолаживания приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

**Основные технические характеристики системы аварийного отвода тепла**

Технические характеристики	Значение
Компоновка системы	Петлевая
Количество петель, шт.	4
Рабочая среда	Теплоноситель второго контура
Отводимая мощность одной петли при температуре первого контура 310 °С, МВт, не менее	8,5
Запас воды в баке блока теплообменников, м <sup>3</sup>	230
Запас воды в емкости, м <sup>3</sup>	4

Система аварийного отвода тепла подключается к трубопроводам пара до запорной арматуры и питательной воды между двойной запорной арматурой каждого парогенератора.

На трубопроводе подачи пара к теплообменникам установлена локализирующая арматура, отключающая систему аварийного отвода тепла в случае разгерметизации трубной поверхности парогенератора.

Параллельно к теплообменнику подключена емкость с запасом воды для ПГ. На сливе воды из емкости установлена пневмоприводная арматура.

Ввод системы аварийного отвода тепла в действие производится открытием подключающей арматуры, установленной на трубопроводах слива воды из теплообмен-

ников, и закрытием пневмоприводной арматуры на трубопроводах питательной воды и пара. При этом вода из системы начинает поступать в ПГ, где испаряется, охлаждая теплоноситель первого контура. Пар возвращается в теплообменники, где конденсируется, отдавая тепло воде, находящейся в баке блока теплообменников и затем испаряющейся. Пар сбрасывается в атмосферу.

Запас воды в одном канале системы аварийного отвода тепла обеспечивает отвод остаточных тепловыделений в течение не менее 24 ч, общий запас воды в системе обеспечивает отвод остаточных тепловыделений в течение не менее 72 ч.

В качестве подключающей арматуры системы аварийного отвода тепла и отключения ПГ по пару и питательной воде применены клапаны с пневмоприводом, для которых кроме управления системой автоматики предусмотрено срабатывание от гидроуправляемых пневмораспределителей при повышении давления в реакторе.

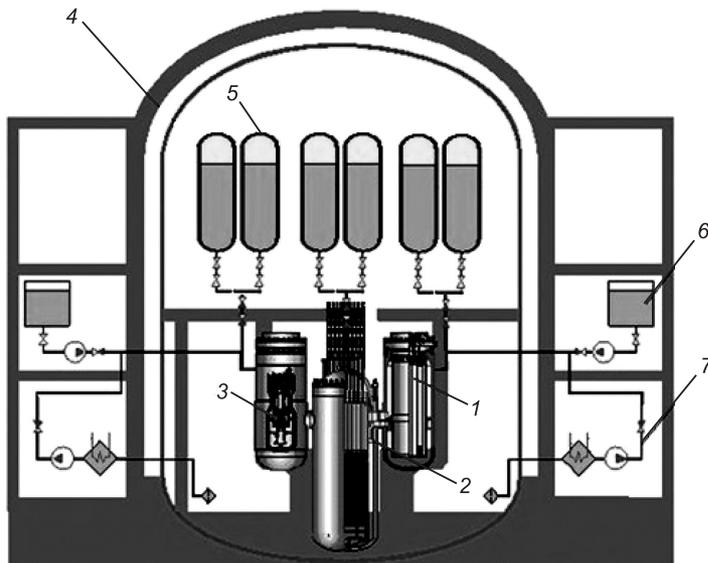
Для приведения пневмоприводной арматуры в действие производится обесточивание электромагнитных пневмораспределителей, после чего происходит перекладка пневмораспределителей, отключение пневмопривода от системы сжатого воздуха, сообщение его с атмосферой и перекладка арматуры за счет усилия пружины.

**Система аварийного охлаждения активной зоны** (рис. 1.7) предназначена для охлаждения активной зоны в авариях с течью теплоносителя первого контура.

Система относится к системам безопасности и состоит из трех каналов. В состав каждого канала входят:

- два гидроаккумулятора;
- арматура;
- трубопроводы;
- первичные измерительные преобразователи.

В состав первого и второго канала входят гидроаккумуляторы первой и второй ступени, в состав третьего канала – гидроаккумуляторы только второй ступени.



*Рис. 1.7. Системы аварийного охлаждения активной зоны:*

1 – парогенератор; 2 – реактор; 3 – главный циркуляционный насос; 4 – гидроаккумулятор САОЗ первой ступени; 5 – гидроаккумулятор САОЗ второй ступени; 6 – система аварийной подпитки; 7 – система рециркуляции

Основные технические характеристики системы аварийного охлаждения активной зоны приведены в табл. 1.6.

Рабочая среда в гидроаккумуляторах – вода с содержанием борной кислоты не менее 16,0 г/кг.

Каждый канал системы аварийного охлаждения активной зоны подключен к одному парогенератору. Патрубки подключения системы к парогенератору снабжены сужающими вставками Ду15.

Таблица 1.6

**Основные технические характеристики  
системы аварийного охлаждения активной зоны**

Технические характеристики	Значение
Гидроаккумулятор первой ступени: рабочее давление, МПа, не более	8,0
полный объем, м <sup>3</sup> , не менее	30
рабочий объем воды, м <sup>3</sup> , не менее	24
объем газовой подушки, м <sup>3</sup> , не менее	6
время работы, ч, не менее	6
Гидроаккумулятор второй ступени: рабочее давление, МПа, не более	8,0
полный объем, м <sup>3</sup> , не менее	30
рабочий объем воды, м <sup>3</sup> , не менее	24
объем газовой подушки, м <sup>3</sup> , не менее	6

На трубопроводах каждого гидроаккумулятора установлена двойная арматура с электроприводами. На трубопроводах каждого канала параллельно установлены по два обратных клапана.

При вводе реакторной установки в действие, после повышения давления в первом контуре более 8,0 МПа, двойная арматура с электроприводами, установленная на каждом гидроаккумуляторе, открывается и гидроаккумуляторы остаются отключенными от первого контура только обратными клапанами.

Ввод гидроаккумуляторов в действие по прямому назначению осуществляется пассивным способом, открытием обратных клапанов после снижения давления в первом контуре менее 8,0 МПа.

Совместной работой гидроаккумуляторов первой и второй ступеней всех трех каналов, с учетом функционирования системы аварийного отвода тепла, обеспечено сохранение активной зоны под уровнем теплоносителя в течение не менее 24 ч при разрыве трубопровода первого контура максимального диаметра.

При разрыве трубы системы аварийного охлаждения активной зоны обеспечено сохранение активной зоны под уровнем теплоносителя в течение не менее 24 ч при работе двух оставшихся каналов, с учетом уменьшенного расхода течи через сужающие вставки Ду15.

Для контроля за работой системы предусмотрена установка следующих первичных измерительных преобразователей:

- уровнемеров в гидроаккумуляторах;
- датчиков давления в гидроаккумуляторах.

**Система подпитки первого контура** предназначена:

- для заполнения и подпитки первого контура;
- введения в первый контур химических реагентов для коррекции водно-химического режима;

- проведения гидравлических испытаний;
- аварийной подпитки первого контура;
- введения в реактор жидкого поглотителя.

Система подпитки выполняет функции защитной системы безопасности при аварийном выводе реакторной установки из действия в авариях с разгерметизацией первого контура.

Система состоит из двух каналов, в каждый из которых входят:

- бак с запасом теплоносителя первого контура;
- подпиточный насос;
- трубопроводы;
- арматура;
- первичные измерительные преобразователи.

Бак с запасом теплоносителя первого контура содержит 35 т воды с концентрацией борной кислоты 16,0 г/кг. Заполнение баков системы осуществляется от системы водоподготовки.

Подпиточный насос имеет подачу 6,3 м<sup>3</sup>/ч с напором не менее 24,5 МПа. Перепускной клапан насоса при работе реакторной установки настроен на давление 20,4 МПа, при проведении гидравлических испытаний – на давление 24,5 МПа.

Канал системы подключен к одному парогенератору трубопроводом Ду50 с двойной пневмоприводной арматурой нормально-закрытого исполнения.

Любой подпиточный насос может работать по любому каналу. Кроме того, один из каналов системы подключен к системе очистки и расхолаживания.

Патрубки подключения системы к реакторному блоку снабжены сужающими вставками Ду32.

Заполнение и подпитка первого контура и ввод в первый контур химических реагентов производятся из системы водоподготовки насосом подпитки через систему очистки и расхолаживания.

Подпитка первого контура осуществляется при снижении уровня воды в компенсаторе давления. Оператор дистанционно включает в работу насос подпитки и открывает соответствующую арматуру. После восстановления требуемого уровня воды оператор останавливает насос и закрывает арматуру.

В режиме разогрева система работает автоматически, поддерживая заданный уровень теплоносителя в компенсаторе давления.

Автоматический ввод системы подпитки в действие предусматривается в авариях с потерей теплоносителя первого контура при понижении давления в первом контуре до 12,5 МПа или при повышении давления в защитной оболочке до 0,15 МПа, которое сопровождается понижением давления в первом контуре. При этом вводятся в действие насосы подпитки и открывается арматура на трубопроводах подачи воды в реактор.

Функционирование одного канала системы подпитки обеспечивает надежное охлаждение активной зоны. Подача воды осуществляется из баков подпиточной воды.

В запроектных авариях с отказами электромеханической системы управления и защиты СУЗ реактора насосы и трубопроводы подпитки используются для ввода в реактор жидкого поглотителя.

В системе предусмотрен контроль:

- уровня в баках подпиточной воды;
- расхода подпиточной воды, подаваемой в реактор;
- давления на напоре подпиточных насосов;
- положения арматуры и сигнализации работы подпиточных насосов.

Управление пневмоприводной арматурой и подпиточными насосами системы осуществляется от двух независимых комплектов управляющей системы безопасности.

**Система ввода жидкого поглотителя** предназначена для ввода в реактор концентрированного раствора борной кислоты с целью перевода активной зоны в подкритическое состояние и поддержания ее в этом состоянии с учетом высвобождения реактивности в процессе расхолаживания и разотравления в авариях с отказом рабочих органов электромеханической системы воздействия на реактивность.

Система обеспечивает подкритичность активной зоны не менее 2,0 % в любой момент кампании расхолаженного и разотравленного реактора без учета ввода всех рабочих органов СУЗ.

Система ввода жидкого поглотителя является защитной системой безопасности и состоит из двух каналов. В состав каждого канала входят:

- бак с жидким поглотителем;
- арматура;
- трубопроводы;
- первичные измерительные преобразователи.

Бак с жидким поглотителем содержит 60 т воды с концентрацией борной кислоты не менее 30,0 г/кг.

Подача жидкого поглотителя осуществляется с помощью насосов системы подпитки первого контура.

Автоматический ввод системы в действие предусматривается в случае отказа электромеханической системы остановки реактора по следующим показателям:

- уменьшение мощности реактора менее 10–15 % от начального значения через 2–4 с после сигнала аварийной защиты;
- отсутствие сигнала с нижних конечных выключателей от двух и более приводов СУЗ в течение 4–5 с после сигнала аварийной защиты.

При этом насосы системы аварийной подпитки отключаются от баков запаса теплоносителя первого контура и подключаются к бакам с запасом жидкого поглотителя, вводятся в действие насосы аварийной подпитки, открывается арматура на трубопроводах подачи воды в реактор.

Задержка подачи борного раствора с момента формирования сигнала аварийной защиты не более 25–30 с.

Борсодержащий раствор начинает поступать в реактор. При этом первая порция поглотителя приводит к остановке реактора, обеспечивая запас подкритичности. По мере расхолаживания реактора и снижения температуры и давления в первом контуре порциями вводится в реактор остальной поглотитель.

Количество вводимого поглотителя в порциях определяется условием компенсации увеличения объема теплоносителя первого контура из-за подачи раствора борной кислоты и уменьшения объема теплоносителя первого контура при расхолаживании.

В системе предусмотрен контроль:

- уровня жидкого поглотителя в баках;
- температуры жидкого поглотителя в баках;
- концентрации бора;
- положения арматуры.

**Система снижения давления в герметичном ограждении** предназначена для снижения давления до уровня, гарантирующего сохранение целостности герметичного ограждения. Система относится к защитным системам безопасности и состоит из двух каналов, в каждый из которых входят:

- теплообменники;
- конденсатосборники;

- арматура;
- трубопроводы;
- первичные измерительные преобразователи.

Теплообменники подключены к баку системы аварийного отвода тепла. Снижение давления в герметичном ограждении обеспечивается за счет конденсации пара теплоносителя первого (второго) контура на поверхности теплообменников и испарения запасов воды в баках системы аварийного отвода тепла. Мощность каждого канала системы выбрана из условия непревышения избыточного давления в герметичном ограждении более 0,4 МПа.

Конденсатосборники обеспечивают сбор и подачу конденсата первого (второго) контура в приемки герметичного ограждения для работы системы рециркуляции или в кессон реактора для охлаждения корпуса.

**Система охлаждения корпуса реактора** (система подачи воды в кессон реактора) предназначена для охлаждения корпуса реактора в тяжелых запроектных авариях, связанных с серьезным повреждением активной зоны. Система обеспечивает защиту корпуса реактора от проплавления в запроектных авариях в тех случаях, когда невозможна подача воды в реактор для охлаждения активной зоны другими средствами.

Система охлаждения корпуса реактора является защитной системой безопасности. В состав системы входят:

- гидроаккумулятор с запасом воды не менее 20 м<sup>3</sup>;
- трубопроводы;
- арматура;
- первичные измерительные преобразователи.

Гидроаккумулятор подключен по воде к нижней части кессона трубопроводом Ду32 двойной параллельной пневмоприводной запорной арматурой нормально-закрытого исполнения, одна из которых (первая по ходу движения воды) не возвратно-запорная. Из участков трубопроводов между двойной арматурой предусмотрен дренаж.

Цепь управления пневмоприводной арматурой заблокирована для предотвращения нерегламентного подключения системы. Подача воды в кессон реактора обеспечивается за счет давления газа после подключения гидроаккумулятора к кессону реактора. Параллельно гидроаккумулятору подача воды в кессон реактора может производиться из конденсатосборников системы снижения давления в герметичном ограждении. Подача воды в кессон реактора из конденсатосборников системы снижения давления в герметичном ограждении осуществляется самотеком.

При нормальной эксплуатации реакторной установки система находится в режиме готовности к вводу в действие:

- гидроаккумулятор заполнен водой и установлен исходный уровень и давление газа;
- арматура по воде закрыта;
- арматура на дренажном трубопроводе открыта.

В запроектных авариях, связанных с отказом всех средств, обеспечивающих аварийный отвод остаточных тепловыделений от активной зоны, система вводится в действие дистанционно:

- разблокируется цепь управления пневмоприводной арматурой;
- закрывается дренажная арматура;
- открывается пневмоприводная арматура.

Подача воды в кессон реактора обеспечивается за счет давления газа, после опорожнения гидроаккумулятора открывается арматура на сливе воды из конденсатосборников системы снижения давления в герметичном ограждении. Подача воды

осуществляется самотеком из конденсатосборников системы снижения давления в герметичном ограждении.

Кессон заполняется водой, что обеспечивает интенсивный отвод тепла от корпуса реактора. Образующийся пар сбрасывается в герметичное ограждение.

В системе предусмотрен контроль:

- уровня и давления в гидроаккумуляторе;
- положения арматуры.

Управление пневмоприводной арматурой системы осуществляется от двух независимых комплектов управляющей системы безопасности.

**Система рециркуляции** предназначена для подачи (возврата) теплоносителя первого контура в реактор из приемков защитного ограждения.

Система относится к защитным системам безопасности и состоит из двух каналов, в каждый из которых входят:

- насос с подачей 90 м<sup>3</sup>/ч и напором не менее 200 м вод. ст.;
- теплообменник;
- механический фильтр;
- трубопроводы;
- арматура;
- первичные измерительные преобразователи.

Каждый канал системы рециркуляции подключен к соответствующему каналу системы подпитки и обеспечивает возврат теплоносителя первого контура в реакторный блок по двум трубопроводам системы подпитки.

Мощности каналов системы рециркуляции хватает для отвода остаточных тепловыделений от активной зоны, который происходит следующим образом. Теплоноситель первого контура из приемков герметичного ограждения через механический фильтр поступает в теплообменник, где охлаждается, после чего возвращается в реактор. Отвод тепла в теплообменниках осуществляется к воде промежуточного контура.

## 1.5. Схема АЭС с реактором ВВЭР-440

Главный циркуляционный контур установки ВВЭР-440 (рис. 1.8) состоит из реактора ВВЭР-440 и шести циркуляционных петель, включающих парогенератор ПГВ-3, главный циркуляционный электронасос ГЦЭН-310 и две главные запорные задвижки Ду500. В номинальном режиме работают все шесть ГЦН, прокачивая через реактор 10 000 кг/с теплоносителя, имеющего на входе в реактор температуру 543 К, а на выходе из реактора температуру 573 К. Давление 12,5 МПа в первом контуре поддерживается паровой системой компенсации давления.

Система компенсации давления предназначена для создания и поддержания давления, а также ограничения отклонений давления в переходных и аварийных режимах в главном циркуляционном контуре.

В атомных энергетических установках применяются следующие системы: паровая с электронагревателями, паровая с генерацией пара твэлами, газовая, парогазовая.

Типовая система компенсации давления в установках с реакторами ВВЭР (кроме ВВЭР-210) включает паровой компенсатор давления, барботер, импульсно-предохранительные устройства (клапаны) и трубопроводы с арматурой. Компенсатор давления подключается к реактору трубопроводами без запорной арматуры и его нельзя отключить.

Давление в компенсаторе создается паровой подушкой за счет кипения теплоносителя, нагреваемого электронагревателями, размещенными под свободным уровнем. Нагреватели делятся на пусковые, работающие при пуске блока и существенном

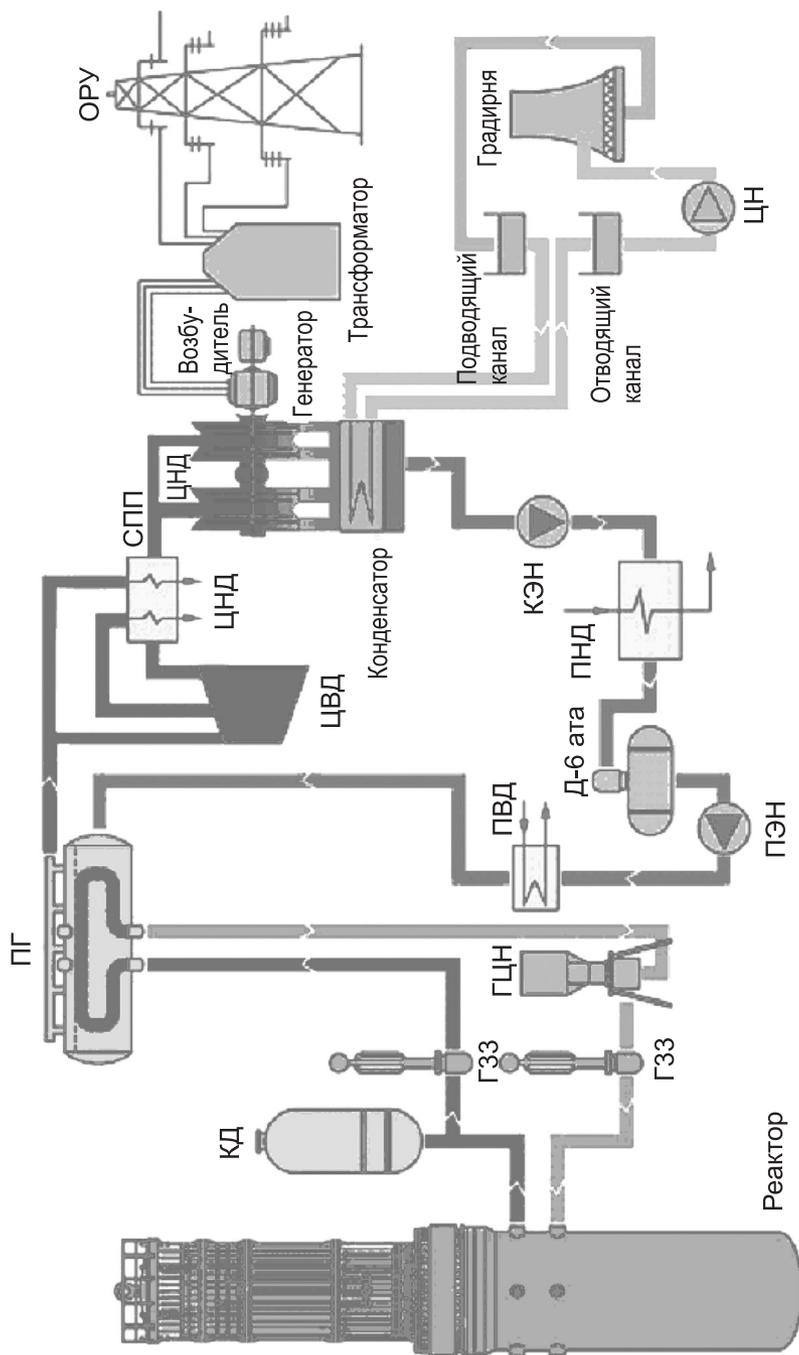


Рис. 1.8. Схема АЭС с реактором ВВЭР-440

снижении давления в переходных режимах, и регулировочные, восполняющие теплоотвод от компенсатора в стационарных энергетических режимах. В переходных режимах при колебаниях средней температуры теплоносителя, связанных с изменением нагрузки или нарушениями в работе оборудования реакторной установки, в первом контуре меняется давление. Ограничение отклонений давления от номинального значения достигается сжатием или расширением паровой подушки в верхней части компенсатора. Активно участвует в процессе компенсации и водяной объем; при расширении пара теплоноситель испаряется, способствуя поддержанию давления, а при сжатии паровой фазы, находящейся при температуре насыщения и соответствующей исходному давлению, происходит ее конденсация на поверхности теплоносителя, ограничивающая рост давления. При значительном росте давления открывают регулирующий клапан и подают воду по трубопроводу из холодной части контура в сопла, расположенные в верхней части компенсатора. В зависимости от параметров переходного процесса (величины и скорости изменения давления) регулирующий клапан увеличивает подачу холодной воды, прекращая или замедляя рост давления в первом контуре. При дальнейшем росте давления (из-за отказа системы или ее недостаточной эффективности) защита реактора от превышения обеспечивается срабатыванием импульсно-предохранительных устройств, из которых пар отводится в бак-барботер и конденсируется.

Если после подрыва импульсно-предохранительного клапана произойдет отказ в его работе, связанный с неполадкой тарелки, то возрастает давление в барботере. При развитии этой аварии рост давления приведет к взрыву установленных на нем мембран с выбросом пароводяной смеси из первого контура под защитную оболочку реактора.

Поддержание рабочего давления и необходимого уровня воды в компенсаторах при нормальной эксплуатации обеспечивается регуляторами давления пара и уровня воды. Сигналы от датчиков через систему регулирования и управления воздействуют на регулировочный автотрансформатор электронагревателей, регулятор подпитки (клапан впрыска) и работу подпиточных насосов первого контура. Для обеспечения требуемой температуры трубопроводов связи реактора и компенсатора давления, включающей тепловые удары в переходных процессах, а также улучшения регулирования организована непрерывная циркуляция воды через компенсатор.

При стационарной работе система компенсации обеспечивает поддержание давления в пределах  $\pm 0,1$  МПа и изменение температуры воды на  $\pm 2,74$  К.

## ГЛАВА 2. ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИЕ СБОРКИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

### 2.1. Ядерное топливо реактора

В энергетических реакторах ВВЭР-1000 в качестве топлива обычно используется не металлический уран, а его соединения, образующие керамику, в частности диоксид урана. Среди преимуществ диоксида урана можно выделить его жаропрочность, позволяющую работать при высоких температурах плавления топлива ( $T_{пл} = 2750$  °С по сравнению с  $T_{пл}$  чистого металлического урана 1130 °С), отсутствие фазовых переходов, высокую стойкость к облучению нейтронами для достижения большей глубины выгорания и химическую совместимость с обычными теплоносителями, в частности с водой, в случае разгерметизации тепловыделяющих элементов (ТВЭлов). К недостаткам диоксида урана следует отнести низкую плотность (10,5 г/см<sup>3</sup> по сравнению с плотностью металлического урана 19,0 г/см<sup>3</sup>) и более низкую теплопроводность, что накладывает ограничения на толщину ТВЭлов для исключения расплавления топлива в их центральной области.

Диоксид урана обычно получают в виде порошка осаждением урана из раствора уранилнитрата алюминием или перекисью водорода. Такая процедура приводит к осаждению диураната или перекиси урана, которые затем разлагаются нагреванием до  $UO_3$ . Последующий нагрев в атмосфере водорода восстанавливает  $UO_3$  до  $UO_2$  в порошкообразном виде.

В ядерных реакторах топливо используется, как правило, в виде таблеток, которые изготавливаются методом холодного прессования и спекания. Таким способом можно получить диоксид урана плотностью, достигающей 95 % теоретического значения, равного 10,97 г/см<sup>3</sup>. Максимальная плотность желательна здесь как для увеличения содержания урана в ТВЭле, так и для лучшего удержания продуктов деления.

Таблетки укладывают столбцом внутри тонкостенных чехлов из таких материалов, как цирконий или нержавеющая сталь. Тепловыделяющие элементы затем собираются в кассеты.

Заполняются ТВЭлы гелием, чтобы увеличить теплопередачу между таблетками и оболочкой, в кассете они удерживаются решетками, расположенными с некоторыми интервалами по длине ТВС. Такая конструкция допускает определенную гибкость системы, обеспечивая компенсацию изменения размеров и позволяя теплоносителю свободно циркулировать вдоль ТВЭлов.

Теплопроводность окисного топлива заметно меняется при изменении его пористости и значительно уменьшается при увеличении температуры. Из-за низкой теплопроводности температурные градиенты в топливной таблетке очень велики, в результате таблетки могут растрескиваться вследствие высоких термических напряжений. Возникновение трещин облегчает радиальные перемещения топлива и продуктов деления. Растрескивание и образование полостей в топливе из-за радиационных дефектов кристаллической решетки и накопления газообразных продуктов деления приводят к постепенному уменьшению теплопроводности, которая в конечном итоге может снизиться более чем на порядок.

Показано, что в поперечном сечении топливной таблетки после длительного облучения в реакторе с большой мощностью достаточно четко выделяются три отличные друг от друга зоны. В периферийной зоне микроструктура топлива не изменилась по сравнению с микроструктурой необлученного топлива, поскольку температура

в этой области в рабочих условиях слишком низка, чтобы вызвать перестройку кристаллической структуры. Для промежуточной (равноостной) зоны характерно увеличение размеров зерен вследствие их роста, а центральная (столбчатая) зона содержит столбчатые зерна, возникающие в результате миграции пор вдоль температурного градиента. Если плотность порошка достаточно высока, то миграция пор к центру может привести к их образованию в центре полости. Поэтому в твэлах с высокой глубиной выгорания над топливным стержнем внутри оболочки предусмотрен дополнительный объем, чтобы выделение газов не привело к недопустимо высокому давлению.

Распухание топлива при накоплении продуктов деления может привести к недопустимо высоким напряжениям в оболочках твэлов. Возникновение таких напряжений наиболее сильно проявляется в высоконапряженных реакторах на быстрых нейтронах, имеющих высокую глубину выгорания. Однако локальные напряжения в оболочках твэлов могут возникать и при малых глубинах выгорания, например в легководных реакторах из-за смещения отдельных кусков растрескавшегося топлива и давления их на оболочку твэла. Как отмечалось ранее, между топливом и оболочкой обычно предусматриваются зазоры, заполненные гелием, которые позволяют топливу свободно расширяться, тем самым предотвращая его прямое воздействие на оболочку. Обеспечить свободный выход продуктов деления из топлива можно путем изготовления топливных таблеток с кольцевыми зазорами или с более высокой пористостью. Обычно таблетки на концах делают «тарельчатой» формы, чтобы неоднородность распухания, вызванная большим температурным градиентом, не приводила к деформации твэла. Для большей надежности в твэлах современных реакторов типа PWR создают предварительно высокое давление, способное снизить разность давлений между теплоносителем и внутренней полостью твэлов. Эта мера противодействует деформации циркониевых оболочек твэлов, приводящих к их контакту с топливом.

Если большая глубина выгорания ведет к прямому контакту топлива с оболочкой твэла, то при быстром увеличении мощности реактора в оболочке могут возникнуть высокие напряжения, способствующие ее разрушению. Избежать этого можно, установив ограничения на скорость увеличения мощности реактора после его остановки. Такое ограничение скорости разгона практически исключает возможность разрушения оболочек твэлов и воздействия топлива на оболочку при их прямом контакте.

Хотя распухание топливных таблеток можно снизить, увеличивая пористость топлива, чрезмерно большая пористость может вызвать явление, называемое уплотнением топлива (впервые это явление наблюдали в 1972 г. на PWR Ginna). В топливе с относительно небольшой первоначальной плотностью в некотором диапазоне температур распухание, вызванное газообразными продуктами деления, может оказаться большим, чем его усадка при спекании таблеток.

Если возникнет контакт между материалом топливной таблетки и оболочкой, то таблетки, расположенные ниже этой точки, могут сползти вниз, что, в свою очередь, приведет к образованию зазора между ними. Под действием теплоносителя с высоким давлением оболочка может вдавиться в зазор, в результате чего произойдет разрушение твэла в этом месте. Сейчас такое явление не представляет серьезной проблемы для PWR, поскольку опыт показал, что его можно полностью исключить, если предусмотреть в твэле более высокое давление гелия или изготавливать топливные таблетки с более высокой плотностью (более полное спекание при изготовлении).

## 2.2. Тепловыделяющая сборка ВВЭР-1000

Современные разработки топлива активных зон реакторов ВВЭР-1000 основываются на длительном и богатом опыте эксплуатации близких прототипов активных зон реакторов ВВЭР-440. Наиболее близким прототипом серийного топлива ВВЭР-1000 явилась кассета 5-го блока Нововоронежской АЭС, повторяющая в какой-то мере конструкцию кассет ВВЭР-440. Отличием было введение в активной зоне принципа более мягкого регулирования энерговыделения по высоте и сечению активной зоны. В конструкцию пучка твэлов были введены направляющие каналы для размещения органов регулирования. Несущим элементом оставалась шестигранная труба. При разработке ТВС для ВВЭР-1000 (чехловой вариант) были использованы те же материалы, что и в конструкции ТВС для ВВЭР-440. В дальнейшем по аналогии с мировыми стандартами кассеты ВВЭР-1000 были выполнены бесчехловыми с целью лучшего межканального перемешивания теплоносителя в нормальных и аварийных режимах. В проекте активной зоны ВВЭР-1000 были разработаны топливные циклы с двух- и трехгодичной кампанией топлива.

Эксплуатация этого топлива началась в 1980 г., а переход на трехгодичную кампанию топлива – в 1989–1992 гг. К настоящему времени накоплен положительный опыт эксплуатации кассет ВВЭР-1000 трехгодичной кампании в течение четырех кампаний до глубины выгорания в кассете в пределах  $\sim 49$  МВт·сут/кг  $U^{235}$ . Начиная со второй половины 1992 г. отмечались случаи нарушения в работе поглощающего стержня (ПС) СУЗ, которые заключались в превышении проектного времени падения (более 4 с) или зависания ПС СУЗ.

Результаты работы межведомственной комиссии по выявлению причин заклинивания ПС СУЗ на блоках ВВЭР-1000 показали, что одной из причин нарушений в работе ПС СУЗ является возникновение дополнительных сил трения между ПС СУЗ и направляющими каналами ТВС. Искривления ТВС вызывают появление повышенных межкассетных зазоров и, как следствие, тепловых нагрузок твэлов. Замечания по надежности срабатывания аварийной защиты и возникшая конкуренция на топливном рынке потребовали разработки и внедрения новых типов ТВС и усовершенствованных топливных циклов с этими кассетами.

В последние годы в России выполнен большой объем расчетных и экспериментальных исследований для обоснования реализации модернизированных топливных циклов ВВЭР-1000. Улучшены технологические и эксплуатационные характеристики твэлов и ТВС (повышено качество изготовления топливных таблеток, оболочечных труб и твэлов, оптимизирована конструкция ТВС, разработана технология изготовления ТВС с циркониевыми дистанционирующими решетками и направляющими каналами, отработана и освоена технология производства уран-гадолиниевого топлива). Предусматривается увеличение экономической эффективности топливного цикла за счет повышения глубины выгорания.

В настоящее время рассматривается возможность применения смешанного уран-плутониевого цикла с использованием как энергетического, так и оружейного плутония. Разработка и внедрение разборных ТВС позволит производить замену дефектных твэлов. Нейтронно-физическими расчетами показана возможность реализации пятигодичных топливных циклов.

**Назначение, состав и устройство комплекса кассет и его составных частей.** Комплекс кассет реактора ВВЭР-1000 предназначен для генерирования тепловой энергии, обеспечения теплосъема и управления процессом энерговыделения в активной зоне реактора. Он представляет собой совокупность различных кассет, ПС СУЗ и пучков стержня с выгорающим поглотителем (СВП), предназначенных для выпол-

нения в активной зоне реактора взаимосвязанных эксплуатационных функций. Основной составной частью комплекса кассет является ТВС.

Кассета предназначена для генерирования тепловой энергии и передачи ее потоку теплоносителя в активной зоне реактора. Тепловыделяющая сборка осуществляет дистанционирование твэлов, формирует поток теплоносителя вблизи элементов, обеспечивая необходимое охлаждение, а также сохраняя механическую целостность сборки твэлов, препятствует возникновению и распространению локальной аварии, связанной с уменьшением потока теплоносителя в отдельные ячейки и разрушением части твэлов. Общий вид кассеты с базовым обозначением представлен на рис. 2.1.

В состав **базовой кассеты** входят:

- головка;
- 18 направляющих каналов;
- центральная труба;
- 312 твэлов;
- 15 дистанционирующих решеток;
- нижняя решетка;
- хвостовик.

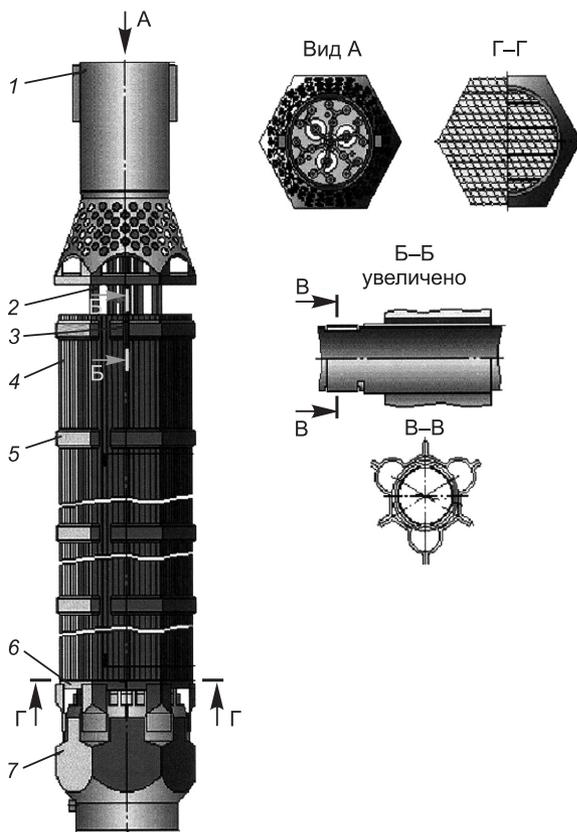


Рис. 2.1. Кассета ВВЭР-1000:

1 – головка; 2 – канал; 3 – центральная труба; 4 – тепловыделяющий элемент; 5 – дистанционирующая решетка; 6 – нижняя решетка; 7 – хвостовик

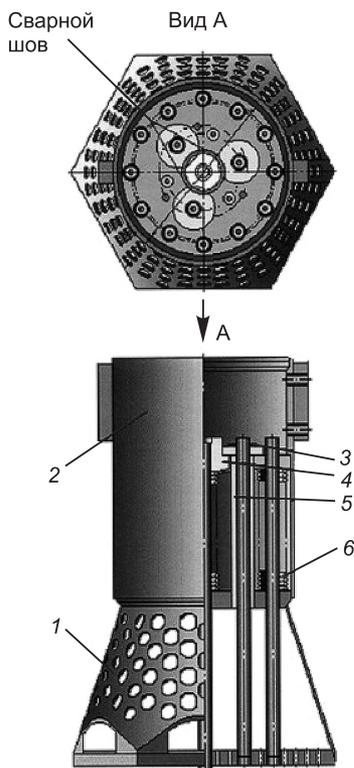


Рис. 2.2. Головка:  
1 – нижняя обечайка; 2 – верхняя обечайка; 3 – шайба; 4 – шток; 5 – болт; 6 – пружина

Головка (рис. 2.2) обеспечивает взаимодействие кассеты с плитой блока защитных труб (БЗТ) реактора и представляет собой конструкцию, состоящую:

- из обечайки верхней;
- обечайки нижней;
- штока;
- трех болтов;
- 16 пружин;
- шайбы.

Верхняя обечайка представляет собой трубу, на наружной поверхности которой есть два ребра, а внутренний объем разделен плитой на две полости. Одна полость предназначена для размещения головки ПС СУЗ или пучка СВП. В другой полости расположены пружины.

Труба обеспечивает взаимодействие головки кассеты с гнездом в плите БЗТ, а с помощью ребер осуществляется взаимодействие кассеты с транспортно-технологическим оборудованием и ориентация ее в реакторе.

Плита имеет отверстия для прохода втулки штока, труб нижней обечайки, болтов и служит упором для пружин и втулки штока.

Нижняя обечайка представляет собой полый усеченный конус с плитами в обоих основаниях, через которые проходят трубы. Конус и плита в нижнем основании имеют отверстия для протока теплоносителя и служат для защиты твэлов от механических повреждений при перегрузках кассет в активной зоне, а также для стабилизации потока теплоносителя на выходе из кассеты. Плита в верхнем основании конуса имеет резьбовые отверстия для болтов и служит опорой для пружин. Трубы закреплены с помощью сварки в нижнем основании конуса и используются в качестве связующих элементов головки с каналами, а также направляющих для пружин.

Шток представляет собой сварную конструкцию из втулки и трубы. Втулка служит упором для пружины и воспринимает нагрузки от удара ПС СУЗ со штангой привода при срабатывании аварийной защиты реактора. Труба является направляющей для пружины и для датчика замера энерговыделения при его установке в центральную трубу кассеты. Болты связывают части головки в единую конструкцию.

Пружины обеспечивают необходимое усилие для удержания кассет от всплытия в активной зоне, компенсируют допуски и разность температурных расширений элементов кассеты и внутрикорпусных устройств реактора, динамические нагрузки на кассету при аварийных ситуациях разуплотнения первого контура реактора, а также на поглощающие элементы ПС СУЗ при срабатывании аварийной защиты реактора.

Шайба предназначена для стопорения болтов.

Головка крепится к каналам с помощью сварки и образует с ними неразъемное соединение.

Направляющий канал (рис. 2.3) является несущим элементом конструкции кассеты и состоит из трубы и наконечника.

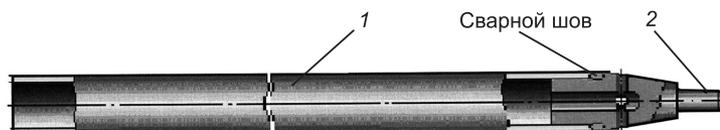


Рис. 2.3. Направляющий канал:  
1 – труба; 2 – наконечник

Труба обеспечивает условия для прохождения ПС СУЗ и пучка СВП внутри пучка твэлов.

Наконечник имеет выступ, которым канал крепится с помощью сварки в нижней решетке, и калиброванные отверстия для протока теплоносителя. Они позволяют:

- организовать надежное охлаждение ПС СУЗ и пучка СВП;
- обеспечить приемлемую скорость и время падения ПС СУЗ при срабатывании аварийной защиты реактора;
- исключить попадание в канал вместе с теплоносителем посторонних частиц, способных воспрепятствовать падению ПС СУЗ.

Центральная труба (рис. 2.4) используется в качестве канала для размещения в активной зоне реактора датчиков замера энерговыделения. Она состоит из наконечника и собственно трубы, соединенных между собой с помощью вальцовки.

Наконечник предназначен для крепления центральной трубы к нижней решетке и имеет калиброванные отверстия для протока теплоносителя.

Труба имеет пазы для фиксации положения дистанционирующих решеток.

Тепловыделяющий элемент (рис. 2.5) предназначен для генерирования тепловой энергии и передачи ее теплоносителю и представляет собой оболочку, герметизированную с обоих концов с помощью заглушек и сварки. Внутренний объем оболочки заполнен топливными таблетками из двуокиси урана и гелием под давлением. Столб топливных таблеток зафиксирован от перемещений двумя фиксаторами, представля-

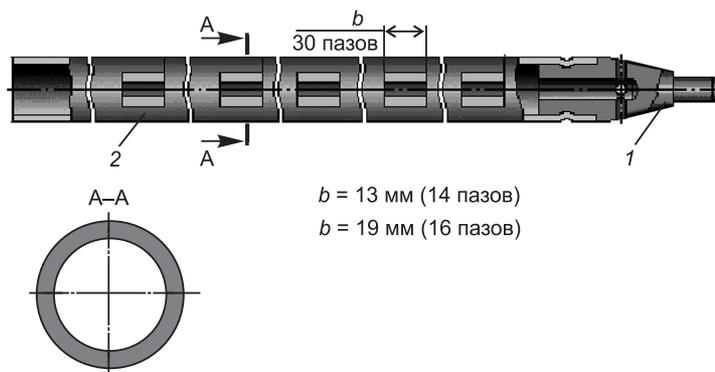


Рис. 2.4. Труба центральная:  
1 – наконечник; 2 – труба

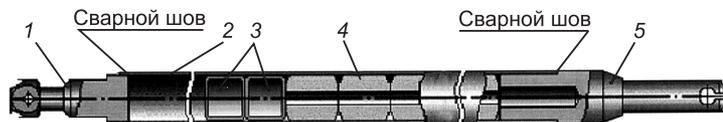


Рис. 2.5. Тепловыделяющий элемент базовой кассеты:  
1 – верхняя заглушка; 2 – оболочка; 3 – фиксатор; 4 – таблетка; 5 – нижняя заглушка



Рис. 2.6. Конструкция топливной таблетки  $UO_2$

ющими собой цилиндрические пружинные втулки. Над столбом топливных таблеток имеется свободный объем, используемый в качестве газосборника для газообразных продуктов деления, выделяющихся в процессе эксплуатации.

Работа твэлов характеризуется высокими тепловыми нагрузками (450 Вт/см) и значительными температурными перепадами по поперечному сечению топлива, которые могут составлять несколько сотен градусов.

Топливные таблетки (рис. 2.6) имеют центральное осевое отверстие для снижения средней объемной температуры топлива и увеличения объема газосборника.

Несмотря на то что при делении урана образуется много радиоактивных продуктов, диоксид урана при нормальных рабочих температурах удерживает более 98 % этих продуктов. Около 1–2 % продуктов, в основном газообразные и летучие – криптон (Kr), ксенон (Xe) и йод (I), диффундируют в газовый объем между топливной композицией и оболочкой, при этом герметичная оболочка препятствует их выходу в теплоноситель.

Поведение топлива как барьера, удерживающего продукты деления, зависит от температуры и степени выгорания. При температурах ниже 1000 °С диоксид урана удерживает все, даже газовые продукты деления. С ростом температуры и степени выгорания продукты деления становятся более подвижными. Этот процесс имеет диффузионную природу, и скорость выхода продуктов деления из топлива определяется законом Фика по формуле

$$e^{E/kT},$$

где  $E$  – энергия активации;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура.

При температуре выше 1600 °С большая доза газов выходит из топлива под оболочку, заметно возрастает также выход йода и других летучих нуклидов. Чтобы топливо выполняло функции барьера, необходимо его минимальное взаимодействие с теплоносителем. Существенным критерием, характеризующим условия работы топливной композиции, является достижение температуры плавления. Этот параметр особенно важен при быстром увеличении мощности, когда температура оболочки повышается еще незначительно. Плавление топлива должно рассматриваться как потеря барьерных функций не только топливом, но и твэлом в целом.

Оболочка обеспечивает передачу тепла от топливных таблеток к теплоносителю и сохранность формы твэла в процессе эксплуатации, а также исключает контакт топливных таблеток и продуктов деления с окружающей средой.

Наличие гелия под оболочкой способствует сохранению формы твэла при эксплуатации и обеспечивает надежную передачу тепла от топливных таблеток к оболочке. Основное требование к оболочке состоит в обеспечении прочности и герметичности во всем спектре нормальных и аварийных воздействий в течение многолетнего жизненного цикла, а также радиационной стойкости при длительном облучении. Герметичность оболочек должна сохраняться в течение всего срока работы твэла и последующего хранения отработавшего топлива. В процессе жизненного цикла оболочка твэла подвергается воздействию совокупности факторов, создающих сложные условия для ее работы. Это коррозионное и силовое воздействия как со стороны теплоносителя, так и со стороны топлива, термоциклирование при изменениях режимов работы (пуск, остановка, маневрирование), радиационное охрупчивание при облучении потоком быстрых нейтронов, перегревы в аварийных

ситуациях. При распухании топлива, а также под действием выходящих под оболочку газовых и летучих продуктов деления увеличиваются нагрузки, действующие изнутри на оболочку твэлов.

Для материалов оболочек первостепенное значение имеют следующие свойства: радиационное упрочнение, охрупчивание, распухание, радиационная ползучесть, коррозионная стойкость. При медленном увеличении мощности или уменьшении расхода теплоносителя через реактор основным параметром, характеризующим целостность твэла, будет температура оболочки. Разрушение оболочки начинается, когда напряжения превышают предел прочности, зависящий от температуры. При определении максимально допустимых значений параметров, характеризующих состояние активной зоны, в первую очередь должны рассматриваться оболочки твэлов, от состояния которых во многом зависит развитие аварийного процесса. Предельно допустимые значения параметров устанавливаются на основе экспериментальных данных по поведению оболочки и твэлов в целом в стационарных и переходных режимах.

Допустимые пределы повреждения твэлов при нормальной эксплуатации для ВВЭР:

- количество твэлов с микродефектами не должно превышать 0,2–1 %;
- количество твэлов с прямым контактом топлива и теплоносителя не должно превышать 0,02–0,1 % общего количества твэлов в активной зоне.

В сложных аварийных условиях допускается превышение проектного предела повреждения твэлов для нормальной эксплуатации. Максимальный проектный предел повреждения твэлов для ВВЭР обусловлен ограничением развития парциркулирующей реакции:

- температура оболочек твэлов не более 1200 °С;
- локальная глубина окисления оболочек твэлов не более 18 % от первоначальной толщины стенки;
- доля прореагировавшего циркония не более 1 % его массы в оболочках твэлов.

В процессе эксплуатации осуществляется непрерывный контроль за состоянием оболочек твэлов, целостность которых является важнейшим условием обеспечения безопасности. Состояние оболочек оценивается системой контроля герметичности оболочек (системой КГО). Для обеспечения целостности первого основного барьера безопасности необходимо поддержание заданного температурного режима работы твэлов и предотвращение механического и коррозионного воздействий на оболочку, выходящих за допустимые по условиям прочности пределы.

Нижняя заглушка позволяет закреплять твэлы в нижней решетке.

*Дистанционирующая решетка* (рис. 2.7) служит для обеспечения заданного расположения твэлов в кассете и представляет собой сварную конструкцию из обода, ячеек и центральной втулки.

Обод снабжен зубчатыми краями, загнутыми в межтвэльное пространство, и выполняет следующие функции:

- придает дистанционирующей решетке дополнительную жесткость и сохраняет ее форму;
- защищает твэлы от механических повреждений во время транспортно-технологических операций с кассетой;
- обеспечивает дистанционирование соседних кассет в активной зоне реактора.

Конструкция ячеек и их размещение в решетке обеспечивают надежное дистанционирование твэлов и направляющих каналов в течение всего срока эксплуатации кассеты.

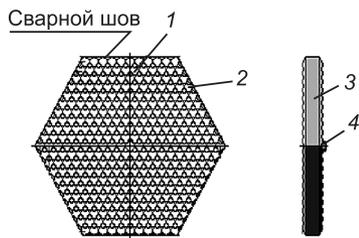


Рис. 2.7. Дистанционирующая решетка базовой кассеты:  
1 – ячейка типа 2; 2 – ячейка типа 1; 3 – обод;  
4 – втулка

Втулка используется для закрепления дистанционирующей решетки на центральной трубе.

Нижняя решетка служит опорой для твэлов, а также выполняет функции фильтра и стабилизатора потока теплоносителя на входе в кассету. Она состоит из собственно решетки и шести уголков, присоединенных в углах к ее боковым граням с помощью сварки.

Решетка представляет собой перфорированную плиту с пазами для протока теплоносителя и отверстиями для крепления каналов, центральной трубы и твэлов. Уголки служат для соединения нижней решетки с хвостовиком.

Следующим элементом рассматриваемой конструкции является *хвостовик* (рис. 2.8), который обеспечивает взаимодействие кассеты с опорным стаканом в днище шахты реактора и состоит из корпуса, системы ребер, соединенных с помощью сварки между собой и с корпусом, а также фиксатора.

Внутри корпуса – полость, через которую подводится теплоноситель, снаружи – сфера, переходящая в цилиндр. Сферой хвостовик опирается на коническую часть опорного стакана, а цилиндр удерживает кассету в вертикальном положении в активной зоне.

Ребра служат опорой для нижней решетки. Фиксатор хвостовика предназначен для ориентации кассеты в реакторе. Шплинт представляет собой отрезок проволоки и предназначен для крепления твэлов в кассете.

Кассета с базовым обозначением имеет несколько вариантов исполнения, различающихся между собой схемой размещения твэлов в поперечном сечении кассеты и степенью обогащения топлива по  $U^{235}$ .

Кассета с базовым обозначением изготавливается в двух производственно-технологических вариантах: базовом (вариант 1) и модернизированном (вариант 2), отличающихся друг от друга комплектацией отдельных составных частей и технологией сборки.

Оба варианта кассеты соответствующего исполнения взаимозаменяемы и совместимы в активной зоне реактора с кассетой базового обозначения.

Конструкции головки, направляющих каналов, центральной трубы, дистанционирующей и нижней решеток, твэлов, а также хвостовика и шплинта аналогичны модернизированной кассете. Исключение составляет топливная таблетка.

Топливная таблетка базовой кассеты (см. рис. 2.6), в отличие от топливной таблетки модернизированной кассеты (рис. 2.9), имеет больший диаметр центрального отверстия.

Рассмотрим общий вид модернизированной кассеты (рис. 2.10).

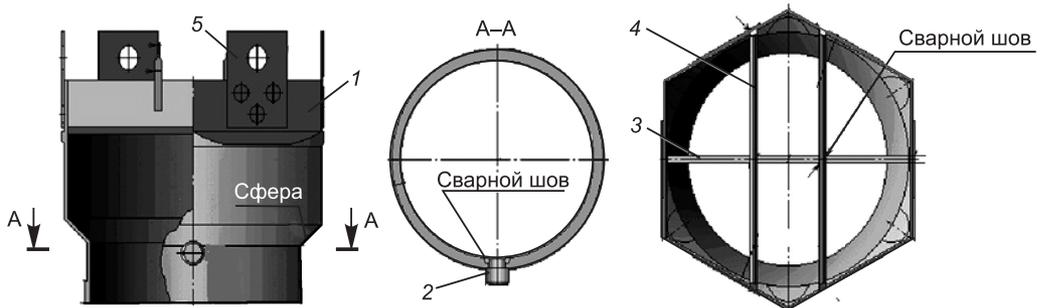


Рис. 2.8. Хвостовик ТВС:

1 – корпус; 2 – фиксатор; 3 – ребро горизонтальное; 4 – ребро вертикальное; 5 – пластины; стрелками показаны места сварных швов

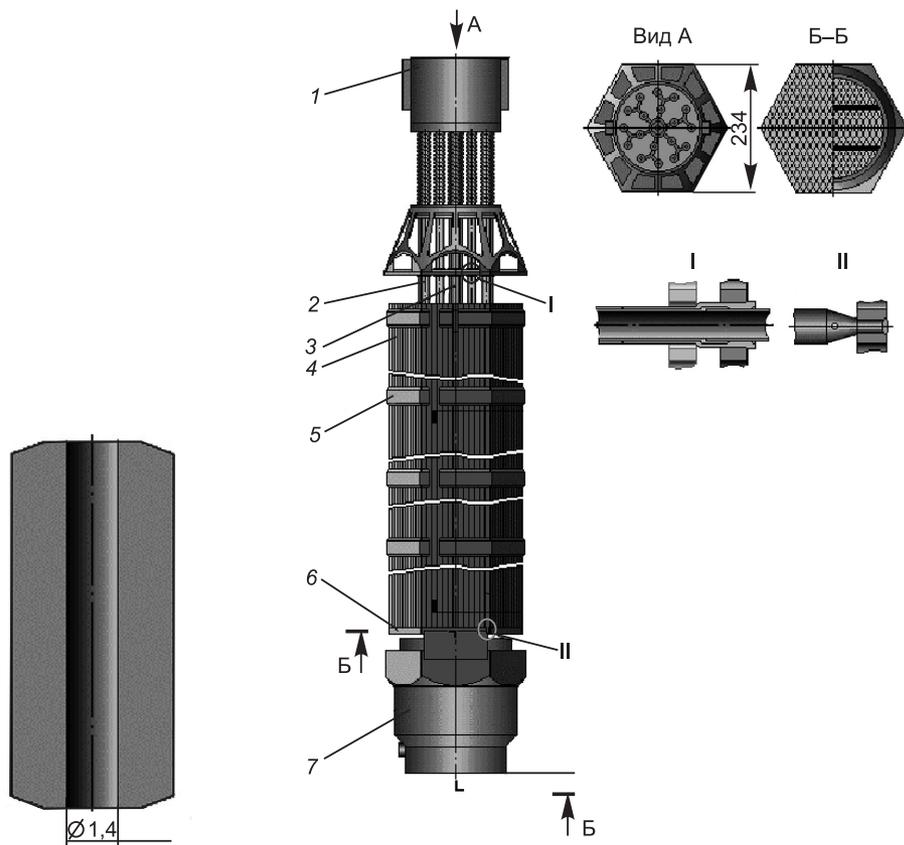


Рис. 2.9. Общий вид топливной таблетки  $UO_2$  модернизированной кассеты

Рис. 2.10. Модернизированная ТВС ВВЭР-1000:  
 1 – головка; 2 – канал; 3 – центральная труба; 4 – тепловыделяющий элемент; 5 – дистанционирующая решетка; 6 – нижняя решетка; 7 – хвостовик;  
 I, II – увеличенные фрагменты кассеты

Конструкция кассеты с модернизированной головкой позволяет исключить пережатие кассеты в условиях непроектных отклонений допусков на внутрикорпусные устройства (ВКУ) и их сборку в реакторе. Реализация указанных ранее положений осуществляется за счет конструктивного изменения схемы взаимодействия головки и направляющего канала (НК) и размещения в головке пружин с меньшей жесткостью и большим, по сравнению с пружинами серийной кассеты, ходом до соприкосновения витков.

В состав модернизированной кассеты входят:

- головка;
- 18 направляющих каналов;
- центральная труба;
- 312 ТВЭлов;
- 15 дистанционирующих решеток;
- нижняя решетка;
- хвостовик.

Головка модернизированной кассеты (рис. 2.11), в отличие от головки базовой кассеты, имеет увеличенный ход пружинного блока и присоединена к каналам с помощью разъемного (цангового) соединения, что позволяет демонтировать ее с кассеты и монтировать обратно.

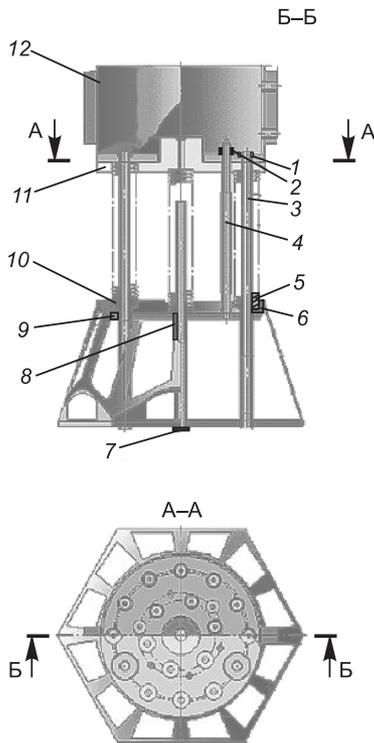


Рис. 2.11. Головка модернизированной кассеты: 1, 6, 7, 10 – втулки четырех типов (сталь 12Х18Н10Т); 2 – гайки (сталь 08Х18Н10Т); 3 – цанги (сталь 12Х18Н10Т); 4 – шпильки (сталь 12Х18Н10Т); 5 – пружины (сталь ХН77Т10Р); 8 – труба (сталь 12Х18Н10Т); 9 – обечайка нижняя (сталь 12Х18Н10Т); 11 – плита опорная (сталь 12Х18Н10Т); 12 – обечайка верхняя (сталь 12Х18Н10Т)

- запас хода пружинного блока до жесткого нагружения не менее 10 мм при поджатии кассеты БЗТ;
- уменьшение жесткости и рабочего усилия пружинного блока и, как следствие, снижение осевой нагрузки на направляющие каналы;
- исключение возможности искривления каркаса кассеты под действием неравномерности температурных и других удлинений направляющих каналов путем их индивидуального поджатия пружинами.

Усилие поджатия пружин выбрано из условия удержания кассетами блока защитных труб и самих кассет от всплытия. Ход пружин при установке БЗТ и зажатии кассет крышкой реактора равен  $22^{+3,67}_{-4,12}$  мм.

Верхняя обечайка модернизированной головки представляет собой трубу, на наружной поверхности которой имеются два ребра. Один из ее торцов заглушен плитой с отверстиями для прохода втулки опорной плиты, цанг и шпилек. Плита служит упором для опорной плиты и трех пружин, проходящих через отверстия в опорной плите. Назначение верхней обечайки и ее остальных элементов конструкции описано на с. 44. В отличие от верхней обечайки головки базовой кассеты, верхняя обечайка модернизированной головки не имеет полости для размещения пружин.

Между подвижной плитой и втулками, вставленными в опорную плиту, на трубах с цанговыми захватами установлены 15 пружин. Три пружины периферийного ряда расположены на трубах между верхней плитой и втулками, вставленными в опорную плиту, и проходят сквозь отверстия в подвижной плите. Центральная пружина находится между подвижной плитой и опорной плитой конической обечайки. Между цилиндрической и конической обечайками размещены три шпильки, используемые для предварительного поджатия пружин. Для ограничения перемещения конической обечайки вниз на трубах с цанговыми захватами предусмотрены бурты.

Для компенсации неравномерного температурного роста направляющих каналов за счет индивидуального поджатия в головке, установленной на пучок твэлов между шайбой и опорной плитой, предусмотрен зазор, равный 6 мм. Такая конструкция головки кассеты обеспечивает:

- удержание кассеты от всплытия 19 пружинами;
- демпфирование падения ПС СУЗ 16 пружинами;
- постоянное прижатие цилиндрической обечайки к гнезду блока защитных труб, в том числе и в процессе демпфирования ПС СУЗ при падении;
- компенсацию неравномерности температурных и других удлинений направляющих каналов за счет их индивидуального поджатия;

Нижняя обечайка модернизированной головки представляет собой полый усеченный конус с плитами в обоих основаниях, снабженными отверстиями для прохода цанг и трубы. Конус и плита в нижнем основании снабжены дополнительно отверстиями для протока теплоносителя, а плита в верхнем основании – резьбовыми отверстиями для установки шпилек.

Опорная плита через имеющийся выступ воспринимает нагрузки от удара ПС СУЗ со штангой привода при срабатывании аварийной защиты.

Труба служит направляющей для центральной пружины и для датчика замера энерговыделения при его установке в центральную трубу.

Цанги обеспечивают разъемное соединение головки с каналами кассеты.

Пружины модернизированной головки в отличие от пружин головки базовой кассеты имеют увеличенный рабочий ход и обеспечивают постоянное сопряжение кассеты с гнездом в плите БЗТ и направляющими для ПС СУЗ.

Демонтаж модернизированной головки с кассеты осуществляется после предварительного поджатия нижней обечайки вверх, пока цанги не выйдут из положения фиксации в плите нижнего основания. Монтаж головки производится в обратном порядке.

Направляющий канал модернизированной кассеты (рис. 2.12) состоит из втулки, наконечника и трубы, соединенных между собой с помощью сварки.

Втулка предназначена для разъемного соединения канала с цангой головки кассеты. Если чертежи центральных труб модернизированной и базовой кассет расположить рядом, то очевидны некоторые различия (рис. 2.13, а, б).

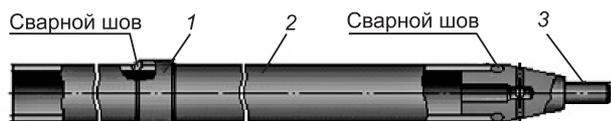


Рис. 2.12. Направляющий канал модернизированной кассеты:  
1 – втулка; 2 – труба; 3 – наконечник

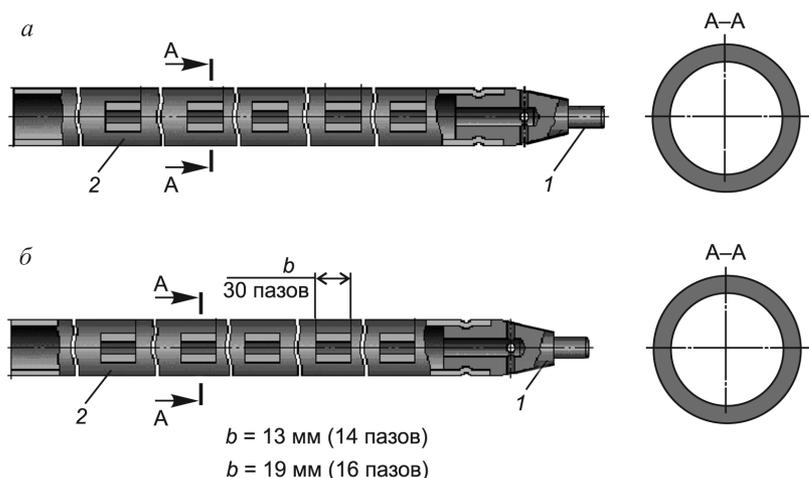


Рис. 2.13. Труба центральная:  
а – базовой кассеты; б – модернизированной кассеты; 1 – наконечник; 2 – труба

Тепловыделяющий элемент модернизированной кассеты (рис. 2.14) по своей конструкции аналогичен твэлу базовой кассеты. Исключение составляют топливная таблетка и заглушки. Топливная таблетка была рассмотрена ранее.

Конструкция нижней заглушки позволяет закреплять твэл в нижней решетке и осуществлять, при необходимости, его удаление из кассеты.

Верхняя заглушка имеет захватную часть для удаления твэла из кассеты.

Дистанционирующая решетка (ДР) модернизированной кассеты представлена на рис. 2.15.

В отличие от нижней решетки, используемой в кассетах, описанных ранее, нижняя решетка модернизированной кассеты (рис. 2.16) имеет вместо уголков две пластины, с помощью которых к ней присоединяют хвостовик. Крепление твэлов к нижней решетке осуществляется посредством раскрытия усиков наконечников (типа «ласточкин хвост»). Для обеспечения проектного времени падения ПС СУЗ в наконечниках направляющих каналов организованы четыре боковых отверстия диаметром 1,5 мм и одно центральное отверстие диаметром 2 мм.

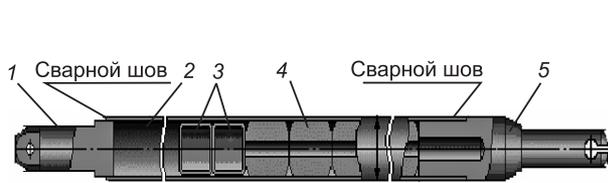


Рис. 2.14. Тепловыделяющий элемент модернизированной кассеты:  
1 – верхняя заглушка; 2 – оболочка; 3 – фиксатор; 4 – таблетка; 5 – нижняя заглушка; размеры даны до облучения

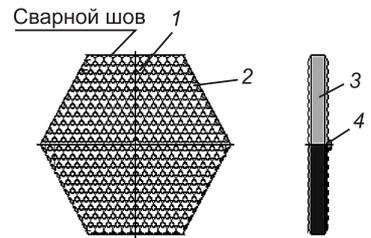


Рис. 2.15. Дистанционирующая решетка модернизированной кассеты:  
1 – ячейка типа 2; 2 – ячейка типа 1; 3 – обод; 4 – втулка

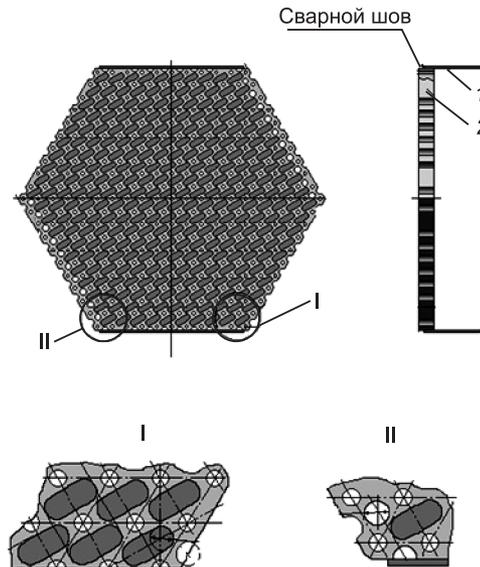


Рис. 2.16. Нижняя решетка модернизированной кассеты:  
1 – пластина; 2 – решетка; I, II – увеличенные фрагменты решетки

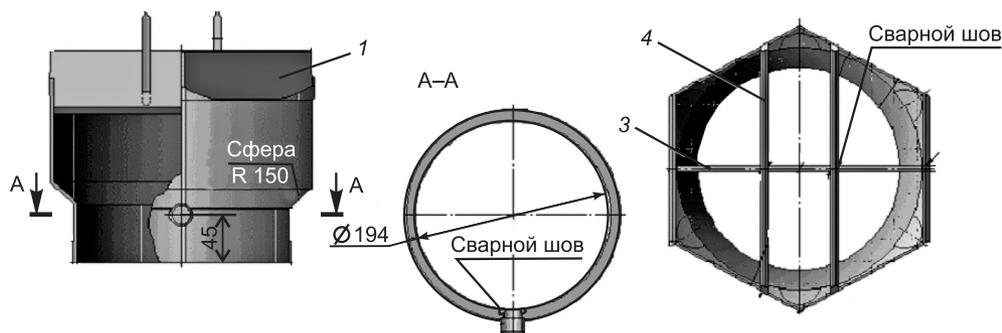


Рис. 2.17. Хвостовик модернизированной кассеты:

1 – корпус; 2 – фиксатор; 3 – ребро горизонтальное; 4 – ребро вертикальное; стрелками показаны места сварных швов

Хвостовик модернизированной кассеты (рис. 2.17) отличается от хвостовика базовой кассеты конструкцией элементов крепления к нижней решетке и расположением подкрепляющих ее ребер.

Расположение ребер, подкрепляющих нижнюю решетку, и ее пластин после присоединения хвостовика обеспечивает доступ для обслуживания нижних заглушек ТВЭЛОВ.

### 2.3. Тепловыделяющие сборки

В связи с замечаниями по надежности активных зон, связанными с искривлениями ТВС, а также с отставанием по технико-экономическим показателям от мирового уровня, было принято решение о разработке альтернативной конструкции ТВС с улучшенными характеристиками для использования в активных зонах реактора ВВЭР-1000. Разработка ТВСА проводилась ОАО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова», ОАО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», ОАО «Машиностроительный завод» при участии РНЦ «Курчатовский институт», ОКБ «Гидропресс», ОАО «Всероссийский Научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» и других организаций.

Анализ условий и эксплуатационного опыта отечественных и зарубежных ТВС в активных зонах водо-водяных реакторов, а также результатов послереакторных исследований отработавших ТВС показал, что деформация, приводящая к аномалиям в работе ПС СУЗ, является следствием целого ряда факторов конструктивного, технологического и эксплуатационного характера. К ним относятся:

- неравномерность выделения энергии, температур, потока нейтронов по радиусу и высоте ТВС;
- неравномерность выгорания и удлинения ТВЭЛОВ;
- разброс усилий заземления ТВЭЛОВ в ДР;
- значительные осевые усилия, действующие на ТВС от прижимных пружин;
- сильная зависимость устойчивости ТВС без чехла от жесткости пучка ТВЭЛОВ, которая определяется величиной натяга в системе «ТВЭЛ–ячейка ДР» и снижается в процессе работы ТВС из-за «усыхания» ТВЭЛОВ.

При разработке концепции альтернативной ТВСА главное внимание было направлено на сведение к минимуму отрицательных последствий термомеханического и радиационного воздействий на геометрическую стабильность ТВСА. Предлагаемая конструкция альтернативной сборки занимает в определенной степени промежуточное положение между чехловыми ТВСА реактора ВВЭР-1000 пятого блока Нововоронежской АЭС и штатными бесчехловыми ТВСА серийного реактора ВВЭР-1000.

**Конструкция ТВСА.** Тепловыделяющие сборки бесчехлового типа шестигранного профиля представлены на рис. 2.18. Габаритные и присоединительные размеры ТВСА выбраны из условия размещения ее в реакторе ВВЭР-1000.

Основные технические характеристики ТВСА представлены в табл. 2.1.

В конструкции ТВСА реализованы следующие технические решения:

- введен постоянно действующий силовой каркас;
- применены оптимизированные ДР, обеспечивающие уменьшенное взаимодействие в паре «ТВЭЛ–ячейка ДР»;
- обеспечена «однородность» ТВСА за счет использования на высоте активной части ТВСА конструкционных материалов одного класса (циркониевые сплавы);
- в качестве материала уголков каркаса и НК применен циркониевый сплав Э635, обладающий повышенными, по сравнению со сплавом Э110, механическими свойствами и радиационной стойкостью;

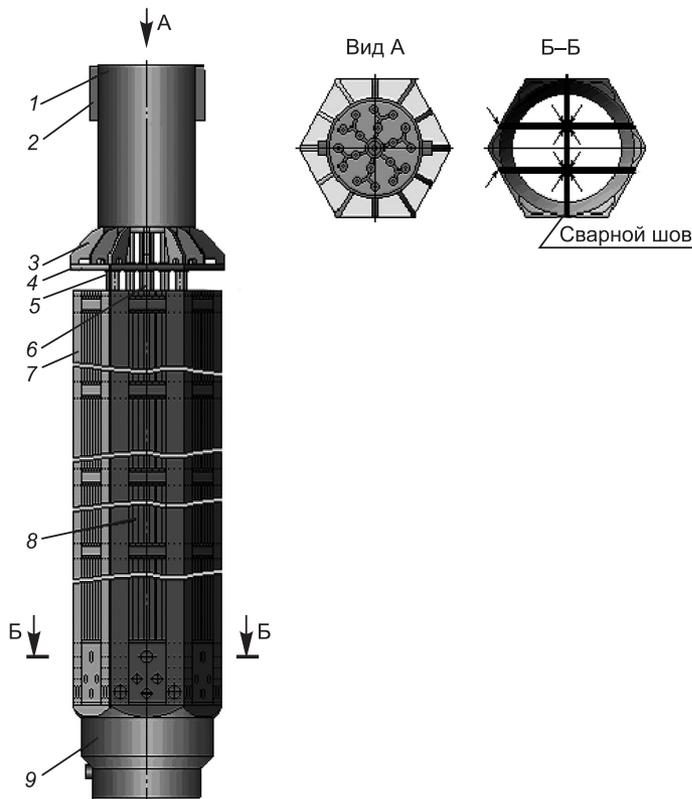


Рис. 2.18. Кассета ТВСА ВВЭР-1000:

1 – головка; 2 – шпонка; 3 – ребро; 4 – плита; 5 – направляющая труба; 6 – центральная труба; 7 – уголок; 8 – твэл; 9 – хвостовик; стрелками указаны места сварных швов

- направляющие каналы имеют возможность независимого друг от друга терморadiационного роста, а осевая нагрузка распределяется на все 18 НК за счет применения головки специальной конструкции и обеспечения зазора между НК и ячейками ДР.

Таблица 2.1

**Основные технические характеристики ТВСА**

Технические характеристики	Значение
Длина ТВСА, мм	4570
Масса ТВСА, кг	730
Количество твэлов, шт.	312
Сетка расположения твэлов, мм	Треугольная
Шаг между твэлами, мм	12,75
Наружный диаметр твэла, мм	9,1
Количество ДР, шт.	15
Высота ячейки ДР, мм	20
Максимальный размер «под ключ» по уголкам, мм	234,8
Количество НК, шт.	18
Наружный диаметр/толщина стенки НК	12,6/0,85
Наружный диаметр/толщина стенки ЦТ, мм	13,0/1,0
Количество прижимных пружин, шт.	18
Конструкционные материалы: детали головки и хвостовика НК, центральная труба, уголки ДР прижимные пружины оболочка твэлов	Сталь 08Х18Н10Т Сплав Э635 Сплав Э110 ЭК 173-ИД Сплав Э110/Э635

Альтернативная тепловыделяющая сборка состоит из силового каркаса, пучка твэлов, головки, хвостовика.

Силовой каркас, обеспечивающий жесткость и прочность, образуют 15 дистанционирующих решеток из сплава Э110 (рис. 2.19) и шесть уголков из сплава Э635, к которым ДР приварены контактной точечной сваркой. Уголки каркаса крепятся к хвостовику из нержавеющей стали винтами. Центральная труба из сплава Э635, служащая для размещения сборок канала нейтронных измерений и 18 НК из сплава Э635, крепится резьбовыми соединениями к нижней несущей решетке, которая с помощью шести стальных пластин приваривается к хвостовику. Для подкрепления несущей решетки в хвостовике имеется опорная конструкция из трех ребер. Силовой каркас воспринимает нагрузки от внутренних сил, вызываемых трением твэлов в ячейках ДР при терморadiационном росте, и изгибающих моментов направляющих каналов, возникающих под действием усилий от прижимных пружин. Силовыми

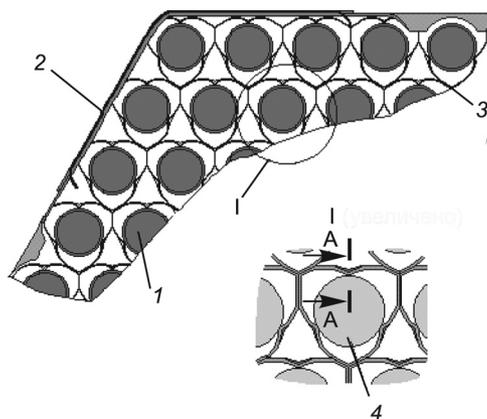


Рис. 2.19. Дистанционирующая решетка ТВСА:

1 – твэл; 2 – уголок; 3 – элемент дистанционирующей решетки; 4 – сечение дистанционирующей решетки по высоте; I – увеличенный фрагмент

элементами, соединяющими головку и хвостовик и воспринимающими нагрузки при транспортно-технологических операциях, служат 18 НК.

Пучок твэлов набран из 312 твэлов цилиндрического типа диаметром 9,1 мм, расположенных в углах правильной треугольной сетки с шагом 12,75 мм. Дистанционирование твэлов осуществляется с помощью 15 ДР сотового типа из сплава Э110. Для исключения деформации ДР в осевом направлении при радиационном росте твэлов каждая ДР в местах проходов НК подкреплена втулками. Закрепление твэлов для предохранения от осевых перемещений произведено в перфорированной плите хвостовика ТВСА с помощью нижних заглушек твэлов, рассеченных в продольном направлении. В сборке ТВСА применяются гладкостержневые твэлы, разработанные на основе серийного твэла для ТВС ВВЭР-1000.

Собственно твэл (рис. 2.20) состоит из оболочки, заглушек (верхней и нижней), сердечника (набор топливных таблеток), пружинного фиксатора и проставки.

В качестве материала оболочки и заглушек твэла предусмотрено использование как сплава Э100, так и сплава Э635. Оболочка твэла имеет наружный диаметр 9,1 мм, внутренний диаметр 7,73 мм. В качестве ядерного топлива применяются таблетки диоксида урана плотностью  $10,4 \times 10,7 \text{ г/см}^3$ , наружным диаметром 7,57 мм и уменьшенным диаметром центрального отверстия 1,4 мм. Таблетки имеют фаски, снижающие взаимодействие топлива с оболочкой и уменьшающие сколы таблеток при загрузке. Для снижения внутреннего давления газообразных продуктов деления в верхней части твэла предусмотрен газосборник. Высота топливного столба – 3530 мм. Фиксация его в заданном положении осуществляется пружинным фиксатором из сплава ЭК 173-ИД, а герметизация твэлов – с обоих концов заглушками с помощью контактно-стыковой сварки. Давление заполнения гелием при изготовлении твэла – 2 МПа.

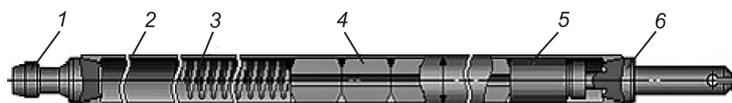


Рис. 2.20. Тепловыделяющий элемент:

1 – верхняя заглушка; 2 – оболочка; 3 – пружинный фиксатор; 4 – таблетка; 5 – проставка; 6 – нижняя заглушка

Отличия твэла ТВСА от твэла штатной ТВС:

- герметизация твэла осуществляется двумя швами при контактно-стыковой электросварке;
- введен пружинный фиксатор;
- в качестве материала оболочки и концевых деталей наряду со сплавом Э110 используется сплав Э635;
- уменьшен диаметр центрального отверстия таблетки.

Возможна замена части твэлов на твэлы с оксидным выгорающим поглотителем (твэги). Геометрические характеристики твэгов совпадают с геометрическими характеристиками твэлов. Состоит твэг из следующих частей: заглушки верхней, оболочки, заглушки нижней, сердечника из топливных таблеток, фиксатора, проставки. В качестве материала оболочки и концевых деталей используется сплав Э110.

Ядерным топливом для твэгов является уран-гадолиниевое топливо. Массовая концентрация оксида гадолиния составляет 5 %. Топливные таблетки с наружным диаметром 7,57 мм имеют центральное отверстие диаметром 1,5 мм. Используются топливные таблетки с ужесточенными допусками и повышенными требованиями по внешнему виду, дроспекаемости, пористости, размеру зерна и т.д. Таблетки имеют фаски, снижающие взаимодействие топлива с оболочкой и уменьшающие сколы краев при загрузке. Для снижения внутреннего давления газообразных продуктов деления в верхней части твэгов предусмотрен газосборник. Герметизация твэгов осуществляется с двух сторон контактно-стыковой электросваркой. Проставка из циркониевого сплава предназначена для поднятия столба топлива до уровня, существующего в штатном твэле ВВЭР-1000. Фиксация топливного столба в заданном положении осуществляется пружинным фиксатором из сплава ЭК173-ИД. Давление заполнения гелием составляет 2 МПа.

Головка ТВСА содержит блок из 19 пружин, 18 пружин через направляющие каналы прижимают ТВСА к опорным стаканам шахты реактора, удерживая ТВСА от всплытия в процессе работы реактора. Центральная пружина и 15 прижимных пружин поджимают центральный шток головки, демпфируя ПС СУЗ при аварийном сбросе, а три пружины удерживают головку ТВСА в зацеплении с нижней плитой БЗТ. Для транспортировки ТВСА и исключения углового рассогласования между направляющими каналами и каналами БЗТ на головке ТВСА имеются две шпонки. Головка ТВСА крепится к направляющим каналам с помощью гаек. Демонтаж этих гаек позволяет снимать головку с направляющих каналов в случае ремонта ТВСА при разгерметизации твэлов. Для поддержания верхней части НК и организации проходки НК в головке ТВСА, а также для закрепления головки на направляющих каналах циркониевая труба сверху переходит в стальную втулку.

Одним из методов контроля состояния активной зоны является определение подогревов теплоносителя в ТВС. В системе внутриреакторного контроля (ВРК) реактора ВВЭР-1000 регистрируются температуры теплоносителя на выходе из 95 ТВС с помощью термопар, установленных в верхней части головки ТВС. Конструктивно штатные ТВС и конструкция БЗТ обеспечивают циркуляцию теплоносителя вблизи термопар следующим образом: после выхода из пучка твэлов основная часть теплоносителя поступает в участок между головками ТВС, а часть теплоносителя – в верхнюю часть головки ТВС через отверстия верхней плиты головки ТВС в область размещения термопар. В верхнюю часть головки ТВС поступают также протечки теплоносителя по НК и ЦТ. Указанная часть расхода теплоносителя может иметь пониженную температуру по сравнению с температурой теплоносителя, поступающего в верхнюю

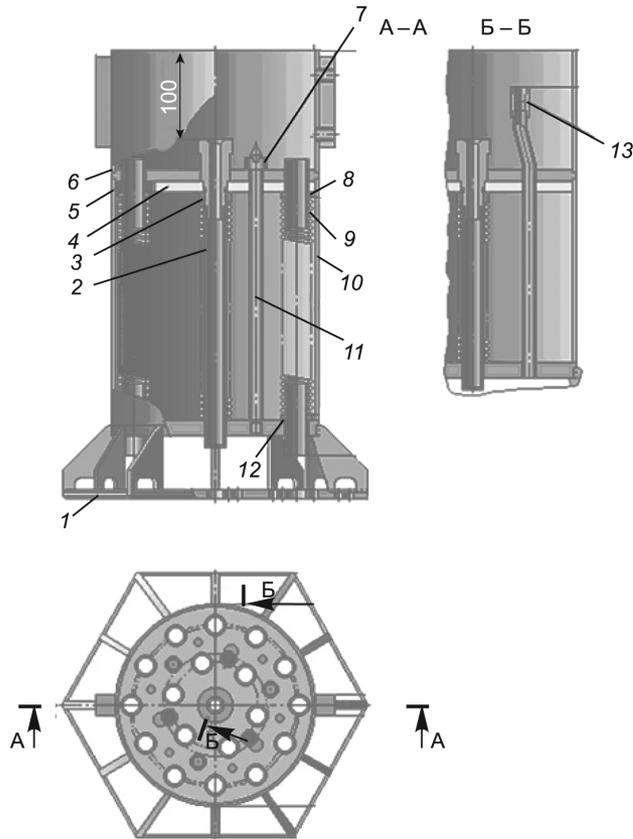


Рис. 2.21. Модернизированная головка ТВСА:

1 – решетка головки; 2 – центральная втулка; 3 – гайка; 4 – плита; 5 – шайба; 6 – узел головки; 7 – гайка; 8, 12 – втулка; 9 – пружина; 10 – обечайка; 11 – шпилька; 13 – труба термоконтроля

часть головки ТВС после выхода из пучка твэлов, что приводит к занижению показаний выходных термопар («пэльный эффект»). Наличие «пэльного эффекта» снижает представительность контроля за состоянием активной зоны.

С целью улучшения контроля подогрева теплоносителя в ТВС в ОКБМ была разработана модернизированная головка ТВСА (рис. 2.21) со специальными каналами, обеспечивающими поступление теплоносителя после выхода из пучка твэлов непосредственно к термодатчику. На стенде были проведены испытания предлагаемого способа измерения теплоносителя с помощью модернизированной головки.

На АЭС термодатчики для контроля температуры теплоносителя на выходе из ТВС размещаются в камере, образованной нижней плитой БЗТ и верхней частью головки ТВС. Основная часть теплоносителя после выхода из пучка твэлов поступает в пространство между головками ТВС и далее через отверстия в нижней плите БЗТ в участок межтрубного пространства БЗТ. После выхода из пучка твэлов небольшая часть теплоносителя направляется в верхнюю часть головки ТВС по шести отверстиям в нижней и верхней плите головки ТВС.

В верхнюю часть головки ТВС поступает также более холодный теплоноситель из направляющих каналов и «захлаживает» термодатчик, размещенную в верхней ка-

мере головки ТВС. Из выходной камеры головки ТВС теплоноситель попадает внутрь защитных труб (размещенных над ТВС с ПС СУЗ и ТВС средней части активной зоны) и в межтрубное пространство БЗТ (из головок периферийных ТВС). С целью исключения «захолаживания» термопары, размещенной в верхней камере головки ТВС, в модернизированной головке ТВСА установлены три специальных канала, выполненные в виде трубы и сопла на выходе из этой трубы. Сопло на выходе имеет конусное расширение и размещается вблизи от термопары (посередине между двумя возможными радиусами ее расположения).

Таким образом, за счет использования трех специальных каналов обеспечивается непосредственное поступление теплоносителя из выходного участка ТВСА к выходной термопаре.

В ТВСА в качестве конструкционных материалов НК, ЦТ, уголков каркаса и оболочек твэлов используется *сплав Э635*. Он изготавливается на основе смеси электролитического и йодидного циркония. Содержание легирующих элементов в сплаве Э635 (% мас.): ниобий (0,95–1,05), олово (1,2–1,3), железо (0,34–0,4). С ростом температуры отмечено монотонное увеличение коэффициента теплопроводности, что характерно и для других циркониевых сплавов. При проведении исследования по определению механических свойств труб НК и ЦТ результаты показали достаточно высокую прочность и пластичность.

При приложении растягивающих усилий деформация в трубах НК и ЦТ начинается при достижении напряжений, соответствующих величине предела упругости. Результаты испытаний характеризуют сплав Э635 как коррозионно-стойкий, коррозия которого слабо зависит от структурного состояния, содержания кислорода в воде и наличия кипения. Сплав Э635 слабо подвержен радиационному росту.

Деформация радиационного роста оболочечных и канальных труб в осевом и поперечном направлениях весьма незначительна. Сплав Э635 и изделия из него имеют высокое сопротивление ползучести, превосходящее другие сплавы, что позволяет использовать его для изготовления труб НК, ЦТ и уголков каркаса ТВСА.

Подтверждена высокая прочность сварных швов из сплава Э635, выполненных электронно-лучевой сваркой. Разработана технология контактной точечной сварки уголков из сплава Э635 к ободам ДР из сплава Э110. Трубы НК и ЦТ находятся в контакте с ДР из сплава Э110. Исследования совместимости сплава Э635 с другими материалами показали аналогичные результаты с другими циркониевыми сплавами.

## 2.4. Тепловыделяющая сборка УВР-1500

За основу конструкции ТВС для реактора УВР-1500 взята разработанная альтернативная конструкция унифицированной ТВС (ТВСА) с улучшенными характеристиками для использования в активных зонах как действующих, так и вновь вводимых установок, технический проект которой выполнен ОКБМ.

При проектировании ТВСА учитывался опыт создания и эксплуатации ТВС для ВВЭР-1000, ВВЭР-440 и зарубежных ТВС типа PWR и проанализированы тенденции их развития.

В соответствии с современными требованиями конструкция ТВС и применяемые материалы при заданных проектных характеристиках должны обеспечивать:

- прочность, геометрическую стабильность и проектные условия охлаждения во всех режимах эксплуатации (НУЭ, ННУЭ и проектных авариях);

- проектное время введения органа регулирования (ОР) СУЗ в течение всего срока службы ТВС;
- непревышение установленных проектом эксплуатационных пределов повреждения топлива;
- возможность безопасной загрузки и выгрузки ТВС;
- достаточную прочность ТВС при совместном воздействии максимального расчетного землетрясения (МРЗ) и максимальной проектной аварии (МПА), обеспечивающую выгрузку ТВС из реактора.

В качестве типа ТВС была выбрана бесчехловая ТВС, обеспечивающая максимальное количество твэлов в активной зоне при минимуме конструкционных материалов. При этом на длине активной зоны использовались только циркониевые радиационно-стойкие конструкционные материалы.

В рамках технического проекта ТВСА был выполнен комплекс дореакторных статических, динамических, гидравлических, вибрационных, ресурсных и других испытаний, подтверждающих работоспособность ТВС этого типа. В ходе испытаний изучались, в частности, следующие вопросы:

- прочностные характеристики каркаса и ТВС в целом;
- влияние разновеликого роста уголков, обусловленного неравномерным распределением флюенса быстрых нейтронов по сечению ТВС, на изгиб ТВС;
- влияние разновеликого радиационно-термического роста твэлов на изгиб ТВС;
- влияние «усыхания» твэлов под воздействием наружного давления теплоносителя и ползучести материала оболочки на фреттинг-коррозию пары «твэл–ячейка ДР» в местах дистанционирования твэлов;
- напряженно-деформированное состояние уголков и прочность сварного соединения уголков с дистанционирующими решетками.

Испытания проводились на фрагментах и полномасштабных макетах ТВС. Полномасштабные макеты ТВС прошли прочностные и ресурсно-гидравлические испытания, испытания на сбросы ОР СУЗ, на собираемость активной зоны, на совместное воздействие на ТВС землетрясения и МПА. Результаты испытаний подтвердили правильность выбранной конструкции, заложенные в проекте прочностные и гидравлические характеристики ТВС, а также позволили подтвердить принятые методики расчетов.

Тепловыделяющая сборка для реактора УВР отличается от ТВСА увеличенной на 370 мм (для ТВС с высотой активной зоны  $L_a = 3900$  мм) или на 670 мм (для ТВС с  $L_a = 4200$  мм) высотой активной части твэлов и соответственно увеличенной общей высотой ТВС, а также новой конструкцией хвостовика. В остальном конструкции этих ТВС аналогичны.

Таким образом, опытно-конструкторские работы, проведенные в обоснование конструкции ТВСА, могут служить и для обоснования работоспособности ТВС для реактора УВР. Но увеличение высоты ТВС для УВР и введение нового хвостовика требуют проведения дополнительных испытаний на стендах:

- определения статических характеристик сопротивления изгибу и изгибной жесткости каркаса ТВС и ТВС в целом;
- ресурсно-гидравлических испытаний ТВС при натуральных параметрах теплоносителя (скорость, температура, давление).

Основные технические характеристики ТВС бесчехлового типа шестигранного профиля с максимальным размером «под ключ» 234,8 мм (см. рис. 2.18) даны в табл. 2.2.

Таблица 2.2

## Основные технические характеристики ТВС бесчехлового типа

Технические характеристики	Значение
Длина ТВС, мм	4960/5260 <sup>1</sup>
Масса ТВС, кг	~800/860 <sup>1</sup>
Количество твэлов, шт.	312
Сетка расположения твэлов	Равномерно треугольная
Шаг между твэлами, мм	12,75
Наружный диаметр твэла, мм	9,1
Высота активной части, мм	3900/4200 <sup>1</sup>
Топливная композиция	UO <sub>2</sub>
Высота твэла, мм	4250/4550
Количество ДР, шт.	17/18
Высота ячейки ДР, мм	20
Максимальный размер «под ключ» по уголкам, мм	234,8
Количество НК, шт.	18
Наружный диаметр/толщина стенки НК, мм	12,6/0,85
Наружный диаметр/толщина стенки ЦТ, мм	13,0/1,0
Количество прижимных пружин, шт.	18
Усилие поджатия «свежей» ТВС в реакторе: в режиме уплотнения, кгс в номинальном режиме, кгс	~1400 ~800
Конструкционные материалы: детали головки и хвостовика НК, центральная труба, уголки ДР прижимные пружины оболочка твэлов	Сталь 08X18H10T Сплав Э635 Сплав Э110 ЭК 173-ИД Сплав Э635

<sup>1</sup> В числителе указано значение для активной зоны с высотой активной части 3900 мм, а в знаменателе – с высотой активной части 4200 мм.

Тепловыделяющая сборка состоит из следующих основных частей: силового каркаса, пучка твэлов, головки и хвостовика.

Силовой каркас, обеспечивающий жесткость и прочность конструкции, независимую от натягов в системе «твэл–ячейка ДР», образует 17 (для  $L_a = 3900$  мм) или 18 (для  $L_a = 4200$  мм) дистанционирующих решеток из сплава Э110 и шесть уголков из сплава Э635, к которым дистанционирующие решетки приварены контактной точечной сваркой. Уголки каркаса крепятся к хвостовику из нержавеющей стали винтами. Центральная труба из сплава Э635, служащая для размещения зондов ВРК, и 18 направляющих каналов также из сплава Э635 крепятся болтовыми соединениями к перфорированной плите хвостовика.

Силовой каркас воспринимает нагрузки от внутренних сил, вызываемых трением твэлов в ячейках ДР при терморadiационном росте, и изгибающих моментов направляющих каналов, возникающих под воздействием усилий от прижимных пружин. Силовыми элементами, соединяющими головку и хвостовик и воспринимающими нагрузки при транспортно-технологических операциях, служат 18 направляющих каналов.

Пучок твэлов набран из 312 твэлов цилиндрического типа диаметром 9,1 мм, расположенных в углах правильной треугольной сетки с шагом 12,75 мм. Дистанционирование твэлов осуществляется 17 ДР сотового типа, конструктивно аналогичных ДР серийных ТВС ВВЭР-1000, но оптимизированных по величине усилия протаскивания твэлов через ячейки ДР за счет уменьшения поверхности контакта твэлов с ДР и уменьшения натягов в системе «твэл–ячейка ДР». Это позволяет уменьшить эффект «защемления» твэлов ячейками ДР и соответственно изгибающие моменты в ТВС, возникающие при терморadiационном росте твэлов. Для исключения деформации ДР в осевом направлении при радиационном росте твэлов каждая ДР в местах проходов НК подкреплена втулками, приваренными к НК контактной сваркой.

Для закрепления твэлов от осевых перемещений используется стальная ДР хвостовика, ячейки которой беззазорно обжимают нижние стальные наконечники твэлов, имеющие проточки. Такая конструкция, обеспечивая закрепление твэлов, одновременно позволяет легко удалять поврежденные твэлы.

Стальная ДР хвостовика совместно с нижними стальными наконечниками твэлов образует барьер для дебриса (мелких металлических частиц, попадающих в первый контур), снижая риск повреждения твэлов из-за фреттинг-коррозии и повышая надежность ТВС.

Хвостовик ТВС представляет собой сварную конструкцию, состоящую из шестигранной перфорированной плиты, к которой сверху приварен обод стальной ДР, а снизу с помощью шести пластин приварена цилиндрическая часть хвостовика, имеющая шаровую поверхность, которой хвостовик устанавливается на конусную поверхность стакана шахты реактора. Снизу перфорированная плита подпирается тремя ребрами. Для ориентации ТВС в плане на хвостовике имеется фиксирующий штырь.

Головка ТВС крепится к направляющим каналам с помощью гаек. Демонтаж этих гаек позволяет снимать головку с НК в случае ремонта ТВС при разгерметизации твэлов.

Для подкрепления верхней части НК и организации их проходки в головке ТВС, а также для закрепления головки на направляющих каналах циркониевая труба вверх переходит в стальную втулку. Соединение трубы с втулкой произведено посредством промежуточного тела – стальной проволоки диаметром 0,5 мм, навитой на циркониевую трубу, с последующей обжимкой втулки ротационным способом на оправке.

Головка ТВС содержит блок из 18 прижимных пружин, которые через направляющие каналы прижимают ТВС к опорным стаканам шахты реактора, удерживая ТВС от всплытия в процессе работы реактора.

Конструкция головки ТВС позволяет компенсировать возможную разницу в величине радиационного роста отдельных направляющих каналов, а также распределять осевую нагрузку на все 18 НК при транспортировке ТВС в вертикальном положении, при загрузке и выгрузке ТВС.

Для транспортировки ТВС и исключения углового рассогласования между направляющими каналами и каналами БЗТ на головке ТВС имеются две шпонки. Направляющие каналы, поджатые индивидуальными прижимными пружинами, проходят через ячейки ДР с зазором диаметром ~ 0,3 мм и крепятся к перфорированной плите хвостовика с помощью болтов. Направляющие каналы передают осевые усилия от прижимных пружин на перфорированную плиту хвостовика, а возникающие при этом изгибающие моменты НК через ДР передают на штампованные уголки.

Для подпитки активной зоны УВР используются профилированные по топливу ТВС, содержащие твэлы разного обогащения. В одной ТВС возможно применение твэлов с двумя или тремя значениями обогащений топлива. Твэлы с пониженным обогащением размещаются обычно в углах ТВС, на местах, закрытых уголками жесткости, и в центральной области ТВС, где находятся направляющие каналы.

В качестве выгорающего поглотителя в кассете УВР используется гадолиний, интегрированный в таблетки топлива (твэлы с гадолиниевым выгорающим поглотителем – твэги). В кассете УВР может быть использовано от 12 до 24 твэгов, размещаемых обычно равномерно по сечению ТВС либо в центральной области вблизи трубок НК. Обогащение топлива в твэгах ниже на ~ 20 % по сравнению с обогащением топлива в твэлах ввиду пониженного значения коэффициента теплопроводности. Плотность естественного гадолиния в твэгах составляет 0,3–0,6 г/см<sup>3</sup>. С целью выравнивания высотного энергораспределения (в первую очередь в «свежей» активной зоне первой загрузки) распределение гадолиния по высоте твэгов профилируется – гадолиний удален из торцовых частей твэгов (так называемые обрезы).

В конструкции постоянного действующего силового каркаса ТВС предусмотрены следующие меры, исключаящие или сводящие к минимуму изгиб каркаса и ТВС в целом:

- уголки каркаса изготовлены из радиационно-стойкого сплава Э635, что позволяет снизить их разновысотность, вызываемую радиационным ростом;
- между ячейками ДР и НК обеспечен радиальный зазор;
- обод ДР выполнен таким образом, что в случае неравномерного роста уголков и перекоса ДР может играть роль компенсатора деформации;
- ячейки ДР оптимизированы по усилиям натяга и обеспечивают проектные усилия протаскивания твэлов в случае перекоса ДР при разновеликом росте уголков.

Кроме того, направляющие каналы ТВС благодаря их закреплению в головке через систему втулок и индивидуальных прижимных пружин и наличию радиального зазора между НК и ячейками ДР имеют возможность расширяться при терморadiационном росте независимо друг от друга.

Функциональная роль основных элементов ТВС:

- каркас, образованный уголками, соединенными с ДР и хвостовиком, имеет вполне определенную жесткость, не изменяющуюся при эксплуатации, и обеспечивает несущую способность и минимальное формоизменение на весь срок службы;
- НК не участвуют в жесткости каркаса и выполняют роль элемента, обеспечивающего надежную работу ОР СУЗ;
- твэлы максимально прослаблены в ДР с целью снижения их влияния на каркас.

Опыт эксплуатации российских бесчехловых ТВС типа ВВЭР-1000 и зарубежных ТВС типа PWR показал, что при применении в качестве материала направляющих каналов циркониевых сплавов и повышении выгорания топлива (переход на более экономичные топливные циклы) отмечены нарушения в работе ОР СУЗ (застывание или увеличение времени падения), связанные с изгибом ТВС. Изгиб ТВС приводит также к появлению непроектных увеличенных зазоров между ТВС, что обуславливает ограничение максимально допустимой мощности станции.

Основными направлениями борьбы с непроектными изгибами ТВС в реакторах PWR были выбраны:

- повышение жесткости НК за счет увеличения толщины стенки трубы;
- создание жесткого каркаса за счет крепления ДР к НК механическим способом или сваркой;
- применение ДР с пружинными элементами, в которых реализуются минимальные усилия взаимодействия в паре «твэл–ячейка ДР».

Тепловыделяющая сборка, примененная в реакторе УВР, обладает следующими достоинствами:

- в конструкции ТВС используется каркас (уголки + ДР), обеспечивающий постоянную жесткость ТВС в течение всего срока службы;
- уголки выполнены из отечественного циркониевого сплава Э635, обладающего минимальным радиационным ростом;
- НК имеют возможность независимого свободного расширения и роста;
- усилия взаимодействия в паре «твэл–ячейка ДР» сведены к минимуму за счет оптимизации геометрии ячеек ДР;
- наличие уголков улучшает условия загрузки и выгрузки ТВС (уголки выполняют роль своеобразных полозьев, по которым скользят соседние ТВС).

Как следует из изложенного выше, ТВС для реактора УВР обладает конструктивными преимуществами перед ТВС-аналогами с точки зрения обеспечения геометрической стабильности в составе активной зоны.

**ТВС с твэлами уменьшенного диаметра.** Результаты выполненных технико-экономических оценок показали, что основными тенденциями, обеспечивающими достижение экономического эффекта (по топливной составляющей и себестоимости энергии), является максимальное увеличение глубины выгорания топлива (до 60 МВт·сут/кг) с одновременным увеличением кампании топлива (до шести лет), а также использование режима перегрузок через 1,5–2 года. Последнее условие логично сочетается со снижением удельной энергонапряженности активной зоны УВР (на 20 % по сравнению с принятой в ВВЭР-1000). Кроме того, снижение энергонапряженности обеспечивает улучшение условий работы твэлов, способствующее достижению глубины выгорания 60 МВт·сут/кг.

Снижение удельной энергонапряженности активной зоны означает соответствующее снижение линейной нагрузки твэлов, что благоприятно с точки зрения снижения максимальных температур твэлов в МПА и сокращения количества разгерметизированных твэлов, а также создания условий для успешной эксплуатации активной зоны в маневренных режимах. Снижение линейной нагрузки приводит к уменьшению температуры топлива при нормальной работе, что уменьшает величину мощностного эффекта и позволяет несколько увеличить длительность работы топливной загрузки.

Наиболее радикальным средством снижения линейной нагрузки и достижения отмеченных положительных качеств является использование твэлов уменьшенного диаметра.

Учитывая снижение энергонапряженности активной зоны УВР в целом, достаточным является первый шаг по снижению диаметра твэлов до 8,3 мм. В этом случае линейная нагрузка оказывается сниженной в 1,5 раза по сравнению с ВВЭР-1000 и в 1,2 раза по сравнению с вариантом ТВС, использующим твэлы диаметром 9,1 мм в активной зоне УВР-1500.

Данная ТВС имеет размер «под ключ» 234 мм, при этом проходное сечение по теплоносителю и водо-урановое отношение практически одинаковы с соответствующими значениями для ТВС с твэлами диаметром 9,1 мм. ТВС с твэлами диаметром 8,3 мм содержит 397 точек, в том числе 372 твэла, 24 пэла и центральную трубку под зонд ВРК. Направляющий канал под пэл ориентировочно имеет диаметр 11,7 мм, наружный диаметр пэлов ~7,3 мм. Размещаются пэлы преимущественно в центральной части ТВС, аналогично существующей ТВС ВВЭР-1000, и поэтому сохранен размер трубы БЗТ, однако направляющие пэлов в БЗТ не могут быть сохранены. С целью решения задачи взаимозаменяемости ТВС с твэлами диаметром 9,1 мм на ТВС с твэлами уменьшенного диаметра прорабатывается возможность замены направляющих устройств в БЗТ.

В качестве полностью взаимозаменяемой ТВС с твэлами уменьшенного диаметра, пригодной для использования как в активной зоне реактора УВР-1500, так и в реакторе ВВЭР-1000, рассматривается вариант ТВС с твэлами диаметром 7,1 мм. Для нее характерны фигурные (ромбические) НК для пэлов и несколько эксцентричное размещение пэлов в НК. В данном варианте чрезмерно увеличено количество твэлов и снижена средняя линейная нагрузка до уровня 89 Вт/см (в 1,9 раза по сравнению с ВВЭР-1000).

**Тепловыделяющий элемент.** В составе ТВС для предлагаемого варианта активной зоны УВР-1500 используются гладкостержневые цилиндрические твэлы диаметром 6,1 мм с топливной композицией на основе двуокиси урана. Основные технические характеристики активной зоны указаны в табл. 2.3.

Таблица 2.3

**Основные технические характеристики активной зоны**

Технические характеристики	Значение
Номинальная тепловая мощность, МВт	4200
Средняя температура теплоносителя в активной зоне, °С	312
Сетка размещения ТВС	Гексагональная
Количество ТВС в активной зоне, шт.	253
Высота активной части ТВС, мм	3900
Количество органов СУЗ, шт.	121
Шаг между ТВС, мм	236
Диаметр твэла, мм	6,1
Шаг между твэлами в ТВС, мм	8,5
Топливная композиция	UO <sub>2</sub>
Количество твэлов в ТВС, шт.	648
Количество направляющих каналов в ТВС, шт.	18
Выгорающий поглотитель	Гадолиний в составе таблеток топлива
Средняя энергонапряженность, кВт/л	88,3
Средняя линейная нагрузка твэлов, Вт/см	65,7

В отличие от существующих твэлов реакторов ВВЭР с осевым отверстием, учитывая небольшой размер топливной таблетки и значительное (более чем в 2 раза) снижение линейных тепловых нагрузок, используется топливная таблетка без центрального отверстия. При этом при сохранении проходного сечения по теплоносителю обеспечивается несколько увеличенное и более оптимальное водо-урановое отношение.

Толщина оболочки твэла из циркониевого сплава Э635 составляет 0,48 мм. Диаметр топливной таблетки равен 5,0 мм. При высоте активной части твэла 3900 мм загрузка урана на твэл составляет 795 г. Указанные значения приняты в качестве исходных данных для нейтронно-физических расчетов.

**Выгорающий поглотитель.** В качестве выгорающего поглотителя в ТВС для активной зоны УВР-1500 используется гадолиний, размещенный в топливе. Применение уран-гадолиниевое топлива позволяет уменьшить или полностью ликвидировать недовыгорание поглотителя в конце работы активной зоны между перегрузками и улучшить ситуацию с обеспечением отрицательного коэффициента реактивности по температуре теплоносителя в эксплуатационных режимах, включая режимы на МКУ мощности. Геометрические характеристики твэга совпадают с характеристиками твэла. Весовое содержание гадолиния в твэге составляет 5 % мас., обогащение урана-235 на 20 % меньше, чем обогащение основного массива твэлов в ТВС.

**Тепловыделяющая сборка.** При разработке ТВС для реактора УВР-1500 сохранена концепция ТВС с альтернативным топливом (ТВСА) для реактора ВВЭР-1000.

Тепловыделяющие сборки (кассеты) размещаются в активной зоне с шагом 236 мм. Кассета не имеет чехла. Эффективный размер кассеты «под ключ» равен 231 мм. Шаг расстановки твэлов в ТВС составляет 8,5 мм. Внутри кассеты имеются 648 твэлов, 18 НК для пэлов, ЦТ внутриреакторного контроля, изготовленная из циркониевого сплава. По высоте кассеты в пределах активной зоны расположено 13 ДР из циркониевого сплава. Изгибная жесткость ТВСА обеспечивается шестью штампованными уголками толщиной 0,65 мм из сплава Э635. Размещение НК для пэлов ОР СУЗ в ТВС УВР-1500 такое же, как в штатной ТВС активной зоны ВВЭР-1000. Наружный диаметр НК составляет 13 мм, толщина – 0,6 мм. Один направляющий канал размещается вместо четырех твэлов. С целью обеспечения равномерного расхода теплоносителя по сечению ТВС предусмотрено размещение около НК гладкостержневых вытеснителей или ромбических вытеснителей, охватывающих НК.

Конструктивно проработан вариант ТВС для активной зоны УВР-1500 с гладкостержневым твэлом диаметром 6,6 мм, толщина оболочки из сплава Э635 – 0,48 мм, диаметр топливной таблетки – 5,5 мм. В этом варианте ТВС размещаются в активной зоне также с шагом 236 мм. Шаг по твэлам в ТВС – 9,15 мм. ТВС бесчехловая с размером «под ключ» – 234 мм. В ТВС имеются 498 твэлов, 18 НК для пэлов и ЦТ для размещения датчиков внутриреакторного контроля. НК и ЦТ диаметром 13,0 мм и толщиной стенки 1 мм изготавливаются из сплава Э635. По высоте ТВС расположены 15 ДР из циркониевого сплава, 13 из них – на высоте активной зоны. Изгибная жесткость ТВС обеспечивается каркасом, состоящим из шести штампованных уголков из сплава Э635 толщиной 0,65 мм и приваренных к ним ДР. Один направляющий канал размещается вместо семи твэлов. Вокруг НК расположена труба-вытеснитель

с целью обеспечения равномерного распределения теплоносителя по сечению ТВС. Направляющие каналы в вытеснителях располагаются со смещением относительно оси вытеснителя, что обусловлено сохранением координат расположения НК, как в ТВС ВВЭР-1000. Схема расположения твэлов и НК в ТВС приведена на рис. 2.22.

Выбор предпочтительного размера указанных ранее «мелких» твэлов для ТВС требует тщательной конструкторско-технологической проработки. В данном параграфе рассмотрены характеристики проведено для активной зоны с твэлом диаметром 6,1 мм, обеспечивающим максимальный эффект перехода на «мелкий» твэл.

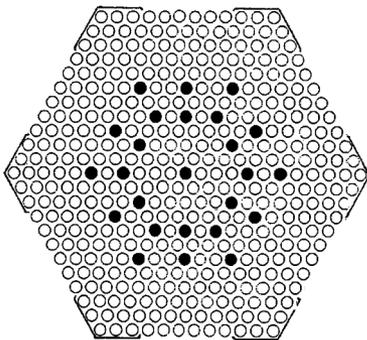


Рис. 2.22. Схема расположения твэлов и НК в ТВС:

○ – твэлы; ● – направляющие каналы для пэлов

## 2.5. Тепловыделяющие сборки ВВЭР-440

Активная зона реактора состоит из 276 рабочих кассет (РК) и 37 кассет АРК, которые могут перемещаться в вертикальном направлении. По периферии активной зоны размещены 36 кассет-экранов.

Кассета АРК является рабочим органом системы управления и защиты реактора и состоит из двух частей: ТВС (топливной части) и надставки, соединенных промежуточной штангой, которая, в свою очередь, сцепляется со штангой привода. Кассета АРК выполняет следующие основные функции:

- обеспечивает быстрое прекращение цепной реакции деления в реакторе путем введения в активную зону поглощающей надставки и одновременным выведением из активной зоны топливной части;
- участвует в автоматическом регулировании в целях поддержания мощности реактора на заданном уровне и перевода его с одного уровня мощности на другой;
- компенсирует быстрые изменения реактивности (температурный, мощностной эффекты, отравление и т.д.).

В активной зоне все кассеты располагаются по треугольной решетке с шагом  $147^{+0,6}_{-0,6}$  мм. Основные технические характеристики РК и кассеты АРК:

- масса урана:  
в РК –  $120,2 \pm 2,5$  кг;  
в ТВС –  $115,2 \pm 2,5$  кг;
- расчетные значения масс:  
общая масса РК – 215 кг;  
общая масса кассеты АРК – 330 кг (в том числе ТВС – 220 кг, надставка – 110 кг);
- общая масса кассеты-экрана – 300 кг.

**Кассета рабочая** (рис. 2.23) состоит из пучка твэлов, головки, хвостовика и чехловой трубы. Твэлы в пучке располагаются по треугольной решетке с шагом  $12,2 \pm 0,15$  мм и объединены между собой ДР «сотового» типа, механически закрепленными на центральной трубе, и нижней опорной решеткой, закрепленной на хвостовике. Верхняя ДР имеет широкий обод, посредством которого верхняя часть пучка центрируется в верхней части чехловой трубы специально для данной цели предназначенными выступами в шестигранной трубе. Это вызвано необходимостью исключить возможную деформацию верхней решетки при неравномерном по пучку

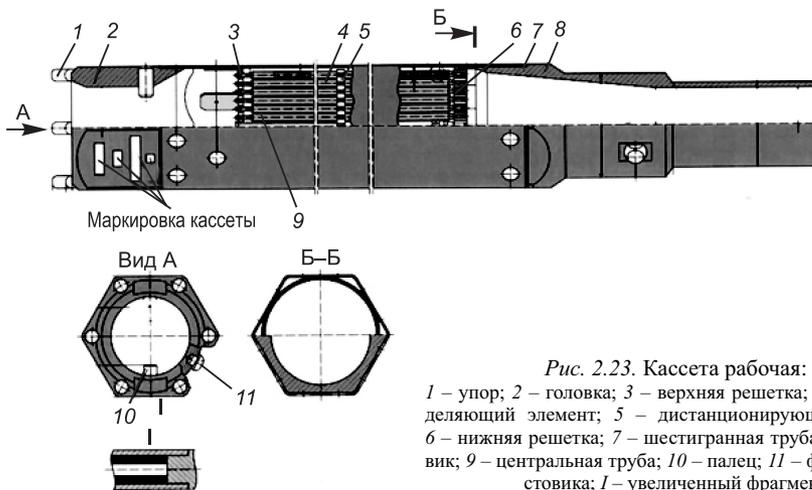


Рис. 2.23. Кассета рабочая:

1 – упор; 2 – головка; 3 – верхняя решетка; 4 – тепловыделяющий элемент; 5 – дистанционирующая решетка; 6 – нижняя решетка; 7 – шестигранная труба; 8 – хвостовик; 9 – центральная труба; 10 – палец; 11 – фиксатор хвостовика; I – увеличенный фрагмент

радиационном росте твэлов. Нижняя опорная решетка приваривается к хвостовику, предназначенному для установки РК в днище корзины реактора.

Головка РК жестко соединена с чехловой трубой по шестигранной поверхности. В головке РК имеются два пальца под транспортный захват перегрузочной машины и шесть подпружиненных упоров, удерживающих рабочую кассету от всплытия и служащих компенсаторами тепловых расширений и технологических допусков внутрикорпусных устройств реактора. К нижнему торцу головки крепится защитная решетка, твэлы закреплены в опорной решетке шплинтующей проволокой. Для компенсации теплового расширения и радиационного роста пучка твэлов относительно опорной решетки конструкцией РК обеспечивается возможность удлинения твэлов не менее чем на 25 мм.

В верхней и нижней частях чехла РК в районе головки и хвостовика имеются отверстия диаметром  $9(+0,36)$  мм (по два на каждой грани), предназначенные для радиальной разгрузки чехловой трубы от перепада давления теплоносителя в случае возникновения максимальной проектной аварии.

В гнездо днища корзины РК устанавливается хвостовиком, опираясь шаровой поверхностью на конусную часть гнезда.

Для ориентации в плане на хвостовике РК имеется фиксирующий палец, а в днище корзины – соответствующий паз.

**Кассета АРК** состоит из надставки (рис. 2.24) и ТВС (рис. 2.25), связанных промежуточной штангой. Надставка представляет собой сварную конструкцию массой 110 кг из нержавеющей стали, внутри которой расположены шестигранные вкладыши из бористой стали.

По своей конструкции ТВС аналогична РК, исключение составляют специальный хвостовик, отсутствие в чехле ТВС перфорации, а в головке ТВС подпружиненных упоров.

Кассета АРК через промежуточную штангу сцепляется и удерживается штангой привода СУЗ. Головка ТВС снабжена захватным устройством байонетного типа с седлом

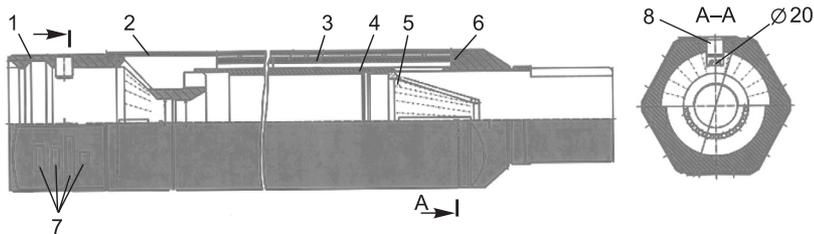


Рис. 2.24. Надставка:

1 – головка надставки; 2 – шестигранная труба; 3 – вкладыш; 4 – центральная труба; 5 – ограничитель; 6 – хвостовик надставки; 7 – маркировка; 8 – палец

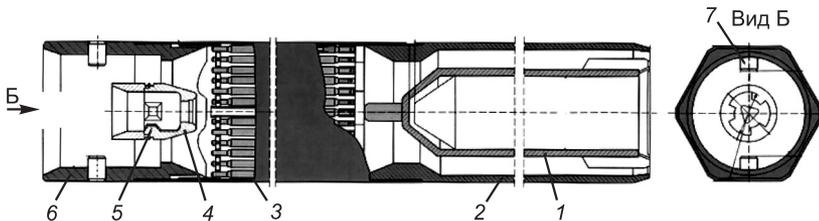


Рис. 2.25. Тепловыделяющая сборка:

1 – втулка демфера; 2 – хвостовик ТВС; 3 – ТВЭЛ; 4 – седло головки; 5 – зуб (развернут условно); 6 – головка; 7 – палец

под треугольный фиксатор, обеспечивающим зацепление с промежуточной штангой. Промежуточная штанга, проходя по центру надставки на всю ее высоту, сцепляется с захватным байонетным устройством, расположенным в головке ТВС, при этом фиксирующий треугольный стержень промежуточной штанги входит в седло головки ТВС, исключая тем самым поворот и последующее расцепление ТВС с промежуточной штангой.

В хвостовике ТВС размещается демпфирующее устройство (стакан), которое обеспечивает демпфирование кассеты АРК при ее движении (падении) самоходом, связанным с обрывом промежуточной штанги. Принцип демпфирования заключается в дросселировании теплоносителя (воды) через зазоры, образующиеся между стержнем, расположенным в днище шахты реактора, и стаканом хвостовика ТВС в момент падения кассеты АРК и посадки стакана на стержень.

Кроме того, дросселирование воды происходит еще через два отверстия диаметром 3 мм, расположенных в днище стакана хвостовика ТВС.

Система управления органами СУЗ является системой нормальной эксплуатации и системой безопасности и предназначена для управления реактором при его пуске, работе на мощности и останове, а также для аварийной остановки реактора.

Управление и защита реактора осуществляются воздействием на реактивность перемещением кассет АРК с помощью механических органов регулирования.

Перемещение кассет АРК производится автоматически группами в требуемой последовательности либо вручную индивидуально или группами. Положение кассет АРК в активной зоне контролируется с помощью датчиков, входящих в конструкцию привода.

**Кассеты экранные (КЭ)** предназначены для ослабления нейтронного потока на корпус реактора ВВЭР-440, устанавливаются по периферии активной зоны, представляет собой сборку, состоящую из пучка, чехла, головки и хвостовика.

Пучок имеет семь стержней диаметром 48 мм, закрепленных в нижней и верхней опорных плитах. Нижняя опорная плита приваривается к хвостовику КЭ, верхняя – к головке.

Конструкции головки и хвостовика КЭ идентичны конструкциям головки и хвостовика РК. В гнездо днища корзины КЭ устанавливается хвостовиком, опираясь шаровой поверхностью на конусную часть гнезда. В процессе работы реактора КЭ неподвижна. Металл чехла, стержней пучка совместно с теплоносителем обеспечивает ослабление нейтронного потока на корпус реактора. Перегрев КЭ предотвращается путем организации в ней потока теплоносителя через отверстие в заглушке хвостовика и через перфорацию в нижней и верхней опорных плитах.

Срок службы КЭ составляет девять лет. Опыт эксплуатации показывает возможность продления срока эксплуатации КЭ. Материал деталей КЭ – коррозионно-стойкая сталь.

**Твэл.** Конструкции твэлов кассеты РК и ТВС (рис. 2.26, а, б) представляют собой цилиндрическую оболочку, заглушенную с торцов заглушками с помощью контактно-стыковой сварки.

Внутри оболочки находится столб топлива, собираемый из таблеток из диоксида урана и закрепленный от перемещения при транспортировке фиксатором. Используется фиксатор пружинного типа из железохромоникелевого сплава ЭК 173-ИД (ХН40М5Т2ГЮБР-ИД), верхняя часть которого зафиксирована за счет трения фиксатора с внутренней поверхностью оболочки твэла.

По своей конструкции твэл ТВС аналогичен твэлу РК и отличается от него тем, что для компенсации всплесков нейтронного поля над столбом топлива помещен столбик из хромоникелевой нержавеющей стали аустенитного класса 08Х18Н10Т. Конструкция твэла двухшовной герметизации с помощью контактно-стыковой сварки позволяет производить его сборку, снаряжение топливом и контроль на полностью автоматизированной линии.

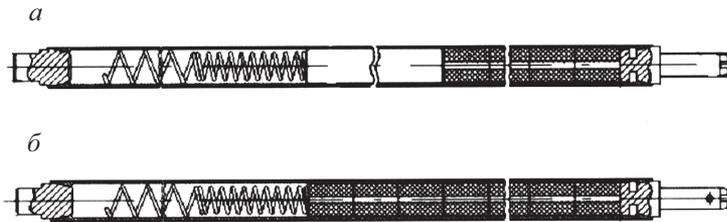


Рис. 2.26. Конструкции твэлов:  
а – для кассеты АРК; б – для кассеты РК

Для снижения температуры топлива и улучшения теплопроводности газового зазора между топливной таблеткой и внутренней поверхностью оболочки внутритвэльная полость заполнена гелием давлением 0,5–0,7 МПа.

Для компенсации газообразных продуктов деления, выделяющихся в процессе эксплуатации твэла на мощности, в конструкции твэла предусмотрен компенсационный объем, расположенный в верхней части твэла и представляющий свободный объем между нижним торцом верхней заглушки и верхним торцом топливного столба в РК и верхним торцом столбика в твэлах кассет АРК.

Маркировка твэлов производится на цилиндрической части их нижней заглушки. Основные технические характеристики твэлов приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

**Основные технические характеристики твэлов**

Технические характеристики	Значение
Наружный диаметр оболочки твэла, мм	9,1 <sup>+0,10</sup> <sub>-0,05</sub>
Внутренний диаметр оболочки твэла, мм	7,73 (+0,06) <sup>1</sup>
Габаритная длина твэла для исполнения с КСС <sup>2</sup> , мм	2536 (±3,5)
Высота топливного сердечника, мм: твэл РК твэл кассеты АРК	2420 (±10) 2320 (±10)
Номинальная масса двуоксида урана в твэле, г: твэл РК твэл кассеты АРК	1087 1041
Длина свободного объема твэла, мм: твэл РК твэл кассеты АРК	75–90 75–90
Массовая доля <sup>235</sup> U в уране, %: твэлы РК твэлы ТВС	1,6; 2,4; 3,6 1,6; 2,4; 3,6
Диаметральный зазор между топливом и оболочкой, мм	0,16–0,25 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Допускается устанавливать твэлы с внутренним диаметром оболочки 7,72(+0,08) мм и диаметральный зазор между топливом и оболочкой 0,12–0,27 мм.

<sup>2</sup> В районе КСС наружный диаметр твэла – 9,1<sup>+0,10</sup><sub>-0,05</sub> мм.

Материал деталей, комплектующих твэлы (за исключением фиксатора и столбика), – циркониевый сплав (Zr + 1 % Nb).

**Топливная таблетка.** Топливные таблетки из спеченной двуокиси урана формируют топливный сердечник твэла.

Основные параметры таблетки:

- наружный диаметр –  $7,60 \pm 0,07$  мм;
- диаметр центрального отверстия – 1,2 мм;
- высота – 8–14 мм;
- плотность –  $10,4 \pm 1,72$  г/см<sup>3</sup>;
- шероховатость поверхности – 3,2 мкм;
- высота торцовых фасок и угол фаски относительно плоскости торца таблетки –  $(0,2-0,5) \text{ мм} \times (25 \pm 5)^\circ$ .

**Дистанционирующие решетки.** Все решетки в конструкции кассет активной зоны можно разделить на три типа: опорные, дистанционирующие и защитные.

**Опорная решетка** с помощью установочных уголков приваривается к хвостовику кассеты и служит для восприятия массы пучка твэлов и закрепления твэлов от их возможного перемещения. Кроме того, опорная решетка имеет необходимое количество проходных отверстий (перфорацию) для потока теплоносителя, поступающего через хвостовик кассеты в пучок. Материал опорной решетки – хромоникелевая нержавеющая сталь.

**Дистанционирующие решетки** служат для сборки твэлов в пучок и дистанционирования твэлов в кассете. В конструкции кассет предусмотрено одиннадцать ДР, включая верхнюю. Конструкции дистанционирующей решетки представляют собой массив из 126 соединенных точечной сваркой тонкостенных ячеек специального профиля, заключенных в обод.

Верхняя решетка РК и ТВС имеет обод толщиной 0,8 мм. С его помощью происходит дистанционирование верхней части пучка твэлов относительно выступов чехловой трубы. Дистанционирующие решетки РК имеют обод толщиной 0,5 мм с выступами (пуклевками) высотой 0,4 мм, а промежуточные решетки кассет ТВС имеют обод толщиной 0,3 мм.

Для изготовления ячеек дистанционирующих решеток РК и ТВС применяют трубы Ду12,3×0,25 из циркониевого сплава Э110.

**Защитная решетка** располагается на головке кассеты и крепится к ней с помощью сварки. Функционально данная решетка предназначена для выравнивания профиля скоростей потока теплоносителя на выходе из кассеты, а также для предотвращения выноса осколков (частей твэлов) в первый контур реакторной установки в случае возможной фрагментации твэлов в аварийной ситуации.

В конструкциях РК и ТВС предусмотрена одинаковая защитная решетка из нержавеющей стали. Вписанный диаметр ячейки составляет  $8,95^{+0,13}$  мм. Расположение ячеек в ДР треугольное с шагом  $12,2 \pm 0,15$  мм. В каждой ячейке имеются три выступа, обеспечивающие фиксацию твэла.

В центре ДР сваркой закреплена центральная втулка, с помощью которой решетка крепится на ЦТ пучка, выполненной из сплава Э110 с наружным диаметром 10,3 мм и внутренним диаметром 8,8 мм.

Все ячейки по сопряженным граням соединены друг с другом и с втулкой точечной сваркой.

На активной длине кассеты расположено 10 ДР с шагом 240 мм.

Конструкция и технология изготовления ячеистых ДР обеспечивают необходимый ресурс упругости по фиксации твэлов в пучке в течение проектного времени эксплуатации кассет в реакторе.

Дистанционирующие решетки из циркониевого сплава (ЦДР) прошли всестороннее обоснование:

- расчетное и экспериментальное определение упруго-пластических характеристик конструкции и отработку технологии изготовления;
- исследование коррозионных свойств;
- исследование поведения ЦДР в условиях аварий с потерей теплоносителя;
- испытания на образцах изнашиваемости при фреттинг-коррозии;
- ресурсные испытания кассет с ЦДР на стенде;
- эксплуатацию в реакторе опытных партий кассет;
- послереакторные исследования одной кассеты после трех лет эксплуатации и одной – после четырех лет эксплуатации.

Результаты послереакторных исследований показали, что дистанционирующие решетки сохранили свойства для выполнения функционального назначения. Усилие извлечения твэлов из пучка составило 50–230 Н, механические повреждения отсутствовали, замерена жесткость ЦДР, отрыв угловых ячеек происходил по основному металлу.

**Чехловые трубы РК и ТВС.** Толщина листа, идущего на изготовление чехловых труб кассет, составляет: для РК –  $1,5(+0,15)$  мм; для ТВС –  $2^{+0,15}_{-0,05}$  мм.

Чехловая защитная труба РК представляет собой шестигранную трубу толщиной 1,4–1,65 мм, длиной  $2725 \pm 0,5$  мм и размером «под ключ»  $145_{-0,7}$  мм. На концах трубы находятся отверстия (по одному на каждой грани), предназначенные для крепления трубы к головке и хвостовику РК, и отверстия (по два на каждой грани) диаметром 9 мм для разгрузки трубы при возникновении на ней перепадов давления в случае аварий. Функциональное назначение чехловой трубы – создание силового каркаса, защита пучка твэлов от механических воздействий и организация потока теплоносителя. Чехловая труба ТВС по конструкции аналогична чехловой трубе РК, за исключением следующих отличий:

- размер «под ключ» составляет  $144,2^{+1,3}_{-0,5}$  мм;
- толщина – 1,85–2,15 мм;
- отсутствуют отверстия диаметром 9 мм;
- на концах трубы находятся по два отверстия на каждой грани, предназначенные для крепления к головке и хвостовику.

Материал чехловых труб – циркониевый сплав Э125 (Zr + 2,5 % Nb).

**Надставка** (см. рис. 2.24) является частью кассеты АРК и состоит из следующих основных частей: головки, чехловой трубы, 22 вкладышей, центральной трубы и хвостовика.

Головка надставки предназначена для размещения в ней транспортных пальцев, а также для закрепления верхнего торца кожуховой трубы.

Чехловая труба предназначена для формирования жесткого силового каркаса надставки и размещения в ней вкладышей. Кожуховая труба с помощью контактной электросварки (две точки на каждой грани) соединяется с головкой и хвостовиком надставки.

Вкладыш изготовлен из боросодержащей стали и используется для поглощения нейтронов.

Центральная труба предназначена для формирования внутренней проточной части и необходимых поглощающих свойств надставки.

Хвостовик надставки предназначен для закрепления нижней части кожуховой трубы и формирования посадочной цилиндрической поверхности, по наружному диаметру которой хвостовик надставки соединяется с головкой ТВС кассеты АРК. На

цилиндрической поверхности хвостовика имеются два вертикальных паза, в которые (при сборке надставки с ТВС) входят пальцы головки ТВС, фиксирующие надставку от поворота в плане в головке ТВС.

**Вкладыш** представляет собой шестигранную трубу толщиной 7,1 мм, высотой 102 мм и размером «под ключ» 137 мм. На наружной поверхности каждой грани расположены четыре сферических выступа высотой 2,5 мм и радиусом сферы 8 мм. При снаряжении надставки вкладышами с помощью данных выступов происходит центрирование вкладышей внутри кожуховой трубы.

Материал вкладышей – хромоникелевая нержавеющая сталь с добавками естественного бора 1,6–2,0 % мас. Маркируется вкладыш электрографическим способом на торцевой поверхности.

## 2.6. Тепловыделяющая сборка ВВЭР-300

В составе активной зоны используется каркасная конструкция бесчелюстных ТВС типа ТВСА, разработанная ОКБМ и положительно зарекомендовавшая себя в процессе четырехгодичной эксплуатации в составе активной зоны реактора ВВЭР-1000 первого блока Калининской АЭС. Данная конструкция обеспечивает геометрическую стабильность ТВС и соответственно стабильность нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны, а также исключает заклинивание поглощающих элементов рабочих органов СУЗ в направляющих, что позволяет обеспечить надежность и безопасность активной зоны в процессе эксплуатации.

Тепловыделяющая сборка шестигранного профиля (рис. 2.27) с высотой 3740 мм и размером «под ключ» по уголкам из циркониевого сплава 234 мм состоит из следующих элементов:

- силового каркаса с входящими в него ДР и уголками;
- твэлов, твэгов, центрального вытеснителя круглого профиля и 18 НК для стержней пэлов;
- 18 стержней пэлов, объединенных в один кластер;
- концевых деталей – головки и хвостовика.

Силовой каркас, обеспечивающий жесткость и прочность конструкции, образует 11 ДР из сплава Э110 и шести уголков из сплава Э635, сваренных контактной точечной сваркой.

Уголки каркаса крепятся к хвостовику из нержавеющей стали.

Силовыми элементами, соединяющими головку и хвостовик ТВС и воспринимающими нагрузки при транспортно-технологических операциях (опускание-извлечение из реактора), служат 18 НК из сплава Э635. Центральная труба и 18 НК для поглощающих элементов крепятся к нижней несущей решетке, приваренной к хвостовику.

Силовой каркас воспринимает нагрузки от внутренних сил, вызываемых трением твэлов в ячейках ДР при терморадационном росте, и изгибающих моментов направляющих каналов, возникающих под воздействием усилий от прижимных пружин.

В ТВС применен гладкостержневой твэл, разработанный на основе серийного твэла активной зоны реакторной установки ВВЭР-1000. Твэлы в ТВС размещены с шагом правильной треугольной решетки 12,75 мм. Стабильность шага расположения твэлов обеспечивается конструкцией ДР. Твэл представляет собой гладкостержневую оболочку диаметром 9,1 мм и толщиной 0,68 мм из циркониевого сплава, заполненную топливом. В качестве топлива используются таблетки диоксида урана с плотностью 10,4–10,7 г/см<sup>3</sup>, наружным диаметром 7,57 мм с центральным отверстием диаметром 1,2 мм. Высота топливного столба – 2700 мм.

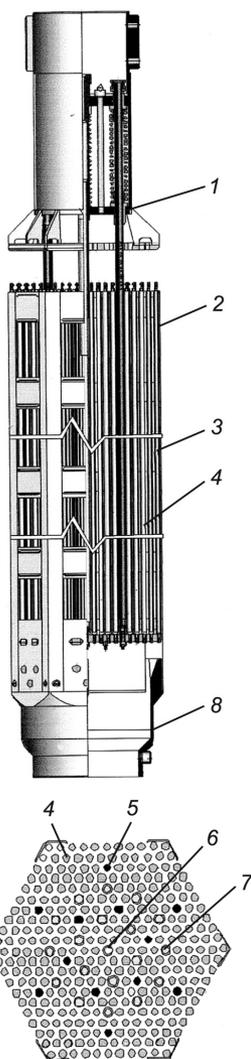


Рис. 2.27. Тепловыделяющая сборка:

1 – головка; 2 – уголок; 3 – дистанционирующая решетка; 4 – твэл; 5 – твэг; 6 – центральная труба; 7 – направляющая пэл; 8 – хвостовик

Твэги представляют собой гладкостержневые оболочки диаметром 9,1 мм и толщиной 0,68 мм из циркониевого сплава, заполненные гадолиниевым поглотителем в таблетках двуокиси урана. В твэгах максимальная массовая доля оксида гадолиния составляет 5 %.

Поглощаемый элемент представляет собой оболочку с наружным диаметром 8,2 мм и толщиной стенки 0,5 мм из хромоникелевого сплава, заполненную порошком из карбида бора.

Оболочки твэлов, твэгов и поглощающих элементов герметизируются заглушками с помощью сварки.

Поглощающие элементы перемещаются в направляющих трубах диаметром 12,6 мм и толщиной стенки 0,6 мм из циркониевого сплава. Поглощающие элементы каждой ТВС объединяются в кластере. Кластеры всех ТВС имеют индивидуальные приводы.

Основные технические характеристики ТВС приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Основные технические характеристики ТВС

Технические характеристики	Значение
Длина ТВС, мм	3740
Высота топливного столба, мм	2900
Количество твэлов, твэгов, шт.	311
Сетка расположения твэлов, твэгов	Равномерно треугольная
Шаг между твэлами, твэгами, мм	12,75
Наружный диаметр твэлов, твэгов, мм	9,1
Количество дистанционирующих решеток, шт.	11
Максимальный размер «под ключ» по уголкам, мм	234,8
Количество направляющих каналов, шт.	18
Количество прижимных пружин, шт.	18
Масса ТВС, кг	590

Пучок твэлов набран из 311 твэлов. Их дистанционирование осуществляется дистанционирующими решетками «сотового» типа из сплава Э110, конструктивно аналогичных дистанционирующим решеткам ТВСА ВВЭР-1000.

Хвостовик ТВС имеет шаровую поверхность, которой он устанавливается на конусную поверхность нижней плиты внутрикорпусной шахты. Для ориентации ТВС в плане на хвостовике имеется фиксирующий штырь.

Головка ТВС содержит блок из 19 пружин, 18 из которых через направляющие каналы прижимают ТВС к опорным стаканам шахты реактора, удерживая ТВС от всплытия в процессе работы. Центральная пружина и 15 прижимных пружин

поддерживают центральный шток головки, демпфируя рабочий орган СУЗ при аварийном сбросе, а три пружины удерживают головку ТВС в зацеплении с нижней плитой блока защитных труб.

Для транспортировки ТВС и исключения углового рассогласования между направляющими каналами и каналами блока защитных труб на головке ТВС имеются две шпонки.

## 2.7. Твэлы и ТВС реакторов PWR

Изучение зарубежного опыта эксплуатации твэлов PWR показывает, что количество разрушений твэлов в реакторах PWR примерно соответствует количеству разрушений в BWR. В отдельных реакторах количество дефектных твэлов достигало 1 %, что, как показали исследования, объясняется:

- недостатками в технологии изготовления ТВС и их компонентов;
- удлинением твэлов;
- гидрированием оболочек при наличии в топливе влаги в количествах, превышающих допустимые;
- уплотнением топлива;
- прогибом твэлов.

Были изучены и исключены следующие повреждения твэлов: гидрирование оболочек, которое практически полностью устранено вследствие введения жестких требований к содержанию влаги в таблетках; деформация оболочек из-за уплотнения топлива и изменения его геометрии под облучением. Причину деформации оболочек удалось ликвидировать улучшением герметизации твэлов, заполнением твэлов инертным газом под давлением и введением новых спецификаций (технических условий) на топливо, включающих требования к его плотности, микроструктуре, размерам и распределению пор в таблетках.

Деформация твэлов между решетками хотя и не была ликвидирована полностью, но уменьшилась после добавления восьмой дистанционирующей решетки в ТВС. После устранения указанных причин число дефектных твэлов сократилось до 0,2 %.

С учетом имеющегося более чем 15-летнего опыта разработана новая стандартная конструкция ТВС для реакторов PWR с решеткой 17×17 (вместо 15×15), основой для разработки которой, как и в случае разработки ТВС BWR-6, послужила необходимость повышения надежности (рис. 2.28, 2.29). Максимальная температура

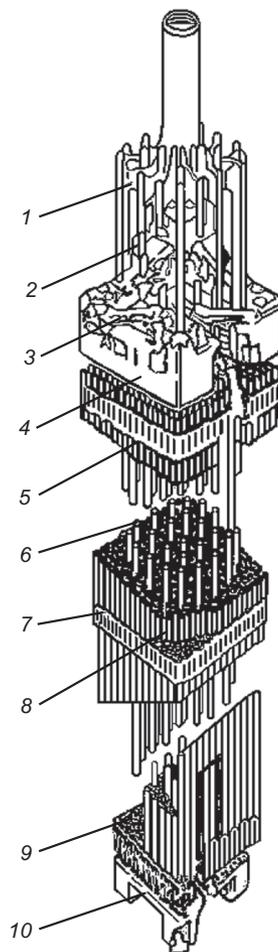


Рис. 2.28. Новая топливная сборка (17×17) PWR фирмы «Фраматом»:  
 1 – крестовина; 2 – регулирующий стержень;  
 3 – захватная пружина; 4 – верхняя плита;  
 5 – верхняя решетка; 6 – направляющий канал;  
 7 – направляющая решетка; 8 – твэл; 9 – нижняя решетка; 10 – нижняя плита

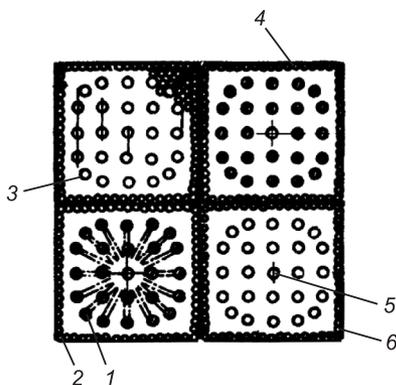


Рис. 2.29. Поперечное сечение ТВС (17×17):  
 1 – регулирующий стержень; 2 – твэлы; 3 – направляющая труба; 4 – ТВС с регулирующими стержнями; 5 – центральный приборный канал; 6 – ТВС без регулирующих элементов

оболочек твэлов понизилась. Новые ТВС вполне соответствовали критериям КАЭ для системы аварийного охлаждения активной зоны, согласно которым максимальная температура оболочек твэлов в случае аварии с потерей теплоносителя не должна превышать 1204 °С. Основным типом твэлов реакторов PWR, так же как и для BWR, является стержневой твэл с оболочкой из циркалоя и топливом в виде таблеток из обогащенной  $UO_2$ . Общая длина твэлов в новой конструкции ТВС увеличилась приблизительно на 30 %, линейная мощность их снизилась, однако общее тепловыделение отдельной ТВС не уменьшилось, и мощность реактора не стала меньше. ТВС новой конструкции прошла всесторонние исследования. Сейчас четыре ТВС облучаются в реакторах АЭС «Сарри-1» и «Сарри-2»; предполагается

облучать промышленные ТВС на АЭС «Фессенгейм». Стандартные ТВС новой конструкции, как полагают, будут использоваться во всех реакторах PWR. Сравнительные технические характеристики активных зон реакторов PWR представлены в табл. 2.6.

В настоящее время количество дефектных твэлов в реакторах PWR, как и в BWR, составляет 0,03 %. Применяемые разными изготовителями конструкции дистанционирующих решеток и материалы, используемые для них, различны. Их характерной особенностью является то, что проволочные и жесткие паяные решетки, подобные используемым в реакторе АЭС «Янки Роу», заменены решетками вида «упаковка для яиц», в которых каждый твэл фиксируется поперечной пружиной. Пружины зажимают твэлы, препятствуя их вибрации, однако не мешают осевому перемещению оболочки при ее удлинении под воздействием температур. Американская фирма Combustion Engineering, Inc. предлагает потребителям ТВС в качестве конструкционного материала использовать только сплавы типа циркалоя, что обеспечивает уменьшение потерь нейтронов в активной зоне и позволяет уменьшить расход урана и понизить его обогащение.

В некоторых реакторах за отдельные периоды их работы число разрушенных твэлов значительно превышало это значение. Исследования, проведенные фирмой Atomic Energy of Canada Ltd., позволили установить, что разрушения были обусловлены:

- механическими повреждениями от неправильной установки твэлов;
- недостатками в технологии изготовления твэлов и отдельных компонентов;
- усталостными разрушениями оболочки;
- коррозией внутренней части оболочки (под воздействием продуктов деления);
- расплавлением топлива внутри топливного сердечника;
- образованием пор в оболочках из циркониевых сплавов;
- гидрированием оболочек при наличии в топливе влаги в количестве, превышающем допустимое (дефекты типа sunburst);
- коррозией под напряжением при увеличении мощности реактора;
- охрупчиванием оболочки и местными разрушениями вследствие уменьшения удлинения (в местах концентрации напряжений и деформаций).

По мнению канадских специалистов, после внесения ряда конструкционных и технологических изменений (устранение технологических ошибок, изменение схемы перегрузок, введение ограничений на скорость увеличения мощности и др.) количество дефектных твэлов может уменьшиться до 0,001 %. Эти работы уже проводятся.

**Сравнительные характеристики активных зон и конструктивных параметров  
ТВС реакторов различных типов**

Показатели	BWR-5 <sup>1</sup>	BWR-6 <sup>2</sup>	PWR	PWR <sup>2,3</sup>	CANDU <sup>4</sup>	CANDU <sup>2,5</sup>
Мощность тепловая, МВт	3293	3833	3250	3423	1744	2855
Давление теплоносителя, МПа	7,2	7,5	15,8	15,8	8,85	8,73
Температура теплоносителя на выходе, °С	275	283	317	325	293,3	304
Максимальная температура, °С: топлива оболочки	2419 365	1830 293	2260 347	1871 347	2000 304	2000 327
Линейное тепловыделение, Вт/см: максимальное (проектное) среднее	607 –	440 198	515 231	441 178	528	509 135
Средняя энергонапряженность активной зоны, кВт/л	51	56	99	104	92	109
Выгорание, МВт·сут/кг U: проектное максимальное (местное)	19	28 ~ 45	21,8	33 ~ 47	9,6	9,7
Количество ТВС в активной зоне, шт.	764	800	193	193	4680	6240
Расположение твэлов в решетке	7×7	8×8	15×15	17×17	–	–
Твэл, мм: эффективная длина диаметр	3657,6 14	3759,2 12,2	3657 11,0	3658 9,5	484 15,19	484 13,08
Оболочка твэла, мм: толщина материал	0,95 Циркалой-2	0,81 Циркалой-2	0,61 Циркалой-4	0,57 Циркалой-4	0,38 Циркалой-4	0,38 Циркалой-4
Топливо	UO <sub>2</sub>					
Содержание <sup>235</sup> U, %	2,2	2,66	3,2	2,1–3,1	0,7	0,7
Теплоноситель	Вода			Тяжелая вода		

<sup>1</sup> BWR-5 – реактор АЭС «Браунз-Ферри-1».

<sup>2</sup> BWR-6 – стандартная конструкция.

<sup>3</sup> PWR – новая конструкция ТВС с пучком поглощающих стержней.

<sup>4</sup> CANDU – реактор АЭС «Пикеринг-3» и «Пикеринг-4».

<sup>5</sup> CANDU – реактор АЭС «Брюс-3» и «Брюс-4».

Последняя стандартная конструкция ТВС реактора АЭС «Брюс» с 37 твэлами в решетке рассчитана на применение в реакторах электрической мощности 600 МВт. ТВС канадских реакторов имеют в основном аналогичную конструкцию и отличаются лишь количеством и расположением твэлов в решетке. Дистанционирование твэлов в ранних конструкциях ТВС тяжеловодных реакторов осуществлялось с помощью дистанционирующей проволоки, которой твэлы обертывали по спирали. Поскольку проволоочная навивка может стать причиной фреттинг-коррозии, для ее предупреждения стали использовать дистанционные ребра, приваренные к оболочке твэлов, а также решетки.

## 2.8. Материалы оболочек твэлов

### Цирконий и его сплавы

**Физические свойства.** Из материалов с малым сечением захвата в области температур до 350 °С широкое применение получили сплавы циркония. Физические (табл. 2.7) и коррозионные характеристики делают сплавы циркония весьма перспективными для изготовления оболочек твэлов. В реакторах канального типа сплавы циркония незаменимы для изготовления канальных труб. Применение каналов из сплавов циркония существенно снижает поглощение нейтронов по сравнению с каналами из аустенитных нержавеющих сталей.

Таблица 2.7

Физические свойства циркония

Характеристика	Значение
Атомный номер	40
Атомный вес	91,22
Сечение поглощения тепловых нейтронов, барн	0,18
Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	6,5
Температура плавления, °С	1845
Температура кипения, °С	3600–3700
Коэффициент линейного расширения, °С <sup>-1</sup>	$5,8 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	23,4
Кристаллическая структура	$\alpha$ -фаза. Гексагональная плотно упакованная до 862 °С $S$ -фаза. Объемно центрированная кубическая выше 862 °С
Параметры кристаллической решетки	$\alpha$ -фаза

Сплав Zr – 1 % Nb используется также для оболочек твэлов в реакторах с водой под давлением. Максимальная температура 300–350 °С, при которой сплавы циркония могут применяться в водоохлаждаемых реакторах, определяется их коррозионной стойкостью.

Металлический цирконий получается в основном иодидным и магнетермическим методами. В первом случае образуется более чистый металл.

**Механические характеристики.** Чистый цирконий имеет небольшую прочность (табл. 2.8) и высокую коррозионную стойкость. Загрязнение циркония, особенно азотом, снижает стойкость металла. Для нивелирования вредного действия азота цирконий легируют оловом. Из этих же соображений легируют оловом и сплав оженнит, который содержит по 0,1–0,3 % Sn, Nb, Fe и Ni. Повышение прочностных характеристик циркония достигается легированием его Nb, Fe, Ni, Cr и др. Сплавы, легированные 2,5 % Nb, и сплавы типа циркаллоу-2 (1,2–1,7 % Sn, 0,07–0,2 % Fe, 0,05–0,15 % Cr, 0,03–0,08 % Ni) по механическим свойствам (табл. 2.9) приближаются к нержавеющим сталям. Возможность их применения в реакторах при температуре 450–600 °С в среде газовых, жидкометаллических или органических теплоносителей определяется не прочностными свойствами, а коррозионной стойкостью в условиях движения теплоносителя и при облучении.

Таблица 2.8  
**Механические свойства циркония и его сплавов при кратковременных испытаниях и скорость установившейся ползучести**

Материал	Временное сопротивление $\sigma_p$ , кг/мм <sup>2</sup>				Предел текучести $\sigma_p$ , кг/мм <sup>2</sup>				Относительное удлинение после разрыва $\delta$ , %				Скорость установившейся ползучести $\nu$ (%/ч) при напряжении $\sigma$ (кг/мм <sup>2</sup> )
	20 °С	200 °С	300 °С	400 °С	20 °С	200 °С	300 °С	400 °С	20 °С	200 °С	300 °С	400 °С	
Цирконий иодидной рафинировки, дуговой переплавки	22	14	12	11	8	5	4,5	4	45	55	55	60	$\left. \begin{array}{l} 260 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma = 8,8 \\ 315 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma = 6,7 \\ 400 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma = 1,76 \end{array} \right\} \nu = 10^{-4}$ $\left. \begin{array}{l} \sigma = 9,8 \\ \sigma = 8,4 \\ \sigma = 4,9 \end{array} \right\} \nu = 10^{-2}$
Цирконий-2	48	25	20	17	31	15	10	7	22	34	35	36	$\lg \nu = -9,75 + 0,215\sigma; 9,84 < \sigma < 18,98$ $\lg \nu = -246,95 + 9\sigma; 18,98 < \sigma < \sigma_b$
Zr – 0,5 % Ta	30	20	16	14	13	8	6	5	40	42	42	45	$\left. \begin{array}{l} \sigma = 5, \nu = 0,4 \cdot 10^{-4} \\ \sigma = 6, \nu = 1,9 \cdot 10^{-2} \\ \sigma = 8, \nu = 4 \cdot 10^{-2} \end{array} \right\}$
Zr – 1 % Nb	35	26	20	18	20	16	12	9	30	31	33	38	350 °С, $\sigma = 8, \nu = 10^{-4}$
Zr – 2,5 % Nb	45	32	30	27	28	22	20	18	25	24	46	50	350 °С, $\sigma = 15, \nu = 10^{-4}$
Сплав ожегнит	29	20	16	13	12	8	7	7	33	42	46	50	$350 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma = 6, \nu = 0,3 \cdot 10^{-4}$ $400 \text{ }^\circ\text{C}, \sigma = 4,5, \nu = 0,7 \cdot 10^{-4}$
Zr – 5 % Nb	65	57	53	48	–	–	–	–	20	17	17	16	$\left. \begin{array}{l} \sigma = 10,9 \\ \sigma = 9,5 \\ \sigma = 7,7 \end{array} \right\} \nu = 1$

Таблица 2.9

## Механические свойства сплава Zr – 2,5 % Nb (облучение нейтронами с энергией &gt;500 эВ)

Обработка	Интегральный поток нейтронов, нейтрон/см <sup>2</sup>	Температура испытания, °С	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , кг/мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление $\sigma_b$ , кг/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , % (на длине 2,54 см)	Относительное сужение после разрыва $\phi$ , %
Закалка с 880 °С и старение при 500 °С в течение 24 ч	Необлученные	20	78	87	13	63
	1020 при 250 °С	20	96	100	10	–
	1021 при 270 °С	20	108	110	8	45
	Необлученные	300	53	58	14	75
	1020 при 250 °С	300	68	72	13	–
	1021 при 270 °С	300	78	81	9	65
Закалка с 960–1000 °С и старение при 500 °С в течение 24 ч	Необлученные	300	48	58	13	70
	1020 при 300 °С	300	77	81	8	50
	1021 при 270 °С	300	86	86	4	5
Медленное охлаждение с 800 °С	Необлученные	20	41	53	27	53
	То же	300	21	31	27	67
Быстрое охлаждение с 700 °С и холодная обработка на 20 %	»	20	63	73	13	51
	»	300	41	48	15	55

Термическая обработка влияет на механические характеристики сплавов циркония. Закалкой из  $\beta$ -фазы и последующим старением при отпуске можно получить высокие механические характеристики на сплавы, легированные 2,5 % Nb. Оптимальный режим термической обработки должен обеспечить высокие прочностные и коррозионные характеристики сплавов циркония. Влияние термической обработки на прочностные характеристики сплава, легированного 2,5 % Nb, представлено в табл. 2.9.

**Радиационная стойкость.** В табл. 2.9 также представлены данные по влиянию облучения на свойства сплава. После закалки с 880 °С и старения сплав обладает высокими механическими свойствами, в том числе и при температуре 300 °С. Облучение в интегральном потоке  $10^{21}$  нейтрон/см<sup>2</sup> несколько снижает пластичность. После закалки из  $\beta$ -фазы и старения облучение в таком интегральном потоке снижает относительное удлинение с 13 до 4 % по сравнению с необлученным состоянием. Цирконий совместим с ураном и сплавом урана с 10 % Мо до 500 °С, а со сплавом урана, легированным 2 % Zr и 1,5 % Мо, до 700 °С. До 500 °С цирконий совместим с двуокисью урана, карбидом и нитридом урана и может являться хорошей средой для диспергирования этих соединений либо служить материалом оболочек для твэлов со спеченными или литыми соединениями урана.

**Коррозионная стойкость.** Цирконий является достаточно электроотрицательным металлом. Нормальный потенциал реакции  $Zr / Zr^{+4} = E$ ,  $E = -1,53$  В. Однако в большинстве водных растворов стационарный потенциал циркония изменяется от  $-0,1$  до  $-0,5$  В. Это связано с образованием на поверхности циркония пассивирующей пленки. При температуре, близкой к комнатной, фазовая пленка на поверхности

циркония не обнаружена. Пассивация циркония в этих условиях определена адсорбционными явлениями. При комнатной температуре пассивное состояние на цирконии сохраняется при потенциалах до +2,5 В. При длительной анодной поляризации циркония в области потенциалов, отвечающих пассивной области, на поверхности циркония образуется фазовая окисная пленка. С ростом температуры характер анодной поляризационной кривой циркония не изменяется, только скорость увеличивается пропорционально температуре анодного растворения металла в пассивном состоянии. Скорость анодного процесса растворения циркония при значениях температуры 20, 190 и 300 °С составляет  $10^{-9}$ ,  $10^{-8}$ ,  $10^{-7}$  и  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$  А/см<sup>2</sup> соответственно. В результате коррозионного процесса, протекающего при высокой температуре, на поверхности металла образуется фазовая защитная пленка двуокиси циркония.

**Кинетика окисления.** В начальный период коррозия протекает по параболическому или логарифмическому закону. На поверхности циркония и его сплавов образуется защитная пленка двуокиси циркония черного цвета с моноклинной решеткой. Для сплавов циркония после первоначального периода эксплуатации в воде и паре при температуре выше 300 °С имеет место изменение кинетического закона, по которому протекает коррозионный процесс. При этом величина коррозии становится прямо пропорциональной времени, т.е. коррозия идет по линейному закону. На кинетической кривой это явление сопровождается переломом, после которого наступает период ускоренной коррозии. Осыпающаяся окисная пленка белого цвета, образующаяся на поверхности металла, не обладает защитными свойствами.

Сплавы циркония с ниобием не имеют перелома на кинетической кривой, однако и на них в определенных условиях образуется пленка продуктов коррозии белого цвета.

Достоверно причины изменения кинетики коррозии и свойств окисной пленки не установлены.

Рост окисной пленки в начальный период происходит преимущественно на границе раздела металл–окисел в результате диффузии кислорода или ионов кислорода через окисную пленку. Об этом свидетельствует следующее. Метка из инертного материала (окись алюминия, платина), нанесенная на поверхность циркония, после окисления остается на поверхности раздела окисел–среда. Черная окисная пленка представляет собой твердый раствор циркония в двуокиси циркония. Недостаток кислорода в таком твердом растворе вычитания приводит к образованию анионных вакансий, по которым и происходит диффузия кислорода. Ион кислорода образуется на поверхности окисной пленки при взаимодействии вакансии, двух электронов и молекулы воды.

На поверхности раздела металл–окисел ионы кислорода взаимодействуют с атомом циркония с образованием двуокиси циркония, анионной вакансии и двух свободных электронов. Анионная вакансия и электроны мигрируют к поверхности раздела окисел–среда.

Окисная пленка играет существенную роль в коррозии циркония. При комнатной температуре чистая двуокись циркония представляет собой соединение белого цвета с моноклинной кристаллической решеткой. В области температур 1000–1900 °С двуокись циркония кристаллизуется в тетрагональной модификации, а при температуре выше 1900 °С – в кубической. Двуокись циркония при растворении в ней до 0,4 МПа меняет цвет до серого и черного, при дополнительном окислении вновь становится белой.

Рассмотрим процессы, происходящие при росте окисной пленки на поверхности циркония и его сплавов. При взаимодействии циркония с коррозионной средой кислород диффундирует в металл. Образуется твердый раствор кислорода в цирконии. С увеличением экспозиции количество кислорода, растворенного в цирконии, воз-

растает. При достижении определенной концентрации кислорода термодинамически более устойчивым становится не твердый раствор кислорода в цирконии, а окисел. Происходит перестройка кристаллической решетки твердого раствора в решетку двуокиси циркония. Избыток атомов циркония растворяется в окисле и образуется твердый раствор циркония в двуокиси циркония.

**Структура окисной пленки.** В начальный период коррозии на поверхности циркония образуется тонкая окисная пленка, имеющая тетрагональную или кубическую решетку. При этом наблюдается структурное соответствие между кристаллическими решетками циркония и двуокиси циркония.

Из общих положений кристаллографии следует, что наилучшую согласованность с гексагональной решеткой (циркония) имеет кубическая решетка. При этом кристаллическая решетка двуокиси искажается, в ней возникают напряжения. По мере роста пленки напряжение возрастает. Напряжение и вызванные им искажения кристаллической решетки окисла интенсифицируют диффузию кислорода и соответственно рост пленки. Рост пленки увеличивает напряжение и т.д. При достижении определенной толщины напряжение в окисной пленке становится столь велико, что приводит к разрушению пленки. Следует заметить, что с ростом толщины пленки происходит также перестройка кристаллической решетки из кубической в тетрагональную. Напомним, что тетрагональная модификация двуокиси циркония стабильна при высокой температуре и соответственно неустойчива при низкой. При этом изменяется и текстура окисла. Исчезновение текстуры и перестройка кристаллической решетки снижают защитные свойства окисной пленки. Следует заметить, что скорость роста окисла по телу и границам зерен циркония неодинакова. Это обстоятельство способствует увеличению напряжений в окисле.

Наличие перелома на кинетической кривой коррозии циркония с образованием белой осыпающейся пленки накладывает определенные условия на проведение коррозионных испытаний для установления стойкости сплавов циркония. Длительность коррозионных испытаний сплавов циркония должна быть максимально приближена к ресурсу работы изделий из этих сплавов. При кратковременных испытаниях может быть не достигнут момент перелома, в то время как в условиях эксплуатации он допустим.

Оценка стойкости сплавов циркония лишь по привесу образцов и цвету окисной пленки недостаточна, так как не вся окисная пленка сохраняется в процессе испытаний на поверхности металла, часть ее переходит в коррозионную среду.

**Влияние среды.** Сплавы стойки в воде высокой чистоты до температуры 300 °С. В деаэрированной воде изменение рН среды от 3 до 11 не сказывается на стойкости сплавов. В присутствии кислорода в количествах, характерных для кипящих реакторов, скорость коррозии сплавов циркония несколько возрастает, но сплавы остаются стойкими. Лишь при одновременном присутствии в среде кислорода и аммиака (2–5 мг/кг) стойкость сплавов циркония резко снижается. В кипящих реакторах, в которых происходит упаривание среды, возможно концентрирование нелетучих щелочей, что может привести к интенсификации коррозии циркониевых сплавов. Хлориды в количестве до 0,1 кг/л не снижают стойкости циркония. Существенно увеличивают коррозию циркония фторид-ион и карбонат-ион. Содержание их в воде не должно превышать 0,02 мг/л.

Сплавы циркония в реакторных условиях не подвергаются щелевой, контактной, межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением.

Сварные соединения сплавов циркония менее стойки, чем основной металл. Увеличения стойкости сварных соединений достигают тщательной подготовкой металла под сварку и последующей термической обработкой высоким (>10<sup>-4</sup> мм рт. ст.) ваку-

умом при электронно-лучевой сварке и термической обработке. Швы, выполненные аргонодуговой сваркой, менее стойки, чем швы, выполненные электронно-лучевой сваркой. Деформация несколько увеличивает общую коррозию циркония. Для удаления с поверхности слоя металла, деформированного в процессе производства, готовые детали и изделия из сплавов циркония осветляются в смеси кислот 30 %  $\text{HNO}_3$ , 30 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и 10 %  $\text{HF}$  с последующей промывкой в растворе, содержащем 15 %  $\text{HNO}_3$  и 15 %  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$  для связывания иона фтора, адсорбированного на поверхности циркония. Теплопередача может интенсифицировать коррозию циркония. При местном, даже кратковременном нарушении теплоотвода, приводящем к недопустимому повышению температуры стенки, наблюдается местная коррозия сплавов циркония. При достижении нормальной температуры процесс коррозионного разрушения не прекращается, а распространяется на неповрежденные участки.

**Деформация и термическая обработка.** После холодной прокатки образуется текстура (преимущественная ориентация зерен) и возникают остаточные напряжения. При наличии текстуры разориентировка зерен основного металла минимальна, при структурном соответствии разориентировка зерен растущей окисной пленки также минимальна.

Наличие текстуры в окисной пленке повышает ее защитные свойства. Остаточные напряжения изменяют параметры решетки металла, а соответственно и окисной пленки, и уменьшают ее стойкость. Например, отжиг в  $\alpha$ -области оказывает, как правило, положительное действие на стойкость сплавов циркония, легированных ниобием.

При отжиге снимаются остаточные напряжения и сохраняется текстура холодной прокатки. Кроме того, после закалки из  $\beta$ -области отжиг в  $\alpha$ -области сохраняет равномерность распределения легирующего элемента. Электрохимическая гомогенность поверхности улучшает стойкость металла. Отжиг в  $\alpha$ - и  $\beta$ -областях ухудшает стойкость сплавов циркония с ниобием. При этом исчезает текстура и увеличивается гетерогенность поверхности. Ниобий имеет различную растворимость в  $\alpha$ - и  $\beta$ -областях, поэтому коррозия отдельных зерен с различным содержанием легирующего элемента происходит по-разному. При отжиге в  $\beta$ -области устранение текстуры и коагуляция избыточных интерметаллидов ведут к увеличению гетерогенности структуры, интенсифицируют коррозию сплавов циркония с ниобием.

**Облучение.** Окисные защитные пленки на цирконии являются полупроводниками  $n$ -типа. Из теории полупроводников следует, что излучение существенно образом влияет на кинетику анодного процесса металлов, покрытых окисной полупроводниковой пленкой  $\alpha$ -типа. Облучение тепловыми нейтронами с плотностью потока  $10^{12}$  нейтрон/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ) в 10 раз увеличивает скорость анодного процесса растворения циркония в пассивном состоянии при комнатной температуре. Деструктурирующий эффект при этом не играет определяющей роли, поскольку в случае прекращения облучения скорость анодного процесса на цирконии снижается до первоначального значения без облучения. В ряде исследований показано, что нейтронное облучение увеличивает скорость коррозии сплавов циркония в воде при 300 °С. При более высокой температуре (400–500 °С) облучение существенно сказывается на стойкости циркония. Напомним, что в этих условиях скорость коррозии сплавов циркония велика и без облучения.

В висмуте, свинце и их эвтектике цирконий стоек до 300 °С, в ртути и галлии при 300 °С цирконий разъедается, в натрии, калии и их эвтектике устойчив до 600 °С. Присутствие в расплавах кислорода, азота, водорода может вызвать образование отслаивающихся окислов. Чем чище расплав от этих загрязнений, тем выше стойкость циркония и его сплавов.

**Наводороживание.** Выделяющийся в процессе коррозии водород может растворяться в цирконии и существенно влиять на его механические характеристики. В период до ускоренного окисления в цирконии растворяется 30–80 % всего водорода, образующегося в процессе коррозии. После перелома на кинетической кривой, в период ускоренного окисления, весь выделившийся при коррозии водород растворяется в цирконии, образуя гидриды. Гидриды выделяются преимущественно вдоль направления течения металла при прокатке труб и других изделий из циркония. При таком распределении гидридов механические характеристики циркония существенно не изменяются. Однако под влиянием механических напряжений, составляющих 0,4–0,5 предела текучести, вместо продольно расположенных гидридов образуются радиально ориентированные гидриды, перпендикулярные оси растяжения. Это приводит к снижению до пяти раз относительного удлинения и к охрупчиванию циркония и его сплавов. Трубы, изготовленные выдавливанием и волочением, крайне чувствительны к радиальному расположению гидридов. Трубы, изготовленные прессованием, волочением и роликовой прокаткой (конечная операция), значительно менее склонны к радиальному выделению гидридов. Присутствие в сплавах циркония никеля интенсифицирует процесс наводороживания.

**Стойкость сплавов циркония в жидкометаллических теплоносителях** существенно зависит от чистоты последних. Цирконий интенсивно поглощает растворенные в расплавленных щелочных металлах водород, азот и кислород. При этом затрудняется формирование защитной окисной пленки, в результате чего в загрязненных этими газами жидкометаллических теплоносителях стойкость сплавов циркония низка.

В органических теплоносителях за счет пиролиза и под действием радиации накапливается водород, который поглощается сплавами циркония. Примеси воды, хлоридов в органическом теплоносителе интенсифицируют наводороживание и коррозию сплавов циркония. Указанные обстоятельства обуславливают низкую стойкость сплавов циркония в органических теплоносителях.

В настоящее время более десяти реакторов имеют твэлы с оболочками из сплавов циркония. В России сплав Zr – 1 % Nb используют для оболочек твэлов водо-водяного реактора Нововоронежской АЭС.

## ГЛАВА 3. КОНСТРУКЦИИ ВОДО-ВОДЯНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Более 80 % установленных мощностей мировой ядерной энергетики вырабатывается водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) (табл. 3.1). За последние годы развития водо-водяные реакторы прошли сложный путь от экспериментальных реакторов малой мощности <100 МВт до реакторов электрической мощностью 1200–1300 МВт. В настоящее время АЭС с водо-водяными реакторами вступили в стадию широкой стандартизации, что позволяет снизить стоимость производства электроэнергии, повысить надежность работы, сократить сроки строительства, а также сделать возможным серийное изготовление оборудования и способствует развитию ядерной энергетики в целом.

Таблица 3.1

**Основные характеристики установок с реакторами типа ВВЭР**

Показатели	ВВЭР-1000	«Библис-Б»	«Мюльхайм-Керлих»	«Индиан-Пойнт»	«Сан-Онофр-2»
1	2	3	4	5	6
Мощность энергоблока электрическая, МВт	1000	1300	1371	1005	1170
Количество циркуляционных петель, шт.	4	4	2	4	2
<i><b>Реактор</b></i>					
Мощность тепловая, МВт	3000	3752	3760	3025	3410
Давление рабочее, МПа	16	15,8	15,8	15,8	15,8
Температура теплоносителя на входе в реактор, °С	290	290	296	284	289
Температура теплоносителя на выходе из реактора, °С	322	323	329	316	322
Расход теплоносителя через активную зону, кг/с	18 040	20 000	19 556	16 681	18 334
Средний тепловой поток на поверхности твэла, Вт/м <sup>2</sup>	$3,5 \cdot 10^4$	$3,45 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$	$3,65 \cdot 10^4$
Загрузка топливом, т	75	102,7	106	89,6	89,4
Начальная загрузка, лет	3	3	3	3	3
Средняя глубина выгорания топлива, МВт·сут/кг U	40	32	32,6	33	34,55
Размер оболочки твэла, мм	9,1×0,6	10,75	9,63×0,6	10,77×0,617	–
Удельная энергонапряженность активной зоны, кВт/л	111	92,3	106,1	94	94,7
Количество регулирующих стержней (приводов СУЗ), шт.	61	61	72	61	91

1	2	3	4	5	6
<b>Корпус реактора</b>					
Диаметр внутренний, мм	4143	5000	4620	4400	4360
Толщина стенки цилиндрической части, мм	190	250	240	–	–
Масса корпуса с крышкой (сухой), т	390	515	478	–	–
<b>Парогенератор</b>					
Количество, шт.	4	4	2	4	2
Тип конструкции	Горизонтальный		Вертикальный		
Расход генерируемого пара, кг/с	408,3	502,8	1011,4	–	–
Давление генерируемого пара, МПа	6,4	5,4	7	5,5	7
Поверхность теплообменника, м <sup>2</sup>	6115	4335	–	4785	–
Средняя удельная теплонапряженность, Вт/м <sup>2</sup>	6994,7	12331,8	–	–	–
Габаритная высота (длина), м	14,53	20,03	23,53	–	–
Габаритный диаметр, мм	4290	4750	3531	–	6600
Масса, т	320	350	490	–	–
<b>Главный циркуляционный насос</b>					
Количество, шт.	4	4	4	4	4
Производительность, м <sup>3</sup>	5,56	6,67	6,67	5,56	6,11
Напор, МПа	0,675	0,71	0,92	0,66	0,76
Частота вращения, об/мин	1000	1500	1500	1500	1500
Мощность электродвигателя, кВт	7000	8650	10 000	–	–

В течение всего периода развития ВВЭР сохраняется тенденция к увеличению их единичной мощности. По оценкам зарубежных специалистов, дальнейший рост единичной электрической мощности реактора свыше 1300 МВт считается экономически неоправданным. На данном этапе оптимальная мощность блока составляет 1000–1100 МВт. Одновременно у нас в стране и за рубежом разрабатываются проекты ВВЭР с единичной мощностью свыше 1500 МВт, срок реализации этих проектов будет зависеть от темпов развития и совершенствования ядерной энергетики.

### 3.1. Реактор ВВЭР-440

Большое внимание уделяется АЭС малой и средней мощности, на которых целесообразно базировать ядерную энергетику для отдаленных районов, а также использованию ВВЭР в системе теплофикации.

Реактор ВВЭР (рис. 3.1) является реактором корпусного типа с водой под давлением, которая выполняет функцию теплоносителя и замедлителя. Корпус реактора представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд высокого давления с крышкой, имеющей разъем с уплотнением и патрубки для входа и выхода теплоносителя. Внутри корпуса закрепляется шахта, являющаяся опорой для активной зоны и части внутрикорпусных устройств, а также служащая для организации внутренних потоков теплоносителя. Активная зона набирается из шестигранных или (в зарубежных конструкциях) квадратных тепловыделяющих сборок. Сверху на активную зону устанавливается блок защитных труб, дистанционирующий сборки в плане и предотвращающий их всплытие и вибрацию. На фланец корпуса монтируется верхний блок с приводами СУЗ, обеспечивающий уплотнение главного разъема. Регулирование реактора осуществляется перемещаемыми органами СУЗ и, как правило, жидким плотителем.

Теплоноситель поступает в реактор через входные патрубки корпуса, проходит вниз по кольцевому зазору между шахтой и корпусом, затем через отверстия в опорной конструкции шахты поднимается вверх по тепловыделяющим сборкам. Нагретый теплоноситель выходит из головок ТВС в межтрубное пространство блока защитных труб и через перфорированную обечайку блока и шахты отводится выходными патрубками из реактора.

В состав реактора входят: верхний блок, внутрикорпусные устройства, шахта, днище шахты, корзина, блок защитных труб, штанги промежуточные и активная зона, корпус, привод АРК.

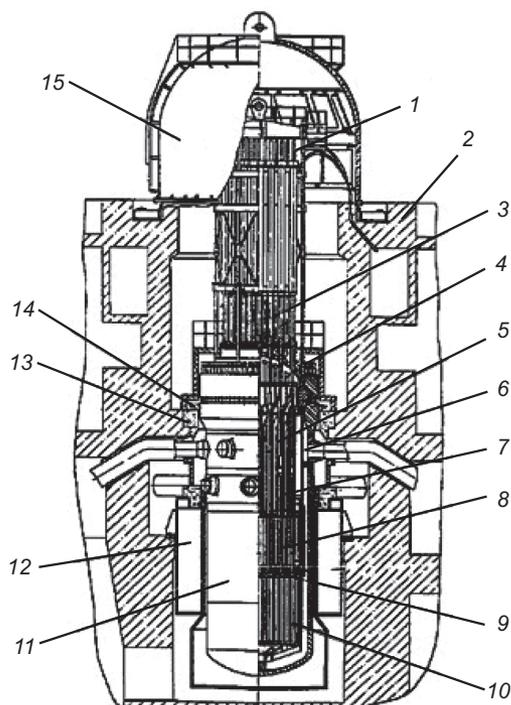


Рис. 3.1. Реактор ВВЭР-440 с оборудованием шахтного объема:

1 – привод АРК; 2 – бетонная шахта; 3 – верхний блок; 4 – крышка; 5 – блок защитных труб; 6 – внутрикорпусное устройство; 7 – штанги промежуточные; 8 – активная зона; 9 – корзина; 10 – днище шахты; 11 – корпус; 12 – кольцевой бак; 13 – бетонная консоль; 14 – сифон; 15 – колпак защитный

Уплотнение главного разъема реактора осуществляется с помощью крышки верхнего блока, устанавливаемой на фланец корпуса и удерживаемой от внутреннего давления нажимным кольцом и шпильками. Плотность разъема обеспечивается двумя кольцевыми никелевыми прокладками. Кроме них, предусмотрены две прокладки контроля протечек, прижимаемых нажимными винтами через прижимное кольцо торового компенсатора. Герметичность главного разъема контролируется по появлению давления в полости торового компенсатора и между прокладками контроля протечек.

Реактор установлен в бетонной шахте, которая представляет собой опорную конструкцию и является биологической защитой. Для размещения реактора в бетонной шахте и соединения с системами безопасности предусмотрено оборудование шахтного объема, которые включает:

- соединительные кабели, шлейфы, электрические разъемы;
- оборудование для охлаждения и вентиляции элементов реактора;
- тепловую изоляцию реактора;
- металлоконструкции, необходимые для обеспечения доступа к корпусу реактора в периоды ППР в процессе эксплуатации энергоблока.

Для организации перегрузки топлива в реакторе под водой верхняя часть бетонной шахты отделена от нижней и уплотнена сильфоном, который приварен к фланцу корпуса реактора и закладному кольцу бетонной консоли. Для изоляции объема бетонной шахты от реакторного зала используется защитный колпак.

Корпус реактора в районе активной зоны окружен кольцевым баком, служащим опорой реактора и биологической защитой.

Основные характеристики окружающей среды и основные эксплуатационные параметры реактора ВВЭР-440 приведены в табл. 3.2 и 3.3 соответственно.

Таблица 3.2

**Основные характеристики окружающей среды**

Характеристики окружающей среды	Нормальные условия эксплуатации	Малая авария	Максимальная проектная авария
Температура, °С, не более	60	80	119,5
Давление, МПа	–	0,122	0,203
Относительная влажность, %	Не более 90	Парогазовая смесь	Парогазовая смесь
Послеаварийное разрежение, мм вод. ст., не более	–	2	2
Время существования послеаварийного разрежения, ч, не более	–	50	50
Разрежение, мм вод. ст.	До 20	–	–
Время существования избыточного давления, ч, не более	–	5	0,5
Уровень радиации, мР/ч, не более	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^7$
Расчетная частота возникновения аварийного режима	–	1 раз в 2 года	1 раз в 100 лет

Основные эксплуатационные параметры реактора ВВЭР-440

Эксплуатационные параметры	Величина
Давление расчетное, МПа	13,73
Температура расчетная, °С	325
Рабочее давление, МПа	12,26
Давление при гидротестировании, МПа	17,16
Рабочая среда – вода	–
Тепловая мощность реактора, МВт	1375
Давление теплоносителя на выходе из активной зоны, МПа	12,26
Расход теплоносителя через реактор, м <sup>3</sup> /ч	40 818
Средняя температура теплоносителя на входе в реактор, °С	266
Средняя температура теплоносителя на выходе из реактора, °С	295,8
Подогрев теплоносителя в реакторе, °С	29,8
Гидравлическое сопротивление реактора, МПа	0,34
Габаритные размеры реактора: высота реактора, м размер по патрубкам, м наибольший диаметр реактора (по нажимному кольцу), м	23,8 4,66 4,35

**Эксплуатация реактора.** Теплоноситель с температурой 258–270 °С принудительно, с помощью ГЦН, подается в реактор через шесть входных патрубков корпуса, опускается по кольцевому зазору между корпусом и шахтой, входит в днище шахты и поднимается вверх, проходя через отверстия в нижней решетке днища шахты. Теплоноситель, проходя через дроссельные шайбы в верхней решетке днища шахты, попадает в рабочие кассеты, кассеты-экраны, а остальная часть через отверстия входит в трубы днища шахты и попадает в кассеты АРК. При прохождении через кассеты теплоноситель нагревается за счет тепла, выделяющегося при делении ядерного топлива, выходит из РК и кассет-экранов через ловители БЗТ, а из кассет АРК – через отверстия в защитных трубах БЗТ, затем через перфорацию в верхней части шахты попадает в кольцевой зазор между шахтой и корпусом и выходит из реактора через шесть выходных патрубков корпуса.

Регулирование мощности реактора производится двумя независимыми способами воздействия на реактивность, основанными на разных принципах:

- механическим перемещением кассет АРК (в активной зоне производится ступенчатое изменение реактивности при работе на мощности и останов реактора при нормальных условиях эксплуатации и авариях);
- изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе (производится медленное изменение реактивности).

Каждое из этих двух воздействий на реактивность способно привести реактор из любого рабочего состояния (без превышения допустимых пределов повреждения

твэлов) в подкритическое состояние и поддерживать его в этом состоянии при рабочей температуре теплоносителя. Конструкция активной зоны и внутрикорпусных устройств реактора исключает возможность непредусмотренного перемещения исполнительных органов СУЗ, приводящего к увеличению реактивности активной зоны и заклиниванию исполнительных органов СУЗ в активной зоне реактора.

При работе реактора на мощности коэффициент реактивности является отрицательным для любого момента времени топливного цикла.

Теплоносителем и замедлителем в реакторе является химически обессоленная вода с борной кислотой, концентрация которой изменяется в процессе эксплуатации от 0 до 16 г/кг воды.

В реакторе контролируется:

- температура теплоносителя на выходе из рабочих кассет и кассет-экранов. Контроль осуществляется с помощью 210 термопар (ТП). Расположение датчиков позволяет обнаружить непредусмотренное падение кассеты АРК по перекосу температурного поля в теплоносителе на выходе из РК;

- температура теплоносителя на выходе из реактора. Контроль осуществляется с помощью шести ТП, равномерно расположенных по периферии в объеме над активной зоной реактора;

- перепад давления на реакторе. Измерение перепада давления ведется с помощью трех импульсных трубок с точками отбора, расположенными над и под буртом разделителя потока теплоносителя;

- объемная активность теплоносителя в первом контуре. Контроль производится отбором пробы один раз в сутки;

- температура поверхности металла корпуса реактора. Контроль осуществляется тремя термометрами сопротивления;

- температура чехлов АРК верхнего блока – 37 точек измерений (по одной точке измерения на чехол);

- плотность главного разъема реактора. Контроль обеспечивается с помощью импульсных трубок, выведенных из контрольных полостей главного разъема;

- положение кассет АРК в активной зоне – информация выдается датчиком положения, входящим в состав привода СУЗ;

- плотность потока нейтронов. Измерения производятся 24 ионизационными камерами, которые установлены в каналах кольцевого бака вокруг корпуса реактора.

### **3.2. Серийный ядерный реактор ВВЭР-1000**

Реакторная установка с реактором ВВЭР-1000 является составной частью энергоблока АЭС и совместно с турбогенератором используется для производства электроэнергии в базовом режиме. Назначение реакторной установки – выработка сухого насыщенного пара для турбогенераторной установки, где тепловая энергия пара преобразуется в электрическую энергию.

Реакторная установка оснащена модернизированным серийным ядерным реактором ВВЭР-1000 корпусного типа с водой под давлением. Реактор энергетический ВВЭР-1000 предназначен для выработки тепловой энергии за счет управляемой цепной реакции деления атомных ядер топлива в активной зоне. Реактор водо-водяной, гетерогенный, корпусного типа, работает на тепловых нейтронах с водо-водяным теплоносителем-замедлителем (вода под давлением). Использование воды в качестве замедлителя и теплоносителя в реакторе упрощает его конструкцию по сравнению с другими типами реакторов. Особенность водо-водяных реакторов типа ВВЭР –

тесное расположение твэлов в уран-водной решетке. Типичное значение соотношения объемов воды и топлива для ВВЭР равно примерно двум, что в сочетании с хорошими теплофизическими свойствами воды обеспечивает высокие (примерно 100 МВт/м<sup>3</sup> и больше) значения удельного энерговыделения в активной зоне и возможность использовать изготовленный в заводских условиях корпус.

Реактор (рис. 3.2) представляет собой вертикальный цилиндрический корпус с эллиптическим днищем, внутри которого размещается активная зона и внутрикорпусные устройства. Сверху корпус реактора герметично закрыт крышкой с установленными в ее патрубках приводами СУЗ и герметичными выводами в ее патрубках кабелей датчиков внутриреакторного контроля. Крепление крышки к корпусу осуществляется шпильками.

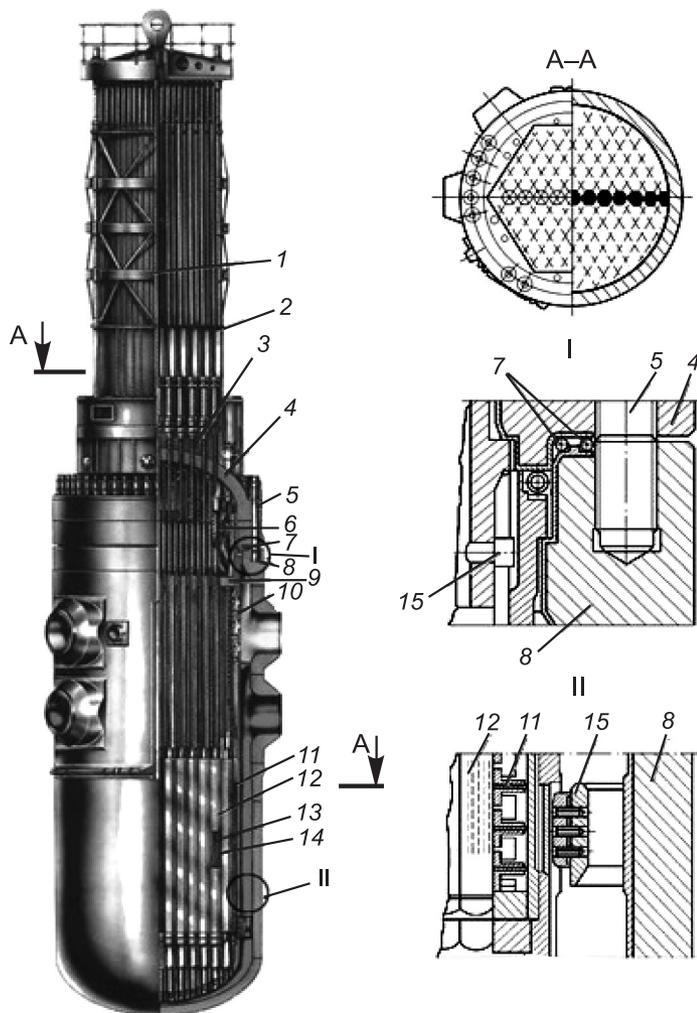


Рис. 3.2. Общий вид реактора ВВЭР-1000:

1 – верхний блок; 2 – привод СУЗ (системы управления и защиты); 3 – теплоизоляция реактора; 4 – крышка реактора; 5 – шпилька; 6 – труба для загрузки образцов-свидетелей; 7 – уплотнение; 8 – корпус реактора; 9 – блок защитных труб; 10 – шахта; 11 – выгородка активной зоны; 12 – топливные сборки; 13 – регулирующие стержни; 14 – топливные стержни; 15 – фиксирующие шпонки; I, II – увеличенные фрагменты

В верхней части корпуса имеются патрубки для подвода и отвода теплоносителя (по два патрубка на петлю), расположенные в два ряда, а также патрубки для аварийного подвода теплоносителя при разгерметизации первого контура. Применение в конструкции реактора ВВЭР-1000 корпуса с двухрядным расположением патрубков позволяет уменьшить габариты корпуса по патрубкам в плане по сравнению с однорядным, а также упрощает схему циркуляции теплоносителя в реакторе за счет разделения потока теплоносителя сплошной кольцевой перегородкой.

Принудительная циркуляция теплоносителя осуществляется по четырем замкнутым петлям первого контура за счет работы ГЦН. Вода первого контура, охлажденная в парогенераторах, поступает в реактор через нижний ряд напорных патрубков, проходит вниз по кольцевому зазору между корпусом и шахтой внутрикорпусной, затем через перфорированное эллиптическое днище и опорные трубы шахты входит в ТВС. Из ТВС через перфорированную нижнюю плиту БЗТ теплоноситель выходит в межтрубное пространство БЗТ, проходит через перфорацию шахты внутрикорпусной, попадает в кольцевой зазор между шахтой и корпусом и через четыре верхних выходных патрубка корпуса выходит из реактора (рис. 3.3).

В случае обесточивания или отключения всех ГЦН создается теплоотвод от активной зоны РУ за счет создания естественной циркуляции теплоносителя в первом контуре (согласно данным ОКБ «Гидропресс», на естественной циркуляции возможен теплоотвод до 10 % мощности РУ без превышения предельных параметров ТВС).

Нагрев воды осуществляется в активной зоне за счет твэлов. Твэлы заполнены двуокисью урана, слабо обогащенного изотопом урана-235. В настоящее время на всех АЭС с ВВЭР-1000 реализован трехлетний топливный цикл, т.е. каждая ТВС используется в реакторе в течение трех кампаний.

Регулирование реактивности и тепловыделения осуществляется перемещением органов СУЗ с твердым поглотителем, а также изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе. Наличие двух систем воздействия на реактивность, основанных на разных принципах, выполнено в соответствии с требованиями ядерной безопасности.

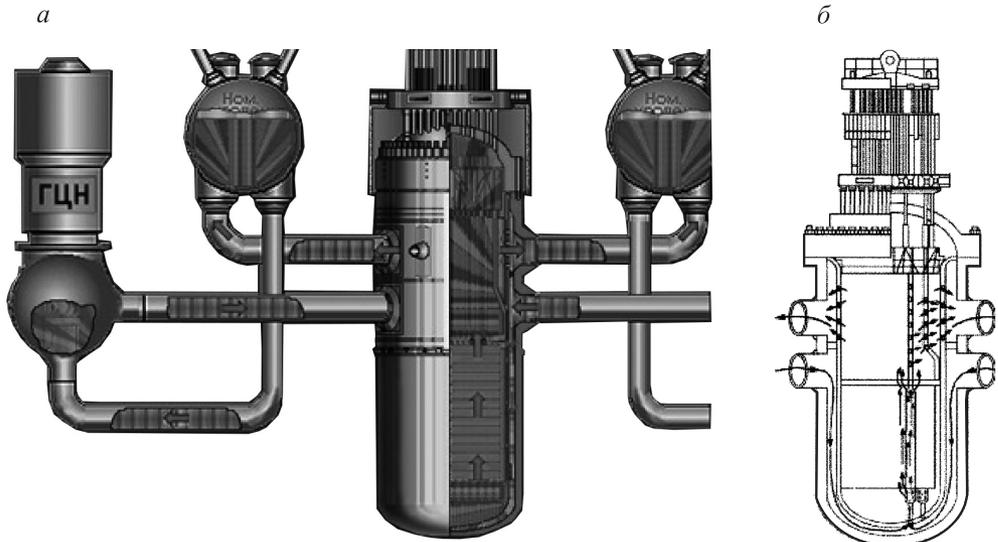


Рис. 3.3. Схема циркуляции теплоносителя первого контура в корпусе реактора:  
а – общий вид; б – сечение

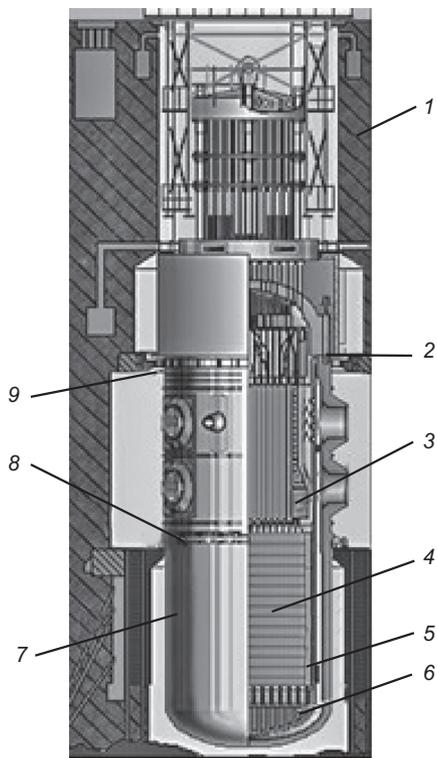


Рис. 3.4. Реактор ВВЭР-1000:

1 – верхний блок; 2 – детали главного уплотнения; 3 – блок защитных труб; 4 – активная зона; 5 – выгородка; 6 – шахта; 7 – корпус; 8 – кольцо опорное; 9 – кольцо опорное

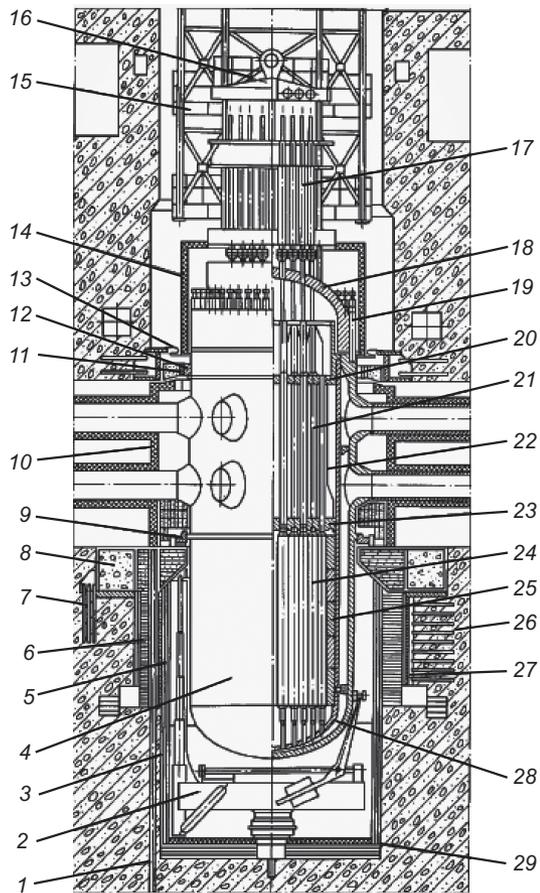


Рис. 3.5. Схема реактора ВВЭР-1000:

1 – канал ионизационной камеры; 2 – машина осмотра корпуса; 3 – нижняя секция теплоизоляции; 4 – корпус реактора; 5 – верхняя секция теплоизоляции; 6 – металлоконструкция радиационно-тепловой защиты; 7 – анкерные связи опорной фермы; 8 – опорная ферма; 9 – опорное кольцо корпуса; 10 – теплоизоляция зоны патрубков; 11 – шпонка упорного кольца; 12 – упорное кольцо; 13 – сифон; 14 – теплоизоляция ВВ; 15 – каркас; 16 – траверса; 17 – привод СУЗ; 18 – крышка ВВ; 19 – шпилька ГРП; 20 – верхняя плита БЗТ; 21 – защитная труба БЗТ; 22 – БЗТ; 23 – нижняя плита БЗТ; 24 – ТВС; 25 – выгородка; 26 – анкерная связь обечайки бокса; 27 – обечайка бокса; 28 – шахта реактора с днищем; 29 – теплоизоляция нижней части

Реактор (рис. 3.4, 3.5) устанавливается в бетонной шахте, обеспечивающей надежное крепление реактора и биологическую защиту. Конструкция реактора и способ его закрепления, СУЗ и САОЗ обеспечивают безопасную остановку и расхолаживание, в том числе при максимальном расчетном землетрясении в 9 баллов по шкале MSK-64, а также гарантируют прочность конструкции при одновременном воздействии нагрузок, вызванных максимальным расчетным землетрясением и разрывом трубопровода Ду850 по полному сечению. В проекте реактора рассмотрена максимальная проектная авария (МПА) с разгерметизацией первого контура при мгновенном разрыве трубопровода Ду850 с беспрепятственным двусторонним истечением теплоносителя (при работе реактора на номинальной мощности с учетом возможного ее превышения за счет погрешностей и допусков системы контроля и управления) и обоснована возможность выгрузки активной зоны после МПА.

В соответствии с принятой классификацией по безопасности реактор относится к устройствам нормальной эксплуатации и обеспечивает осуществление технологи-

ческих процессов в нормальных условиях эксплуатации (разогрев, выход на мощность, работу на мощности, останов, расхолаживание и перегрузку топлива). Срок службы оборудования реактора – 30 лет. Расчетный срок службы корпуса и крышки реактора – 40 лет.

В табл. 3.4 указаны основные технические характеристики реактора ВВЭР-1000.

Таблица 3.4

**Основные технические характеристики реактора ВВЭР-1000**

Технические характеристики	Значение
Тепловая мощность номинальная, МВт	3000
Тепловая мощность предельно допустимая (с учетом неточности измерения, пределов регулирования, защиты и динамической погрешности), МВт	3210
Давление теплоносителя на выходе из реактора, МПа	16,0±3
Количество ТВС в активной зоне реактора, шт. из них с ПЭЛ	163 61
Расход теплоносителя через реактор при работе четырех ГЦН, м <sup>3</sup> /ч	84 800 <sup>+4000</sup> <sub>-4800</sub>
Скорость теплоносителя первого контура, м/с: между твэлами в патрубках реактора	5,6 10
Среднее время прохождения теплоносителя через реактор при работе четырех ГЦН, с	4
Средний подогрев теплоносителя в реакторе при работе ГЦН, °С	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 четырех ГЦН, °С	30,5
Средняя объемная энергонапряженность активной зоны, кВт/л	115
Площадь теплоотдачи в активной зоне, м <sup>2</sup>	5220
Количество каналов измерения энерговыделения в активной зоне реактора, шт.	64
Количество каналов измерения температуры в реакторе, шт. из них под крышкой реактора	98 3
Рабочая скорость перемещения РО СУЗ регулирования, см/с	2
Наружный диаметр корпуса реактора, мм	4535
Высота реактора в сборе, мм	19 137
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

В табл. 3.5 указаны некоторые проектные пределы по теплогидравлическим характеристикам для режимов нормальной эксплуатации.

Таблица 3.5

Теплогидравлические характеристики режимов эксплуатации

Показатели	Значение
Расход теплоносителя через ТВС, м <sup>3</sup> /ч	515 (+ 55)
Доля протечек теплоносителя, не участвующего в теплоотводе из активной зоны реактора, %	3
Максимальная мощность ТВС, МВт	27
Максимальный тепловой поток с твэла, Вт/см	448
Коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи по тепловому потоку	1,19 с вероятностью не менее 95 %
Максимальная температура топлива в твэле, °С	1690
Максимальная температура поверхности оболочки твэла, °С	350

**Корпус реактора** (рис. 3.6) предназначен для размещения внутрикорпусных устройств (ВКУ) и активной зоны реактора. Теплоносителем и замедлителем в корпусе реактора является химически очищенная вода с концентрацией борной кислоты 0–16 г/кг.

При конструировании и изготовлении корпусов ВВЭР ставится задача обеспечения многолетней (до 40 лет) надежной эксплуатации реактора в различных режимах. Корпус реактора работает в очень жестких условиях: высокие давление и температура теплоносителя, мощные потоки радиоактивного излучения, значительные скорости теплоносителя, который даже при высокой степени чистоты является коррозионно-активной средой.

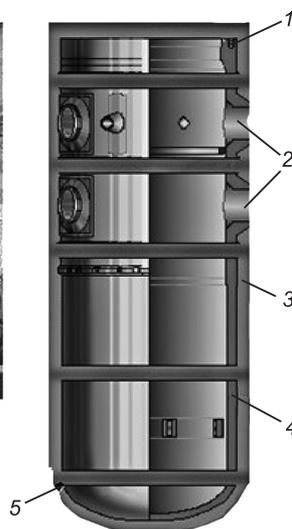
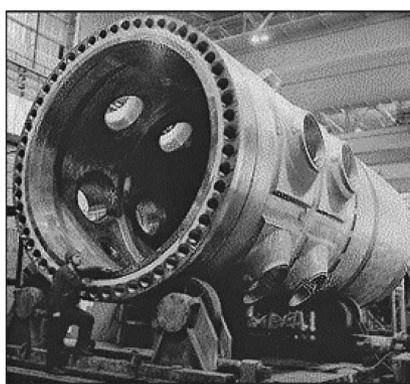


Рис. 3.6. Общий вид корпуса реактора:

1 – фланец; 2 – обечайки зоны патрубков; 3 – опорная обечайка; 4 – нижняя обечайка; 5 – эллиптическое днище

В конструкции корпуса реактора реализованы следующие требования нормативно-технической документации:

- расчетный срок службы корпуса (с крышкой) – 40 лет; наработка до отказа – не менее 24 000 ч (под отказом понимаются восстанавливаемые повреждения корпуса типа: течь разъемного соединения, течь штуцера, задиры резьбы и т.д.);
- обеспечение надежной и безопасной эксплуатации в течение расчетного срока службы;
- возможность осмотра, контроля основного металла и сварных соединений неразрушающими методами дефектоскопии и дезактивации внутренней поверхности;
- учет изменений физико-механических свойств материала корпуса под действием радиоактивного излучения и температуры;
- учет всех возможных при эксплуатации силовых, температурных и сейсмических воздействий.

В расчете корпуса реактора на прочность учтены изменения параметров во всех проектных режимах (нормальные условия эксплуатации, нарушение нормальных условий эксплуатации, аварийные условия эксплуатации) и обоснован расчетный ресурс, его надежность и безопасность. Для обеспечения возможности выполнения контроля внутренней поверхности корпуса реактора внутрикорпусные устройства (шахта с выгородкой и БЗТ) выполнены съемными.

Корпус реактора ВВЭР-1000 (рис. 3.7) представляет собой сварной цилиндрический сосуд высокого давления с эллиптическим днищем. Корпус состоит из фланца, зоны патрубков, опорной обечайки, цилиндрической части и эллиптического днища.

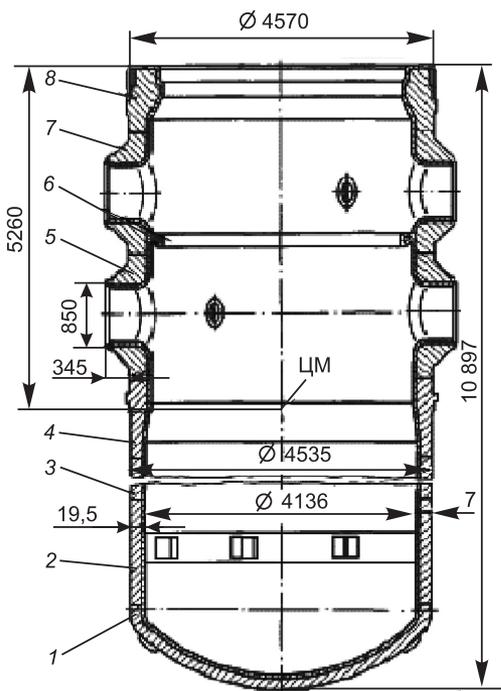


Рис. 3.7. Корпус реактора ВВЭР-1000:

1 – днище; 2 – нижняя обечайка; 3 – верхняя обечайка; 4 – опорная обечайка; 5 – нижняя обечайка зоны патрубков; 6 – разделительное кольцо; 7 – верхняя обечайка зоны патрубков; 8 – фланец

Фланец и все обечайки выполнены цельноковаными, днище – штампованное из заготовки. Патрубки Ду850 вытянуты из основного металла обечайки зоны патрубков методом «горячей» штамповки. В качестве основного материала корпусов реакторов применена аттестованная для корпусов и трубопроводов сталь 15X2НМФА и 15X2НМФА-А с легирующими добавками хрома, молибдена, ванадия, никеля. Габариты корпуса реактора: высота – 10 897 мм, диаметр наружный по фланцу – 4570 мм, диаметр по цилиндрической части – 4535 мм, толщина цилиндрической части корпуса (без наплавки) – 192,5 мм, размер в плане по патрубкам – 990×70–5260 мм, масса корпуса – 320 т.

На внутренней поверхности фланца выполнен борт для опирания шахты. На верхнем торце фланца имеются резьбовые гнезда (54 шт. М 170×6) под шпильки главного разъема и кольцевые канавки для размещения прутковых уплотнительных прокладок.

Зона патрубков состоит из двух обечайек, в каждой из которых имеется

по четыре главных циркуляционных патрубка Ду850 – в нижней обечайке для входа теплоносителя, в верхней – для выхода. На уровне осей верхнего и нижнего рядов патрубков Ду850 расположены по два (всего четыре) отверстия с патрубками Ду350 для организации аварийного охлаждения активной зоны реактора.

Патрубки Ду850 (рис. 3.8, 3.9) выполнены методом штамповки и не требуют приварки промежуточных втулок при изготовлении корпуса реактора. На патрубках САОЗ и трубке КИП в процессе изготовления корпуса с помощью электрошлаковой сварки устанавливаются промежуточные втулки. В патрубках САОЗ также дополнительно установлены тепловые рубашки для защиты корпуса в зоне патрубков от низкой температуры в аварийных режимах.

При возникновении аварии, связанной с большой течью первого контура, в реактор поступает вода из САОЗ, которая без принятия специальных мер будет иметь температуру порядка 30 °С. В настоящее время ведутся работы по установке нагревательных элементов в емкостях САОЗ с целью поддержания температуры среды в них на уровне 55 °С, что вызвано необходимостью защиты корпуса реактора в аварийных режимах от резких перепадов температур.

На уровне верхнего ряда патрубков Ду850 выполнен один патрубок Ду250 для вывода импульсных линий из корпуса реактора. Каждая импульсная линия на выходе из патрубка имеет отключающее устройство. Из корпуса реактора В-320 выведено девять импульсных линий (две трубки – для подсоединения к уровнемеру, шесть трубок – для активной зоны и перепада на АЗ, одна – для отбора проб). Внутри корпуса к облицовке приварены нержавеющие детали для организации крепления трубок.

Во время перегрузки топлива при извлеченных шпильках для исключения попадания борного раствора в гнезда шпилек устанавливаются резьбовые заглушки, которые предусмотрены в объеме поставки.

Для защиты шпилек главного разъема при заполнении борным раствором бетонной шахты при перегрузках топлива предусмотрены защитные чехлы для шпилек.

Для контроля протечек главного уплотнения (рис. 3.10) в теле фланца выполнены сверления, заканчивающиеся резьбовыми отверстиями, в которых установлены штуцеры для подсоединения трубопровода контроля протечек между прокладками.

На внутренней поверхности верхней обечайки зоны патрубков ниже уровня патрубков Ду850 приварено кольцо – разделитель потока теплоносителя. Внутренний диаметр кольца выбран из условия нулевого натяга между ним и шахтой реактора при рабочей температуре для сведения к минимуму перетечки из «холодных» в «горячие» петли, минуя активную зону реактора (в холодном состоянии этот зазор равен 6 мм).

Вся внутренняя поверхность корпуса покрыта антикоррозийной наплавкой толщиной 7–9 мм. В районах соприкосновения с крышкой, шахтой, прокладкой, в местах приварки кронштейнов, деталей крепления трубок КИП, на внутренней поверхности всех патрубков антикоррозийная наплавка имеет толщину не менее 15 мм. На наружной поверхности фланца нанесена наплавка для приварки разделительного сильфона. На внутренней поверхности корпуса в нижней части приварены восемь скоб-кронштейнов, к которым на монтаже привариваются шпонки, сопрягаемые с пазами в шахте и обеспечивающие закрепление ее от вибрации.

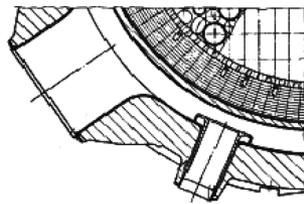


Рис. 3.8. Конструкция патрубков реактора: сечение по «горячим» патрубкам

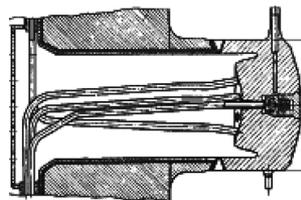


Рис. 3.9. Патрубок для вывода линий КИП из корпуса реактора («звездочка»)

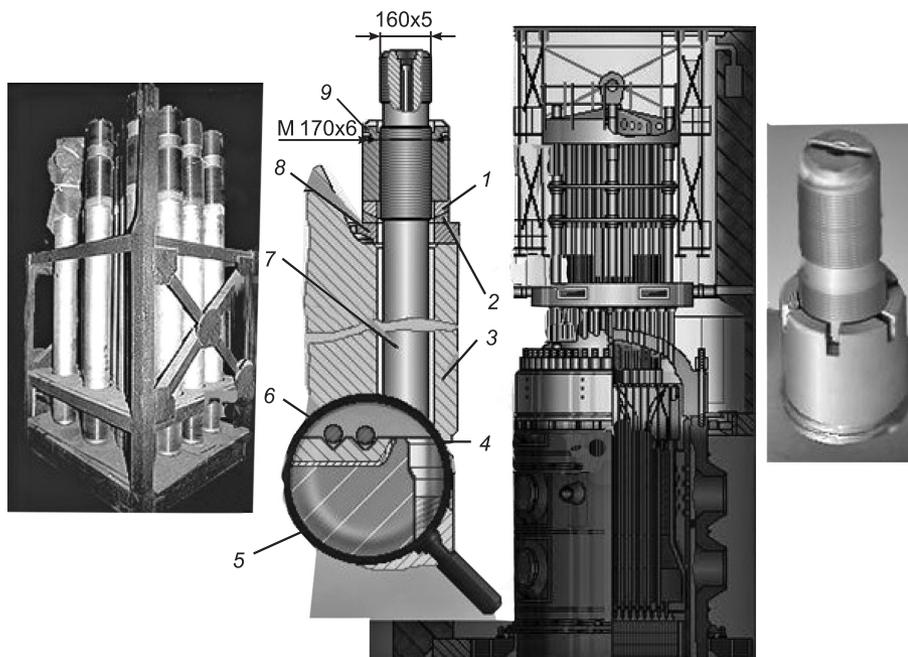


Рис. 3.10. Главное уплотнение:

1, 2 – шайба; 3 – крышка; 4 – стержень контроля вытяжки шпильки; 5 – корпус; 6 – прокладка; 7 – шпилька; 8 – сектор; 9 – гайка

Плотность главного разъема обеспечивается путем обжатия двух никелевых прутковых прокладок (диаметр 5 мм), которые устанавливаются в место контакта фланцев крышки и корпуса в V-образные кольцевые канавки на фланце корпуса.

Затяжка шпилек производится с помощью гайковерта, работающего по принципу вытяжки шпилек со свободным доворачиванием гаек. Усилие затяжки шпилек должно быть на 20–25 % больше усилия, создаваемого внутренним давлением на крышку реактора. Гайковерт снабжен гидравлическими домкратами, подвижная часть которых навинчивается на выступающие концы шпилек. За счет давления рабочей жидкости домкраты растягивают шпильки на величину, необходимую для правильной затяжки главного разъема. Контроль вытяжки шпилек ведется по измерительному стержню, помещенному во внутреннюю полость шпильки.

Снаружи корпуса под нижним рядом патрубков Ду850 выполнен опорный бурт. Корпус реактора устанавливается в проектное положение опорным буртом на кольцо упорное и фиксируется на нем с помощью шпонок. На опорном бурте корпуса выполнено 22 выреза в продольном направлении. Вырезы на опорном бурте одновременно обеспечивают допускаемый железнодорожный габарит. Упорное кольцо через 30 опорных узлов опирается на опорные плиты опорной фермы. Каждый опорный узел состоит из парных клиньев, фиксатора с клином и двумя вкладышами. С помощью клиньев производится подгонка опорного кольца по высоте. Фиксаторы, входя в пазы опорного кольца, удерживают его от проворачивания и любых других смещений в горизонтальной плоскости. Корпус реактора своим буртом опирается на опорное кольцо через прокладку. От перемещения в горизонтальной плоскости корпус удерживается шпонками.

Схема установки реактора в шахте приведена на рис. 3.11.

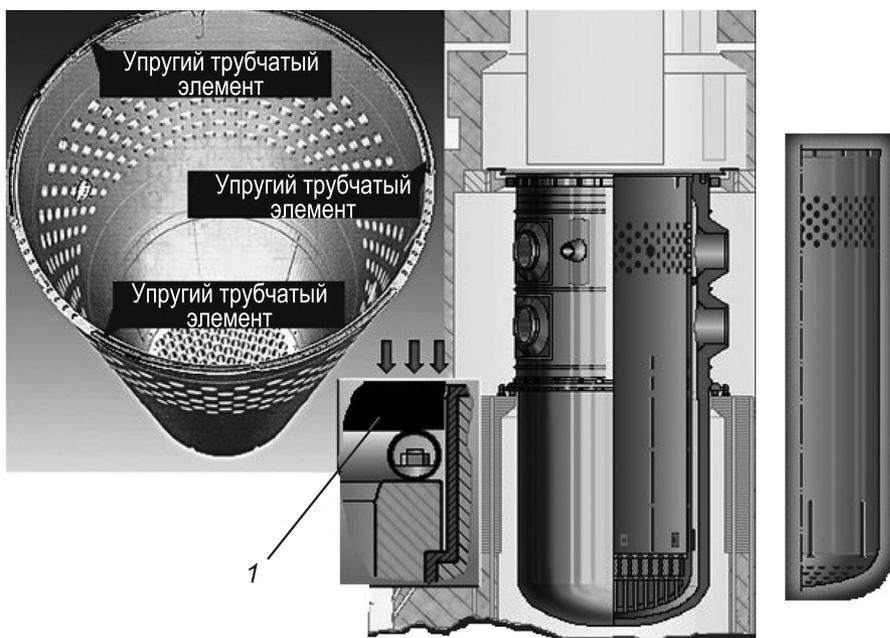


Рис. 3.11. Схема установки реактора в шахте:  
1 – крышка корпуса реактора

Для фиксации корпуса реактора относительно бетонной шахты служит упорное кольцо (рис. 3.12). Оно представляет собой точеное кольцо с прорезями под закладные детали (шпонки) бетонной консоли шахты реактора. Посадка упорного кольца на фланец корпуса реактора обеспечивается за счет установки клиньев, а на шпонки бетонной консоли – за счет костылей, подгонка которых осуществляется по месту с последующей приваркой к шпонкам. Монтаж опорного кольца представлен на рис. 3.13.

Корпус реактора по высоте имеет шесть кольцевых сварных швов между обечайками и днищем. Днище корпуса выполнено из двух предварительно сваренных листовых заготовок методом штамповки. На наружной поверхности днища корпуса в четырех местах по кольцевому поясу выполнена наплавка для приварки кольцевой конструкции на период транспортирования корпуса реактора по железной дороге.

Одинаковый наружный диаметр корпуса реактора (4535 мм) по высоте активной зоны позволяет проводить дистанционно ультразвуковой контроль сварных швов и материала корпуса в районе активной зоны и днища.

На корпусе реактора крепление направляющих для передвижения устройства ультразвукового контроля (УЗК) кольцевых швов в зоне патрубков конструктивно выполнено путем наплавки (16 мест) с наружной стороны корпуса в зоне патрубков и приварки к ним фигурных платиков для крепления направляющих.

С наружной стороны двух обечаек в районе активной зоны в шести местах выполнены наплавки размером 60×50×10 мм для установки термометров сопротивления для оперативного контроля температуры стенки корпуса реактора. Контроль температуры металла корпуса предусмотрен также в районе зоны патрубков.

На торцах всех патрубков корпуса произведена наплавка и обработка присоединительных размеров в зависимости от метода сварки со стыкуемыми трубопроводами.

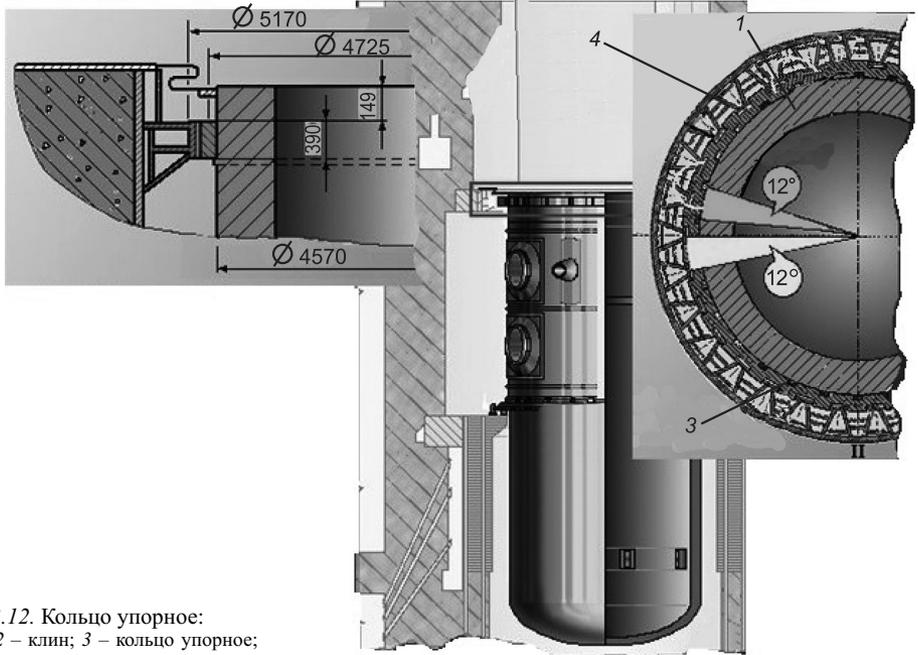


Рис. 3.12. Кольцо упорное:  
 1 – корпус; 2 – клин; 3 – кольцо упорное;  
 4 – кронштейн фермы упорной

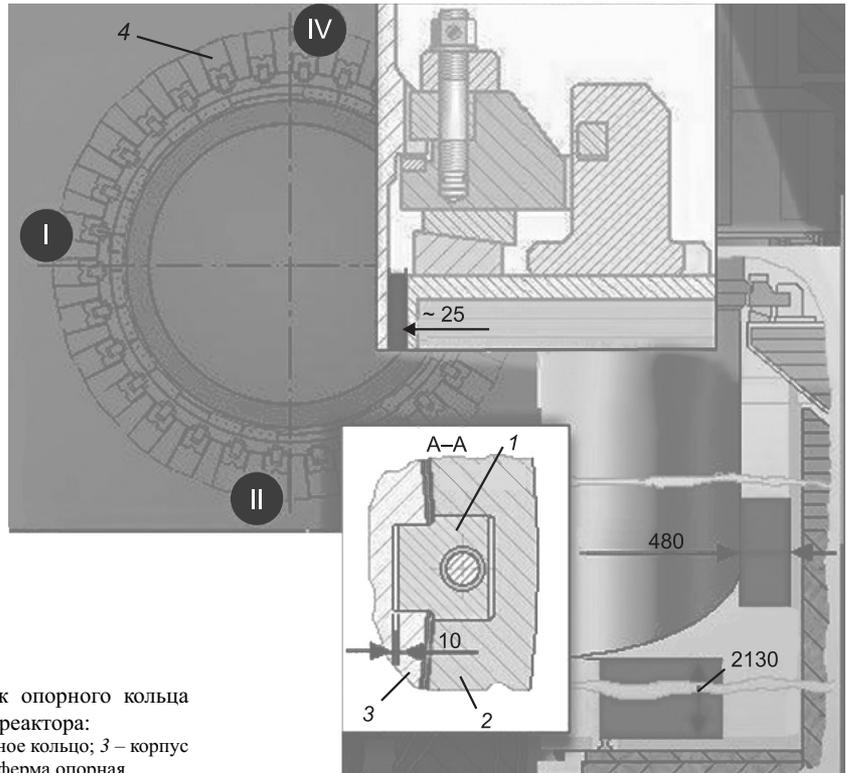


Рис. 3.13. Монтаж опорного кольца  
 корпуса реактора:  
 1 – шпонка; 2 – опорное кольцо; 3 – корпус  
 реактора; 4 – ферма опорная

Максимальный наружный диаметр корпуса реактора 4690 мм (диаметр опорного бурта) выбран из расчета транспортирования корпуса реактора. При этом транспортирование корпуса реактора на железнодорожном транспортере возможна, когда оси двух пар патрубков Ду850 расположены под углом  $55^\circ$ .

С завода-изготовителя на АЭС корпус реактора транспортируется по железной дороге специальным железнодорожным транспортером.

Для получения информации об изменении механических свойств и критической температуры хрупкости металла корпуса под воздействием нейтронного потока и температуры служат образцы-свидетели (рис. 3.14). На них исследуются основной металл, металл сварного шва и металл околошовной зоны (зоны термического влияния) обечаек, расположенных против активной зоны.

Заготовки для образцов-свидетелей изготавливаются одновременно с выполнением сварных стыков обечаек в районе активной зоны корпуса реактора теми же исполнителями, теми же методами, из того же металла и той же партии сварочных материалов.

Заготовки для образцов-свидетелей вырезаются механическим способом из основного металла, металла сварного шва, из зоны термического влияния сварного соединения, отбираются из разных слоев по толщине стенки обечайки.

Образцы-свидетели устанавливаются и закрепляются неподвижно по несколько штук в герметические металлические (из стали 08X18H10T) ампулы. Ампулы с различными образцами имеют одинаковую наружную форму в виде цилиндра наружным диаметром 29 мм, длиной 72 мм, на торцах цилиндра с каждой стороны есть круглые штыри высотой 6 мм, предназначенные для крепления ампул в сборке. Ампулы с образцами-свидетелями соединяются в сборки.

Сборки бывают двух типов. Сборки с «лучевыми» образцами-свидетелями устанавливаются и с помощью байонетных захватов закрепляются в торцах 18 труб

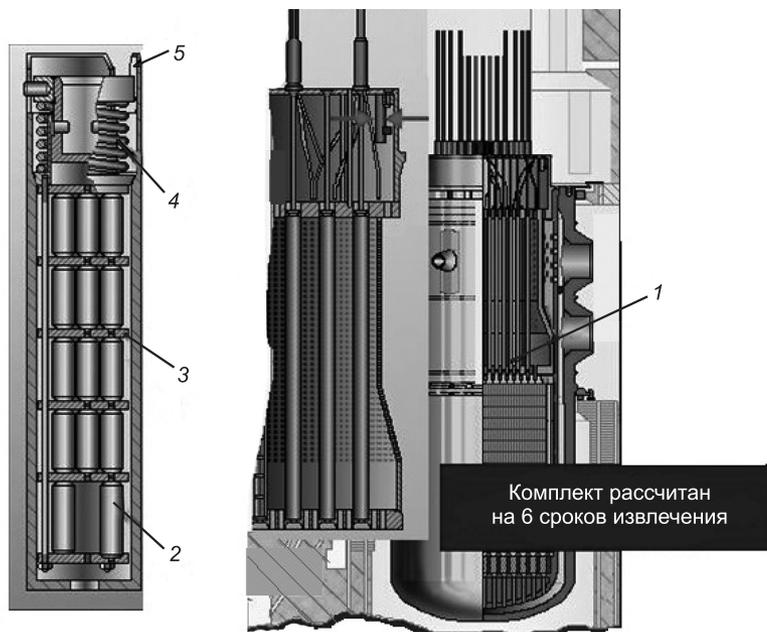


Рис. 3.14. Образцы-свидетели:

1 – блок защитных труб; 2 – контейнер образцов-свидетелей; 3 – сборка; 4 – пружинный блок; 5 – труба на БЗТ

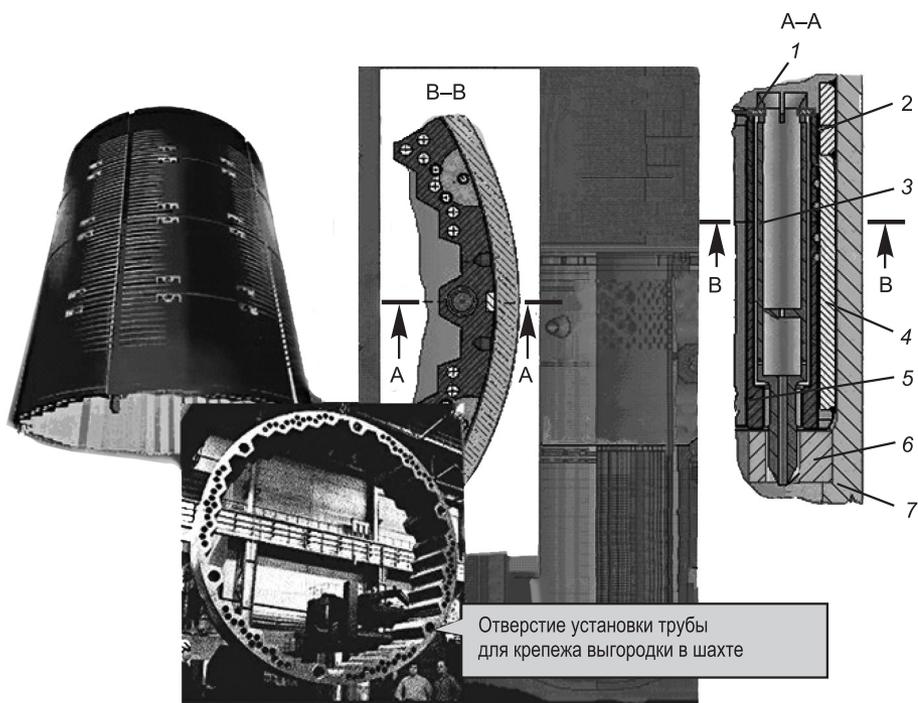


Рис. 3.15. Верхняя часть выгородки:

1 – шайба; 2 – шпонка; 3 – труба; 4 – вытеснитель; 5 – выгородка; 6 – дистанционирующая решетка; 7 – шахта

в верхней части выгородки (рис. 3.15). Шесть сборок с «тепловыми» образцами-свидетелями устанавливаются в блоке защитных труб, при этом трубы для сборок привариваются в монтажных условиях к внутренней части обечайки блока защитных труб.

Сборки с «лучевыми» образцами-свидетелями объединены в комплекты, в каждый из которых входят три сборки с «лучевыми» образцами-свидетелями. Количество комплектов для реактора В-320 составляет шесть штук.

Заводская маркировка комплектов «лучевых» сборок принята буквой Л (1Л–6Л), комплектов «тепловых» сборок – буквой М (1М–6М). Образцы-свидетели устанавливаются в реактор до проведения физического пуска.

Как было указано ранее, для корпусов реакторов ВВЭР-1000 предусмотрена система наружного осмотра и неразрушающего УЗК корпуса.

Система состоит из подсистемы УЗК и телевизионного осмотра цилиндрической части днища корпуса реактора, подсистемы УЗК сварных швов зоны патрубков.

**Верхний блок реактора** (рис. 3.16) предназначен для размещения приводов СУЗ, герметизации главного разъема корпуса реактора, герметизации выводов датчиков внутриреакторного контроля и удержания от вертикальных перемещений вверх БЗТ, шахты реактора и ТВС. Верхний блок представляет собой конструкцию, состоящую из крышки с патрубками, металлоконструкций с траверсой и установленных в патрубках приводов СУЗ, с герметизацией выводов разъемов датчиков внутриреакторного контроля. Материалы верхнего блока: крышка – сталь 15Х2НМФА с антикоррозионной наплавкой поверхностей, контактирующих с теплоносителем первого контура; детали, контактирующие с теплоносителем первого контура – сталь 08Х18Н10Т; металлоконструкции, не контактирующие с теплоносителем первого контура (кроме

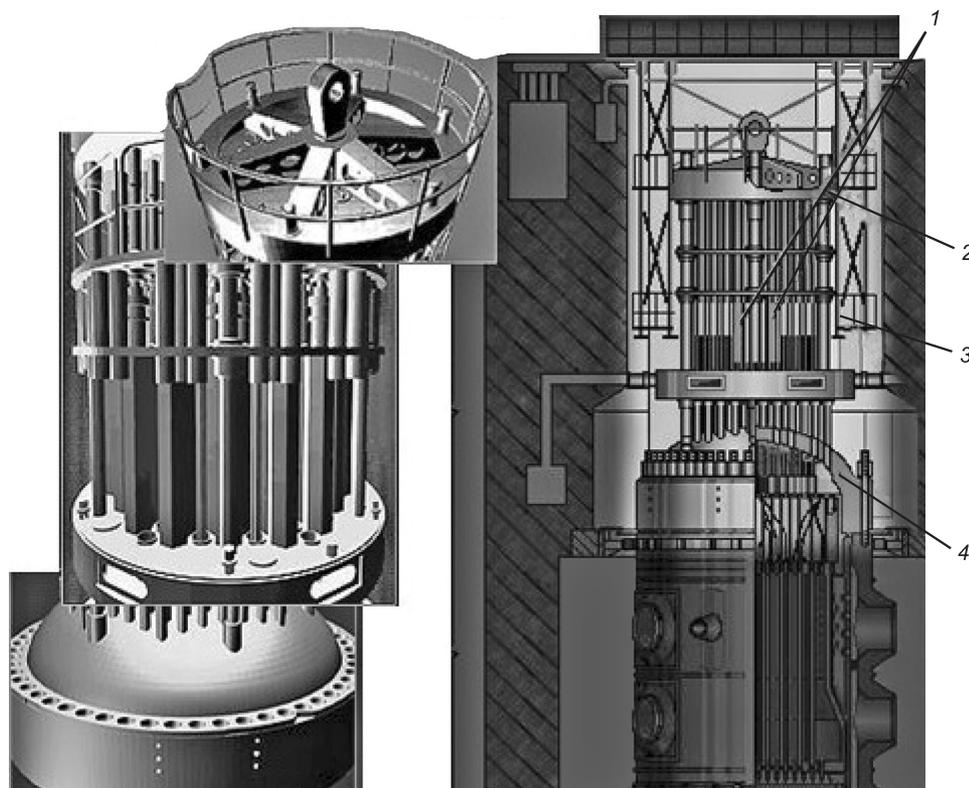


Рис. 3.16. Верхний блок реактора:  
1 – приводы СУЗ; 2 – траверса; 3 – металлоконструкция; 4 – крышка

приводов) – сталь типа ВСтЗ, остальные материалы привода типа шаговый электродвигатель (ШЭМ) – специальные материалы. Масса верхнего блока – 116 т.

Крышка реактора (рис. 3.17) имеет тарельчатую форму и представляет собой штампованную конструкцию, состоящую из «усеченного» эллипсоида и фланца.

На крышке (рис. 3.18) расположены 61 патрубок приводов СУЗ (типа ШЭМ), служащие для крепления корпусов статоров приводов и прохода захватов органов СУЗ, 14 патрубков температурного контроля (ТК) для выводов датчиков температурного контроля и 16 патрубков электровыхода (патрубок КНИ) для вывода зондов, измеряющих относительное распределение плотности потока нейтронов по активной зоне, патрубок воздушника реактора и шесть цилиндрических бобышек с резьбовыми гнездами для установки штанг металлоконструкции верхнего блока.

Все патрубки СУЗ, КНИ, ТК имеют одинаковые присоединительные размеры фланцевых разъемов с канавками для установки двух прокладок: никелевой – для собственно уплотнения разъема и асбестовой – для образования полости сбора протечек. Во всех фланцах указанных патрубков (91 патрубок) сделаны отверстия с трубочками, которые группируются и заводятся в шесть датчиков контроля плотности разъемов патрубков.

Во фланце крышки выполнены 54 сквозных отверстия для прохода шпилек главного разъема и резьбовые гнезда для закрепления системы центровки верхнего блока и промежуточного кольца. Крышка реактора относится к оборудованию первой категории сейсмичности.

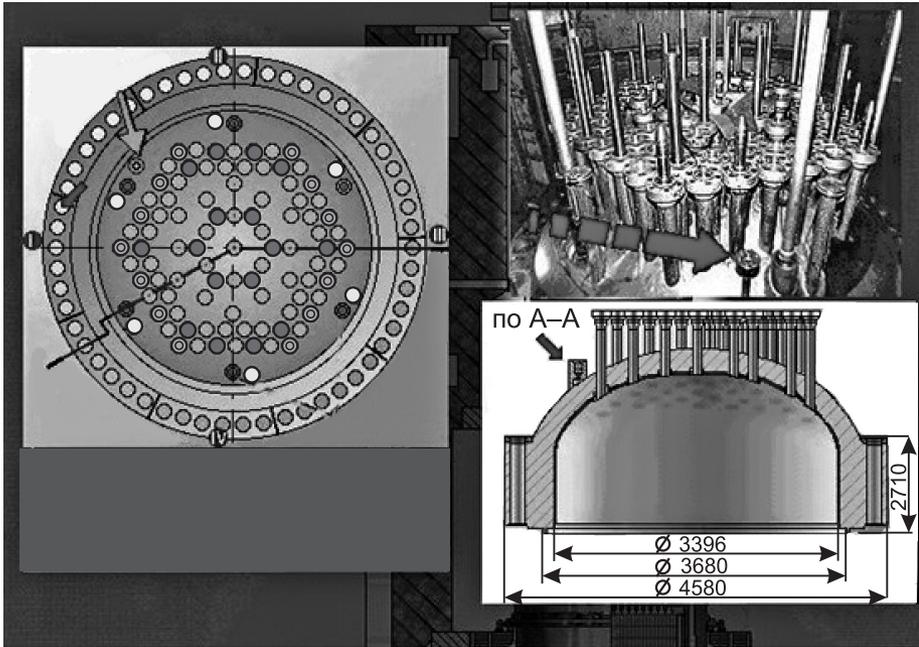


Рис. 3.17. Крышка реактора

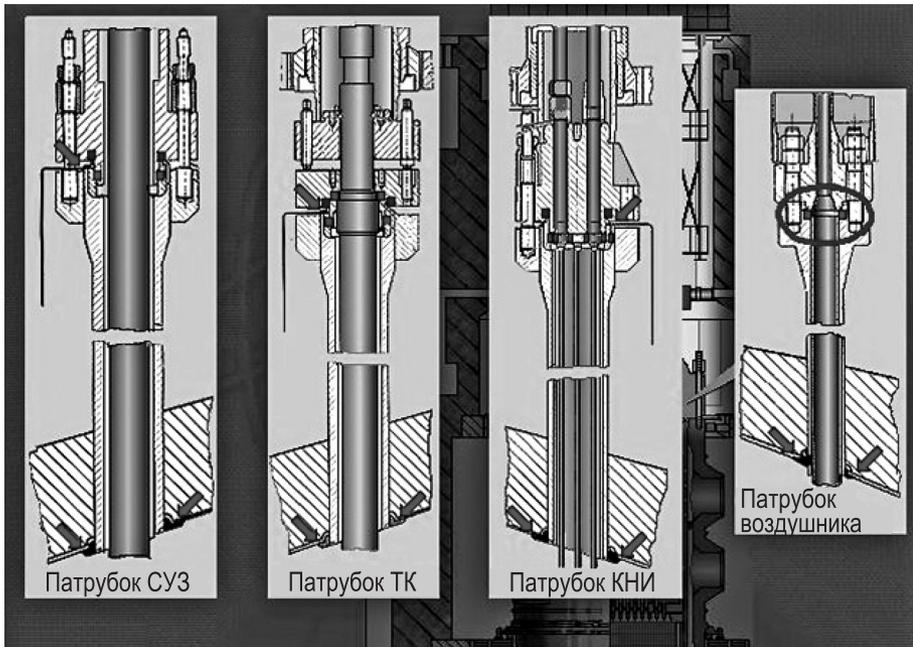


Рис. 3.18. Крышка реактора с патрубками

Каркас верхнего блока реактора состоит из граненого пояса, промежуточной плиты, нижней плиты, смонтированных на шести вертикальных трубах. На нижней и промежуточной плитах закреплен кожух. На кожухе установлены фланцы, к которым подсоединяются съемные патрубки. С другой стороны съемные патрубки подсоединяются к фланцам вентиляционной системы на облицовке бетонной шахты реактора.

На промежуточную плиту вертикально установлены 61 тонкостенная шестигранная нержавеющая труба, служащая для организации воздушного охлаждения блоков электромагнитов приводов СУЗ, и шесть коробок системы контроля плотности разъемов патрубков. Между нижней и промежуточными плитами установлены 16 кожухов, используемых для размещения кабельных проставок электровыводов при операциях монтажа и демонтажа верхнего блока, и семь труб для доступа к стойкам контроля плотности разъемов и к патрубку воздухоудаления.

Каркас устанавливается на шесть штанг, предварительно ввернутых до упора в резьбовые гнезда бобышек крышки реактора, и закрепляется втулками и гайками, а на вертикальные трубы каркаса устанавливается дистанционирующая решетка. Она служит для центровки приводов СУЗ и размещения датчиков указателя положения при операциях монтажа и демонтажа верхнего блока.

Упрощенная конструкция верхнего блока представлена на рис. 3.19.

**Шахта реактора (с днищем)** (рис. 3.20) предназначена для размещения в ней активной зоны, организации входного и выходного потоков теплоносителя.

Шахта и выгородка являются составной частью защиты металла корпуса реактора от воздействия нейтронного и  $\gamma$ -излучений, исходящих из активной зоны реактора.

Конструкция шахты и принцип ее закрепления в корпусе позволяют производить ее извлечение из корпуса для возможности осмотра внутренней поверхности и патрубков корпуса.

Шахта представляет собой цилиндрическую обечайку с фланцем и эллиптическим днищем (рис. 3.21), в котором закреплены 163 опорные трубы (стаканы) с шагом 236 мм. Верхние торцы образуют опорную поверхность для установки ТВС активной зоны. Габариты шахты: длина – 10 503 мм, диаметр наружный по фланцу – 3670 мм, толщина цилиндрической части – 60 мм, материал – сталь 08X18Н10Т, масса – 80,5 т.

Снаружи на фланце шахты имеются 12 пазов шириной 100 мм для ориентации ее по углу в плане. Шпонки, входящие в эти пазы, привариваются к внутренней поверхности фланца корпуса реактора.

Кривизна эллиптического днища шахты больше кривизны днища корпуса реактора. В днище шахты выполнены выступающие (примерно на 30 мм) упоры, что обеспечивает во всех проектных авариях (включая МПА) гарантированный зазор между днищем шахты и днищем корпуса для прохода теплоносителя в активную зону.

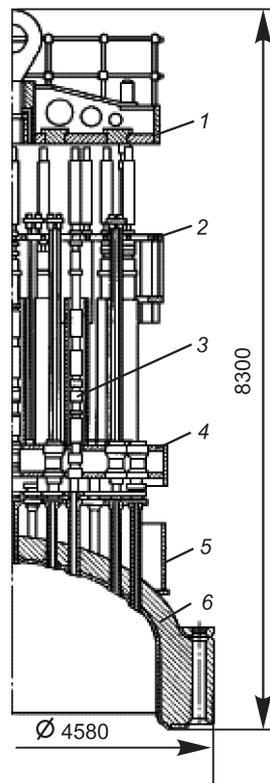
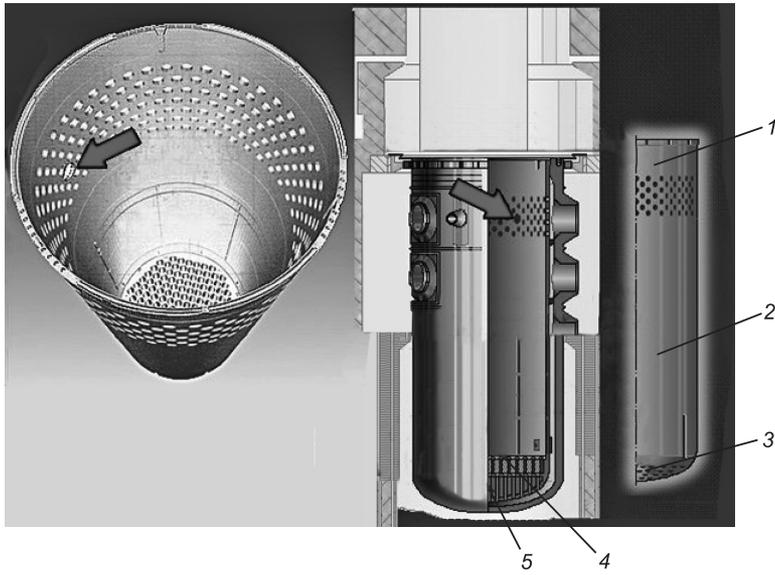
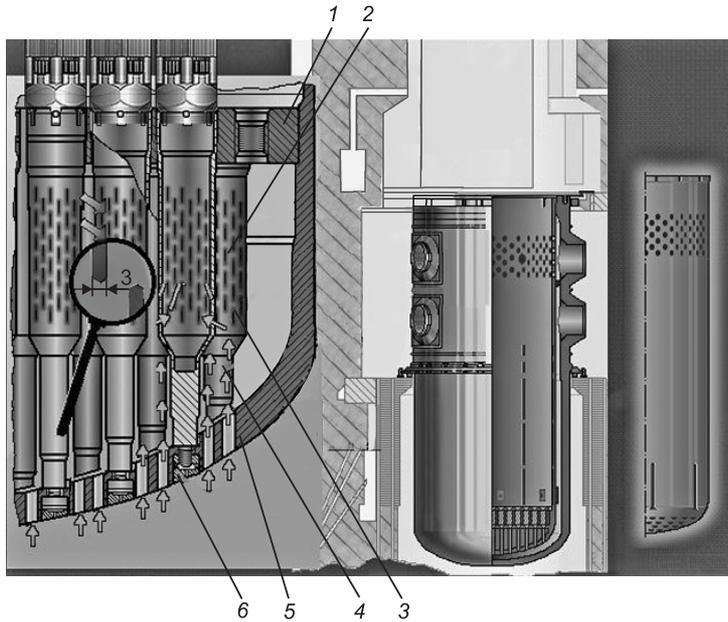


Рис. 3.19. Упрощенная конструкция верхнего блока:  
1 – траверса; 2 – дистанционирующая решетка; 3 – привод ШЭМ; 4 – каркас; 5 – обечайка; 6 – крышка



*Рис. 3.20.* Шахта реактора:

1 – верхняя перфорированная обечайка с фланцем; 2 – обечайка цилиндрической части; 3 – эллиптическое днище;  
4 – дистанционирующая решетка; 5 – опорные трубы ТВС



*Рис. 3.21.* Днище реактора с опорными стаканами:

1 – дистанционирующая решетка; 2 – опора ТВС; 3 – перфорированный стакан; 4 – хвостовик; 5 – днище шахты;  
6 – заглушка

Для разделения потоков «горячего» и «холодного» теплоносителя на наружной поверхности шахты выполнено кольцевое утолщение, контактирующее с внутренней поверхностью разделительного кольца корпуса реактора. Величина зазора между утолщением шахты и внутренней поверхностью разделительного кольца выбирается из условия минимальных напряжений и протечек при разогреве узлов реактора (разделительное кольцо с шахтой при рабочих параметрах имеет нулевой натяг).

Внутри нижней обечайки шахты выполнена кольцевая расточка для установки граненого пояса, который предназначен для ориентации верхней части опорных труб, установки на него и закрепления выгородки. Граненый пояс крепится к днищу шахты с помощью 12 штифтов диаметром 60 мм с последующей их обваркой с наружной стороны шахты. В граненом поясе шахты реактора имеются следующие вертикальные отверстия: шесть отверстий с резьбой М85, три отверстия с переходным диаметром 86×50 мм, 27 отверстий с переходным диаметром 11,5×30 мм, 54 отверстия с переходным диаметром 8×30 мм. Отверстия служат ориентиром при установке выгородки, закреплении ее, организации охлаждения элементов выгородки, размещении образцов-свидетелей корпусной стали («лучевых» сборок) и обеспечении железобетонного соотношения по высоте выгородки.

Крайние стаканы дистанционированы с помощью граненого пояса, укрепленного на нижнем бурте цилиндрической части шахты. Упорные стаканы установлены с шагом 236 мм и выполнены в виде перфорированных труб, верхняя часть которых представляет собой шестигранные призмы с центральными отверстиями диаметром 195 мм. В них устанавливаются хвостовики кассет.

На торце каждого стакана имеются пазы для ориентации кассеты с помощью фиксирующего штыря в плане. Перфорация труб выполнена в виде узких щелей (ширина – 3 мм, длина – 30 мм), что способствует задержанию из потока теплоносителя твердых частиц и защите твэлов от механических повреждений.

Хвостовики стаканов закреплены неподвижно в эллиптическом днище шахты, а шестигранные призмы – друг относительно друга с помощью отжимных винтов М36 и сварки. Основной поток теплоносителя в шахту поступает в имеющиеся отверстия в днище и распределяется по ТВС через перфорированную часть опорных труб. Профиль опускной щели между днищем шахты и внутренней поверхностью корпуса, а также степень перфорации шахты выбраны таким образом, чтобы пульсации и неравномерности скоростей потока теплоносителя перед входом в активную зону были минимальными.

В эллиптическом днище и в верхней части шахты выполнена перфорация для прохода теплоносителя. Против верхних патрубков САОЗ корпуса в шахте выполнены два отверстия Ду300, через которые вода, подаваемая в реактор при аварии, проходит в межтрубное пространство БЗТ.

Своим верхним фланцем шахта устанавливается на внутреннюю проточку в горловине корпуса и центрируется кольцом – разделителем потока, сверху удерживается от перемещений в плане шпонками, приваренными к фланцу корпуса. Нижняя часть шахты удерживается от вибрации шпонками, приваренными к виброгасителям корпуса и входящими в вертикальные пазы шахты.

На горизонтальной поверхности фланца шахты размещены три торовых сектора, изготовленные из нержавеющей труб диаметром 63×5 мм, наружная и внутренняя поверхности которых отполированы, и закреплены тремя шпильками М20 каждый. Закрепление шахты в верхней части обеспечено посредством упругих элементов из труб диаметром 63×5 мм и шпонок, закрепленных на фланце корпуса. При затяжке главного уплотнения реактора эти трубы упруго деформируются, создавая распорное усилие между крышкой и шахтой. Во фланце выполнено 24 резьбовых гнезда М48,

предназначенных для закрепления устройства для подрыва и транспортировки крышки в вертикальном положении.

Снаружи на фланце шахты имеются 12 пазов шириной 100 мм для ориентации ее по углу в плане. Шпонки, входящие в эти пазы, привариваются к внутренней поверхности фланца корпуса, на которой имеются три направляющих паза длиной 410 мм для ориентации установки блока защитных труб и устройства для транспортировки шахты.

В верхней части шахты выполнены отверстия для прохода теплоносителя в выходные патрубки Ду850 корпуса реактора. Напротив верхних тепловых рубашек патрубков САОЗ в шахте выполнены два отверстия диаметром 300 мм, через которые борный раствор подается в активную зону реактора при срабатывании запорной арматуры на трубопроводах САОЗ.

На наружной части обечайки с днищем выполнены восемь продольных пазов шириной 100 мм, оканчивающихся сквозными окнами. Окна предназначены для установки шпонок по месту на скобы-кронштейны, приваренные при изготовлении корпуса к внутренней наплавке корпуса реактора. Такая конструкция шахты обеспечивает тепловое перемещение ее вниз и закрепление от вибрации.

Закрепление шахты в средней части обеспечено посредством прижатия (защемления) ее по периметру к разделительному кольцу корпуса при разогреве шахты. Нижняя часть шахты фиксируется в плане шпонками, закрепленными на кронштейнах, приваренных к цилиндрической части корпуса.

От перемещений вверх (всплытие и вибрация) при работе насосов шахту удерживают упругие элементы из труб диаметром 63×5 мм. От вибрации в поперечном направлении шахта удерживается в трех сечениях, от падения вниз – фланцем и упорами на днище. Закрепление верхней части шахты в корпусе допускает температурные осевые и радиальные перемещения ее относительно корпуса. Один раз в четыре года шахта должна выниматься из корпуса и подвергаться полному профилактическому осмотру, а при необходимости и ремонту в специальной шахте ревизии ВКУ.

В шахте реактора на ее внутренней части на высоту выгородки привариваются шесть вертикальных рядов вытеснителей, которые служат направляющими при установке и извлечении выгородки из шахты. На наружной цилиндрической части выгородки реактора В-320 имеются соответствующие продольные пазы. Крепление выгородки от вертикального перемещения производится шестью трубами, которые ввертываются в граненый пояс шахты, а в верхней части стопорящие гайки труб привертываются к выгородке.

Подытожив выше изложенное, можно сделать вывод, что в обоснование функциональной работоспособности внутрикорпусной шахты приняты следующие конструктивные решения:

- кривизна эллиптического днища шахты больше кривизны днища корпуса, в днище шахты выполнены выступающие упоры. Это обеспечивает во всех проектных авариях (включая МПА) гарантированный зазор между днищем шахты и днищем корпуса для прохода теплоносителя в активную зону;
- пазы в опорных трубах шахты (и на плите БЗТ) под фиксирующие штыри ТВС обеспечивают четкое ориентирование ТВС в плане;
- опорные трубы передают на эллиптическое днище равномерно распределенные нагрузки от ТВС активной зоны, что особенно существенно при возникновении больших перепадов давления на ВКУ в аварийных ситуациях, например, при разрыве входного трубопровода Ду850;
- верхняя перфорированная обечайка шахты обеспечивает свободный вход в межтрубное пространство БЗТ воды из САОЗ.

**Блок защитных труб** предназначен для фиксации и дистанционирования головок тепловыделяющих сборок, удерживания тепловыделяющих сборок от всплытия во всех режимах работы реактора, включая аварийные ситуации, защиты органов регулирования и штанг приводов системы управления и защиты реактора от воздействия потока теплоносителя (скорость теплоносителя в ТВС до 6 м/с), обеспечения разводки направляющих каналов системы внутриреакторного контроля, обеспечения равномерного выхода теплоносителя по сечению активной зоны, размещения сборок «тепловых» образцов-свидетелей.

Блок защитных труб (рис. 3.22) представляет собой сварную металлоконструкцию, состоящую из верхней, средней и нижней плит, связанных между собой перфорированным корпусом и защитными трубами СУЗ, каналов ВРК (ТК и КНИ). Габариты БЗТ: высота – 8228 мм, диаметр наружный по опорному фланцу – 3550 мм, материал – сталь 08Х18Н10Т, масса – 50 т.

В 61 защитную трубу диаметром 180 мм установлены направляющие каркасы, в которых с помощью приводов СУЗ перемещаются траверсы с регулирующими стержнями (рабочие органы СУЗ).

В каждом каркасе защитной трубы предусмотрен плотный чехол для установки термоэлектрического термометра. Всего в БЗТ размещено 98 таких чехлов, в том числе три чехла для замера температуры теплоносителя под крышкой реактора.

Над верхней плитой БЗТ плотные чехлы термометров объединены в 14 стояков ТК, которые расположены на периферийной части БЗТ и проходят через периферийные трубки в крышке верхнего блока. В стояке находится семь плотных каналов ТК.

Радиусы гибов каналов составляют не менее 600 мм. Чтобы исключить попадание раствора борной кислоты в плотные каналы ТК при извлечении и установке БЗТ

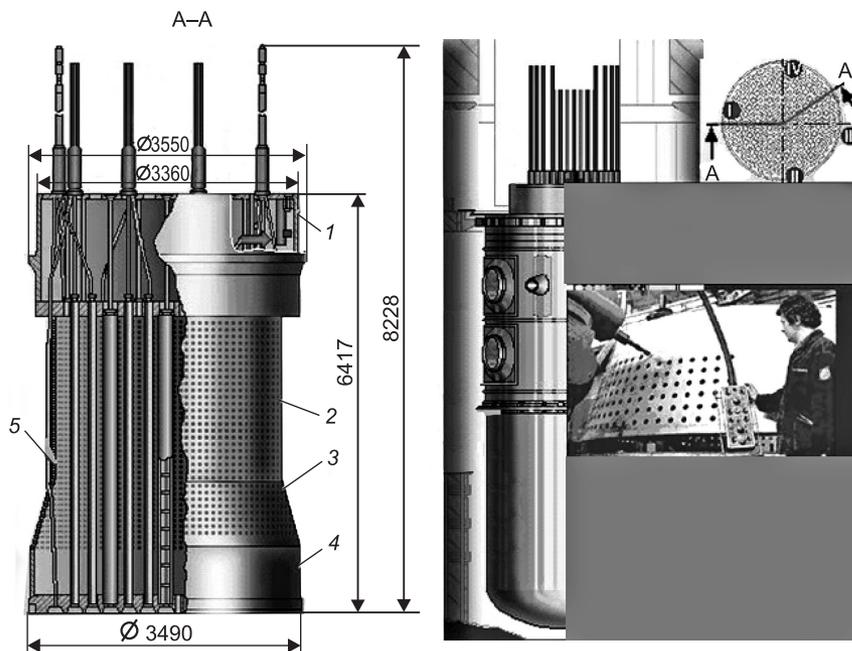


Рис. 3.22. Блок защитных труб:

1 – верхняя обечайка; 2 – верхняя часть; 3 – средняя часть; 4 – нижняя часть; 5 – перфорированная обечайка

в реактор, до заполнения шахты реактора раствором борной кислоты на стояки ТК устанавливаются заглушки, с помощью которых уплотняются верхние части стояков ТК и производится проверка их плотности давлением азота 0,17 МПа с обмыливанием мест уплотнения.

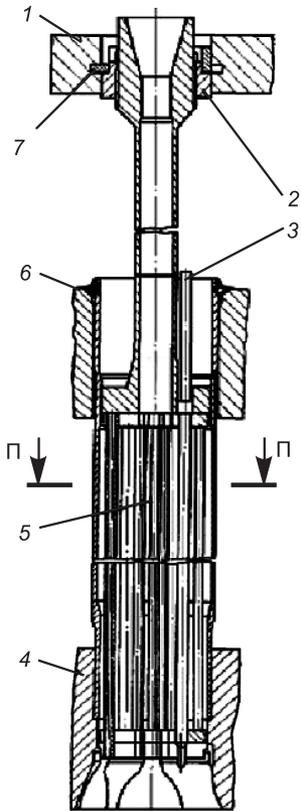


Рис. 3.23. Защитная труба СУЗ: 1 – верхняя плита БЗТ; 2 – гайка; 3 – чехол под установку термопары ВРК; 4 – нижняя плита БЗТ; 5 – направляющий каркас для кластера; 6 – средняя плита БЗТ; 7 – вкладыш

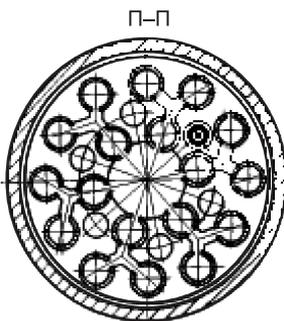


Рис. 3.24. Сечение защитной трубы СУЗ

В верхней плите предусмотрены отверстия для транспортировки БЗТ. В проекте В-320 реактора ВВЭР-1000 между средней и нижней плитами БЗТ кроме защитных труб с направляющими каркасами органов СУЗ установлены 60 защитных труб диаметром 108 мм, в которых по центру проходит направляющий канал для установки зонда ВРК с КНИ (каналом нейтронно-измерительным, чувствительными элементами которого являются датчики прямого заряда (ДПЗ)). В данном проекте зонды ВРК с КНИ устанавливаются в ТВС, в которые не установлены органы СУЗ. Радиусы гибов каналов для зондов ВРК с КНИ допускаются не менее 1200 мм. Каналы объединяются в 10 стояков на периферии верхней плиты, а шесть стояков электровыхода – в центральной части плиты. Такому расположению соответствует размещение патрубков на крыше реактора.

К верхней плите крепится опорная обечайка с фланцем, через который БЗТ прижимается крышкой верхнего блока к головкам кассет активной зоны реактора. На реакторе располагаются жесткие упоры от всплытия внутрикорпусной шахты, конструктивно выполненные на опорном фланце БЗТ в трех местах. В этих местах на опорном фланце БЗТ сверху и снизу с помощью винтов крепятся планки. Высота жестких упоров превышает высоту остальной части фланца. Компенсационные пластины, закрепляемые на опорном бурте БЗТ, обеспечивают проектное положение БЗТ по высоте и зазор 0,5–1,0 мм между опорным буртом БЗТ и фланцем шахты. При значительных перепадах давления между верхней и нижней камерами смещения этот зазор выбирается, причем перемещения БЗТ или шахты возможны только на величину этого зазора.

На рис. 3.23 и 3.24 представлены защитная труба СУЗ и ее сечение.

**Выгородка** (рис. 3.25) предназначена для формирования активной зоны реактора и дистанционирования периферийных кассет. Она снижает утечку нейтронов из активной зоны реактора, служит нейтронной защитой корпуса реактора, а также уменьшает протечки воды помимо активной зоны реактора.

Выгородка реактора представляет собой обечайку, состоящую из кованых колец, скрепленных с помощью шпилек и фиксируемых в плане друг относительно друга штифтами. Габариты выгородки: высота – 4070 мм, диаметр наружный – 3470 мм, материал – сталь 08Х18Н10Т, масса – 35 т. Количество металла в выгородке принято

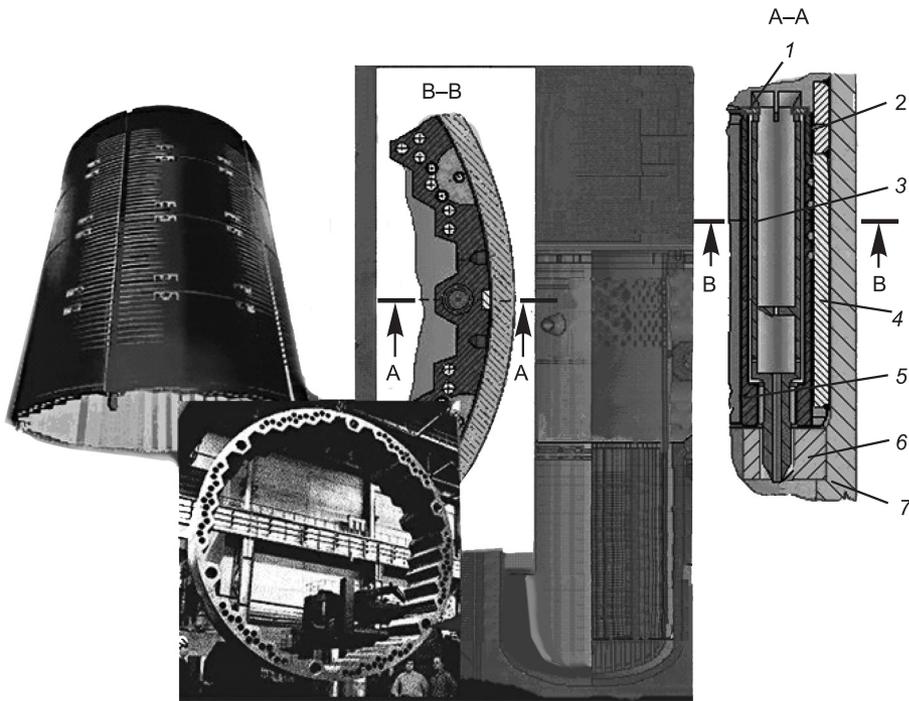


Рис. 3.25. Выгородка:

1 – шайба; 2 – шпонка; 3 – труба; 4 – вытеснитель; 5 – выгородка; 6 – дистанционирующая решетка; 7 – шахта

максимальным для эффективного снижения потока нейтронов, падающих на корпус реактора.

Внутренняя конфигурация колец повторяет профиль, образованный гранями кассет активной зоны. Для охлаждения на кольцах имеются продольные каналы. При установке выгородки на граненый пояс шахты каналы в выгородке совпадают с отверстиями в граненом поясе шахты.

В шести сквозных отверстиях выгородки установлены трубы с резьбой в нижней части, предназначенные для жесткого закрепления выгородки в шахте от всплытия (путем вворачивания их в граненый пояс шахты) и одновременно используемые под установку датчиков системы контроля перегрузки (СКП).

Кроме того, выгородка предварительно устанавливается на три фиксатора, закрепленных в граненом поясе шахты. Верхнее кольцо выгородки центрируется относительно цилиндрической части шахты шпонками, привариваемыми к внутренней поверхности шахты и входящими в вертикальные пазы выгородки. Ниже шпонок, по направлению продольных пазов выгородки, к внутренней поверхности шахты приварены вытеснители, которые по высоте и ширине имеют меньшие размеры, чем шпонки. На наружной поверхности в районе вертикальных пазов выгородки на кольцах выполнены горизонтальные пазы для обеспечения равномерного охлаждения выгородки в этом районе. В верхней части выгородки установлены трубы с пазами для байонетного захвата контейнерных сборок с образцами-свидетелями корпусной стали.

В выгородке кроме отверстий для крепления колец имеется 72 вертикальных канала: шесть каналов диаметром 130 мм используются для труб, крепящих выгородку к шахте, в эти трубы во время работ по перегрузке топлива устанавливаются сухие каналы системы перегрузки; шесть каналов, оканчивающихся отверстиями с резь-

бой М5, предназначены для транспортировки выгордки; в 30 каналах (на верхнем кольце выгордки) в монтажных условиях приваривают трубы, выступающие над горизонтальной плоскостью кольца на 35 мм, в которые устанавливаются сборки с «лучевыми» образцами-свидетелями; 30 каналов используются для охлаждения.

Все продольные каналы выгордки имеют шайбы (конструктивно в граненом поясе шахты), которые обеспечивают необходимый расход теплоносителя через них.

Выем выгордки из реактора производится совместно с шахтой (рис. 3.26). Таким образом, выгордка неподвижно крепится в нижней части в шахте, а ее верхняя часть имеет возможность температурного перемещения относительно стенки шахты реактора.

Оборудование бетонной шахты предназначено:

- для закрепления корпуса реактора;
- герметичного разделения верхнего и нижнего объемов шахты реактора;
- обеспечения прохода различных коммуникаций к реактору;
- обеспечения биологической защиты;
- обеспечения теплоизоляции реактора;
- размещения устройств контроля за нейтронной мощностью реактора.

Подытожив вышеизложенное, можно сделать вывод, что в обоснование функциональной работоспособности выгордки приняты следующие конструктивные решения:

- количество металла в выгордке является максимальным для эффективного снижения потока нейтронов, падающих на корпус;
- размещение продольных каналов и кольцевых проточек в выгордке выбрано из условия наиболее эффективного охлаждения металла выгордки;

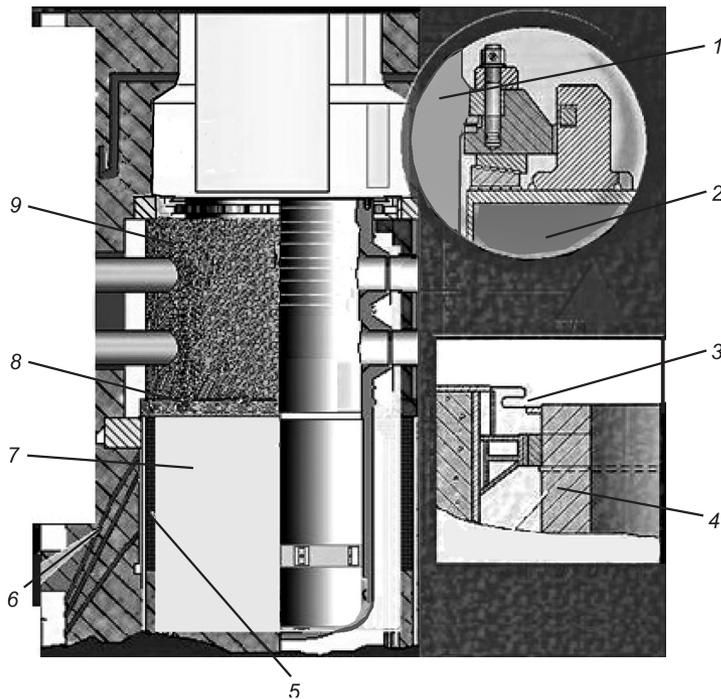


Рис. 3.26. Оборудование бетонной шахты:

1, 4 – корпус реактора; 2 – опорная ферма; 3 – разделительный сиффон; 5, 8 – биологическая защита; 6 – проходки; 7, 9 – тепловая изоляция

- кольцевая жесткость выгородки и ее закрепление обеспечивают сохранность ТВС при возникновении больших перепадов давления в аварийных ситуациях (разрыв ДУ850);

- при обрыве шахты по поперечному сечению в районе выгородки обеспечивается циркуляция теплоносителя по проектному тракту, благодаря установке выгородки в шахте с небольшим кольцевым зазором.

**Ферма опорная** предназначена для закрепления реактора от воздействия весовых, компенсационных, аварийных и сейсмических нагрузок, которые могут действовать на реактор, и рассчитана на весовую нагрузку 870 000 т. Ферма опорная представляет собой сварную конструкцию, состоящую из 30 радиально расположенных балок коробчатого сечения. Наружные концы балок объединены кольцевой обечайкой и в районе бетона приварены к объединяющему кольцу. Ферма изготавливается тремя отдельными транспортабельными блоками, которые на монтаже собираются на болтах и свариваются друг с другом. Внутренние полости балок и пространство между балками заполняются серпентинитовой засыпкой и обычным бетоном. Ферма закрепляется в бетоне.

При работе реактора ферма охлаждается воздухом, который продувается через охлаждающие щели в межбалочных пространствах и в кольцевых зазорах между каналом ионизационных камер и облицовочной трубой фермы опорной.

Вокруг корпуса реактора, в районе активной зоны выполнена биологическая («сухая») защита, ослабляющая до допустимых значений потоки нейтронов и  $\gamma$ -излучений в радиальном направлении. «Сухая» защита предназначена для обеспечения радиационно-тепловой защиты бетона шахты реактора и работы ионизационных камер системы контроля плотности потока нейтронов. Для «сухой» защиты использован слой серпентинитового бетона, хорошо удерживающий воду (и, следовательно, водород) и уменьшающий утечку нейтронов из реактора, облицованный металлической оболочкой. Кроме того, учитывая различие в коэффициентах расширения между обычным и серпентинитовым бетоном, создается тепловой барьер за счет системы охлаждаемых воздухом труб.

На первых реакторах ВВЭР в качестве биологической защиты использовался кольцевой водяной бак. При эксплуатации бак подвергался постепенному коррозионному разрушению с протечками радиоактивной воды. Ремонт водяного бака и его замена были практически невозможны, и в последующих проектах от этого решения отказались, перейдя на «сухую» защиту.

### 3.3. Реактор ВПБЭР-600

Реактор ВПБЭР-600 предназначен для преобразования ядерной энергии активной зоны в тепловую энергию теплоносителя первого контура и передачи ее в секциях парогенераторов теплоносителю второго контура.

В данном варианте реакторной установки применен водо-водяной энергетический реактор интегрального исполнения, в корпусе которого размещены активная зона с рабочими органами СУЗ, контур охлаждения активной зоны, парогазовый компенсатор давления, 12 секций парогенераторов, 12 теплообменников-конденсаторов системы аварийного отвода тепла, проточные части шести главных циркуляционных насосов, расположенных на днище корпуса реактора, и первичные измерительные преобразователи систем технологического контроля (рис. 3.27, 3.28).

Основные технические характеристики реактора приведены в табл. 3.6.

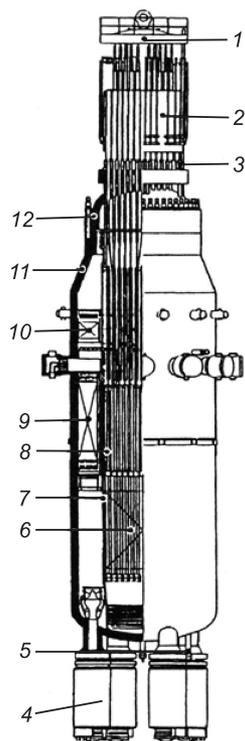


Рис. 3.27. Общий вид ВПБЭР-600:

1 – верхний блок; 2 – привод СУЗ; 3 – уровнемер; 4 – циркуляционные насосы первого контура; 5 – ионизационная камера; 6 – активная зона; 7 – внутрикорпусная шахта; 8 – блок, уплотняющий головки ТВС; 9 – парогенератор; 10 – теплообменник-конденсатор; 11 – крышка реактора; 12 – корпус реактора

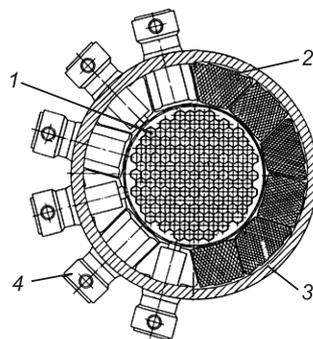


Рис. 3.28. Поперечный разрез ВПБЭР-600:

1 – ТВС; 2 – секция парогенератора; 3 – корпус реактора; 4 – патрубков секции парогенератора

### Основные технические характеристики ВПБЭР-600

Таблица 3.6

Технические характеристики	Значение
1	2
Тепловая мощность реактора, МВт	1800
Тип реактора	Водо-водяной, корпусный, интегральный
Циркуляция теплоносителя	Принудительная
Активная зона:	
диаметр описанный, мм	3210,5
высота, мм	3530
удельная энергонапряженность, кВт/л	69,4
количество ТВС, шт.	151
размер ТВС «под ключ», мм	234
диаметр твэла, мм	9,1
топливо	UO <sub>2</sub>
обогащение по U (топливо подпитки), %	3,6; 4,0; 4,4
интервал между перегрузками топлива, лет	До 2
количество рабочих органов СУЗ, шт.	139*

1	2
Количество приводов СУЗ, шт.	139 <sup>1</sup>
Параметры первого контура: давление, МПа температура теплоносителя на входе в активную зону, °С температура теплоносителя на выходе из активной зоны, °С расход теплоносителя, т/ч	15,7 294,4 325 36 500
Главный циркуляционный насос: тип насоса  подача, м <sup>3</sup> /ч напор, м вод. ст. потребляемая мощность из сети, кВт количество оборотов, об/мин диаметр корпуса, мм длина суммарная, мм масса, т	Центробежный со встроенным герметичным электродвигателем (6 шт.)  8250 78 2875 1500 1580 7870 53
Парогенератор: тип количество блок-секций, шт. количество подсекций в блок-секции, шт. общее количество подсекций, отглушаемых по второму контуру, шт.	Прямоточный с перегревом пара 12 18 216
Параметры второго контура: паропроизводительность, т/ч давление пара, МПа температура перегретого пара, °С давление питательной воды, МПа температура питательной воды, °С	3350 6,38 305 7,85 230 <sup>2</sup>
Габариты реактора: высота общая, мм высота без приводов СУЗ и главных циркуляционных насосов, мм высота корпуса, мм диаметр корпуса наружный, мм	34 565 26 900  20 150 5970
Масса реактора: в сухом состоянии, т в рабочем состоянии, т	2010 2200
Объем реактора, м <sup>3</sup> : общий теплоносителя первого контура парогазового компенсатора давления	336 256 80

<sup>1</sup> При 139 приводах СУЗ обеспечивается глушение реактора в холодном разотравленном состоянии без одного наиболее эффективного рабочего органа при чистой воде.

<sup>2</sup> Питательная вода подогревается на 10 °С за счет постоянной работы системы непрерывного отвода тепла, которая через промежуточные теплообменники передает 36 МВт тепла в деаэрактор.

В состав реактора входят: корпус, шахта внутрикорпусная, активная зона, блок труб и устройств, верхний блок, теплообменники-конденсаторы, секции парогенера-

тора, приводы СУЗ, главные циркуляционные насосы, чехлы ионизационных камер, первичные измерительные преобразователи системы контроля и управления.

**Корпус реактора** представляет собой герметичный цилиндрический сосуд с эллиптическим днищем и главным фланцевым разъемом, уплотняемым с помощью прокладки крышкой корпуса. Крышка корпуса входит в состав верхнего блока.

На наружной поверхности корпуса расположены:

- 12 патрубков для прохода теплоносителя второго контура и установки секций парогенератора;
- шесть патрубков для прохода вала циркуляционного насоса;
- шесть патрубков для размещения ионизационных камер;
- два патрубка подпитки реактора теплоносителем первого контура и газом;
- 12 патрубков для прохода теплоносителей контуров системы аварийного отвода тепла и установки теплообменников-конденсаторов;
- три патрубка подвода борсодержащего раствора для аварийной остановки реактора, два патрубка подвода борсодержащего раствора для аварийной подпитки (проливки) реактора и ряд других патрубков.

Конструктивно проходное сечение патрубков по теплоносителю первого контура ограничено диаметром 32 или 50 мм.

Патрубки уровнемеров, термопреобразователей, ионизационных камер и зондов внутриреакторного контроля снабжены ограничителями перемещений на случай их обрыва.

В верхней части корпуса расположен парогазовый компенсатор давления, в качестве газа в котором используется азот.

Корпус имеет следующие габариты: высота – 20 150 мм, наружный диаметр – 5970 мм, масса – 850 т, материал – сталь типа 15Х2НМФА. Назначенный срок службы корпуса – 60 лет.

**Шахта внутрикорпусная** представляет собой цилиндрическую сборносварную конструкцию с опорным кольцом для установки и фиксации ее положения в корпусе реактора и нижней плитой с отверстиями под ТВС активной зоны.

Шахта установлена на днище корпуса реактора и предназначена для размещения ТВС активной зоны в корпусе реактора. Масса шахты – 75 т, материал – сталь 08Х18Н10Т. Назначенный срок службы шахты – 60 лет.

**Активная зона** гетерогенного типа на тепловых нейтронах набрана из 151 тепловыделяющей сборки, которые расположены в узлах правильной треугольной сетки с шагом 236 мм. ТВС бесчехлового типа имеет форму шестигранника с размером «под ключ» 234 мм. ТВС активной зоны расположены в шахте реактора. Дистанционирование ТВС в реакторе осуществляется нижней плитой шахты и нижней перфорированной плитой блока труб и устройств, в отверстия которой входят концевые детали ТВС.

Конструкционный материал активной зоны – циркониевые сплавы, топливо – низкообогащенная двуокись урана.

Для компенсации избыточной реактивности и управления цепной ядерной реакцией в активной зоне предусмотрены две системы:

- 1) механическая система на основе поглощающих стержней;
- 2) жидкостная система компенсации реактивности за счет растворенной в теплоносителе борной кислоты.

Дополнительно для компенсации избыточной реактивности и выравнивания поля энерговыделений в активной зоне используются твэги – твэлы, в топливе которых содержится поглотитель в виде окиси гадолиния ( $Gd_2O_3$ ).

Рабочие органы СУЗ расположены в каждой ТВС в виде отдельной сборочной единицы, состоящей из 18 поглощающих стержней и деталей крепления.

Транспортирование свежих ТВС, хранение на станции и отправка на завод регенерации топлива осуществляется совместно с рабочим органом СУЗ.

Над 139 ТВС расположены индивидуальные электромеханические приводы, с помощью которых осуществляется перемещение рабочих органов СУЗ в режиме регулирования и их сброс в активную зону в режиме аварийной защиты.

Перед началом эксплуатации рабочие органы СУЗ двенадцати оставшихся ТВС выводятся в крайнее верхнее положение и закрепляются в блоке труб и устройств – над этими ТВС на крышке реактора расположены стойки внутриреакторного контроля. Перед перегрузкой активной зоны рабочие органы этих ТВС с помощью манипулятора опускаются и фиксируются в ТВС в крайнем нижнем положении. Рабочие органы СУЗ остальных 139 ТВС с помощью электромеханических приводов также опускаются в ТВС в крайние нижние положения.

Для осуществления контроля за нейтронно-физическими и теплотехническими параметрами в активной зоне расположены 54 зонда внутриреакторного контроля. Они оснащены датчиками прямой зарядки и термоэлектрическими преобразователями, объединенными одной несущей трубкой. По показаниям этих датчиков с помощью расчетных программ определяются линейные нагрузки на твэл в стационарных и переходных режимах эксплуатации и осуществляется контроль за непревышением границ безопасной эксплуатации твэлов.

Активная зона эксплуатируется в режиме частичных перегрузок топлива типа in...out (от центра активной зоны к периферии).

Предельно допустимое количество негерметичных твэлов в активной зоне в условиях нормальной эксплуатации составляет:

- 0,1 % с газовой неплотностью;
- 0,01 % с контактом топлива и теплоносителя.

При достижении запланированной глубины выгорания топлива (исчерпания запаса реактивности на выгорание) или при нарушении герметичности твэл ТВС извлекается из заглушенного реактора и помещается в бассейн выдержки. При необходимости проводится контроль герметичности оболочек твэлов.

После выдержки ТВС транспортируются на завод регенерации топлива с помощью контейнеров.

Основные технические характеристики активной зоны приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

**Основные технические характеристики активной зоны**

Технические характеристики	Значение
1	2
Тепловая мощность активной зоны, МВт	1800
Габариты активной зоны, мм: высота описанный диаметр эквивалентный диаметр	3530 3210,5 3045
Количество ТВС, шт.	151
Тип сечения ТВС	Шестигранник
Размер «под ключ», мм	234
Шаг расположения ТВС, мм	236

1	2
Тип твэла	Гладкостержневой цилиндрический
Наружный диаметр твэла, мм	$9,1^{+0,08}_{-0,05}$
Диаметр топливной таблетки, мм	$7,57^{+0,07}_{-0,04}$
Топливная композиция	UO <sub>2</sub>
Внутренний диаметр оболочки твэла, мм	$7,72^{+0,07}$
Внутренний диаметр отверстия в таблетке, мм	$2,3^{+0,2}$
Диаметр поглощающего стержня, мм	8,2
Толщина стенки оболочки поглощающего стержня, мм	0,6
Поглощающая композиция	B <sub>4</sub> C
Температура теплоносителя, °C: на входе в активную зону на выходе из активной зоны	294,4 325
Номинальное давление теплоносителя, МПа	15,7
Средняя скорость теплоносителя в активной зоне, м/с	3,9
Расход теплоносителя через активную зону, т/ч	36 500
Средняя линейная нагрузка на твэл, Вт/см	114,3
Обогащение топлива, %: первая загрузка стационарный режим	1; 2,4; 4,0 3,6; 4,0; 4,4
Максимальный флюенс нейтронов: на оболочке твэла с энергией более 0,5 МэВ нейтр/см <sup>2</sup>	$2,2 \cdot 10^{24}$ $(1,5-2,5) \cdot 10^{24}$
Топливный цикл: интервал между перегрузками, лет средняя глубина выгорания топлива по выгружаемым ТВС в стационарном режиме, МВт·сут/т	2 До 51 000
Время работы в году в пересчете на номинальную мощность, ч	7000
Календарный срок службы, лет	7
Ресурс (время работы на всех уровнях мощности), ч	50 000
Скорость планового разогрева, °C/ч	20
Скорость планового расхолаживания, °C/ч	30
Диапазон изменения мощности, % $N_{ном}$	30–100
Максимальная скорость изменения мощности в диапазоне регулирования, % $N_{ном}$ /мин	2,5
Удельная напряженность активной зоны, кВт/л	69,4
Масса топлива (U) в активной зоне (с твэгами), кг	62 000

Активная зона может эксплуатироваться в режиме суточного регулирования мощности.

**Тепловыделяющая сборка** бесчехлового типа имеет форму шестигранника с размером «под ключ» 234 мм и состоит из следующих основных частей: хвостовика, силового каркаса, тепловыделяющих элементов, головки и рабочего органа СУЗ.

**Хвостовик** предназначен для установки ТВС в плиту шахты реактора, подвода теплоносителя и крепления на нем тепловыделяющих элементов и силового каркаса. Крепление твэлов к хвостовику осуществляется с помощью двойных пластин, сваренных между собой точечной сваркой, и штифтов. Крепление набора двойных пластин выполняют в пазах хвостовика аргоно-дуговой сваркой.

Для фиксации ТВС в реакторе по углу в хвостовике ТВС предусмотрен фиксатор.

**Силовой каркас** представляет собой набор из 18 труб, которые являются направляющими для перемещения поглощающих стержней, и одной направляющей трубки под зонд ВРК, 15 ДР и центрального стержня из циркониевого сплава, предназначенного для опоры головки ТВС и крепления ДР.

В верхней части ТВС направляющие трубы под поглощающие стержни могут свободно перемещаться вверх, компенсируя радиационный рост. Направляющие трубы в нижней части ТВС крепятся к хвостовику гайками.

На выходе из пучка твэлов в районе двух верхних дистанционирующих решеток (выше верхней границы активной зоны) все направляющие трубы для перемещения поглощающих стержней завальцованы во втулках из нержавеющей стали, проходящих через две верхние дистанционирующие решетки и опорные детали головки ТВС.

В **головке** ТВС в местах проходов 12 направляющих труб для перемещения поглощающих стержней установлены пружины, предназначенные для выравнивания усилий, действующих на 12 направляющих труб, в случае их неравномерного радиационного роста, при транспортировании ТВС при перегрузке активной зоны. Дистанционирующие решетки из циркониевого сплава закреплены на центральном стержне.

Дистанционирующие решетки сотового типа имеют следующие особенности. Шестигранные ячейки (двух типов), изготовленные из тонкостенных труб из циркониевого сплава, крепятся друг к другу точечной сваркой. В каждой ячейке по ее высоте в районе углов установлены пуклевки, которые выполняют функцию дистанционирования твэлов. К периферийным ячейкам точечной сваркой крепится обод, имеющий заходные участки, обеспечивающие перемещение ТВС относительно друг друга при загрузке в реактор.

**Рабочий орган СУЗ**, состоящий из 18 поглощающих стержней и траверсы, расположен в верхней части головки ТВС. Сцепление рабочего органа СУЗ с приводом осуществляется шариковым замком, а фиксация органа СУЗ в ТВС – цапговым фиксатором.

Для транспортирования ТВС в головке предусмотрены пальцы, которые одновременно фиксируют ТВС по углу, для чего они входят в пазы плиты блока труб и устройств.

Фиксация ТВС по углу верхней части ТВС необходима для совмещения направляющих труб в ТВС и направляющих для поглощающих стержней в блоке труб и устройств.

**Тепловыделяющий элемент** цилиндрического типа с наружным диаметром 9,1 мм состоит из оболочки, концевых деталей, топливных таблеток и фиксатора топливного столба.

Конструкционный материал оболочки и концевых деталей – циркониевый сплав Э110. Топливо – спеченная двуокись урана плотностью 10,4–10,7 г/см<sup>3</sup>.

Топливные таблетки имеют центральное осевое отверстие диаметром 2,3 мм. Оболочка твэла с внутренней стороны плакирована чистым цирконием, толщина покрытия – 70–90 мкм.

Твэлы в ТВС (293 шт.) крепятся с помощью нижней концевой детали. В верхней части твэла расположен газосборник продуктов деления. Внутренняя полость твэлов заполнена смесью инертных газов. Герметизация оболочки с заглушками выполняется сваркой. Наряду с твэлами указанной конструкции в ТВС размещены 18 твэгов.

**Поглощающий стержень** цилиндрического типа с наружным диаметром 8,2 мм состоит из оболочки, концевых деталей, поглощающей композиции и фиксатора поглощающей композиции.

Материал оболочки и концевых деталей – нержавеющая сталь 08X18H10T, поглощающая композиция – порошок карбида бора плотностью не менее 1,5 г/см<sup>3</sup>. Внутренняя полость стержня заполнена гелием высокой чистоты. Герметизация оболочки с заглушками выполняется сваркой.

При разработке активной зоны рассмотрена возможность создания ремонтпригодной ТВС путем модернизации разработанной конструкции.

**Блок труб и устройств** представляет собой цилиндрическую сборную конструкцию из перфорированных плит и обечаек, внутри которой размещаются тягово-соединительные устройства поглощающих стержней ТВС активной зоны, тяговые трубы и проходки для средств внутриреакторного контроля.

Блок предназначен для центровки верхних концевиков ТВС активной зоны, соединения посредством тягово-соединительных устройств поглощающих стержней ТВС активной зоны с приводами СУЗ, организации потока первичного теплоносителя на выходе из активной зоны и в общем тяговом участке.

Масса блока – 100 т. Назначенный срок службы блока – 60 лет.

**Верхний блок** представляет собой сборно-сварную конструкцию, объединяющую в один монтажный узел крышку корпуса реактора, приводы СУЗ, блок верхнего пояса биологической защиты реактора и траверсу для монтажа и демонтажа верхнего блока при техническом обслуживании реактора в процессе эксплуатации.

Блок предназначен для размещения на крышке реактора приводов СУЗ, фиксации от вертикальных перемещений внутрикорпусной шахты с активной зоной и блоком труб и устройств, для уплотнения фланцевого разъема корпуса реактора и обеспечения защиты от ионизирующих излучений пространства над крышкой корпуса реактора.

Масса блока – 286 т. Назначенный срок службы блока – 30 лет.

**Теплообменники-конденсаторы** предназначены для аварийного отвода тепла от теплоносителя первого контура к теплоносителям контуров системы аварийного отвода тепла.

В состав реактора входят 12 теплообменников-конденсаторов, расположенных вертикально под уровнем теплоносителя над парогенераторами.

Основные расчетные параметры теплообменника-конденсатора приведены в табл. 3.8.

Теплообменник-конденсатор состоит из патрубков и трубной системы.

Патрубок выполнен по типу «труба в трубе», внутренняя (центральная) труба является входным каналом, кольцевая труба – выходным каналом. Патрубки теплообменников-конденсаторов крепятся в горизонтальных патрубках корпуса реактора.

Трубная система теплообменника-конденсатора состоит из 1012 U-образных труб диаметром 12×1,5 мм, упакованных по квадратной сетке с шагом 17 мм. Материал трубной системы – нержавеющая сталь 08X18H10T. Трубки объединяются в 11 кассет, содержащих непосредственно трубный пучок и два коллектора: раздающий и собира-

Расчетные параметры теплообменника-конденсатора

Параметры	Значение		
	Режим работы установки на мощности		Режим расхолаживания
	СНОТ	СПОТ	
Давление первого контура, МПа	15,7	15,7	15,7
Температура теплоносителя первого контура, °С: на входе на выходе	325 320	325 325	310 288
Расход теплоносителя первого контура, кг/с	186	186	50
Давление контура системы аварийного отвода тепла: СНОТ, МПа СПОТ, МПа	18 18	18 18	19,4 16,7
Температура теплоносителя контура системы аварийного отвода тепла, °С: на входе на выходе	55 300	55 325	110 260
Расход теплоносителя контура системы аварийного отвода тепла, кг/с	5,6	0,03	9,1
Тепловая мощность, МВт	6	0,03	6

ющий. Каждый раздающий коллектор кассеты гидравлически соединен с входным каналом патрубка, а собирающий коллектор кассеты – с выходным каналом патрубка. Кассета теплообменника-конденсатора кожуха для направления потока не имеет.

В межтрубном пространстве циркулирует теплоноситель первого контура, в трубном пространстве – теплоноситель контура системы аварийного отвода тепла. Циркуляция по промежуточному контуру системы аварийного отвода тепла естественная.

Масса теплообменника-конденсатора – 1,8 т, суммарная масса всех теплообменников конденсаторов – 21,6 т. Назначенный срок службы теплообменника-конденсатора – 25–30 лет.

**Парогенератор** представляет собой прямоточный, вертикальный теплообменный аппарат поверхностного типа, предназначенный для передачи тепла от теплоносителя первого контура к теплоносителю второго контура. Расположен в кольцевом зазоре между корпусом и внутрикорпусной шахтой.

Парогенератор имеет шесть прямоугольных и шесть трапецеидальных независимых блок-секций, каждая из которых состоит из трубной системы, патрубков подвода и отвода теплоносителя второго контура, опускных труб, коллекторов, кожуха, закрепленного на патрубок и оканчивающегося в нижней части пружинным торцевым уплотнением, прижимающимся к опорному кольцу реактора.

Трубная система блок-секции состоит из плотного пучка однотипных элементов, набранных по треугольной сетке разбивки и сжатых до соприкосновения по ребрам трубы, что обеспечивает их дистанционирование с необходимым шагом.

Элементы блок-секции объединены в 18 независимых подсекций. Каждая под-секция в случае межконтурной неплотности может быть заглушена по входу и выходу второго контура.

Патрубок подвода и отвода теплоносителя второго контура представляет собой полый цилиндр с донышком, в стенках которого выполнено 18 продольных каналов, соединенных с паровыми трубами. В донышке патрубка сделаны 18 отверстий, в которые вставлены и приварены опускные трубы подвода питательной воды.

Для организации потока теплоносителя первого контура и формирования геометрии трубной системы блок-секция заключена в кожух.

Масса блок-секции – 15 т, суммарная масса парогенератора – 180 т, материал элементов – сплав типа ПТ7М. Назначенный ресурс блок-секции – 120 тыс. ч. Назначенный срок службы блок-секции – 25–30 лет.

**Приводы СУЗ** (общее количество – 139 шт.) применяются в системе управления и защиты реактора и предназначены для управления реактивностью реактора через изменение положения рабочих органов СУЗ в ТВС.

Приводы СУЗ обеспечивают выполнение следующих функций:

- подъем и опускание рабочего органа с заданной скоростью в пределах рабочего хода в режиме работы от электродвигателя;
- удержание рабочего органа в заданном положении;
- опускание с заданной скоростью рабочего органа в режиме «самохода» (под действием собственной массы) из любого положения рабочего хода при обесточивании электродвигателя;
- надежное стопорение рабочего органа от самопроизвольного перемещения вверх;
- выдача сигналов о положении рабочего органа в активной зоне реактора и на отключение электродвигателя в крайних верхнем и нижнем рабочих и промежуточных положениях рабочего органа.

Основные технические характеристики приводов СУЗ приведены в табл. 3.9.

Приводы СУЗ размещены в герметичных стойках, сваренных в крышку корпуса реактора, и уплотнены в них с помощью никелевых прокладок.

Верхняя часть привода СУЗ, расположенная вне герметичной стойки, работает в условиях окружающей среды верхней части страховочного корпуса реактора.

Все приводы СУЗ имеют одинаковую конструкцию и могут работать как отдельно друг от друга, так и совместно, при групповом перемещении рабочих органов, в зависимости от сигналов, подаваемых на них из системы управления и защиты.

Привод СУЗ относится к классу электромеханических и состоит из следующих основных частей: датчика положения, электродвигателя, обгонной муфты, регулятора скорости самохода, редуктора, рейки, уплотнителя, амортизатора и охладителя.

Датчик положения при работе привода СУЗ обеспечивает выдачу сигналов о положении рабочего органа в активной зоне реактора в пределах рабочего хода и на отключение электродвигателя в крайних верхнем и нижнем рабочих и промежуточных положениях рабочего хода.

Питание к датчику подводится через штепсельный разъем и герметичные электровводы в переходнике.

Рабочими элементами датчика являются установленные в его трубе на определенном расстоянии блоки с катушками, размещенными внутри полой рейки. При перемещении рейки изменяется коэффициент взаимной связи катушек. В систему поступают сигналы индикации о положении рабочего органа или на отключение электродвигателя. В крайних положениях рабочего органа обеспечивается также световая сигнализация на пульте управления.

## Основные технические характеристики приводов СУЗ

Технические характеристики	Значение
Тип электродвигателя	Трехфазный синхронно-реактивный с секционированным ротором с короткозамкнутой клеткой
Режим работы электродвигателя	Повторно-кратковременный
Давление среды, МПа	15,7
Температура среды, °С: внутри стойки в районе редуктора, не более под крышкой корпуса реактора, не более	100 350
Рабочий ход рейки между верхним и нижним рабочими положениями, мм	3550
Полный ход рейки, мм	3670
Скорость перемещения рабочего органа в режиме перемещения электродвигателем, мм/с	4–10
Установившаяся скорость перемещения рабочего органа вниз под действием собственной массы после обесточивания электродвигателя (режим «самохода»), мм/с	500–800
Время разгона до скорости 500 мм/с, с, не более	1
Давление среды первого контура для обесточивания приводов СУЗ, МПа: по сигналам аварийной защиты для срабатывания размыкателя электропитания по давлению	18 19,1
Дискретность выдаваемых датчиком положения сигналов, характеризующих положение рабочего органа в активной зоне реактора в пределах рабочего хода, мм: до высоты 1 м выше 1 м	50±10 100±10
Положение конечных выключателей для выдачи сигналов на включение электродвигателя, мм: в нижнем положении в верхнем положении	100 3660
Масса привода СУЗ, кг, не более	600
Масса рабочего органа, кг, не более	80
Температура воды промышленного контура, поступающей на охлаждение приводов СУЗ, °С, не более	45
Назначенный срок службы, лет	20

Электродвигатель представляет собой низкооборотную герметичную электрическую машину синхронно-реактивного типа и предназначен для перемещения рейки с рабочим органом и удержания их на любом участке рабочего хода в режиме фиксированной стоянки.

Ротор электродвигателя через шлицевую муфту, поводковую вилку и обгонную муфту соединен с валом регулятора скорости самохода. Обгонная муфта предназначена для стопорения рейки с рабочим органом от самопроизвольного перемещения вверх, в том числе при разгерметизации привода и от подскока под воздействием амортизатора после сброса в режиме «самохода».

Регулятор скорости самохода служит для ограничения скорости опускания рейки с рабочим органом в режиме «самохода». Ограничение скорости вращения вала происходит за счет тормозного момента, возникающего в результате взаимодействия магнитного поля, создаваемого постоянными установленными на валу магнитами, с магнитным полем токов, которые индуцируются в «беличьей» клетке гильзы, укрепленной в корпусе.

Редуктор цилиндрическо-конический реечного типа служит для обеспечения на реечной шестерне необходимого крутящего момента и частоты вращения. Реечная пара предназначена для преобразования вращательного движения реечной шестерни в возвратно-поступательное перемещение рейки с укрепленным на ней рабочим органом. К нижнему концу рейки крепится штанга с захватом цангового типа, с помощью которого в процессе монтажа привода СУЗ осуществляется сцепление с удлинителем.

Уплотнитель предназначен для уплотнения привода в стойке реактора и штанги в корпусе привода с целью ограничения попадания во внутренние полости привода парогазовой смеси с высокой температурой.

Для поглощения энергии падающих масс в режиме «самохода» предусмотрен амортизатор пружинного типа.

Охладитель обеспечивает необходимые температурные условия работы деталей привода СУЗ в герметичной стойке верхнего блока реактора за счет съема избыточного тепла.

**Принцип работы привода СУЗ.** Перемещение рейки, штанги и соединенного с ними рабочего органа производится электродвигателем, вращение от ротора которого через шлицевую муфту, поводковую вилку, обгонную муфту, вал регулятора скорости самохода, шестерню и промежуточный валик передается на редуктор, в котором вращение реечной шестерни преобразуется в возвратно-поступательное перемещение рейки.

При достижении рабочим органом заданного положения в активной зоне реактора электродвигатель переключается на режим фиксированной стоянки, удерживая рабочий орган в этом положении. Дискретная индикация положения рабочего органа и остановка его в верхнем и нижнем положениях рабочего хода осуществляются по сигналам датчика положения.

По сигналу аварийной защиты или от срабатывания размыкателя электропитания по давлению электродвигатель привода СУЗ обесточивается, и рейка с соединенным с ней рабочим органом под действием их массы опускается вниз. После кратковременного разгона в течение 1 с устанавливается постоянная скорость опускания, которая ограничивается регулятором.

**Главные циркуляционные электронасосы (ГЦЭН)** предназначены для организации принудительной циркуляции первичного теплоносителя по контуру охлаждения активной зоны.

В состав реактора входят шесть главных циркуляционных электронасосов, расположенных в днище корпуса.

Тип электронасоса – центробежный, вертикальный со встроенным герметичным электродвигателем; установка – электродвигателем вниз.

Электронасосы разработаны в двух вариантах:

- вариант 1 – ГЦЭН с приводным электродвигателем со статорной перегородкой;
- вариант 2 – ГЦЭН с приводным электродвигателем с водозаполненным статором.

Основные технические характеристики ГЦЭН приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

**Основные технические характеристики ГЦЭН**

Технические характеристики	Значение	
	Вариант 1	Вариант 2
Подача, м <sup>3</sup> /с (м <sup>3</sup> /ч)	2,29 (8250) при $t = 294,4$ °С	
Напор, м	78	
Температура теплоносителя на входе, °С	До 325	
Давление на входе, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	15,7 (160)	
Частота вращения ротора (синхронная), об/мин	1500	
Напряжение питающей сети, В	6000	
Мощность на роторе, кВт	2350	2200
Мощность потребляемая, кВт	2875	2280
Ресурс до капитального ремонта, ч	120 000	60 000
Масса, т	53	29
В том числе электродвигателя	48	24
Габаритные размеры, мм:		
длина	7870	7360
в том числе электродвигателя	4380	3870
ширина (диаметр)	1580	1340
Назначенный срок службы, лет	15	7,5

Главный циркуляционный электронасос включает: статор электродвигателя, размещенный в прочном корпусе; ротор электродвигателя; подшипниковые узлы; проточную часть с рабочим колесом и направляющим аппаратом; ремонтное уплотнение.

Отличие вариантов ГЦЭН заключается в конструкции статора электродвигателя.

В ГЦЭН по варианту 1 статорная полость отделена статорной перегородкой от роторной полости, где циркулирует вода автономного контура. Статорная перегородка закреплена с помощью сварки во внутренней расточке статора. Статор шихтованный, набран из отдельных листов электротехнического железа. Корпус статора снабжен встроенным холодильником автономного контура. Вода автономного контура циркулирует внутри трубок, наружная поверхность которых омывается водой промежуточного контура охлаждения оборудования реакторной установки.

Ротор электродвигателя состоит из вала, представляющего собой поковку из стали 09Х17Н, в средней части которого выполнена короткозамкнутая «беличья» клетка. В нижней части ротора закреплены вспомогательное рабочее колесо автономного контура и пята осевого подшипника. Ротор электродвигателя вращается в двух радиальных гидростатодинамических подшипниках, питание которых осуществляется от вспомогательного рабочего колеса автономного контура. Материалы пары трения радиальных подшипников – наплавка С-2 (сплав на основе никеля) по силицированному графиту ПРОГ-2400С.

Верхняя часть ротора электродвигателя снабжена втулкой внутреннего шлицевого соединения для передачи крутящего момента от электродвигателя к валу проточной части, на котором установлено рабочее колесо.

Осевой подшипник – колодочный, двустороннего действия, рабочей средой которого является вода автономного контура. Материалы пары трения подшипника – силицированный графит ПРОГ-2400С по силицированному графиту ПРОГ-2400С.

Проточная часть электронасоса, выполненная в виде отдельного блока, устанавливаемого в реактор со стороны верхней крышки, включает рабочее колесо, закрепленное на валу проточной части электронасоса, нижний шлицевой участок которого входит в зацепление со шлицевой втулкой ротора электродвигателя; направляющий аппарат, выход из которого осуществляется в конический торообразный коллектор, снабженный четырьмя обратными клапанами; элементы крепления блока проточной части в патрубке реактора. Во внутренней полости обтекателя направляющего аппарата размещена втулка верхнего гидростатического подшипника электронасоса.

Рабочее колесо – диагонального типа, цельнолитое (сварнолитое). С целью достижения необходимого по режимам работы РУ махового (массового) момента инерции ротора электронасоса на покрывном диске рабочего колеса размещена дополнительная масса металла, играющая роль маховика.

Направляющий аппарат – лопаточного типа, сварнолитой конструкции.

Верхний подшипник электронасоса (в блоке проточной части) гидростатический. Его питание осуществляется перекачиваемой жидкостью с напора колеса. Пара трения, примененная в конструкции подшипника, – сталь 20Х13 по стали 20Х13.

Обратный клапан – нормально приоткрытого типа, представляет собой облегченную захлопку, выполненную из титанового сплава.

Крепление вала проточной части и ротора электродвигателя осуществляется тягой, проходящей внутри полого ротора электродвигателя.

Для исключения протечек воды первого контура при демонтаже электродвигателя в конструкции электронасоса предусматривается ремонтное уплотнение, включающее подвижный в осевом направлении фланец с фторопластовой прокладкой, связанный с управляющими сильфонами. Полость со стороны вала между основанием уплотнения и подвижным фланцем герметизируется разделительным сильфоном. Для закрытия уплотнения необходимо подать газ (жидкость) во внутренние полости управляющих сильфонов, при этом прокладка подвижного фланца прижимается к уплотнительной поверхности вала.

Подвод электропитания к двигателю (6000 В) осуществляется для каждой фазы отдельно посредством трех герметичных электропроводов, рассчитанных на полное давление рабочей среды.

Электропроводы, места соединения с силовым кабелем снабжены защитными устройствами, рассчитанными на наружное давление 4 МПа.

В ГЦЭН по варианту 2 статорная перегородка отсутствует, вода автономного контура циркулирует через пазы статора и роторную полость.

Статор электродвигателя – шихтованный, набран из листов электротехнического железа и имеет водостойкое покрытие (фторопласт). Обмотка статора выполнена проводом с водостойкой изоляцией (на основе облученного полиэтилена).

Подвод питания к обмотке водозаполненного статора осуществляется с помощью герметичных электропроводов, имеющих водостойкую изоляцию на напряжение 6000 В.

Остальные узлы ГЦЭН по варианту 2 являются общими с ГЦЭН по варианту 1.

В электронасосе использованы узлы, конструкция которых отработана в процессе испытаний на стендах предприятия ОКБМ, а также в процессе длительной эксплуатации в составе насосов на действующих установках.

Для верхнего подшипника, размещенного в блоке проточной части, в качестве аналога использована конструкция гидростатического подшипника главного циркуляционного насоса ЦВН-7. Насосы ЦВН-7 работают на первом и втором блоках Ленинградской и Курской АЭС.

Радиальные подшипники, аналогичные по конструкции подшипникам электродвигателя, подвергались длительным испытаниям на стенде предприятия, а также были применены в насосе ЦВН-12 РБМКП-2400 и в составе насоса прошли испытания на стенде.

Осевой подшипник, использованный в ГЦЭН, был разработан применительно к насосу ЦВН-12. Длительность испытаний на стенде составила 6000 ч. Достигнутая осевая нагрузка 40 тс значительно превышает возможное осевое усилие в ГЦЭН. Износа подшипника при испытаниях не было обнаружено.

Аналогом ремонтного уплотнения ГЦЭН является ремонтное уплотнение ГЦН первого и второго контуров установки БН-600. Указанные уплотнения совместно с насосами в течение длительного времени находятся в эксплуатации, показывая надежную работу. В качестве модели проточной части ГЦЭН принята проточная часть серийно выпускаемого электронасоса.

Применение в ГЦЭН узлов, работоспособность которых подтверждена испытаниями на стендах предприятия и длительной эксплуатацией в составе насосов, работающих на АЭС, позволяет значительно снизить объем опытно-конструкторских работ по ГЦЭН.

Использование электродвигателя с водозаполненным статором в ГЦЭН по варианту 2 позволяет снизить потребляемую мощность и массу, что делает этот насос более экономичным. Ресурс такого насоса определяется ресурсом обмоточного провода и изоляции, установленным разработчиком в 60 тыс. ч, после чего возможна замена статора или всего электродвигателя. Реальный ресурс электродвигателя будет определен по мере наработки в процессе эксплуатации установки.

Принудительная *циркуляция теплоносителя по контуру охлаждения активной зоны* осуществляется по следующей схеме.

Охлажденный теплоноситель с напора ГЦН поступает через щелевой фильтр в активную зону, где нагревается, отводя тепло от ТВЭЛОВ. После активной зоны горячий теплоноситель поднимается по индивидуальным тяговым трубам и общему тяговому участку блока труб и устройств и через переливные окна поступает в трубную систему ПГ, где охлаждается, передавая тепло теплоносителю второго контура. После трубной системы ПГ охлажденный теплоноситель по кольцевому зазору между внутрикорпусной шахтой и корпусом реактора поступает на всас ГЦН.

Циркуляция теплоносителя через ПГ при аварийных ситуациях, связанных с остановкой ГЦН, осуществляется за счет естественной конвекции по той же схеме.

Часть расхода теплоносителя при работе ГЦН из блока труб и устройств через переливные отверстия поступает в теплообменники-конденсаторы и далее охлажденным через сливные отверстия в дистанционирующем кольце подмешивается к основному потоку, поступающему в трубную систему ПГ.

При аварийном расхолаживании реактора через теплообменники-конденсаторы при остановленных ГЦН движение теплоносителя осуществляется за счет естественной конвекции от активной зоны вверх через блок труб и устройств к теплообменникам-конденсаторам и после охлаждения в них вниз через трубную систему ПГ, по кольцевому зазору между внутрикорпусной шахтой и корпусом реактора и через проточные части главных циркуляционных насосов к активной зоне.

*Чехлы ионизационных камер* предназначены для размещения во внутренней полости корпуса реактора подвесок ионизационных камер для контроля нейтронного потока.

Они длинномерные, сварной конструкции, трубного типа с герметичной внутренней полостью и фланцами, посредством которых осуществляется уплотнение чехлов в соответствующих патрубках днища корпуса реактора.

В днище корпуса реактора устанавливается шесть чехлов ионизационных камер. Материал чехлов – сталь 08X18H10T.

Для контроля состояния и управления реактором в его корпусе размещены следующие первичные измерительные преобразователи:

- 12 термоэлектрических преобразователей, предназначенных для измерения температуры первичного теплоносителя на входе и выходе активной зоны, которые установлены в стойках, сваренных в крышку реактора;

- шесть уровнемеров, предназначенных для контроля уровня теплоносителя первого контура от номинального уровня до верхнего обреза активной зоны, размещены в крышке реактора;

- шесть подвесок ионизационных камер, предназначенных для измерения уровня мощности и скорости ее изменения в эксплуатационных режимах, а также для контроля нейтронного потока в период перегрузки активной зоны, размещены внутри чехлов, крепящихся к патрубкам на днище корпуса реактора;

- 54 зонда внутриреакторного контроля, предназначенные для контроля теплотехнических и нейтронно-физических характеристик активной зоны, размещены внутри 18 стоек, равномерно расположенных на крышке.

**Анионитовый фильтр системы очистки теплоносителя и борной компенсации реактивности** предназначен для снижения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура в процессе выгорания топлива в активной зоне. Фильтр в составе системы работает периодически по мере выгорания топлива.

Основные технические характеристики фильтра приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Основные технические характеристики анионитового фильтра

Технические характеристики	Значение
Наполнитель	Анионит АВ-17-8чс
Фильтруемая среда	Вода первого контура
Номинальное давление, МПа	15,7
Рабочее давление, МПа	18,0
Рабочая температура, °С	60
Расход фильтруемой среды, м <sup>3</sup> /ч	До 30
Дренажный подслей	Титановая рубка
Объем, м <sup>3</sup> : полный анионита	4,5 3,0
Гидравлическое сопротивление после загрузки при расходе 30 м <sup>3</sup> /ч, МПа	0,03
Массогабаритные характеристики: диаметр внутренний, мм высота, мм масса в сухом состоянии, т масса в рабочем состоянии, т	1600 3250 10,56 23,7
Назначенный срок службы, лет	50–60

Фильтр представляет собой сварной вертикальный цилиндрический сосуд, состоящий из корпуса, верхнего и нижнего распределительных устройств.

Корпус выполнен из ковanej обечайки и приваренных к ней штампованных эллиптических днищ. На наружной поверхности обечайки расположены три строповочных крюка и четыре опоры для крепления аппарата к фундаменту, на верхнем днище – патрубок загрузки анионитов.

Верхнее днище снабжено горловиной с патрубком входа фильтруемой среды и люком для осмотра, имеющим фланцевый разъем, герметизируемый сваркой, нижнее – горловиной с патрубками выхода фильтруемой среды и выгрузки анионитов.

Распределительные устройства представляют собой щелевые пластинчатые фильтры, предназначенные для равномерного распределения фильтруемой среды по сечению фильтра и предотвращения заброса анионитов в контур. Размер щелей не более 0,25 мм.

Во внутреннюю полость фильтра загружаются титановая рубка и анионит марки АВ-17-8чс. Загрузка и выгрузка анионита производятся гидравлическим способом.

Материал корпуса – сталь 15Х2НМФА с антикоррозионной наплавкой; внутрикорпусных устройств – сталь 08Х18Н10Т; опор – сталь 20.

**Катионитовый фильтр системы очистки теплоносителя и борной компенсации реактивности** предназначен для выведения избытка щелочности из теплоносителя первого контура при снижении концентрации борной кислоты. Фильтр в составе системы работает периодически параллельно с анионитовым фильтром.

Основные технические характеристики фильтра приведены в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Основные технические характеристики катионитового фильтра

Технические характеристики	Значение
Наполнитель	Катионит КУ-2-8чс
Фильтруемая среда	Вода первого контура
Номинальное давление, МПа	15,7
Рабочее давление, МПа	18,0
Рабочая температура, °С	60
Расход фильтруемой среды, м <sup>3</sup> /ч	до 30
Дренажный подслои	Титановая рубка
Объем, м <sup>3</sup> : полный катионита	1,6 0,5
Гидравлическое сопротивление после загрузки при расходе 30 м <sup>3</sup> /ч, МПа	0,03
Массогабаритные характеристики: диаметр внутренний, мм высота, мм масса в сухом состоянии, т масса в рабочем состоянии, т	1000 3250 3,7 6,95
Назначенный срок службы, лет	50–60

Конструкция катионитового фильтра аналогична конструкции анионитового фильтра, но имеет меньшие габаритные характеристики.

Во внутреннюю полость фильтра загружаются титановая рубка и катионит марки КУ-2-8чс. Загрузка и выгрузка катионита производятся гидравлическим способом.

Материал корпуса – сталь 15Х2НМФА с антикоррозионной наплавкой; внутрикорпусных устройств – сталь 08Х18Н10Т; опор – сталь 20.

**Фильтр смешанного действия системы очистки теплоносителя и борной компенсации реактивности** предназначен для поддержания требуемого качества теплоносителя первого контура посредством улавливания ионитами из теплоносителя растворимых и нерастворимых продуктов коррозии, примесей и продуктов деления.

Основные технические характеристики фильтра смешанного действия приведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13

**Основные технические характеристики фильтра смешанного действия**

Технические характеристики	Значение
Наполнитель	Катионит КУ-2-8чс Анионит АВ-17-8чс
Фильтруемая среда	Вода первого контура
Номинальное давление, МПа	15,7
Рабочее давление, МПа	18,0
Рабочая температура, °С	60
Расход фильтруемой среды, м <sup>3</sup> /ч	до 30
Дренажный подслей	Титановая рубка
Объем, м <sup>3</sup> : полный ионитов	1,6 1,0
Гидравлическое сопротивление после загрузки при расходе 30 м <sup>3</sup> /ч, МПа	0,03
Массогабаритные характеристики: диаметр внутренний, мм высота, мм масса в сухом состоянии, т масса в рабочем состоянии, т	1000 3250 4,1 7,2
Назначенный срок службы, лет	50–60

Конструкция фильтра смешанного действия аналогична конструкции катионитового фильтра.

Во внутреннюю полость фильтра загружаются титановая рубка и иониты: анионит марки АВ-17-8чс и катионит марки КУ-2-8чс. Загрузка и выгрузка ионитов производятся гидравлическим способом.

Материал корпуса – сталь 15Х2НМФА с антикоррозионной наплавкой; внутрикорпусных устройств – сталь 08Х18Н10Т; опор – сталь 20.

**Фильтр-ловушка системы очистки теплоносителя и борной компенсации реактивности** предназначен для предотвращения выноса ионообменных смол в кон-

тур при прорыве щелевых распределительных устройств ионообменных фильтров посредством их улавливания. Фильтр-ловушка в составе системы работает постоянно.

Основные технические характеристики фильтра-ловушки приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.14

**Основные технические характеристики фильтра-ловушки**

Технические характеристики	Значение
Фильтруемая среда	Вода первого контура
Номинальное давление, МПа	15,7
Рабочее давление, МПа	18,0
Рабочая температура, °С	60
Расход фильтруемой среды, м <sup>3</sup> /ч	До 30
Объем, м <sup>3</sup>	0,3
Гидравлическое сопротивление после загрузки при расходе 30 м <sup>3</sup> /ч, МПа: начальное допустимое	0,03 0,7
Массогабаритные характеристики: диаметр внутренний, мм высота, мм масса в сухом состоянии, т масса в рабочем состоянии, т	450 2300 1,35 1,65
Назначенный срок службы, лет: корпуса выемной части	50–60 25–30

Фильтр-ловушка представляет собой сварной вертикальный цилиндрический сосуд, состоящий из корпуса, крышки, выемной части.

Корпус выполнен из ковanej обечайки и приваренного к ней штампованного эллиптического днища. На наружной поверхности обечайки расположены: патрубок выхода фильтруемой среды, строповочные крюки и четыре опоры для крепления аппарата к фундаменту, на днище – патрубок входа фильтруемой среды.

В верхней части корпуса предусмотрен фланцевый разъем для съемной плоской крышки, герметизируемый сваркой.

Внутри корпуса размещена выемная часть, устанавливаемая на опорный буртик, приваренный к стенкам корпуса, и прижатая нажимным устройством. Она представляет собой две трубные доски, между которыми закреплены 18 фильтрующих элементов с возможностью демонтажа любого элемента.

Рабочая поверхность каждого из фильтрующих элементов создана тремя штампованными фасонными элементами-желобами, образующими в поперечном сечении симметричный звездообразный профиль. В углублениях желобов расположены с определенным шагом дренажные отверстия для прохода фильтрата во внутреннюю полость фильтрующего элемента.

По наружной поверхности фильтрующего элемента плотно (виток к витку) навита деформированная проволока. Деформация проволоки перед навивкой осуществляется методом сплющивания обычной проволоки на заданную величину на небольшом участке с определенным шагом по всей длине проволоки. При навивке места сплю-

щивания проволоки образуют между соседними витками щель не более 0,1 мм, через которую происходит фильтрация.

Материал корпуса и крышки – сталь 15Х2НМФА с антикоррозионной наплавкой; внутрикорпусных устройств – сталь 08Х18Н10Т; опор – сталь 20.

**Теплообменник (рекуператор) системы очистки теплоносителя и борной компенсации реактивности** предназначен для охлаждения теплоносителя первого контура, поступающего из реактора в систему, и подогрева теплоносителя первого контура, возвращающегося из системы в реактор. Рекуператор в составе системы работает постоянно.

Основные технические характеристики рекуператора приведены в табл. 3.15.

Таблица 3.15

**Основные технические характеристики рекуператора**

Технические характеристики	Значение
Рабочая среда	Вода первого контура
Номинальное давление, МПа	15,7
Рабочее давление, МПа	18,0
Температура на входе, °С: в трубное пространство в межтрубное пространство	55 325
Температура на выходе, °С: из трубного пространства из межтрубного пространства	293 100
Расход среды, м <sup>3</sup> /ч	До 30
Площадь поверхности теплообмена, м <sup>2</sup>	107
Мощность рекуператора, МВт	8,8
Массогабаритные характеристики: диаметр внутренний, мм высота, мм масса в сухом состоянии, т масса в рабочем состоянии, т	700 4465 11 12
Назначенный срок службы, лет	30

Рекуператор представляет собой вертикальный кожухотрубный одноходовой теплообменный аппарат с противоточным движением сред. Охлаждаемая среда движется в межтрубном пространстве, охлаждающая – в трубах.

Рекуператор состоит из следующих элементов: корпуса, двух трубных досок, двух эллиптических днищ, поверхности теплообмена, внутрикорпусных устройств.

Корпус выполнен из ковanej обечайки, с двух торцов к которому приварены трубные доски. На наружной поверхности обечайки расположены патрубки подвода и отвода охлаждаемой среды, а также строповочные крюки и четыре опоры для крепления аппарата к фундаменту.

Эллиптические днища приварены к трубным доскам. На нижнем днище расположен патрубок подвода охлаждающей среды, на верхнем – патрубок отвода охлаждающей среды.

Поверхность теплообмена представляет собой многорядную многозаходную змеевиковую бухту, образованную навивкой труб 18×2 мм на центральную обечайку. Концы змеевиков выведены в трубные доски и закреплены на сварке.

Материал рекуператора за исключением опор – сталь 08X18H10T; опор – ст.3.

**Теплообменник (доохладитель) системы очистки теплоносителя и борной компенсации реактивности** предназначен для доохлаждения теплоносителя первого контура, поступающего в систему после рекуператора, до температур, приемлемых для работы ионообменных фильтров. Доохладитель в составе системы работает постоянно.

Основные технические характеристики доохладителя приведены в табл. 3.16.

Таблица 3.16

Основные технические характеристики доохладителя

Технические характеристики	Значение
Рабочая среда: межтрубное пространство трубное пространство промконтура	Вода первого контура Вода
Номинальное давление по первому контуру, МПа	15,7
Рабочее давление по первому контуру, МПа	18,0
Температура на входе, °С: в межтрубное пространство в трубное пространство	100 До 45
Температура на выходе, °С: из межтрубного пространства из трубного пространства	55 70
Расход сред, м <sup>3</sup> /ч: в межтрубном пространстве в трубном пространстве	До 30 2×55
Площадь поверхности теплообмена расчетная, м <sup>2</sup>	2×50
Площадь поверхности теплообмена, м <sup>2</sup>	103,86
Мощность доохладителя, МВт	1,6
Массогабаритные характеристики: диаметр внутренний, мм высота, мм масса в сухом состоянии, т масса в рабочем состоянии, т	1180 3190 11,5 13,8
Назначенный срок службы, лет	30

Дохладитель представляет собой вертикальный кожухотрубный двухходовой теплообменный аппарат с противоточным движением сред и двумя независимыми секциями по охлаждающей среде. Охлаждаемый теплоноситель первого контура движется в межтрубном пространстве, охлаждающий теплоноситель промконтура – в трубах.

Дохладитель состоит из корпуса, трубной доски, четырех камер, поверхности теплообмена, внутрикорпусных устройств.

Корпус выполнен из ковanej обечайки и приваренного к ней эллиптического днища с расположенным на нем патрубком отвода теплоносителя первого контура. На наружной поверхности обечайки расположены строповочные крюки и четыре опоры для крепления аппарата к фундаменту.

В верхней части к корпусу приварена трубная доска, на которой расположены две камеры подвода и две камеры отвода теплоносителя промконтюра, а также патрубок подвода теплоносителя первого контюра. Камеры выполнены из обечайки и плоской крышки, соединенных между собой усиковым сварным швом для обеспечения доступа к узлам крепления труб в трубной доске при ремонтах.

Поверхность теплообмена представляет собой многорядную многозаходную змеевиковую бухту, образованную навивкой труб 18×2 мм на центральную обечайку. Верхние концы змеевиков выведены двумя пучками на трубную доску в две камеры. Нижние концы змеевиков с помощью прямых опускных труб, проходящих внутри центральной обечайки, также выведены на трубную доску в две другие камеры. Концы трубной системы в трубной доске закреплены на сварке.

Материал корпуса – перлитная теплоустойчивая сталь 15X2НМФА с двухслойной антикоррозионной наплавкой; трубной системы с внутрикорпусными устройствами, трубной доски, камер – сталь 08X18Н10Т; опор – сталь 20.

**Электронасос системы очистки теплоносителя и борной компенсации реактивности** предназначен для организации принудительной циркуляции теплоносителя первого контюра в системе.

Основные технические характеристики электронасоса приведены в табл. 3.17.

Таблица 3.17

**Основные технические характеристики электронасоса**

Технические характеристики	Значение
Тип электронасоса	Вертикального исполнения герметичный центробежный
Подача, м <sup>3</sup> /ч	30
Напор, м вод. ст.	30
Температура воды на всасывании, °С, не более	60
Давление на всасывании, МПа	16
Рабочее давление корпуса, МПа	18
Параметры питающей сети: род тока частота, Гц	Переменный трехфазный, напряжение 380 В 50
Ток, потребляемый из сети, А	30
Мощность, потребляемая из сети, кВт	12
Масса, кг	1300
Назначенный ресурс, тыс. ч	120
Назначенный срок службы, лет	15

Электронасос обеспечивает работу при статическом давлении на всасывании, которое больше давления насыщения на 0,05 МПа, его конструкция позволяет проводить дезактивацию наружных и внутренних полостей.

Электронасос состоит из герметичного асинхронного электродвигателя и лопастного насоса, объединенных в едином агрегате. В его состав входят рабочее колесо центробежного типа, радиальный лопаточный направляющий аппарат, конфузор, гидрокамера с подводящим и отводящим патрубками.

Рабочее колесо установлено на верхнем конце вала ротора электродвигателя. Вход в рабочее колесо – осевой сверху.

В состав электродвигателя входят: корпус статора, ротор, подшипниковые узлы, нижняя крышка.

Полость обмотки статора отделена от рабочей среды тонкой статорной перегородкой из стали ХН78Т, опирающейся на расточку пакета железа статора. Концы статорной перегородки приварены к корпусу статора герметичными швами.

Корпус статора выполнен сварным и рассчитан на рабочее давление первого контура. В случае разрушения статорной перегородки разгерметизация первого контура исключена.

Клеммная коробка – герметичная, рассчитана на наружное давление 5 МПа.

Роторная полость корпуса статора закрыта снизу крышкой. Ротор электродвигателя массивный, выполнен из стали 09Х17Н с «беличьей» клеткой из меди, «мокрого» исполнения, вращается в радиальных подшипниках, установленных в расточках статора. Осевая нагрузка ротора, направленная вниз, воспринимается упорным подшипником.

Все элементы пар трения подшипников выполнены из антифрикционного материала – силицированного графита марки СГП-0,5.

Охлаждение статора электродвигателя осуществляется перекачиваемой водой. Уплотнение разъема между корпусом статора и гидрокамерой производится сваркой. Замена электронасоса выполняется совместно с гидрокамерой путем отрезки присоединительных труб.

Для контроля работы и состояния электронасоса используется перепадомер, измеряющий напор насоса, два термометра сопротивления, измеряющие температуру воды в районе подшипников, а также датчики системы диагностирования, выдающие сигнал о степени износа вкладышей подшипников.

### 3.4. Реакторный блок ВБЭР-300

Реакторный блок ВБЭР-300 (рис. 3.29) предназначен для производства пара требуемых параметров за счет тепла ядерной реакции.

В состав реакторного блока входят:

- реактор с активной зоной;
- четыре парогенератора;
- четыре главных циркуляционных насоса;
- приводы СУЗ.

Основные технические характеристики реакторного блока приведены в табл. 3.18.

Корпус реактора разрабатывается с учетом размещения в нем кассетной активной зоны в составе 85 ТВС и обеспечения назначенного срока службы – 60 лет при работе по 8000 ч в год на номинальной мощности. Максимальный флюенс нейтронов с  $E_n > 0,5$  МэВ на основной металл корпуса реактора составляет  $3,5 \cdot 10^{23}$  нейтр/см<sup>2</sup>.

Назначенный ресурс корпуса реактора – не менее 480 000 ч.

Отличительной особенностью компоновки реакторного блока является то, что корпуса реактора, парогенераторов и гидрокамеры главных циркуляционных насосов соединяются между собой с помощью сварки через короткие патрубки. Такая компоновка основного оборудования исключает трубопроводы большого диаметра, а вместе с тем и класс аварий с большими и средними течами.

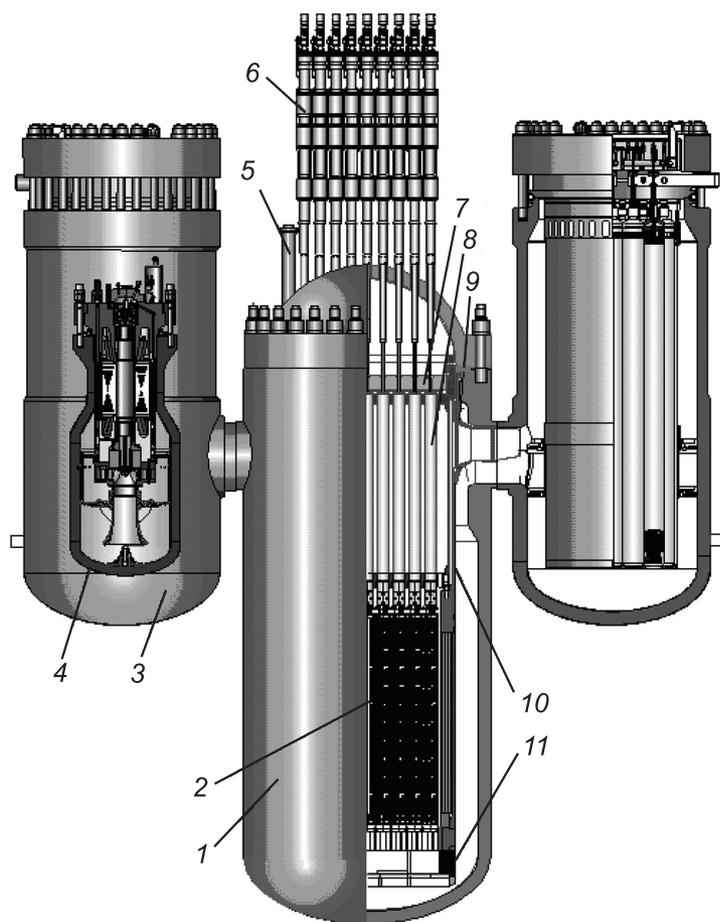


Рис. 3.29. Реакторный блок ВБЭР-300:

1 – реактор; 2 – активная зона; 3 – парогенератор; 4 – главный циркуляционный насос; 5 – стойка зондов ВРК; 6 – привод СУЗ; 7 – блок зондов ВРК; 8 – блок защитных труб; 9 – разделительная обечайка; 10 – внутрикорпусная шахта; 11 – щелевой фильтр

Технические решения, использованные при создании конструкции реакторного блока, подтверждены соответствующим положительным опытом применения их в эксплуатирующихся серийных изделиях судовых ядерных паропроизводящих установок (ЯППУ), результатами комплекса необходимых НИОКР, выполненных на стадии их разработки и внедрения и после эксплуатационных исследований по истечению назначенных показателей.

Для изготовления основного оборудования реакторного блока применяются отработанные технологии, ориентированные на традиционные заводы-изготовители, владеющие опытом изготовления изделий-аналогов, современным металлургическим, ковочным, сварочным, механообрабатывающим оборудованием и современным комплексом средств технического контроля качества, апробированной технологией интеграции отдельных корпусов оборудования в единый блок корпусов как на заводе-изготовителе, так и на месте монтажа блока, с применением автоматизированных способов сварки и наплавки.

Основные технические характеристики реакторного блока

Технические характеристики	Значение
Тепловая мощность, МВт	850
Давление первого контура, МПа	15,7
Температура теплоносителя, °С: на выходе из активной зоны на входе в активную зону	332 294
Расход теплоносителя, т/ч	13 610
Паропроизводительность второго контура, т/ч	1460
Параметры перегретого пара за парогенератором: давление, МПа температура, °С	6,38 305
Температура питательной воды, °С	185
Мощность электродвигателя главного циркуляционного насоса, кВт	1050
Подача, м <sup>3</sup> /ч	4607
Напор, м	61
Количество приводов СУЗ, шт.	85

Преимущества компактного размещения основного оборудования в едином блоке корпусов особенно выгодно реализуется при сохранении работоспособности реакторного блока в проектных авариях и целостности в запроектных авариях со значительными внешними воздействиями – сейсмическими, падение самолета, ударной волны и т.п.

Обеспечение работоспособности в указанных ситуациях с большими проектными внешними воздействиями, чем для наземных АЭС, как одно из первоочередных требований к реакторным установкам судового и корабельного назначения, эволюционно привело от петлевого к блочному решению, что впоследствии было подтверждено длительным опытом эксплуатации ледокольных, корабельных реакторных установок.

Ключевым вопросом интеграции блока корпусов из отдельных корпусов на площадке строительства (или на заводе-изготовителе) является обеспечение всех требований по качеству к сварным соединениям главных патрубков, выполненных без последующей термической обработки, которые гарантированы:

- экспериментальной отработкой и аттестацией технологии сварки с применением автоматического способа сварки;
- результатами анализа напряженно-деформированного состояния и ресурсных характеристик от воздействия всего спектра внешних и внутренних нагружений статического, циклического и ударного характера;
- положительными результатами послеексплуатационного комплексного исследования сварного соединения главного патрубка «корпус–гидрокамера» реактора атомного ледокола «Ленин», не выявившего дефектов выше уровня фиксации при контроле на стадии изготовления;
- производственным контролем сплошности металла сварного соединения, периодическим контролем в процессе эксплуатации неразрушающими методами (визуальный, ультразвуковой, радиографический контроль).

Основными сборочными единицами реакторного блока являются блок корпусов, активная зона, выемной блок, верхний блок, четыре трубные системы парогенераторов, четыре главных циркуляционных насоса с клапанными коробками, приводы СУЗ. Общий вид реакторного блока представлен на рис. 3.30.

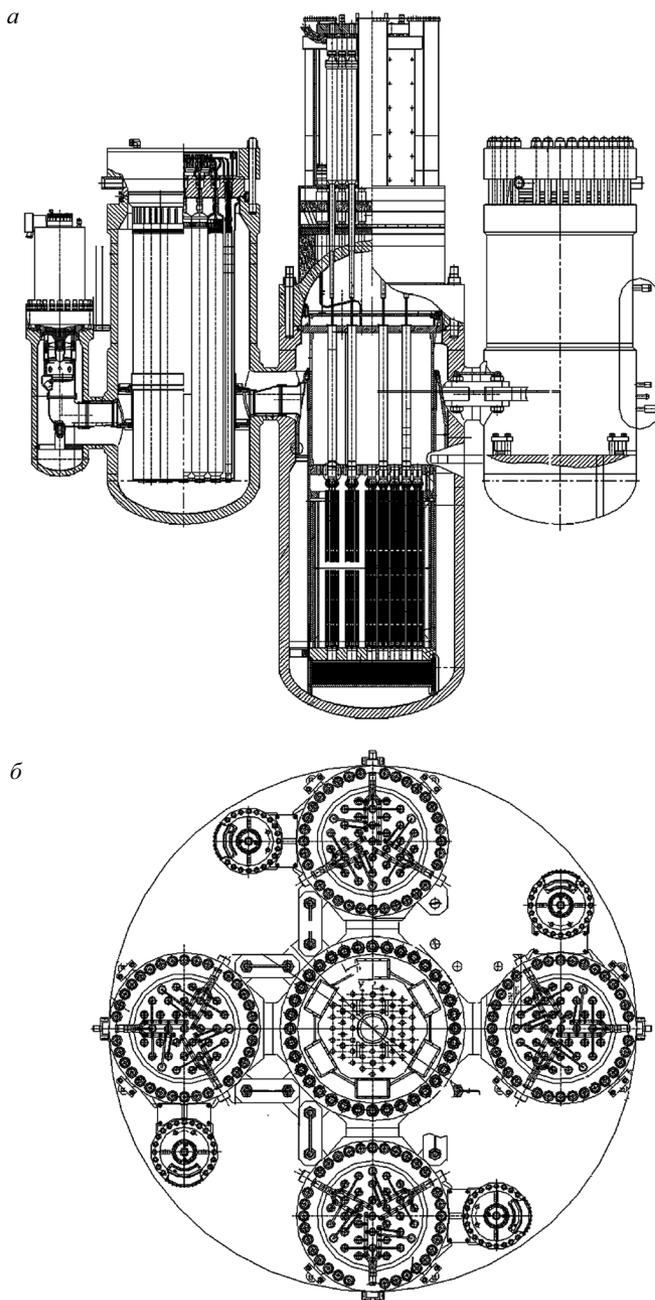


Рис. 3.30. Общий вид реакторного блока ВВЭР-300:  
*a* – продольный разрез; *б* – вид сверху

Интегрированный корпус включает корпус реактора и соединенные с ним силовыми патрубками, выполненными по схеме «труба в трубе», четыре блока «корпус парогенератора и гидрокамера главного циркуляционного насоса».

Корпус реактора служит для размещения в нем внутрикорпусного блока и представляет собой сварной цилиндрический сосуд с эллиптическим днищем, четырьмя главными патрубками и фланцевой частью. Внутренняя поверхность корпуса защищена от коррозионного воздействия теплоносителя первого контура антикоррозионной наплавкой.

Блок «корпус парогенератора и гидрокамера главного циркуляционного насоса» включает корпус парогенератора и гидрокамеру, соединенные между собой сваркой их главных патрубков.

Корпус парогенератора служит для размещения в нем трубной системы парогенератора и представляет собой цилиндрический сосуд с эллиптическим днищем, двумя главными патрубками, расположенными под углом  $90^\circ$  относительно друг друга со смещением по вертикали. В районе главных патрубков каждый корпус парогенератора имеет по четыре опоры, которыми реакторный блок крепится к фундаменту.

Корпус парогенератора изготовлен из перлитной стали, его внутренняя поверхность защищена от коррозионного воздействия теплоносителя первого контура антикоррозионной наплавкой.

В районе главных патрубков расположен кольцевой коллектор подачи теплоносителя из ГЦН в реактор.

На корпусе парогенератора расположены патрубки, служащие для присоединения систем реакторной установки. В трех парогенераторах предусмотрены патрубки для подачи воды от систем, обеспечивающих аварийное охлаждение активной зоны, патрубки снабжены сужающими устройствами диаметром 32 мм. В одном из парогенераторов предусмотрены патрубки для подключения компенсатора давления и системы очистки и расхолаживания:

- забор теплоносителя в систему очистки и расхолаживания;
- возврат теплоносителя из системы очистки и расхолаживания;
- подключение парового компенсатора давления;
- забор теплоносителя на душирующее устройство парового компенсатора давления.

Все патрубки снабжены сужающими вставками.

Гидрокамера представляет собой конструкцию, предназначенную для размещения главного циркуляционного насоса и клапанной коробки. Клапанная коробка имеет обратный клапан, исключающий обратную циркуляцию теплоносителя первого контура через парогенератор при остановке главного циркуляционного насоса, и перепускные клапана для обеспечения естественной циркуляции теплоносителя первого контура через парогенератор при остановке всех главных циркуляционных насосов.

Крепление реакторного блока осуществляется на одном фундаментном уровне: от вертикальных перемещений – четырьмя лапами каждого корпуса парогенератора, от горизонтальных перемещений – четырьмя шпоночными выступами на корпусе реактора. Элементы крепления обеспечивают свободные тепловые расширения элементов реакторного блока.

Выемной блок состоит из внутрикорпусной шахты, блока труб и устройств и блока зондов внутриреакторного контроля.

Внутрикорпусная шахта предназначена для размещения ТВС активной зоны и блока труб и устройств, а также для разделения полости реактора на напорную и сливную. Она устанавливается и уплотняется в разделительной обечайке корпуса реактора.

Внутрикорпусная шахта включает обечайку с граненым поясом, нижнюю плиту, вытеснители, щелевой фильтр.

Тепловыделяющие сборки шестигранного типа с размером «под ключ» 234,8 мм в количестве 85 штук устанавливаются в нижней плите внутрикорпусной шахты по углам правильной треугольной решетки с шагом 236 мм, размещаются, ориентируясь в определенном положении, в отверстия нижней плиты.

Диагностирование внутренней поверхности корпуса реактора в районе активной зоны и выгрузка контейнеров с образцами-свидетелями обеспечиваются после демонтажа внутрикорпусной шахты.

Блок труб и устройств включает обечайку с двумя плитами, защитные трубы для поглощающих стержней рабочих органов СУЗ.

Блок защитных труб устанавливается на граненом поясе внутрикорпусной шахты. Нижняя плита блока труб и устройств перфорирована отверстиями для сопряжения с головками ТВС и прохода теплоносителя внутрь блока.

В отверстиях нижней плиты размещаются защитные трубы для поглощающих стержней, извлекаемых из ТВС при работе реактора. Они закрепляются на верхней плите блока труб и устройств. Циркуляция теплоносителя в защитных трубах снижена до минимальных протечек.

Обечайка между плитами имеет окна для прохода теплоносителя в выходные патрубки.

Блок труб и устройств обеспечивает поджатие головок ТВС и сам поджимается крышкой реактора через блоки пружин.

На верхнюю плиту блока труб и устройств устанавливается блок зондов внутриреакторного контроля, имеющий шесть стоек, герметизирующихся в соответствующих стойках крышки реактора.

Основными сборочными единицами верхнего блока являются крышка и приводы рабочих органов СУЗ. Кроме того, в состав верхнего блока входит блок специальной изоляции, траверса для демонтажа верхнего блока и раздаточный коллектор системы воздушного охлаждения приводов СУЗ.

Крышка состоит из фланцевой части с приваренной к ней полусферой. Внутренняя поверхность крышки защищена от коррозионного воздействия теплоносителя первого контура антикоррозионной наплавкой. На крышке расположены стойки для установки приводов СУЗ и стойки для герметизации стоек с зондами внутриреакторного контроля.

Крышка обеспечивает герметизацию главного разъема реактора с помощью 40 шпилек М150 с двумя кольцевыми металлическими прокладками круглого сечения, аналогичных уплотнению главного разъема реактора ВВЭР-1000.

Циркуляция теплоносителя первого контура в реакторном блоке осуществляется следующим образом: теплоноситель с напора главных циркуляционных насосов через внутренние насосные патрубки и кольцевую полость парогенератора попадает в реактор. Пройдя кольцевой зазор между корпусом реактора и обечайкой внутрикорпусной шахты, теплоноситель через щелевой фильтр попадает в напорную камеру активной зоны.

Пройдя активную зону, нагретый теплоноситель первого контура попадает в сливную камеру реактора, откуда через внутренние патрубки поступает в кольцевой зазор между обечайкой трубной системы и корпусом парогенератора, а затем через переливные окна на трубную систему парогенераторов.

Из парогенераторов охлажденный теплоноситель первого контура по кольцевым полостям между главными и внутренними патрубками поступает в гидрокamеры на всас главных циркуляционных насосов.

### 3.5. Реактор УВР-1500

Реактор УВР (рис. 3.31) предназначен для выработки тепловой энергии в составе реакторной установки АЭС с электрической мощностью блока 1500 МВт. По принципу работы является гетерогенным ядерным энергетическим реактором корпусного типа на тепловых нейтронах с обычной водой в качестве теплоносителя и замедлителя (ВВЭР). Энергия деления ядерного топлива в активной зоне отводится теплоносителем, прокачиваемым через нее главными циркуляционными насосами.

Реактор УВР разработан с учетом опыта эксплуатации отечественных реакторов ВВЭР, которые прошли путь от мощности 210 МВт (эл.) (ВВЭР-210) до мощности 1000 МВт (эл.) (ВВЭР-1000), а также зарубежных реакторов PWR, которые в настоящее время переходят к мощности 1500 МВт (эл.) (например, реактор EPR, разрабатываемый совместно фирмами Siemens и Framatome).

Цель разработки реактора УВР – повышение экономичности блока АЭС с реактором ВВЭР за счет увеличения мощности и надежности при обеспечении нормативного уровня безопасности.

Проект реактора УВР разрабатывается в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, действующей в атомной энергетике Российской Федерации.

Реактор УВР относится к оборудованию нормальной эксплуатации, важному для безопасности, и должен соответствовать:

- первому классу безопасности;
- группе А;
- первой категории сейсмостойкости.

Основные технические характеристики реактора УВР на номинальной мощности в стационарном режиме при нормальных условиях эксплуатации приведены в табл. 3.19.

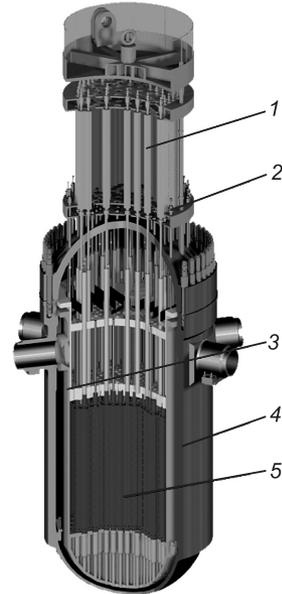


Рис. 3.31. Реактор УВР-1500:  
1 – привод СУЗ; 2 – блок зондов; 3 – внутренкорпусные устройства; 4 – корпус;  
5 – активная зона

Таблица 3.19

Основные технические характеристики реактора УВР-1500

Технические характеристики	Значение
Мощность тепловая, МВт	4200
Давление в реакторе, МПа	15,7
Температура теплоносителя, °С: на входе в реактор на выходе из реактора	296,5 326,5
Расход теплоносителя через реактор, кг/с	24 070

Назначенный срок службы реактора – 60 лет (кроме оборудования, заменяемого в процессе эксплуатации с учетом его назначенного срока службы).

Расчетная продолжительность кампании ТВС 28 000 ч работы реактора на номинальной мощности при количестве перестановок ТВС за кампанию 4.

Энергонапряженность активной зоны ~88 кВт/л.

Скорость изменения температуры теплоносителя не должна превышать 20 °С/ч – при плановом разогреве, 30 °С/ч – при плановом расхолаживании, 60 °С/ч – при ускоренном расхолаживании.

За календарный год реактор обеспечивает выработку энергии, соответствующей энергии, производимой в течение не менее 7000 ч работы на номинальной мощности.

Конструкция реактора и его крепление совместно с системами СУЗ и САОЗ обеспечивают безопасную остановку и расхолаживание реактора при максимальном расчетном землетрясении и разрыве трубопровода ДУ850 по полному сечению.

При монтаже отклонение от горизонтальности не должно превышать 0,5 мм на диаметре уплотнительных поверхностей главного разъема, а за назначенный срок службы – 2 мм.

Масса реактора (без теплоносителя и ТВС активной зоны) – 390 т.

Реактор представляет собой вертикальный сосуд высокого давления, внутри которого размещается активная зона и внутрикорпусные устройства (ВКУ). Опорными поверхностями патрубков он устанавливается на фундамент шахты реактора и закрепляется. ВКУ состоят из внутрикорпусной шахты и блока защитных труб; выполняются выемными для обеспечения возможности осмотра внутренних поверхностей корпуса реактора.

Во внутрикорпусной шахте реактора устанавливаются ТВС активной зоны. Активная зона комплектуется из 253 ТВС (121 ТВС имеет поглощающие стержни, которые перемещаются исполнительным механизмом СУЗ реактора).

Сверху на активную зону устанавливается БЗТ, дистанционирующий ТВС и предотвращающий их всплытие при работе реактора. Внутри БЗТ размещаются защитные трубы ПС и направляющие трубы зондов внутриреакторного контроля (ВРК).

На фланец корпуса устанавливается верхний блок. Реактор снабжается необходимым количеством блоков зондов ВРК. Уплотнение главного разъема реактора обеспечивается его деталями.

В табл. 3.20 указаны назначенные сроки службы оборудования реактора УВР.

Конструкция реактора УВР позволяет производить его разборку, контроль и ремонт оборудования, а также замену оборудования, выработавшего ресурс.

В основном ремонтпригодность реактора УВР соответствует ремонтпригодности реактора ВВЭР-1000.

Таблица 3.20

Срок службы оборудования реактора УВР

Наименование оборудования	Количество, шт.	Срок службы оборудования, лет
Корпус	1	60
Крышка (блок верхний без приводов СУЗ)	1	60
Блок труб и устройств (без блоков зондов ВРК)	1	60
Шахта внутрикорпусная (с выгородкой)	1	60
Детали главного разъема:		
шпилька М210	54	30
гайка М210	54	30
прокладка	2	4
Блок зондов ВРК	21	10

**Корпус** представляет собой цилиндрический вертикальный сосуд высокого давления, герметично уплотняемый крышкой верхнего блока и деталями главного уплотнения. Внутренняя поверхность корпуса покрыта аустенитной наплавкой, защищающей основной металл от коррозионного воздействия, наводороживания и обеспечивающей возможность дезактивации внутренней поверхности корпуса.

Конструкция корпуса и его элементов обеспечивает возможность проведения периодического обследования состояния корпуса (основного металла, антикоррозионных покрытий, сварных соединений) снаружи и изнутри в объеме до 100 %.

Патрубки подвода и отвода теплоносителя расположены в корпусе выше активной зоны.

Корпус состоит из фланца, цилиндрической обечайки с патрубками Ду850, цилиндрической обечайки, расположенной напротив активной зоны и сферического днища, сваренных между собой кольцевыми швами. Размеры обечайки определены исходя из технологических возможностей их изготовления на заводах России из слитков металла в 290 т и максимального наружного диаметра заготовок 5540 мм. Расположение сварных швов выбрано из условия наименьшего облучения сварных швов в районе активной зоны и возможности получения сферического днища из цельной поковки. Во фланце корпуса выполнено 48 резьбовых отверстий М210 под шпильки главного уплотнения, проточка для опоры шахты активной зоны и канавки под уплотнительные прокладки. Для контроля протечек уплотнения главного разъема между уплотнительными поверхностями выполняется канавка, соединенная сверлением со штуцером отвода протечек.

К отрезкам обечайки зоны патрубков привариваются восемь патрубков Ду850 для входа и выхода теплоносителя. Отростки в обечайках выполнены штамповкой, аналогично технологии получения патрубков Ду850 в корпусе реактора ВВЭР-1000.

На внутренней поверхности корпуса в районе выходных патрубков выполняются накладки для уплотнения выходных патрубков внутрикорпусной шахты. В нижней части корпуса расположено восемь кронштейнов, к которым при сборке реактора крепятся шпонки, сопрягаемые с пазами шахты активной зоны.

Определяющей проблемой повышения безопасности и надежности реакторов нового поколения с длительными сроками службы является оптимальный выбор конструкционных материалов, обеспечивающих высокие механические свойства в условиях воздействия эксплуатационных факторов.

В качестве основного материала для корпуса реактора выбрана перлитная теплорадиационноустойчивая низколегированная сталь 15Х2НМФА (15Х2НМФА-А). Сталь этой композиции разработана и освоена для корпусов реакторов ВВЭР (изготовлено 26 корпусов), обладает достаточно высокими прочностными (аттестована на КП45 при 350 °С) и технологическими свойствами, удовлетворительно сваривается, имеет значительный исходный уровень сопротивления хрупкому разрушению.

Для антикоррозионной наплавки корпуса реактора используются сварочные материалы оптимизированного состава 07Х25Н13 (для первого слоя) и 04Х20Н10Г2В (для второго слоя) с пониженным содержанием  $\alpha$ -фазы и примесных элементов.

На внутренней стенке корпуса напротив активной зоны размещены образцы-свидетели в герметичных контейнерах, предназначенные для получения информации об изменении физико-механических свойств и критической температуры хрупкости основного материала корпуса и его сварных соединений под воздействием нейтронного и  $\gamma$ -излучения и температуры.

Исходным материалом для изготовления образцов-свидетелей основного металла является металл обечайки, расположенной напротив активной зоны. Материал под-

вергается тому же комплексу термических обработок и проходит тот же контроль, что и обечайка, от пробного кольца которой он отобран в процессе изготовления корпуса.

Исходным материалом для образцов-свидетелей металла сварного шва и зоны термического влияния является кольцевая сварная проба, изготовленная из припуска той же обечайки путем сварки двух колец одинаковой толщины, по той же разделке, при идентичных режимах и методах сварки, теми же исполнителями, с применением сварочных материалов той же партии, что и сварные швы корпуса. Сварная проба подвергается тому же комплексу термических обработок, что и сварные швы корпуса.

Для контроля нейтронного потока и температуры в контейнерах с образцами установлены индикаторы.

Комплект облучаемых образцов предусматривает периодическое извлечение их для исследования при эксплуатации реактора.

Габариты корпуса: высота – 10 700 мм, диаметр наружный по фланцу – 5900 мм, диаметр наружный напротив активной зоны – 5660 мм. Размер в плане по патрубкам – 7800 мм. Масса корпуса – 390 т.

**Верхний блок** является составной частью реактора и предназначен для размещения приводов СУЗ, первичных измерительных преобразователей системы ВРК, устройств, обеспечивающих охлаждение приводов СУЗ, фиксации внутрикорпусной шахты с активной зоной и блока защитных труб от вертикальных перемещений, обеспечения тепловой защиты и защиты от ионизирующих излучений пространства над крышкой реактора, а также уплотнения главного разъема реактора.

*Верхний блок* выполняется в виде сборно-разъемной конструкции, объединяющей в единую сборочную единицу крышку реактора, приводы СУЗ, металлоконструкцию, траверсу для транспортирования верхнего блока при его монтаже и демонтаже, кожух.

Принятая конструкция верхнего блока обеспечивает возможность его монтажа и демонтажа в процессе обслуживания реактора без разборки составляющих частей блока, что позволяет сократить сроки подготовительных работ при перегрузке активной зоны реактора. Кроме того, конструкция верхнего блока обеспечивает возможность проведения контроля состояния комплектующих изделий в ходе эксплуатации, а также их ремонта.

Основной несущей конструкцией верхнего блока является крышка реактора, на которую устанавливается и закрепляется комплектующее оборудование данного блока.

Крепление стоек приводов СУЗ, преобразователей системы ВРК, блоков КИП, устройства газоудаления осуществляется сварными швами.

В конструкцию верхнего блока входят также стойки ВРК, предназначенные для вывода из внутренней полости реактора коммуникаций первичных измерительных преобразователей систем технологического контроля параметров реактора.

*Крышка* состоит из фланца, сферы и патрубков. Сфера выполняется штампованной. Она имеет отверстия, в которые устанавливаются патрубки привода СУЗ и блока датчиков ВРК. Материалы фланца и сферы – сталь 15Х2НМФА с аустенитной антикоррозионной наплавкой на внутренних поверхностях.

Во фланце выполняются отверстия под шпильки главного разъема и два паза с уплотнительными поверхностями для установки и крепления прокладок.

На крышке размещается 121 стойка СУЗ для крепления и уплотнения приводов СУЗ. Стойка представляет собой сварную трубчатую конструкцию переменного по высоте сечения, имеющую на верхнем торце фланец с резьбовыми отверстиями под шпильки, крепящие привод СУЗ. Внутренняя часть стоек из углеродистой стали имеет антикоррозионное покрытие, верхняя часть выполняется из аустенитной стали. Стойки привариваются к крышке через переходную наплавку в нижней части отверстий.

Аналогичными по конструкции и применяемым материалам являются стойки, предназначенные для направляющих ВРК, блоков КИП, устройств газоудаления.

Габариты крышки: высота от поверхности главного разъема до торцов патрубков – 4000 мм, наружный диаметр по фланцу – 5900 мм. Масса крышки – 121 т.

В комплект деталей главного разъема входят: 54 шпильки М 210×6, гайки, шайбы и две прокладки. Для обеспечения прокаливаемости в центре шпильки выполнено отверстие диаметром 80 мм. Гайка и шайба снабжаются сферическими контактными поверхностями. Прокладка – упругая (например, типа «Геликофлекс») с наружным диаметром 12 мм. Масса комплекта – 29 т.

*Металлоконструкция* верхнего блока представляет собой сборно-сварную сборочную единицу, предназначенную для соединения составляющих частей верхнего блока.

В состав металлоконструкции входят: кожух воздушного охлаждения, плита промежуточная, плита (верхняя) дистанционирующая, обеспечивающая дистанционирование и фиксирование верхних торцов приводов СУЗ и центральных (внутренних) стоек первичных измерительных преобразователей системы ВРК, а также трубы направляющие, штанги и крепежные элементы, предназначенные для соединения составляющих частей верхнего блока в единую силовую конструкцию.

В качестве основного конструкционного материала металлоконструкции применена углеродистая сталь.

*Траверса* предназначена для транспортирования верхнего блока при выполнении монтажно-демонтажных работ по обслуживанию реактора, связанных с его вскрытием при перегрузке активной зоны, а также выполнения функции упора, ограничивающего вертикальное перемещение вверх привода СУЗ в случае разрыва стойки. Траверса представляет собой силовую сварную конструкцию, состоящую из обечайки, плит (нижней, верхней), грузовой проушины и силового набора ребер. Основным конструкционным материалом траверсы – углеродистая сталь.

Траверса с помощью штанг соединяется с крышкой реактора и предназначена для монтажа (демонтажа) верхнего блока в процессе эксплуатации.

Габариты траверсы: высота до центра проушины – 1350 мм, наружный диаметр – 4150 мм. Масса траверсы – 20,6 т.

*Привод СУЗ* электромагнитного типа, имеет воздушное охлаждение. Привод СУЗ перемещает один рабочий орган СУЗ массой 25 кг.

В состав реактора входит 121 привод СУЗ.

Привод СУЗ установлен сверху на стойку крышки реактора и заполнен теплоносителем, объем которого в стойке привода СУЗ – 0,03 м<sup>3</sup>.

Масса привода СУЗ – 400 кг.

Комплект *электрокабелей приводов СУЗ* закрепляется на поддоне, установленном на штангах верхнего блока.

Масса комплекта (с поддоном и креплениями) – 2 т.

*Кожух* воздушного охлаждения приводов СУЗ состоит из входного и выходного коллекторов и труб, которые охватывают патрубки приводов СУЗ.

Габариты кожуха: высота – 3500 мм, наружный диаметр – 4300 мм. Масса кожуха – 18 т.

В состав **внутрикорпусных устройств** входит шахта внутрикорпусная (ШВК) с выгородкой и блок защитных труб.

Функциональное назначение внутрикорпусных устройств реактора:

- формирование исходной геометрии активной зоны и сохранение ее в реакторе без изменения в аварийных ситуациях и при внешних воздействиях;
- размещение и дистанционирование каждой ТВС;
- удержание ТВС от всплытия и вибрации;

- размещение органов регулирования и зондов ВРК, обеспечение возможности свободного вертикального перемещения их в активной зоне и защиты от непосредственного динамического воздействия потока теплоносителя;
- организация циркуляции теплоносителя, обеспечение равномерного расхода теплоносителя через ТВС;
- уменьшение величины нейтронного потока, падающего на корпус реактора;
- обеспечение гарантированного времени падения органов регулирования в аварийных режимах.

Тепловыделяющие сборки устанавливаются в гнезда опорных стаканов ШВК и посредством расположенных на цилиндрических хвостовиках штырей однозначно ориентируются в плане.

Ориентация ТВС в плане и точное совмещение осей направляющих каналов в ТВС и БЗТ за счет сопряжения головок ТВС с трубами БЗТ, а хвостовиков ТВС с опорными стаканами ШВК обеспечивают свободное перемещение органов регулирования в ТВС и БЗТ.

Материал ВКУ – аустенитная нержавеющая сталь.

*Шахта внутрикорпусная* представляет собой сборно-сварную металлоконструкцию, которая устанавливается фланцем на опорный бурт в корпусе реактора и в нижней части фиксируется расположенными на внутренней поверхности корпуса шпонками, входящими в зацепление с соответствующими пазами на цилиндрической обечайке шахты.

Сферическое днище ШВК в совокупности с опорными стаканами для каждой ТВС и дистанционирующей плитой образуют нижнюю опорную конструкцию активной зоны, которая сохраняет несущую способность и функциональное назначение даже в ситуации максимальной аварии с потерей теплоносителя.

Опорная конструкция активной зоны за счет перфорации сферического днища и опорных стоек под ТВС образует камеру смещения, назначением которой является снижение пульсации давления и неравномерности расхода теплоносителя на входе в активную зону.

Верхняя часть ШВК снабжается четырьмя патрубками для выхода теплоносителя. При разогреве указанные патрубки прижимаются к уплотнительным поверхностям выходных патрубков корпуса.

Нижняя часть ШВК состоит из перфорированного сферического днища и закрепленных в нем опор. Закрепление головок опор в перфорированном сферическом днище производится с помощью сварки.

Опоры фиксируются дистанционирующей решеткой, устанавливаются с шагом 236 мм и выполняются в виде перфорированных труб, верхняя часть которых имеет отверстие. В него хвостовиками устанавливаются ТВС. Указанная перфорация представляет собой механический фильтр с ячейкой: ширина 3 мм, длина 30 мм. На торце каждой опоры имеется паз для ориентации ТВС в плане с помощью фиксирующего штыря.

В верхней части ШВК прижимается крышкой, внутри шахты устанавливается выгородка, фиксируемая снизу штифтами, а сверху – шпонками, которые крепятся на внутренней поверхности шахты. Выгородка ШВК предназначена для формирования поля энерговыделений и ограничения прохождения теплоносителя мимо активной зоны. Одновременно выгородка является составной частью защиты металла корпуса реактора от воздействия нейтронного и  $\gamma$ -излучения.

Выгородка представляет собой толстостенный цилиндр, состоящий из набора кованых колец, внутренняя гранная поверхность которых повторяет контур активной зоны. Для охлаждения выгородки и обеспечения соотношения «вода–железо» (30 % воды и 70 % железа), необходимого для защиты корпуса от воздействия нейтронного потока и  $\gamma$ -излучения, в кольцах выгородки выполнены вертикальные каналы.

Кольца выгородки соединяются между собой механическим способом. Нижнее кольцо крепится к граненому поясу шахты, а верхнее центрируется относительно цилиндрической части шахты шпонками, приваренными к внутренней поверхности шахты и входящими в вертикальные пазы выгородки.

Габариты ШВК: длина – 10 500 мм, диаметр наружный по фланцу – 4960 мм. Масса ШВК – 170 т.

*Блок защитных труб* представляет собой сборно-сварную металлоконструкцию, состоящую из нижней плиты, цилиндрической обечайки, верхней дистанционирующей плиты, защитных труб с направляющими каркасами для обеспечения перемещения органов СУЗ, направляющих чехлов для каналов температурного и нейтронного контроля активной зоны.

Блок защитных труб подвешивается на буре ШВК, опирается на головки ТВС активной зоны, дистанционирует и поджимает их.

Нижняя плита БЗТ представляет собой дистанционирующую решетку с отверстиями для сопряжения с головками ТВС и прохода теплоносителя внутрь БЗТ.

В отверстиях плит БЗТ устанавливаются защитные трубы ПС и направляющие трубы зондов ВРК. Они закрепляются на верхней плите БЗТ.

Обечайка между плитами имеет окна для прохода теплоносителя в выходные патрубки. БЗТ шпонками фиксируется относительно ШВК.

Габариты БЗТ: высота – 4200 мм, наружный диаметр по фланцу – 4960 мм. Масса БЗТ – 90 т.

*Активная зона* – низкообогащенная, гетерогенного типа, на тепловых нейтронах. Активная зона набрана из 253 ТВС, расположенных в узлах правильной треугольной сетки с шагом 236 мм.

Системы воздействия на реактивность в активной зоне УВР аналогичны системам в действующих реакторах ВВЭР-1000 и PWR. Используются две системы воздействия на реактивность – борная и механическая. Борная система обеспечивает необходимые значения концентрации бора (в виде борной кислоты) в теплоносителе при расхолаживании, плановых остановках и проведении перегрузки топлива. При разогреве, выходе на мощность и ксеноновом отравлении бор частично выводится из теплоносителя. В процессе выгорания к концу топливной кампании бор выводится практически полностью.

Механическая система воздействия на реактивность используется в режимах аварийной защиты, выполняет функции поддержания заданного уровня мощности и управления мощностью для заданного графика изменения нагрузки станции (например, график суточных изменений мощности). Механическая система включает 121 рабочий орган СУЗ, из которых 18 являются «серыми» и используются непосредственно для управления мощностью при работе в базовом графике нагрузок и в графике суточных изменений мощности. Рабочие органы разбиты на группы по управлению. Группа включает три или шесть рабочих органов в зависимости от сектора симметрии (120° или 60°) в картограмме размещения ТВС.

Рабочий орган СУЗ представляет собой сборку из 18 поглощающих элементов (ПЭЛ), объединенных общей траверсой. Над 121 ТВС расположены индивидуальные электромеханические приводы, с помощью которых происходит перемещение РО СУЗ в режиме регулирования и их сброс в режиме аварийной защиты.

Для осуществления контроля нейтронно-физических и теплотехнических параметров в активной зоне расположены зонды внутрореакторного контроля. Они устанавливаются в центральные трубы ТВС, с их помощью контролируются температура теплоносителя на входе и выходе из активной зоны, а также величины энерговыделений по объему активной зоны.

Основные конструкционные характеристики и показатели назначения активной зоны реактора УВР-1500 представлены в табл. 3.21.

Таблица 3.21

**Основные конструкционные характеристики активной зоны реактора УВР-1500**

Конструкционные характеристики	Значение
Номинальная тепловая мощность, МВт	4200
Средняя температура теплоносителя в активной зоне, °С	311,7
Сетка размещения ТВС	Гексагональная
Количество ТВС в активной зоне, шт.	253
Высота активной части ТВС, см	390
Количество органов СУЗ, шт.	121
Шаг между ТВС, мм	236
Топливная композиция	UO <sub>2</sub>
Диаметр центрального отверстия в таблетках, мм	1,4
Выгорающий поглотитель	Гадолиний в составе таблеток топлива
Средняя энергонапряженность, кВт/л	81,9–92,6
Средняя линейная нагрузка твэлов, Вт/см	128–145
Режим эксплуатации	Базовый
Номинальное время пребывания ТВС в активной зоне, лет	5–6
Средняя глубина выгорания выгружаемого топлива, МВт·сут/кг U	50–60

Высота активной зоны (в холодном состоянии) – 3900 мм. Масса ТВС – 800 кг.

Блок зондов внутриреакторного контроля предназначен для контроля энергораспределения.

Шесть блоков зондов ВРК предназначены для контроля температуры на выходе из активной зоны.

Блок зондов ВРК представляет собой «жесткую» сборку из 4–6 вертикальных зондов, размещаемых в вертикальных направляющих трубах БЗТ и ТВС. Над верхней плитой БЗТ блок зондов ВРК имеет горизонтальную траверсу и стойку, проходящую через периферийный патрубок крышки реактора. Стойка заканчивается разъемом первого контура и электроразъемом.

В процессе разборки реактора (после демонтажа верхнего блока) на БЗТ устанавливается технологическая сборка.

Пятнадцать блоков зондов ВРК, зонды которых размещены одновременно внутри вертикальных направляющих труб БЗТ и ТВС, поднимаются из нижнего положения в верхнее. После выхода нижнего торца зонда из направляющей трубы ТВС производится закрепление блока зондов ВРК в верхнем положении.

Данные работы производятся под слоем воды толщиной не менее 2 м. После окончания указанных работ БЗТ (вместе с технологической сборкой и блоками зондов ВРК) транспортируется в шахту БЗТ. По мере выработки ресурса блока зондов ВРК в шахте БЗТ производится замена блоков зондов ВРК. Конструкция «жесткого» блока

зондов ВРК позволяет использовать любые типы систем ВРК, в том числе неподвижные и подвижные детекторы нейтронов (например, камера деления и пневмопочта).

Масса блока зондов ВРК – 240 кг.

*Крепление реактора.* Нижняя часть патрубка корпуса реактора изготавливается утолщенной для организации лап и опорных поверхностей.

Боковые поверхности четырех лап выполняют функцию шпонок радиального перемещения корпуса при разогреве. За указанные лапы производится крепление реактора на фундаменте.

*Работа реактора.* При нормальном функционировании реактора циркуляция теплоносителя осуществляется по следующей схеме: охлажденный теплоноситель принудительно (с помощью главных циркуляционных насосов) подается в реактор через входные патрубки, опускается вниз по кольцевому зазору между корпусом и ШВК, снизу через перфорированное сферическое днище ШВК и отверстия в опорах поступает в ТВС активной зоны, затем теплоноситель (отводя тепло от твэлов активной зоны) поднимается вверх, проходит через отверстия нижней плиты БЗТ, поворачивается и через окна в БЗТ и патрубки ШВК попадает в выходные патрубки корпуса реактора.

Реактор обеспечивает работу РУ во всех режимах, предусмотренных проектом:

- ввод в действие;
- работа на мощности;
- вывод из действия;
- работы по техническому обслуживанию.

Перегрузка ТВС производится после остановки реактора, его разуплотнения, демонтажа блока верхнего и извлечения БЗТ. ШВК извлекается из реактора при периодическом обследовании оборудования реактора.

При работе реактора в зависимости от характера отказов оборудования возможны режимы, требующие ограничения мощности, и аварийные режимы.

Ограничение мощности реактора производится в режимах с превышением тепловой нагрузки твэлов, а также для предотвращения срабатывания аварийной защиты и аварийного вывода из действия при отказах отдельного оборудования РУ.

Аварийные режимы связаны с отказами, при которых работа реактора является недопустимой и предусматривается вывод РУ из действия. Аварийные режимы допускают нормальный вывод РУ из действия и аварийный, когда производится срабатывание аварийной защиты реактора (сбрасывание всех рабочих органов СУЗ в активную зону под действием собственного веса после обесточивания приводов СУЗ).

*Управление и контроль реактором* осуществляются с помощью системы управления и контроля. Управление цепной реакцией производится системой СУЗ.

При нормальном функционировании поддержание мощности реактора на заданном уровне, а также переход с одного уровня мощности на другой производятся изменением нейтронной мощности реактора рабочими органами СУЗ. Компенсация изменения реактивности в процессе выгорания осуществляется изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе и рабочими органами СУЗ.

При работе реактора производится автоматический контроль параметров. Изменения параметров сверхдопустимых пределов приводят к формированию аварийной и предупредительной сигнализации. Значения контролируемых параметров сравниваются с уставками аварийной и предупредительной сигнализации. При достижении определенным параметром значения действующей уставки формируется сигнал аварийной или предупредительной сигнализации и производится автоматическое изменение режима работы РУ.

Основные контролируемые параметры:

- энергораспределение по объему активной зоны;
- температура теплоносителя на выходе из ТВС;

- давление над активной зоной;
- положение рабочих органов СУЗ;
- нейтронный поток (измерительные каналы размещены вне реактора).

Конструкция «жесткого» блока зондов ВРК рассчитана на использование в реакторе УВР современной системы ВРК, позволяющей удерживать параметры энергораспределения в безопасных пределах (неподвижные и подвижные детекторы нейтронов, например, камера деления и пневмопочта).

Аварийная защита реактора срабатывает, в том числе по контролируемым параметрам:

- уровню нейтронной мощности;
- периоду удвоения мощности;
- давлению над активной зоной;
- перепаду давления на реакторе.

При перегрузке реактора контролируется нейтронный поток (измерительные нестандартные каналы размещены в выгородке ШВК).

К *обеспечивающим системам* реакторной установки УВР-1500 (рис. 3.32) относятся:

- четыре циркуляционные петли (каждая включает в себя парогенератор, главный циркуляционный насос, главный циркуляционный трубопровод);
- система компенсации давления;
- система САОЗ;
- система аварийного ввода бора;
- система защиты первого контура от повышения давления;
- система воздухоудаления;
- система гидроиспытаний;
- система охлаждения воздухом приводов СУЗ;
- система контроля и управления;
- система СУЗ;
- система энергоснабжения собственных нужд.

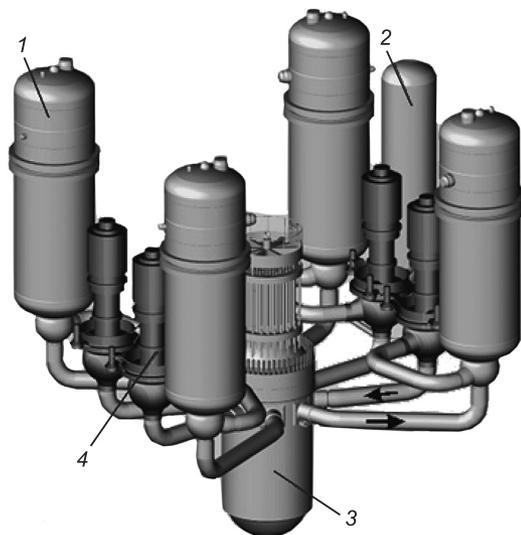


Рис. 3.32. Реакторная установка УВР-1500:

1 – парогенератор; 2 – компенсатор давления; 3 – реактор; 4 – главный циркуляционный насос

Для технического обслуживания реактора УВР используется *специальное оборудование*:

- устройства центровки верхнего блока;
- сборка технологическая БЗТ (для размещения «жестких» блоков зондов ВРК при перегрузке);
- устройства для обслуживания главного разъема;
- универсальная траверса;
- устройства для работы с образцами-свидетелями;
- комплекс систем контроля оборудования;
- перегрузочная машина;
- ремонтная кабина.

В состав *систем диагностики* реактора УВР входят:

- виброконтроль (ШВК, БЗТ, привод СУЗ);
- контроль течи теплоносителя (уплотнение главного разъема, уплотнение патрубка привода СУЗ, уплотнение патрубка блока зондов ВРК);
- контроль роста трещин корпуса и крышки реактора методом акустической эмиссии;
- комплекс систем контроля оборудования (система контроля верхнего блока, система наружного контроля, система внутреннего контроля, система контроля главного разъема, система контроля БЗТ, система контроля ШВК).

Гидравлические испытания реактора производятся периодически после полной выгрузки активной зоны. Гидравлические испытания совмещаются с процессом контроля роста трещин корпуса и крышки реактора методом акустической эмиссии.

Комплекс систем контроля оборудования используется периодически в процессе технического обслуживания остановленного и расхоложенного реактора с помощью следующих методов: визуального контроля, капиллярной дефектоскопии, ультразвуковой дефектоскопии, вихретоковой дефектоскопии.

Для ремонта внутри корпуса реактора в зоне высоких уровней  $\gamma$ -излучения предусматривается ремонтная кабина.

**Технология изготовления корпуса и крышки.** Для корпуса и крышки реактора УВР необходимы кованные обечайки большого диаметра.

Корпус реактора может быть изготовлен из семи обечаек диаметром 6100 мм, высотой 1500 мм, восьми кованных патрубков и бесшовного сферического штампованного днища с центральным углом  $\sim 130^\circ$  (диаметр 5100 мм); крышка реактора – из одной обечайки диаметром 6100 мм, высотой 1500 мм, бесшовной сферической штампованной крышки с центральным углом  $\sim 130^\circ$  (диаметр 5100 мм).

Для изготовления указанных обечаек, бесшовных днища и крышки необходимо освоение новых технологий обработки слитков массой 360 т из стали марки 15X2НМФА-А, а на предприятиях России – отработка технологии и специального оборудования, например раскатка передельной заготовки с применением выносной траверсы, клиновья раздача передельной заготовки.

Максимальные размеры кованой обечайки были получены в 1994 г. (ПАО «Энергомашспецсталь», г. Краматорск, Украина) на опытной обечайке диаметром 6300 мм и высотой 2200 мм. Масса максимального слитка из стали марки 15X2НМФА-А составляет 290 т.

Для перевозки кованных обечаек большого диаметра с металлургического завода на завод-изготовитель корпуса по железной дороге (при невозможности использования смешанного автомобильно-водного транспорта) применяется технологический процесс «овализации» обечайки до высоты, обеспечивающей ее размещение в стандартном колесном железнодорожном транспортёре, и выпрямления обечайки после перевозки.

**Сравнение с аналогами.** Отечественным аналогом реактора УВР является реактор ВВЭР-1000. Зарубежным аналогом, наиболее полно соответствующим цели разработки проекта реактора УВР, – реактор EPR.

В табл. 3.22 даны сравнительные технические характеристики реакторов ВВЭР-1000, УВР-1500 и EPR.

Таблица 3.22

**Сравнительные технические характеристики реакторов ВВЭР-1000, УВР-1500, EPR**

Технические характеристики	ВВЭР-1000	УВР-1500	EPR
Мощность тепловая, МВт	3000	4200	4272
Давление теплоносителя, МПа	15,7	15,7	15,5
Температура теплоносителя, °С: на выходе из реактора подогрев	320 30,3	326,5 29,7	326,3 35
Расход теплоносителя, кг/с	16 424	24 070	21 050
Размеры активной зоны, мм: высота диаметр (эквивалентный)	3530 3160	3900 3940	4200 3770
Энергонапряженность, кВт/л	107	8В	91
Линейная нагрузка, Вт/см	167	137	153
Количество ТВС, шт.	163	253	241
Количество приводов СУЗ, шт.	61	121	81
Количество зондов ВРК, шт.	162	120	100
Количество ПС в одной ТВС, шт.	18	18	24
Расход через 1 м <sup>2</sup> поперечного сечения активной зоны, кг/с	2245	1975	1887
Высота корпуса, мм	10 900	10 700	10 350
Диаметр главных патрубков, мм	850	850	750
Расстояние между главными патрубками активной зоны, мм	1650	2250	2150
Масса корпуса, т	323	390	–
Срок службы корпуса, лет	30	60	60
Флюенс на корпус, н/см <sup>2</sup>	6×10 <sup>19</sup>	0,7×10 <sup>19</sup>	<1,5×10 <sup>19</sup>
Зазор между эквивалентным диаметром активной зоны и внутренней поверхностью корпуса, мм	488	590	558
Толщина стенки корпуса (напротив активной зоны), мм	199,5	245	244
Масса реактора (без воды и ТВС), т	770	895	–
Удельная металлоемкость реактора (масса без воды и ТВС/тепловая мощность), т/МВт	0,256	0,213	–
Масса блока верхнего, т	116	210	180

Реактор УВР по сравнению с реактором ВВЭР-1000 позволяет:

- сохранить суммарную высоту корпуса и крышки реактора;
- обеспечить более высокое положение патрубков относительно активной зоны.

Увеличенные размеры активной зоны реактора по сравнению с активной зоной реактора ВВЭР-1000 обеспечивают мощность реактора 1500–1800 МВт (эл.).

Корпус реактора из обечаек большого диаметра по сравнению с корпусом реактора ВВЭР-1000 позволяет иметь проектный запас (в 5–10 раз) по флюенсу, что создает перспективу обеспечения длительного ресурса с учетом возможного ужесточения требований по безопасности и дополнительных требований к материалам корпуса реактора, которые могут выявиться в процессе длительной эксплуатации.

Опора реактора выполнена на патрубках, что в сравнении с опорой реактора ВВЭР-1000 на корпусе позволяет обеспечить контролепригодность наружной цилиндрической поверхности корпуса реактора в районе опор и убрать с указанной поверхности концентраторы напряжений (пазы и выступы).

«Жесткие» блоки зондов ВРК реактора по сравнению с зондами ВРК реактора ВВЭР-1000 позволяют разместить одновременно неподвижные и подвижные детекторы нейтронов (например, камеры деления и пневмошариковую систему) и повысить точность контроля энергораспределения в активной зоне.

Сравнивая показатели таблиц, анализируя основные технические решения реакторов ВВЭР-1000, УВР-1500 и EPR, можно сделать вывод о соответствии проекта реактора УВР-1500 современному техническому уровню и поставленной цели разработки.

### 3.6. Водо-водяные реакторы-размножители типа LWBR

**Реактор-размножитель типа LWBR.** Разработка водо-водяных реакторов-размножителей типа LWBR была начата в США в 1965 г. и продолжалась до 1987 г., когда было принято решение о замораживании финансирования работ по реакторам этого типа. Реактор LWBR является реактором на тепловых нейтронах, в проекте которого используется хорошо опробованная технология реакторов PWR, позволяющая избежать некоторых технических и лицензионных проблем. Из-за более высокого эффективного коэффициента размножения нейтронов был выбран  $^{233}\text{U}$ – $^{232}\text{Th}$  топливный цикл. Применяя в запальной зоне высокообогащенное топливо, окруженное зоной воспроизводства ( $\text{ThO}_2$ ), можно наработать достаточное количество  $^{233}\text{U}$  и после переработки облученного топлива изготовить топливо для дальнейшей эксплуатации реактора.

Нейтронный поток необходимо сформировать так, чтобы запальная зона и зона воспроизводства выполняли свои функции наилучшим образом. В запальном топливе нейтронный спектр должен быть в максимальной степени тепловым, что требуется для достижения наибольшего значения эффективного коэффициента размножения нейтронов. В зоне воспроизводства должно быть минимальное количество воды, чтобы сделать нейтронный спектр более жестким; это стимулирует резонансное поглощение нейтронов ядрами вторичного топлива и, следовательно, увеличивает шансы получения расширенного воспроизводства топлива.

Разработка водо-водяных реакторов-размножителей рассматривалась как одно из направлений совершенствования эффективности использования топлива в реакторах PWR, хотя между реактором типа LWBR и реактором PWR имеются принципиальные отличия, которые в основном сводятся к следующему.

1. В реакторе LWBR используется  $^{233}\text{U}$ – $^{232}\text{Th}$  топливный цикл, в результате чего:

- возможно больше наработать делящегося топлива, чем его сжигается при производстве энергии;



вого контура, и толстостенная защитная (внешняя) бетонная оболочка АЭС. Активная зона у реактора LWBR более безопасна, чем у реактора PWR, благодаря большому отрицательному коэффициенту реактивности при использовании тория.

Первый контур АЭС «Шиппингпорт» состоит из четырех петель и содержит узлы, обычные для всех реакторов PWR (рис. 3.34). Конструкция активной зоны реактора LWBR представляет логическое развитие активных зон реакторов PWR, эксплуатировавшихся на этой АЭС. В табл. 3.23 приведены основные технические характеристики АЭС «Шиппингпорт» с активной зоной реактора LWBR.

По проекту электрическая мощность АЭС с реактором PWR-1 («Шиппингпорт») составляла 60 МВт, а АЭС с реактором PWR-2 – 150 МВт. Активная зона реактора LWBR совместима по мощностным и конструкционным характеристикам с активной зоной PWR-1.

Топливо в активных зонах реакторов PWR-1, PWR-2 и LWBR имело одинаковую схему размещения: высокое содержание делящегося материала в запальной зоне и низкое его содержание в зоне воспроизводства. Активная зона реактора LWBR была спроектирована для монтажа в корпусе реактора без существенных изменений его конструкции (рис. 3.35). Новыми узлами являлись активная зона и связанная с ней крышка корпуса реактора с механизмами управления активной зоной.

Центральная часть активной зоны реактора LWBR состоит из 12 топливных модулей в виде шестигранных блоков. Каждый модуль содержит центральную подвижную область с высоким содержанием  $^{233}\text{U}$  (запальная часть), окруженную неподвижной зоной воспроизводства (рис. 3.35, а). Управление реактором осуществляется изменением положения запальных сборок относительно неподвижных сборок зон воспроизводства (рис. 3.35, б). Каждая из 12 подвижных сборок крепится с помощью специального устройства на крышке корпуса реактора. Кольцеобразная зона, окружа-

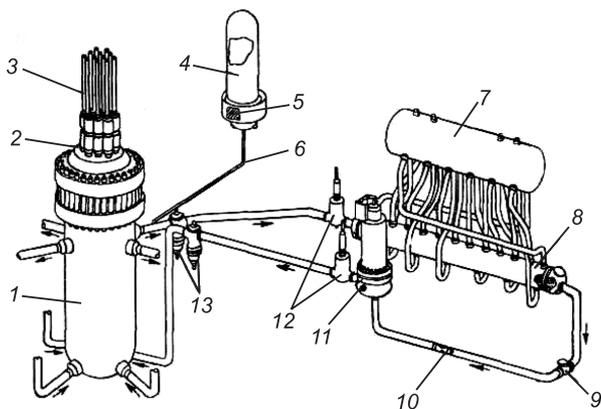


Рис. 3.34. Устройство первого контура АЭС «Шиппингпорт» с активной зоной реактора LWBR:

1 – корпус реактора; 2 – крышка корпуса; 3 – привод управления; 4 – компенсатор объема; 5 – подогреватели; 6 – трубопровод, соединяющий компенсатор объема с корпусом давления; 7 – паросборник; 8 – теплообменник с прямыми трубами; 9 – клапан; 10 – расходомер Вентури; 11 – главный циркуляционный насос; 12 – запорные клапаны с ручным приводом; 13 – запорные клапаны с гидравлическим приводом

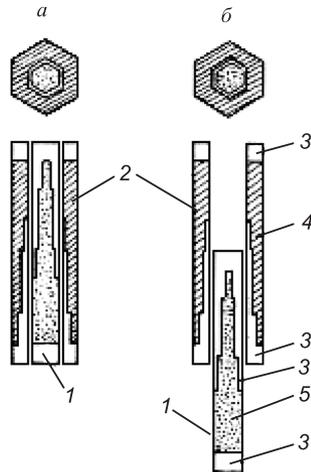


Рис. 3.35. Запально-воспроизводящие топливные модули реактора LWBR, иллюстрирующие управление реактивностью: а – положение нормальной эксплуатации (геометрия низкой утечки нейтронов); б – положение останова (геометрия большой утечки нейтронов); 1 – подвижная запальная сборка; 2 – неподвижная воспроизводящая сборка; 3 –  $\text{ThO}_2$ ; 4 –  $\text{UO}_2$  (3 мас.%); 5 –  $\text{UO}_2$  (6 мас.%)

Основные технические характеристики АЭС «Шиппингпорт»

Технические характеристики	Значение
Мощность, МВт: тепловая электрическая, брутто/нетто	236,6 72/60 <sup>1</sup>
Кампания, тыс. ч	18
Давление пара: при полной нагрузке генератора, Па без нагрузки генератора, Па	49,6·10 <sup>5</sup> 59,7·10 <sup>5</sup>
Количество петель, шт.	4
Перепад давления в реакторе, Па	46,1·10 <sup>4</sup>
Диаметр главного трубопровода, мм: внешний внутренний	457,2 381,0
Скорость теплоносителя в главном трубопроводе, м/с	10,7
Активная зона, мм: высота (включая отражатель из ThO <sub>2</sub> ) средний диаметр	3048 2286
Теплоноситель: расход, кг/ч температура (вход/выход), °С средняя температура, °С	13,8·10 <sup>6</sup> 271/283 277
Давление (номинальное) в первом контуре, Па	133,4·10 <sup>5</sup>
Топливо: запальная зона: концы стержней отражателя зона воспроизводства: концы стержней отражателя отражатель зоны воспроизводства	<sup>233</sup> UO <sub>2</sub> -ThO <sub>2</sub> ThO <sub>2</sub> <sup>233</sup> UO <sub>2</sub> -ThO <sub>2</sub> ThO <sub>2</sub> ThO <sub>2</sub>

<sup>1</sup> Полезная электрическая мощность (нетто) – 50 МВт.

ющая 12 топливных модулей реактора LWBR, состоит из 15 модулей зоны воспроизводства с торием.

В твэлах используются топливные таблетки цилиндрической формы, изготовленные методами порошковой металлургии. Характеристики топлива и твэлов приведены в табл. 3.24.

Для монтажа активной зоны реактора LWBR существенных изменений в конструкции установки не потребовалось. Перед началом эксплуатации заменили теплообменники в двух петлях, поскольку в них обнаружили небольшие течи. Была модифицирована система аварийного впрыска воды, содержащей растворимый поглотитель нейтронов (тетраборат калия), установлены новые насосы, смонтированы два новых дизель-генератора по 150 кВт для аварийного энергопитания и построены два хранилища топлива; усовершенствованы системы контрольно-измерительного оборудования и управления; проведена оценка состояния корпуса реактора, теплообменников, компенсатора объема, насосов и др.

Модули активной зоны

Тип модуля и параметры твэла	Запальная зона (6 мас.% $^{233}\text{U}$ )	Стандартная зона воспроизводства (3 мас.% $^{233}\text{U}$ )	Зона воспроизводства, выравнивающая энерговыделение	Отражатель зоны воспроизводства
<b>Количество стержней на модуль, шт.</b>				
I	619	443	–	–
II	619	261	303	–
III	619	187	446	–
IV	–	–	–	128
V	–	–	–	166
<b>Твэлы</b>				
Внешний диаметр, мм	77	14,52	13,37	21,13
Толщина оболочки, мм	0,56	0,70	0,65	1,07

**Оценка радиоактивных выбросов при нормальной эксплуатации.** При эксплуатации активной зоны реактора PWR-1 АЭС «Шиппингпорт» было установлено, что дефектная поверхность оболочки твэлов зоны воспроизводства составила 0,005 %, в твэлах запальных сборок дефектов оболочки обнаружено не было. В течение всей кампании активной зоны реактора PWR-2 дефектов в оболочке твэлов не было установлено, поэтому предполагалось, что при эксплуатации активной зоны реактора LWBR проникновения продуктов деления в теплоноситель не будет (впоследствии это подтвердилось). Согласно расчетам, общее количество продуктов деления, накопленное в топливе реактора LWBR, составит к концу кампании примерно 70 % аналогичного показателя для активной зоны реактора PWR-2. Таким образом, возможное проникновение продуктов деления топлива в теплоноситель первого контура реактора LWBR должно быть меньше, чем при эксплуатации активной зоны реактора PWR-2.

Вторым источником радиоактивности являются следы природного урана ( $3\text{--}6 \cdot 10^{-4} \%$ ) и продукты его активации, содержащиеся в циркуляционной оболочке. В оболочке может быть некоторое количество природного тория, однако предположение, что содержится только уран, обеспечивает при расчете максимальную оценку. Ожидаемая удельная активность от каждого из 32 радионуклидов (от  $^{82}\text{Br}$  до  $^{140}\text{La}$ ) в теплоносителе реактора LWBR, рассчитанная на конец кампании, находится в пределах от  $1,5 \cdot 10^{-10}$  ( $^{91}\text{Y}$ ) до  $3,1 \cdot 10^{-3}$  ( $^{135}\text{Xe}$ ) мкКи/см<sup>3</sup>. Общая удельная активность для всех рассмотренных радионуклидов составляет примерно  $1,6 \cdot 10^{-2}$  мкКи/см<sup>3</sup>.

Удельная активность теплоносителя от отдельного радионуклида за счет активации продуктов коррозии и эрозии материалов первого контура (оценка проводилась для  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ) была рассчитана на основе измерений, выполненных в процессе эксплуатации активной зоны реактора PWR-2 с учетом поправок на изменения объема теплоносителя и энергонапряженности активной зоны реактора LWBR. Расчеты показали, что общая удельная активность на конец кампании составляет около  $4,19 \cdot 10^{-2}$  мкКи/см<sup>3</sup>, при этом основной вклад дает

<sup>1</sup> 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

$^{41}\text{Ar}$  ( $4,1 \cdot 10^{-2}$  мкКи/см<sup>3</sup>). Удельная активность остальных радионуклидов находится в пределах  $8 \cdot 10^{-4}$  ( $^3\text{H}$ ) –  $2,8 \cdot 10^{-6}$  ( $^{54}\text{Mn}$ ) мкКи/см<sup>3</sup>.

Выброс жидких радиоактивных отходов (за исключением трития) должен быть практически нулевым, поскольку теплоноситель первого контура (и утечки из него) полностью подвергается обработке. Суммарная радиоактивность, сбрасываемая с жидкими отходами, составит около 1,001 Ки/г, в том числе от трития – 1,0 Ки/г.

Возможны три причины выброса активных газов с газообразными отходами (включая йод): прямая течь из первого контура во внутреннее пространство защитной стальной оболочки, протечки во второй контур в парогенераторе, попадание радиоактивных отходов в вентиляционную систему из системы обработки. Общая радиоактивность, сбрасываемая в окружающую среду с газообразными отходами, оценивается в 3,0 Ки/г, при этом основной вклад вносит  $^{41}\text{Ar}$  (2,4 Ки/г).

При нормальной эксплуатации реактора LWBR тритий образуется в меньшем количестве, чем при эксплуатации активных зон реакторов PWR-1 и PWR-2, так как отсутствуют два важных источника трития: стержни управления, содержащие бор, и борная кислота, вводимая в теплоноситель для регулирования реактивности. Тритий в реакторе LWBR образуется при делении топлива и активации дейтерия, который присутствует в теплоносителе.

Опыт эксплуатации активной зоны реактора PWR-2 показывает, что диффузия трития через оболочку твэлов крайне мала. Поскольку оболочки твэлов реактора LWBR более толстые, предполагают, что диффузия трития через оболочку будет меньшей, чем в реакторе PWR-2, поэтому ее в расчетах не учитывали. Образование трития за счет активации дейтерия оценено в 0,4 Ки/г, а концентрация трития в теплоносителе – в  $8 \cdot 10^{-4}$  Ки/см<sup>3</sup>.

**Эксплуатация.** Изменение реактивности в реакторе LWBR, активная зона которого не содержит стержней управления, как в реакторах PWR, происходит при изменении положения подвижных запальных сборок. Для их перемещения используется обычная, но более мощная система приводов. При нижнем положении всех запальных сборок реактор останавливается. Предполагают, что последствия возможных аварий реактора LWBR должны быть меньшими, чем последствия аналогичных аварий реактора PWR, поскольку система защиты реактора LWBR усовершенствована и, кроме того, активная зона реактора LWBR эксплуатируется при меньшей энергонапряженности.

Критичность реактора с активной зоной LWBR, смонтированной на АЭС «Шиппингпорт», была достигнута в августе 1977 г. Вывод реактора на проектную тепловую мощность 236 МВт впервые осуществлен 21 сентября 1977 г. Опробование управления реактивностью в процессе приемных испытаний с помощью перемещения 12 запальных сборок не показало отличий от управления реактора PWR-2, хотя доля запаздывающих нейтронов для  $^{233}\text{U}$  несколько меньше, чем для  $^{235}\text{U}$ . Эта разница была легко скомпенсирована подбором скорости перемещения запальных сборок.

Эксплуатация АЭС «Шиппингпорт» с реактором LWBR на установленной мощности с ее отдельными понижениями и перерывами в работе продолжалась до 1 октября 1982 г. Для достижения максимального коэффициента воспроизводства, который, по оценкам, должен составить около 1,015, реактор LWBR должен был проработать на установленной мощности не менее 19 тыс. ч. За весь срок эксплуатации (декабрь 1977 г. – октябрь 1982 г.) реактор LWBR проработал на установленной мощности 29 тыс. ч (время, эквивалентное работе реактора на установленной мощности).

**Определение коэффициента воспроизводства.** По окончании опытной эксплуатации реактора LWBR его активная зона была демонтирована и выгруженное топливо направлено для детального анализа на содержание в твэлах делящегося вещества. Для проведения анализа облученного топлива реактора LWBR в Лаборатории ядерной

энергетики Беттиса под техническим руководством Отделения реакторов для ВМФ Министерства энергетики была разработана установка PIFAG, позволяющая определять в твэлах (без разрушения) общее содержание делящихся веществ с точностью до 0,5 %.

Каждый топливный стержень подвергался анализу на установке PIFAG дважды: один раз с регистрацией спектра тепловых нейтронов, а второй – с регистрацией спектра надтепловых нейтронов; при этом получались два различных значения содержания делящихся материалов. Анализ 33 твэлов запального модуля показал, что средняя разность определения содержания делящихся веществ по надтепловым и тепловым нейтронам составляет 0,14 % (стандартное отклонение – 0,26 %). Для оценки точности анализа, проводимого на установке PIFAG, из общего числа твэлов активной зоны реактора LWBR было отобрано 17. Полученные данные сопоставлены с данными анализа с разрушением испытуемых образцов в Аргоннской национальной лаборатории. Результаты проведенных исследований подтвердили, что точность определения содержания делящихся веществ без разрушения анализируемых образцов на установке PIFAG находится в пределах от нескольких десятых до 1 %. Это может быть использовано для определения коэффициента воспроизводства активной зоны реактора LWBR.

Предполагалось провести анализ 500 облученных твэлов, которые были отобраны из 12 центральных топливных модулей (всего 39 топливных модулей), размещенных в различных областях активной зоны (запальной, стандартной зоне воспроизводства, выравнивающей зоне воспроизводства, зоне отражателя). Выбор 500 твэлов (всего 17 900) из ограниченного числа модулей представляется вполне оправданным, поскольку активная зона реактора LWBR обладает высокой степенью симметрии. Результаты анализа 350 твэлов из восьми топливных модулей находятся в хорошем соответствии с расчетными значениями для твэлов запальной зоны и зоны воспроизводства. Для зоны отражателя отмечается несколько худшее соответствие измеренных и расчетных значений, что объясняется неточностями нейтронного переноса в расчетной модели и грубым описанием геометрии стержней для модулей зоны внешнего отражателя.

Допуская, что потери делящегося топлива при переработке составят примерно 0,5 %, коэффициент воспроизводства активной зоны реактора LWBR должен быть более 1,005, что должно обеспечить самоподдерживающийся топливный цикл. По более точной оценке, коэффициент воспроизводства равен 1,012–1,015 и находится в хорошем соответствии с расчетным значением (1,0135).

Таким образом, было экспериментально подтверждено, что активная зона реактора LWBR обеспечивает расширенное воспроизводство делящегося топлива. Внедрение данной концепции активной зоны в современные промышленные реакторы PWR позволит приблизительно в 50 раз повысить эффективность использования топлива.

**Водо-водяной реактор для промышленного использования.** В 1976 г., когда изготовление активной зоны для экспериментального реактора LWBR (АЭС «Шиппингпорт») близилось к завершению, Комиссия по атомной энергетике приступила к осуществлению программы по разработке усовершенствованных водо-водяных реакторов-размножителей для промышленного использования (AWBA – Advanced Water Breeder Applications). Цель программы – разработка проекта полномасштабного реактора LWBR электрической мощностью порядка 1000 МВт (нетто) и предоставление необходимой технической информации для оценки концепции LWBR, а также возможностей ее использования. Фактически эта программа была завершена в 1982 г. и включала следующие данные по реакторам LWBR промышленного масштаба:

- концепции предразмножительных активных зон, которые должны были производить  $^{233}\text{U}$  для реактора LWBR наряду с производством электроэнергии;

- концепции усовершенствованных активных зон для реактора LWBR, эксплуатирующегося в режиме расширенного воспроизводства;
- прочую техническую информацию, позволяющую энергетическим фирмам оценить технологию концепции LWBR.

В Лаборатории ядерной энергетики Беттиса были разработаны три проекта водо-водяного реактора-размножителя.

*Первый проект* – LWBR Scale-Up – реактор увеличенного масштаба. Проект основывался на конструкции экспериментальной активной зоны реактора LWBR для АЭС «Шиппингпорт» и предусматривал определение возможности увеличения масштаба экспериментальной активной зоны для АЭС промышленного масштаба электрической мощностью примерно 1000 МВт (нетто).

*Второй проект* для управления реактивностью предлагал использование сборки стержней из  $\text{ThO}_2$  в отличие от подвижного запального топлива (экспериментальный реактор LWBR и реактор LWBR Scale-Up). Достоинствами этой концепции являются пониженные максимумы энерговыделения по сечению активной зоны (соответственно пониженные пики всплесков мощности), поскольку обеспечиваются ежегодная возможность перегрузки части активной зоны и перестановки оставшегося топлива. Кроме того, стержни управления могут перемещаться с существенно более высокой скоростью, чем массивные подвижные запальные модули.

*Третий проект* характеризуется одновременной загрузкой всей партии топлива без перегрузки активной зоны по частям и использованием топливных сборок небольших размеров, совместимых с размерами оборудования современных установок для переработки топлива (демонтаж, резка, сборка новых топливных модулей). Кроме того, реакторная концепция AMFB (Advanced Movable Fuel Breeder – усовершенствованный реактор-размножитель с подвижным топливом) может обеспечить дополнительный запас расширенного воспроизводства топлива в равновесном цикле.

Ноллзская лаборатория ядерной энергетики, которая с начала 1970-х гг. принимала участие в программах экспериментальных реакторов LWBR и AWBA, разработала проект водо-водяного реактора-размножителя со стационарным (неподвижным) устройством запально-воспроизводящей активной зоны и использованием подвижных стержней из  $\text{ThO}_2$  для управления реактивностью в комбинации с обычной системой, применяемой в современных промышленных реакторах PWR.

В целях обеспечения начальной топливной загрузки для промышленного водо-водяного реактора-размножителя необходим предразмножительный реактор, который, наряду с наработкой  $^{233}\text{U}$  из  $^{232}\text{Th}$  производит электроэнергию. Предразмножительный реактор может быть выполнен в виде отдельной установки либо используется тот же корпус давления, что и для реактора-размножителя.

Расширенное воспроизводство топлива в водо-водяных реакторах, применяющих  $^{233}\text{U}$ – $^{232}\text{Th}$  топливный цикл, требует сведения к минимуму потерь нейтронов в активной зоне. Нейтронные потери в теплоносителе реактора LWBR минимизированы за счет «тесной» решетки (большое объемное отношение топливо/теплоноситель), что наилучшим образом достигается при использовании треугольной топливной решетки. Водо-водяные реакторы-размножители должны эксплуатироваться при более низких, по сравнению с современными промышленными реакторами PWR, плотностях энерговыделения, чтобы свести к минимуму захват нейтронов  $^{233}\text{Pa}$  (промежуточным нуклидом в цепочке превращений  $^{232}\text{Th}$ – $^{233}\text{U}$ ). Более низкая плотность энерговыделения, а также использование осевых и радиальных отражателей для уменьшения утечки нейтронов приводят к увеличению размеров активной зоны и соответственно размеров реакторного корпуса давления.

Активные зоны водо-водяных реакторов-размножителей могут быть размещены в существующих корпусах промышленных PWR, однако в этом случае они имеют более низкий уровень номинальной мощности, чем активные зоны, которые они замещают.

Проект активной зоны для реактора LWBR Scale-Up включает 141 топливную сборку (рис. 3.36). По своей конструкции эти сборки идентичны конструкции трех центральных топливных сборок для активной зоны экспериментального реактора LWBR. Топливные сборки окружены областью, которая содержит твэлы с относительно высоким содержанием делящегося топлива и служит для выравнивания энерговыделения по радиусу активной зоны. Действующая часть активной зоны, имеющая высоту 2135 мм, окружена областью отражателя, содержащей стержни из  $\text{ThO}_2$ , которые снижают утечку нейтронов и повышают способность расширенного воспроизводства топлива. Размеры активной зоны позволяют разместить ее в корпусе давления с внутренним диаметром 7086 мм.

Экспертные исследования проекта корпуса давления такого размера показали, что проект является технически осуществимым. Поскольку в качестве системы управления реактивностью используется подвижное топливо, «борной» системы регулирования реактивностью для нормальной эксплуатации и холодного останова реактора не требуется. Все топливные сборки прикреплены к базовым плитам (одна половина – к нижней плите, а другая – к верхней), чтобы исключить любую возможность для осевого смещения стержней.

Проект реактора LWBR Scale-Up представляет концепцию с загрузкой топлива в виде одной партии, которая должна обеспечивать электрическую мощность 900 МВт (нетто), при длительности кампании активной зоны 3,5 года и предполагаемом коэффициенте нагрузки 75 %. Минимальный срок кампании активной зоны, предполагающий 1 % потери реактивности, составляет немногим более трех лет. Кампания активной зоны реактора Scale-Up может быть увеличена путем его эксплуатации на пониженной мощности, которая следует за эксплуатацией на номинальном уровне мощности в конце кампании активной зоны. Например, реактор LWBR Scale-Up может дополнительно работать в течение 9 месяцев на уровне электрической мощности 630 МВт (71 % номинальной мощности). Таким образом, энергетические фирмы, эксплуатирующие этот тип реактора, получают возможность выбора наиболее удобного времени останова реактора и осуществления перегрузки топлива.

Концепция реактора LWBR Scale-Up предусматривает расширенное воспроизводство топлива во всех циклах – с начального до равновесного цикла. Коэффициент воспроизводства концепции, определяемый как отношение общей делящейся загрузки в конце цикла (предполагая, что весь  $^{233}\text{Pa}$  превратится в  $^{233}\text{U}$ ) к топливной загрузке в начале цикла, составляет для начального цикла 1,017 и для равновесного цикла 1,005. Коэффициент воспроизводства несколько снижается, когда топливо подвергается переработке для использования в равновесном цикле, поскольку при этом в топливной смеси происходит относительное снижение содержания  $^{233}\text{U}$  и повышение содержания  $^{235}\text{U}$ , что способствует некоторому снижению выхода нейтронов (на акт деления) и тем самым уменьшению числа нейтронов, производящих конверсию

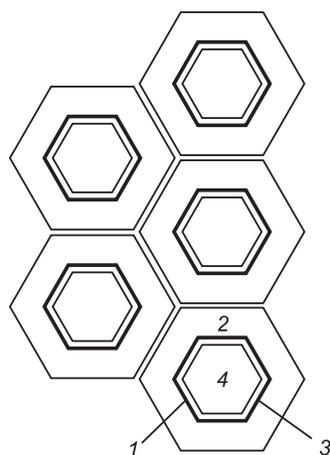


Рис. 3.36. Несколько сборок центральной части активной зоны реакторной концепции LWBR Scale-Up:

1 – кожух запальной сборки; 2 – неподвижная воспроизводящая сборка; 3 – направляющий канал; 4 – подвижная запальная сборка

$^{232}\text{Th}$  в  $^{233}\text{U}$ . Поскольку минимальный коэффициент воспроизводства составляет 1,005, то общие потери нейтронов за счет использования переработанного топлива должны составлять менее 0,5 %.

В обеих концепциях водо-водяного реактора-размножителя (LWBR в «Шиппинг-порте», LWBR Scale-Up) скорость подвижного топлива в процессе быстрого останова реактора должна быть достаточной для обеспечения приемлемой скорости останова. Чтобы гарантировать достаточную скорость останова, используется гидросистема, отводящая через байпасную линию часть потока теплоносителя, который оказывает дополнительное давление на опускаемое подвижное топливо (табл. 3.25, 3.26).

Таблица 3.25

**Технические характеристики установки с реактором LWBR Scale-Up**

Технические характеристики	Значение
Мощность: тепловая, МВт электрическая, нетто, МВт КПД, брутто, %	2941 900 32,76
Теплоноситель: средняя температура <sup>1</sup> , °C давление, атм количество петель в первом контуре, шт. внутренний диаметр корпуса, мм расход потока теплоносителя в первом контуре, кг/ч	277 135,6 6 7086 118,0·10 <sup>6</sup>
Количество модулей, шт.: тип 1 воспроизводящих в отражателе в геометрическом центре активной зоны количество твэлов на модуль (запальных/воспроизводящих) общее количество твэлов <sup>2</sup> плотность энерговыделения на 1 кг делящегося вещества, кВт	141 39 51 3 619/443 167 793 542
Перепад давления: горячие и холодные ветви, атм <sup>3</sup> корпус реактора (без активной зоны), атм активная зона, атм парогенератор, атм расход потока теплоносителя через петлю, кг/ч	0,50 1,69 3,12 2,27 19,6·10 <sup>6</sup>
Общая площадь теплопередачи, м <sup>2</sup> твэлов <sup>3</sup> на один парогенератор	15 857 4987,1
Отношение металл/вода (запальная зона/воспроизводящая зона)	1,72/2,98
Коэффициент воспроизводства (начальный цикл/равновесный цикл)	1,0174/1,0056
Кампания активной зоны (номинальная/минимальная), лет	3,4/3,0

<sup>1</sup> При эксплуатации на полной мощности.

<sup>2</sup> Включает запальные и воспроизводящие твэлы, а также твэлы бинарной зоны воспроизводства и отражателя.

<sup>3</sup> 1 атм = 9,81 · 10<sup>5</sup> Па.

## Технические характеристики топливных стержней реактора LWBR Scale-Up

Технические характеристики	Экспериментальный реактор LWBR (АЭС «Шиппингпорт»), начальный цикл	Реактор LWBR Scale-Up	
		Начальный цикл <sup>1</sup>	Равновесный цикл <sup>2</sup>
<b>Запальная зона модуля (тип 1)</b>			
Диаметр стержня, мм	7,07	–	–
Толщина оболочки, мм	0,56	–	–
Диаметр таблетки, мм	6,40	–	–
Шаг решетки, мм	9,37	–	–
Делящееся топливо, мас. %:			
верхняя зона	5,20	5,06/5,49 <sup>2</sup>	5,96/6,55
нижняя зона	4,34	4,19/4,55	4,93/5,43
<b>Воспроизводящая зона модуля (тип 1)</b>			
Диаметр стержня, мм	14,51	–	–
Толщина оболочки, мм	0,70	–	–
Диаметр таблетки, мм	12,96	–	–
Шаг решетки, мм	16,00	–	–
Делящееся топливо, мас. %:			
верхняя зона	2,01	1,96/2,12	2,31/2,50
средняя зона	1,67	1,62/1,76	1,91/2,10
нижняя зона	1,21	1,17/1,27	1,38/1,51
<b>Бинарная зона воспроизводства</b>			
Диаметр стержня, мм	–	14,51	14,51
Толщина оболочки, мм	–	0,70	0,70
Диаметр таблетки, мм	–	12,96	12,96
Шаг решетки, мм	–	16,00	16,00
Делящееся топливо, мас. %:			
зигзагообразно размещенные модули	–	3,11	3,57
трапецеидальные модули	–	2,51	2,85
<b>Зона отражателя</b>			
Диаметр стержня, мм	21,13	–	–
Толщина оболочки, мм	1,06	–	–
Диаметр таблетки, мм	18,8	–	–
Шаг решетки, мм	22,86	–	–

<sup>1</sup> Значения характеристик для реактора LWBR Scale-Up даются только в том случае, если они отличаются от данных для экспериментального реактора LWBR (АЭС «Шиппингпорт»).

<sup>2</sup> Внутренняя зона/внешняя зона.

Содержание изотопов урана в активной зоне реакторов LWBR для начального и равновесного циклов представлено в табл. 3.27.

Таблица 3.27

Содержание изотопов урана в активной зоне реакторов LWBR, мас. %

Изотоп	Экспериментальный реактор LWBR (АЭС «Шиппингпорт»), начальный цикл	Реактор LWBR Scale-Up, начальный цикл, равновесный цикл
$^{232}\text{U}$	0,37	0,22
$^{233}\text{U}$	98,2328	57,29
$^{234}\text{U}$	1,2849	28,12
$^{235}\text{U}$	0,0865	7,77
$^{236}\text{U}$	0,0221	6,60
$^{238}\text{U}$	0,3730	0,00

Характеристика топливных стержней активной зоны реактора AMFB дана в табл. 3.28.

Таблица 3.28

Технические характеристики топливных стержней активной зоны реактора AMFB

Технические характеристики	Запальная зона	Зона воспроизводства
Материал оболочки	Циркалой-4 <sup>1</sup>	
Внешний диаметр твэла, мм	10,44	14,12
Внутренний диаметр оболочки, мм	9,24	12,52
Внешний диаметр таблетки, мм	9,02	12,29
Внешний диаметр твэла/толщина оболочки, мм	17,6	17,5
Зазор между топливом и оболочкой, мм	0,23 (+0,04)	0,23 (+0,04)
Состав топлива (UO <sub>2</sub> ), мас. %	6	3
Давление газа (гелия) в твэле, атм: при комнатной температуре при номинальной мощности (начало цикла)	20,4 50	20,4 50
Длина твэла, мм	3968,75	3968,75
Активная высота набора таблеток, мм	3048	3048
Набор таблеток из ThO <sub>2</sub> , мм высота верхнего отражателя высота нижнего отражателя	254 203,2	203,2 254
Длина газосборника, мм	330,2	330,2

<sup>1</sup> Степень сжатия холодной деформации 70 %, затем отжиг для снятия напряжений.

**Реактор с управлением реактивностью стержнями из ThO<sub>2</sub>.** Основной причиной для разработки водо-водяного реактора-размножителя с регулированием реактивностью из стержней из ThO<sub>2</sub> явилось стремление к созданию проекта реактора

с пониженными максимумами энерговыделения в активной зоне, повышенные значения которых характерны для реакторов с управлением реактивностью за счет подвижного топлива. Путем снижения максимумов энерговыделения можно повысить уровень среднего энерговыделения в активной зоне без превышения допустимых пределов. Это может быть использовано для повышения номинальной мощности реактора или сохранения того же уровня мощности при активной зоне меньших размеров. Выходной уровень номинальной электрической мощности установки с реакторной концепцией, использующей для управления реактивностью подвижные стержни из  $\text{ThO}_2$ , составляет 1000 МВт.

Активная зона реактора спроектирована таким образом, чтобы можно было ежегодно перегружать ее треть, при этом предполагается, что коэффициент нагрузки составит около 75 %. Действующая часть активной зоны состоит из 211 топливных сборок гексагонального сечения и 42 половинок гексагональных сборок зоны воспроизводства, размещенных по периферии активной зоны. Осевые и радиальные отражательные зоны воспроизводства, изготовленные из  $\text{ThO}_2$ , окружают центральную часть активной зоны и препятствуют утечке нейтронов. Эти отражающие области улучшают характеристику расширенного воспроизводства топлива для данной реакторной концепции. Все топливные модули размещены в циркуляционных решетках, что также минимизирует потери нейтронов. Активная зона может быть в корпусе давления реактора с внутренним диаметром около 6502 мм. Размещение топливных сборок в центральной части активной зоны показано на рис. 3.37.

Особенностью данного проекта является то, что в процессе эксплуатации при уровне мощности более 50 % управление реактивностью осуществляется за счет перемещения сборок, состоящих из 18 стержней управления, размещенных примерно в 65 % топливных сборок активной зоны. Эти стержни имеют большой диаметр (около 30,5 мм) и содержат двойные таблетки, внешняя часть которых выполнена из  $\text{ThO}_2$ , а внутренняя – из  $\text{ZrO}_2$ . Размеры и число стержней управления были выбраны таким образом, чтобы гарантировать достаточное значение запаса активности для обеспечения желаемого цикла работы в течение года при коэффициенте нагрузки 75 % и сохранить структурную целостность стержней управления и их направляющих каналов.

Остальные топливные сборки активной зоны (каждая сборка) содержат по 36 подвижных стержней управления, которые по составу, размерам и функциям аналогичны управляющим стержням, используемым в активных зонах промышленных реакторов PWR. Эти стержни при нормальной эксплуатации реактора полностью выведены из активной зоны и обеспечивают достаточное значение запаса реактивности, чтобы гарантировать горячий останов активной зоны, когда они полностью введены в нее. «Борное» управление реактивностью в условиях

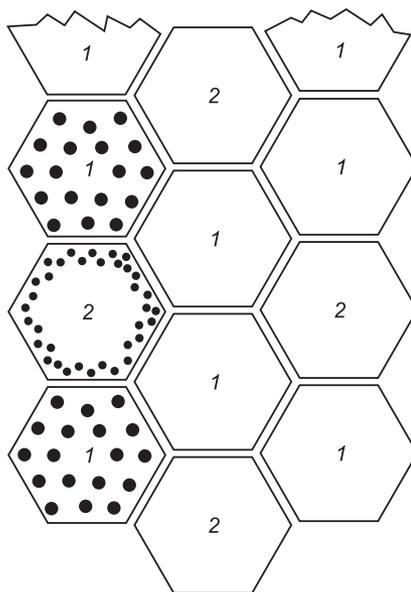


Рис. 3.37. Схематическое устройство центральной части активной зоны водо-водяного реактора-размножителя с управлением реактивностью с помощью стержней из  $\text{ThO}_2$ : 1 – подвижная управляющая сборка со стержнями из  $\text{ThO}_2$  (18 стержней); 2 – сборка стержней останова (36 стержней, аналогичных по устройству управляющим стержням реактора PWR)

нормальной эксплуатации не требуется и может быть использовано только в случае менее 50 % номинальной мощности, а также для холодного останова реактора.

Стержни управления реактора ( $\text{ThO}_2$ ) рассчитаны таким образом, чтобы коэффициент воспроизводства составлял в начальном цикле 1,03 и в равновесном цикле несколько более 1,01. Были проведены дополнительные исследования, показывающие, что активная зона будет удовлетворительно вести себя как в условиях нормальной эксплуатации, так и в аварийных условиях, и что реакторная концепция будет соответствовать структурным критериям норм ASME (American Society of Mechanical Engineers – Американское общество инженеров-механиков) (раздел III) и условиям безопасности норм федерального регулирования.

Основные технические характеристики водо-водяного реактора-размножителя с управлением реактивностью с помощью подвижных стержней из  $\text{ThO}_2$  приведены в табл. 3.29.

Таблица 3.29

**Основные технические характеристики реактора-размножителя**

Технические характеристики	Значение
1	2
<i><b>Активная зона</b></i>	
Мощность, МВт: тепловая электрическая, нетто	2992 1000
Плотность энерговыделения в модуле, кВт/л	47,0
Общий коэффициент образования максимумов энерговыделения	3,2
Максимальное линейное энерговыделение (бинарные стержни $\text{UO}_2\text{-ThO}_2$ ), кВт/м	64,6
Минимально допустимая реактивность (при управлении стержнями из $\text{ThO}_2$ ), % $\Delta\rho$	6,5
<i><b>Параметры модулей</b></i>	
Шаг модуля, мм	330,2
Действующая высота активной зоны, мм	3048
Высота осевых зон воспроизводства (на каждом конце), мм	304,8
Количество бинарных стержней в поглощающем модуле, используемом для останова в ториевом модуле, шт.	414
Модуль, используемый для останова: количество поглощающих стержней (реактора PWR), мм количество опорных стоек из циркония, шт.	36 18
Отношение шаг/диаметр	1,117
Шаг решетки, мм	15,08
Бинарный твэл, мм: внешний диаметр толщина оболочки внешний диаметр таблетки расстояние между твэлами длина (с концевыми заглушками)	13,51 0,75 11,71 1,57 4089

1	2
Длина газосборника	330,2
Тип бинарной топливной таблетки	Сплошная
<b>Стержень управления из <math>ThO_2</math></b>	
Направляющий канал, мм: внешний диаметр толщина стенки	35,71 0,95
Внешний диаметр стержня, мм	30,4
Толщина оболочки, мм	1,90
Внешний диаметр таблетки, мм	26,23
Расстояние между стержнем и направляющим каналом, мм	1,52
Необходимый расход потока в направляющем канале, кг/ч	1,88
Тип таблетки	Двойная ( $ThO_2-ZrO_2$ )
<b>Стержень управления для останова</b>	
Внешний диаметр, мм	10,16
Толщина оболочки, мм	1,01
Направляющий канал, мм внешний диаметр толщина стенки	13,61 0,83
Зазор между стержнем и каналом (по диаметру), мм	1,78
Внешний диаметр опорной стойки, мм	13,51
<b>Характеристики перемещения для сборок управления (<math>ThO_2</math>)</b>	
Количество стержней на один привод, шт.	18
Длина перемещения, мм	3048
Подъемная сила, Н: минимально надежная максимально допустимая	3900 14 440
<b>Номинальные термогидравлические характеристики</b>	
Теплоноситель: расход в системе, кг/ч средняя температура в корпусе реактора, °С	91,2·10 <sup>6</sup> 313
Давление, МПа: в системе перепад в активной зоне	15,26 0,454
Допустимое превышение номинальной мощности в установившемся режиме, %	121
Количество петель в первом контуре, шт.	6

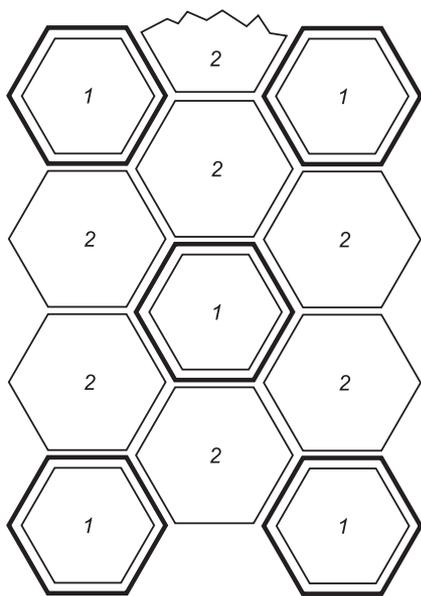


Рис. 3.38. Размещение запальных и воспроизводящих сборок в центральной части активной зоны реакторной концепции AMFB: 1 – подвижная запальная сборка; 2 – неподвижная воспроизводящая сборка

**Проект реактора AMFB.** Дальнейшим развитием концепции водо-водяного реактора-размножителя явилось совершенствование реактора LWBR Scale-Up. Проект реактора AMFB с более высоким уровнем мощности обеспечивает более высокое значение коэффициента воспроизводства в равновесном цикле. Концепция реактора AMFB относится к концепциям по конструктивному принципу, основанному на полностью перегружаемой активной зоне, состоящей из 121 запальной сборки, 240 воспроизводящих топливных сборок и 42 половинок воспроизводящих сборок, размещенных по периферии активной зоны. На рис. 3.38 показано размещение запальных и воспроизводящих сборок в центральной части активной зоны реактора AMFB. Запальные твэлы имеют небольшой диаметр и более высокое содержание делящегося топлива, чем воспроизводящие сборки. Внешняя зона воспроизводящих сборок и их половинок, размещенных по периферии активной зоны, содержит твэлы с большим содержанием делящегося материала, чем воспроизводящие сборки внутренней области, чтобы выравнять энерговыделение по радиусу активной зоны.

Активная зона (действующая высота 3048 см) окружена областью отражателя из  $\text{ThO}_2$ , который снижает утечку нейтронов и улучшает показатель воспроизводства топлива. Все топливные модули размещаются в циркалоевой решетке с целью минимизации потерь нейтронов. Активная зона может быть размещена в корпусе давления реактора с внутренним диаметром около 6756 мм.

Электрическая мощность установки с реактором AMFB составляет 1000 МВт (нетто), а длительность начального цикла при сохранении номинальной мощности – 5 лет. При этом коэффициент нагрузки установки должен быть 65 %. Как и у проекта реактора LWBR Scale-Up, длительность кампании активной зоны реактора AMFB может быть увеличена при условии ее эксплуатации на уровне мощности ниже номинальной. Коэффициент воспроизводства начального цикла составляет 1,03, в равновесном цикле он несколько выше (1,01). Использование «борной» системы регулирования реактивностью не требуется ни для условий нормальной эксплуатации, ни для холодного останова реактора.

Основное отличие реакторов AMFB и LWBR Scale-Up в том, что в концепции AMFB запальные сборки не содержатся в циркаловых кожухах (сборки без кожухов). Устранение этой оболочки не только уменьшает количество циркалоя в активной зоне, но и позволяет увеличить диаметр запальных твэлов и количество запального топлива. Это дает возможность повысить отношение топливо/вода (т.е. делает активную зону более «сухой»), что ведет к увеличению коэффициента воспроизводства и удлинению кампании активной зоны.

Второе отличие концепций указанных реакторов заключается в уменьшенных размерах воспроизводящих сборок. Запальные и воспроизводящие сборки реактора AMFB имеют гексагональную форму и такие же размеры, что и топливные сборки

промышленных реакторов PWR. Компонировка размещения ТВЭлов в запальном и воспроизводящем топливных модулях показана на рис. 3.39.

Для быстрого перемещения подвижного топлива в реакторе АМФВ в случае быстрого останова используется гидравлическая система с байпасной линией отвода части теплоносителя, аналогичная реакторной концепции LWBR Scale-Up. Концепция реактора АМФВ удовлетворяет структурным критериям норм ASME (раздел III), а также условиям безопасности норм федерального регулирования.

Проектные технические характеристики водо-водяного реактора-размножителя АМФВ приведены в табл. 3.30.

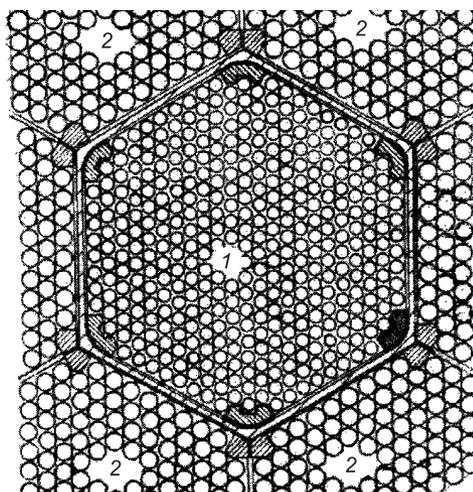


Рис. 3.39. Схема размещения ТВЭлов для реакторной концепции АМФВ:  
1 – в запальном модуле; 2 – в окружающем воспроизводящем топливном модуле

Таблица 3.30

#### Проектные технические характеристики водо-водяного реактора-размножителя АМФВ

Технические характеристики	Значение
1	2
<b>Общие характеристики установки</b>	
Мощность: тепловая, МВт электрическая, нетто, МВт КПД, брутто/нетто, %	3113 1000 34,1/32,1
Средняя температура теплоносителя (температура пара, как и в реакторе PWR), °С	293
Рабочее давление в системе (в диапазоне давлений для промышленных реакторов PWR), МПа: номинальное минимальное в установившемся режиме	152,5 150,5
Кампания активной зоны при эксплуатации на номинальной мощности (5 лет при коэффициенте нагрузки 75 %), тыс. ч	32
<b>Размеры реактора</b>	
Внутренний диаметр корпуса, мм	6756
Толщина кольцевого зазора <sup>1</sup> между внутренним диаметром корпуса давления и внешним диаметром кожуха активной зоны, мм	254
Радиальная толщина отражателя (средняя/минимальная), мм	261/190
<b>Топливные стержни</b>	
Внешний диаметр (запальные/воспроизводящие), мм	10440/14120

Продолжение табл. 3.30

1	2
Длина твэлов, мм: активная верхнего осевого отражателя (запального/воспроизводящего) нижнего осевого отражателя (запального/воспроизводящего) общая длина	3048 254/203,2 203,2/254 3968,75
Толщина оболочки (запальный/воспроизводящий), мм	0,59/0,80
Длина газосборника, мм	330,2
Отношение (внешний диаметр/толщина оболочки) для обоих видов стержней	17,5
Длина концевых заглушек (верхняя/нижняя), мм	25,4/57,1
Толщина прокладки (верх/низ)	25,4/25,4
Расстояние (зазор <sup>2</sup> ) между стержнями (запальным/воспроизводящим), мм	1,93/1,52
Зазор между стержнем и направляющим каналом (запальным/воспроизводящим), мм	2,79/2,69
Максимальное линейное энерговыделение твэлов <sup>3</sup> (запального/воспроизводящего), кВт/м	33,8/32,8
Количество решеток (запальный модуль/воспроизводящий), шт.	9/9
<b>Топливная решетка</b>	
Материал решетки (закалка из β-области, отжиг в α-области)	Циркалой-4
Межмодульный шаг твэлов (от стержня к стержню), мм: запальный/воспроизводящий воспроизводящий/воспроизводящий	10,3 4,36
Среднее расстояние между решетками по оси, мм	434
<b>Управление реактивностью</b>	
Длина хода, мм	3355
Растворимый поглотитель (используется при аварийном охлаждении)	Отсутствует
<b>Термогидравлические параметры</b>	
Давление в первом контуре, атм	152,5
Перепад давления, атм: в петле (горячая и холодная ветви) корпусе реактора (безактивной зоны) активной зоне парогенераторе	152,6 1,96 3,17 2,10
Номинальная скорость потока теплоносителя, запальное топливо/воспроизводящее топливо (в области стержней между решетками), м/с	5,03/4,66
Допустимое превышение мощности в переходном режиме (при 119 % следует остановка реактора)	118 % проектной мощности
Допустимое превышение мощности в установившемся режиме (такое же, как в промышленных реакторах PWR)	102 % проектной мощности

1	2
Количество насосов/петель/парогенераторов, шт.	6/6/6
Мощность одного насоса, кВт	6624
Расход теплоносителя через реактор, кг/ч	110,776·10 <sup>6</sup>
<b>Коэффициент воспроизводства</b>	
Начальный цикл	1,03
Равновесный цикл	1,012

<sup>1</sup> Скорость потока в зазоре сопоставима с аналогичным показателем в реакторе PWR.

<sup>2</sup> Эти зазоры больше, чем для реактора LWBR АЭС «Шиппингпорт» (1,60/1,47 мм).

<sup>3</sup> В области значений промышленной практики.

Конструктивные размеры реакторных корпусов приведены в табл. 3.31.

**Конструктивные размеры LWBR Scale-Up и AMFB**

Таблица 3.31

Показатель	Тип реактора	
	LWBR Scale-Up	AMFB
Внутренний диаметр корпуса, мм	708,6	675,6
Толщина кольцевого зазора между внутренним диаметром корпуса и внешним диаметром кожуха активной зоны, мм	241	254
Кожух активной зоны, мм: толщина стенки внутренний диаметр	88,9 642,6	88,9 607,0
Активная зона, мм: внешний диаметр	6400	6045
Длина, мм: активная топливный набор, включая верхний и нижний отражатели топливная сборка, включая верхний и нижний выступы, и крепежная штанга	213,5 264,1 359,9	305 350,7 466,6
Ход подвижной топливной сборки, мм	213,5	335,5
Длина корпуса реактора (без крышки), мм	10 820	13 570
Масса, т: корпуса корпуса и подъемного оборудования	814 866,5	920 972,5

**Реактор Ноллзской лаборатории ядерной энергетики.** Особенности водо-водяного реактора-размножителя, разработанного Ноллзской лабораторией ядерной энергетики, заключаются в использовании системы управления реактивностью, которая

сводит к минимуму количество необходимого подвижного топлива, объединении предразмножительных и размножительных функций в одной реакторной установке.

Подобно экспериментальному реактору LWBR, реактору LWBR Scale-Up и реакторной концепции AMFB (все с подвижными запальными сборками) проект реакторной концепции Ноллзской лаборатории содержит запальные и воспроизводящие топливные сборки, однако они совершенно неподвижны, поскольку находятся в стационарной решетке.

Активная зона реактора состоит из 163 топливныхборок двух типов, каждый тип содержит области запальных и воспроизводящих твэлов. Твэлы запального топлива меньше по диаметру и имеют более высокое содержание делящегося топлива, чем твэлы воспроизводящего топлива, которые содержат только таблетки из  $\text{ThO}_2$ . Все твэлы размещены в топливных решетках, выполненных из циркалоя. Один тип топливной сборки включает группу подвижных поглощающих стержней для управления реактивностью, конструкция которых аналогична конструкции стержней управления, используемых в современных промышленных реакторах PWR; другой тип топливной сборки содержит группу подвижных компенсирующих стержней, изготовленных из  $\text{ThO}_2$  (рис. 3.40). Компенсирующие стержни из  $\text{ThO}_2$  имеют диаметр, несколько больший диаметра аналогичных стержней, предлагаемых для использования в реакторной концепции, разработанной в Лаборатории ядерной энергетики Беттиса.

Активная зона реактора, разработанного в Ноллзской лаборатории, имеет высоту 3660 мм и окружена областью отражателя из  $\text{ThO}_2$ , препятствующей утечке нейтронов и улучшающей показатель расширенного воспроизводства топлива. Активная зона реактора может быть смонтирована в корпусе реактора с внутренним диаметром примерно 5232 мм.

Установка с реактором Ноллзской лаборатории имеет электрическую мощность (нетто) 964 МВт при продолжительности кампании активной зоны 2,5 года. Предполагается, что коэффициент нагрузки составит 75 %. Коэффициент воспроизводства реактора в равновесном цикле – 1,01. Система управления реактивностью включает группы поглощающих стержней в активной зоне и «борное» регулирование (при впрыске в теплоноситель растворенного в воде соединения бора), используемое в промышленных реакторах PWR.

Однако такая система реакторной концепции сводит к минимуму продолжительность кампании активной зоны и предназначена для производства электроэнергии в базисной нагрузке. Эксплуатация в маневренном режиме может иметь место, но использование «борного» регулирования реактивностью в сочетании с поглощающими стержнями должно неизбежно приводить к деградации расширенного воспроизводства.

Основные проектные характеристики водо-водяных реакторов-размножителей, разработанных Ноллзской лабораторией, и реактора PWR приведены в табл. 3.32.

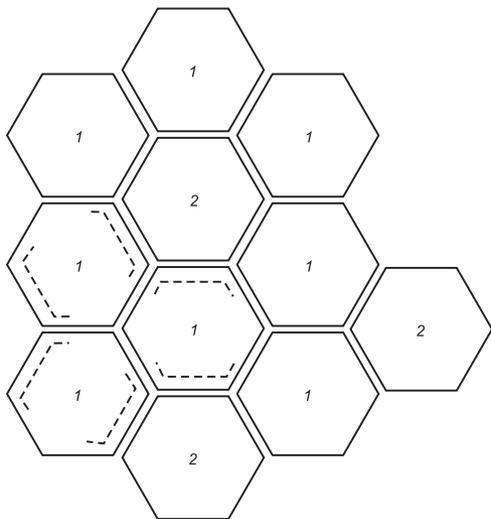


Рис. 3.40. Схематическое устройство центральной части активной зоны концепции водо-водяного реактора-размножителя, разработанного Ноллзской лабораторией ядерной энергетики:

1 – сборка управляющих стержней из  $\text{ThO}_2$  (36 стержней); 2 – сборка стержней управления, аналогичных по устройству стержням управления реактора PWR

**Проектные характеристики водо-водяных реакторов-размножителей  
Ноллзской лаборатории и реактора PWR**

Проектные характеристики	Тип реактора	
	Разработка Ноллзской лаборатории	PWR (System-80)
Мощность, МВт: тепловая электрическая, нетто	2930 964	3800 1280
Корпус реактора: внутренний диаметр, мм высота, мм	5232 12 800	462,3 13 700
Активная зона: диаметр, мм действующая высота, мм	4153 3660	3860 3810
Шаг топливного модуля, мм	305	208
Количество сборок управления реактивностью (со стержнями реактора PWR), шт.	37	81
Количество топливных модулей, шт.	163	241
Количество управляющих сборок (стержни из ThO <sub>2</sub> ) и/или сборок, выравнивающих энерговыделение в активной зоне, шт.	114	8
Количество твэлов, шт.: запальных воспроизводящих радиального отражателя	55 644 23 148 6294	56 876 – –
Диаметр твэла, мм: запального воспроизводящего	11,2 11,4	9,7 –
Шаг твэла, мм	12,9 <sup>1</sup>	12,8 <sup>2</sup>
Средняя температура теплоносителя, °С	304	312
Кампания активной зоны, лет	2,5 <sup>3</sup>	3 <sup>4</sup>
Потребность в U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> на 100 лет, в U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> /ГВт <sup>6</sup>	2554	11 091 <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Треугольная решетка.

<sup>2</sup> Квадратная решетка.

<sup>3</sup> Перегружается вся активная зона.

<sup>4</sup> Перегружается 1/3 активной зоны за год.

<sup>5</sup> При условии переработки и возврата U–Pu в топливный цикл.

<sup>6</sup> Электрическая мощность.

Основные технические характеристики твэлов запально-воспроизводящего топлива для размножительной активной зоны реактора, разработанного Ноллзской лабораторией, представлены в табл. 3.33.

Основные технические характеристики твэлов реактора Ноллзской лаборатории

Технические характеристики	Тип твэла		Стержень управления	Зона отражателя
	запальный	воспроизводящий		
Материал топливной таблетки	ThO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	ThO <sub>2</sub>	ThO <sub>2</sub>	ThO <sub>2</sub>
Средняя плотность таблетки, % теоретической плотности	97,5	97,5	97,5	97,5
Оболочка, мм: внешний диаметр толщина	11,17 0,67	11,43 0,57	8,76 0,54	21,46 1,19
Диаметральный зазор между топливом и оболочкой, мм	0,20	0,15	0,13	0,18
Внешний диаметр топливной таблетки, мм	9,62	10,13	7,54	18,89
Высота набора таблеток, мм	4064 <sup>1</sup>	4064	4000	3861
Длина газосборника, мм	254	254	482	254
Общая длина твэла, мм	4445	4445	4699	3861

<sup>1</sup> Высота таблеток для двойного топлива составляет 3657 мм, отражателя из ThO<sub>2</sub> – 203 мм на концах твэла.

**Предразмножительные реакторные концепции и потребности в ресурсах.** По программе AWBA предполагается производство <sup>233</sup>U в качестве побочного продукта в ядерных реакторах деления, использующих первоначально <sup>235</sup>U, содержащих <sup>232</sup>Th, который превращается в <sup>233</sup>U, и одновременно производящих электроэнергию. Такие двухцелевые реакторы называются предразмножительными. Производительность зависит от конструкции предразмножительного реактора и определяется следующими факторами: объемным отношением топливо/теплоноситель, плотностью энерговыделения в активной зоне, типом системы управления реактивностью, долей тория в активной зоне, наличием ториевых зон воспроизводства в активной зоне.

Содержание <sup>233</sup>U в уране, поставляемого для реактора LWBR, зависит от вида топлива, используемого в предразмножительном реакторе. Были рассмотрены два вида топлива: таблетки ThO<sub>2</sub> – UO<sub>2</sub>, содержащие высокообогащенный <sup>235</sup>U (93 %), этот вид топлива называется системой смешанных изотопов; топливо, в котором внешняя кольцевая зона UO<sub>2</sub> физически отделена от ThO<sub>2</sub>, называется сегрегированной системой. Первый вид топлива (смесь изотопов) обеспечивает первую загрузку активной зоны реактора LWBR ураном, содержащим значительное количество <sup>235</sup>U и <sup>236</sup>U, а сегрегированная топливная система обеспечивает ураном с большим содержанием <sup>233</sup>U (около 90 %).

Сегрегированное топливо может быть двух типов: стержни из UO<sub>2</sub> и ThO<sub>2</sub>, двойные таблетки (центральная зона изготовлена из ThO<sub>2</sub>, внешняя кольцевая зона – из UO<sub>2</sub>). При переработке таких двойных таблеток внешняя зона должна быть химически отделена от центральной части. Уран из UO<sub>2</sub> поступает для повторного цикла в предразмножительный реактор, в то время как уран из центральной части, содержащей <sup>233</sup>U, предназначен для реактора-размножителя.

Рассмотренные конфигурации предразмножительных активных зон подразделяются на два типа: активные зоны, которые могут быть установлены в современных промышленных реакторах PWR, и активные зоны, в которых несложно заменить предразмножительное топливо на топливо, предназначенное для реакторов-размножителей (основой проекта является размножительная концепция реактора). В концепциях активных зон, которые могут быть установлены в реакторах PWR, использовалось «борное» регулирование реактивностью. Они предназначались для эксплуатации при уровне энергонапряженности, типичном для промышленных реакторов PWR (около 100 кВт/л). Концепции предразмножительных активных зон, основанных на проектах реакторов-размножителей, используют как твэлы с двойными таблетками, так и топливную систему из смеси делящихся изотопов, и управление реактивностью в них осуществляется с помощью подвижного топлива. При этом эксплуатируются такие активные зоны при гораздо меньшем уровне энергонапряженности, характерном для реактора-размножителя (примерно 50 кВт/л). Предразмножительная активная зона (проект Ноллзской лаборатории) базируется на проекте реактора-размножителя и близка по конструкции к размножительной активной зоне. Эксплуатации предразмножительной активной зоны в течение нескольких циклов предшествует эксплуатация размножительной активной зоны в той же реакторной установке, использующей топливную систему из смеси изотопов.

Потребность в ресурсах  $U_3O_8$  для концепций водо-водяных реакторов-размножителей существенно меняется в зависимости от типа предполагаемой предразмножительной активной зоны (табл. 3.34).

Таблица 3.34

**Потребность в  $U_3O_8$  для различных комбинаций предразмножитель/размножитель при электрической мощности АЭС 1000 МВт, нетто, т<sup>1</sup>**

Тип топливной системы, используемый в предразмножительной активной зоне	LWBR Scale-Up	Управление за счет стержней из $ThO_2$	AMFB	Разработка Ноллзской лаборатории
Раздельные топливные стержни из $UO_2$ и $ThO_2$	5621	4893	5842	–
Двойные топливные таблетки	4665	4007	4786	–
Двойные топливные таблетки, подвижное топливо	3367 <sup>3</sup>	3157 <sup>2</sup>	3596 <sup>3</sup>	–
Запально-воспроизводящая активная зона	–	–	–	2467
Смесь изотопов, подвижное топливо	3378 <sup>3</sup>	–	3562 <sup>3</sup>	–

<sup>1</sup> Приведенные значения предполагают полную переработку топлива (урана и плутония) и использование его в предразмножителях. Потери при рециклировании предразмножительного и размножительного топлива составляют 1 % в течение первых 40 лет (0,5 % при переработке и 0,5 % при изготовлении нового топлива); время до переработки выгруженного топлива 1 год.

<sup>2</sup> Предразмножитель реакторной концепции AMFB.

<sup>3</sup> Допускается использование предразмножительной зоны в конфигурации размножительной активной зоны.

**Сравнение концепций.** Разработанные в соответствии с программой AWBA четыре концептуальных проекта водо-водяного реактора-размножителя способны обеспечить расширенное воспроизводство делящегося материала для поддержания непрерывного топливного цикла. Все эти реакторные концепции используют  $^{233}U$ – $^{232}Th$  топливный

цикл. В предразмножительных активных зонах в качестве делящегося материала применяется обычный обогащенный уран, а в качестве материала зоны воспроизводства –  $^{232}\text{Th}$  в виде  $\text{ThO}_2$ , который обеспечивает наработку  $^{233}\text{U}$  для начальной активной зоны реактора-размножителя. Проекты реакторов-размножителей базировались на технологии, разработанной в соответствии с программами LWBR (экспериментальный реактор в «Шиппингпорте») и AWBA. Успешная эксплуатация экспериментального реактора LWBR продемонстрировала, что водо-водяной реактор-размножитель может обеспечить расширенное воспроизводство делящегося топлива  $^{233}\text{U}$ .

Сравнение важнейших эксплуатационных характеристик проектов водо-водяных реакторов-размножителей, разработанных в Лаборатории ядерной энергетики Беттиса (три концепции) и Ноллзской лаборатории ядерной энергетики (одна концепция), показывает, что с точки зрения практического их использования предпочтительны проекты AMFB и Ноллзской лаборатории (табл. 3.35).

Таблица 3.35

**Сравнение важнейших эксплуатационных характеристик для различных концепций водо-водяного реактора-размножителя**

Характеристики	Проект реактора-размножителя			
	LWBR Scale-Up	Со стержнями управления из $\text{ThO}_2$	AMFB	Разработка Ноллзской лаборатории
Электрическая мощность, нетто, МВт	900	1000	1000	964 <sup>1</sup>
Коэффициент воспроизводства: начальный цикл равновесный цикл	1,017 1,005	1,03 1,01	1,03 1,01	1,00 1,01
Кампания активной зоны, лет	3,5 <sup>2</sup>	3 <sup>3</sup>	5	2,5
Управление реактивностью	Подвижное топливо <sup>4</sup>	Стержни из $\text{ThO}_2$ и стержни реактора PWR	Подвижное топливо <sup>4</sup>	Стержни $\text{ThO}_2$ , стержни PWR и «борное» регулирование <sup>5</sup>
Внутренний диаметр корпуса реактора, мм	7086	6502	6756	5232
Потребность в $\text{U}_3\text{O}_8$ для различных типов топливной системы, т: двойные таблетки смесь изотопов запально-воспроизводящая	3367 <sup>6</sup> 3378 <sup>6</sup> –	3157 – –	3596 3562 –	– – 2467 <sup>6</sup>
Уровень энергонапряженности активной зоны, кВт/л	~50	~50	~50	~100

<sup>1</sup> Концепция предназначена только для эксплуатации в режиме номинальной мощности.

<sup>2</sup> Минимальный срок кампании 3 года.

<sup>3</sup> Ежегодно перезагружается 1/3 активной зоны.

<sup>4</sup> «Борное» управление реактивностью не используется.

<sup>5</sup> «Борное» управление реактивностью может быть использовано при эксплуатации реактора на уровне мощности менее 50 % номинальной.

<sup>6</sup> В расчете на электрическую мощность (нетто) 1000 МВт.

Проект Ноллзской лаборатории отличается размещением активной зоны в корпусах, близких по размерам к корпусам современных промышленных реакторов PWR, минимальной потребностью в  $U_3O_8$  (2467 т) для производств делящегося материала для начального цикла реактора-размножителя. Недостатками реактора, разработанного в Ноллзской лаборатории, являются малая продолжительность кампании активной зоны (2,5 года); возможность эксплуатации реактора в базовом режиме номинальной мощности, высокая энергонапряженность активной зоны (около 100 кВт/л), длительное время (несколько десятков лет) до достижения равновесного состояния активной зоны (наиболее существенный недостаток). Остальные реакторные концепции (LWBR Scale-Up, концепция, использующая управление реактивностью за счет стержней из  $ThO_2$ ) предусматривают, как и реакторная концепция Ноллзской лаборатории, наибольшие сроки кампании активной зоны – 3,5 и 3 года соответственно.

Таким образом, из четырех предполагаемых концепций водо-водяного реактора-размножителя для практического использования наиболее приемлем реактор AMFB, у которого, по сравнению с концепцией реактора Ноллзской лаборатории, один недостаток – более высокая потребность в  $U_3O_8$ .

В 1965 г. в США были начаты исследования по разработке водо-водяного реактора-размножителя на тепловых нейтронах, использующего  $^{233}U$ - $^{232}Th$  топливный цикл. Основная цель исследований, проводившихся по программе LWBR, – повышение эффективности использования топлива в промышленных реакторах PWR. Программа LWBR включала три этапа: разработку проекта экспериментального реактора-размножителя с активной зоной, способной разместиться в корпусе реактора АЭС «Шиппингпорт», опытную эксплуатацию активной зоны реактора LWBR и определение коэффициента воспроизводства активной зоны для сравнения его расчетных значений с экспериментальными.

Исследования облученного топлива после завершения эксплуатации, продолжавшейся с декабря 1977 до октября 1988 г., и демонтажа активной зоны реактора LWBR показали, что достигнутые значения коэффициента воспроизводства (1,012–1,015) находятся в хорошем соответствии со средним расчетным значением (1,0135). Внедрение активной зоны реактора LWBR в современные промышленные реакторы PWR позволит примерно в 50 раз повысить эффективность использования топлива.

С 1976 г. началось выполнение программы AWBA, основная цель которой заключалась в разработке проекта усовершенствованного водо-водяного реактора-размножителя, способного заменить реактор PWR или разместить его активную зону в корпусах современных (и будущих) реакторов PWR. В выполнении программы AWBA участвовали две организации: Лаборатория ядерной энергетики Беттиса (три проекта водо-водяного реактора-размножителя, не считая проект экспериментального реактора LWBR) и Ноллзская лаборатория ядерной энергетики (один проект).

Из предлагаемых четырех проектов усовершенствованного реактора-размножителя на тепловых нейтронах наиболее приемлемым для промышленного использования (по совокупности самых важных эксплуатационных характеристик) представляется проект реактора AMFB, управление реактивностью которого осуществляется за счет подвижного запального топлива. При этом кампания активной зоны составляет около 5 лет.

Основные характеристики АЭС с реакторами четырех проектов представлены в табл. 3.36.

Таблица 3.36

**Основные характеристики АЭС с реакторами большой мощности, ВВЭР-1000 последней модификации и европейским реактором EPR**

Характеристики	ВВЭР-1000	N4	EPR	УВР-1500
1	2	3	4	5
<b>Технические характеристики</b>				
<i>Энергоблок АЭС</i>				
Номинальная тепловая мощность, МВт	3000	3817	4250	4200
Электрическая мощность, МВт	1068	1475	1600	1500
Время использования, ч/год	7000	6200	7000 (7400)	7000 (7446)
<b>Реактор</b>				
<i>Тепловыделяющие сборки</i>				
Конфигурация	Усовершенствованная типа ВВЭР-1000	17×17	17×17	Шестигранная типа ВВЭР-1000А
Количество твэлов, шт.	311	264	264	311
Количество направляющих труб, шт.: для поглотителей для внутриреакторных КИП	18 1	24 1	24 1	18 1
Общая длина, мм	4570	4795	4820	4570–4900
Ширина «под ключ», мм	234	214	214	234
Шаг твэлов, мм	12 750	12 600	12 600	12 750
Масса UO <sub>2</sub> , кг	461	610,8	515	495
<i>Твэл</i>				
Длина, мм	3837	4488	4270	3530/3885
Внешний диаметр, мм	9,1	9,5	9,5	9,1
Материал оболочки	Циркониевый сплав Э110	Циркалой-4	Циркалой-4	Циркониевый сплав Э635
Толщина оболочки, мм	0,67	0,57	0,57 (0,64)	0,67
<i>Топливная таблетка</i>				
Материал	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> (МОХ-топл)	UO <sub>2</sub> (МОХ-топл)
Плотность (% теоретической плотности), %	96	95	95	96
Длина (высота), мм	11,0	13,5	13,5	12–18
Диаметр, мм	7,57	8,19	8,20	7,57
Внутренняя полость, мм	2,35	–	–	1,4

1	2	3	4	5
<b>Активная зона</b>				
Количество тепловыделяющих сборок, шт.	163	205	241	241/253
Активная высота, м	3,49	4,27	4,27	3,9–4,2
Эквивалентный диаметр, м	3,16	3,37	3,767	3,94
Регулирующие сборки, шт.: «черные» сборки: количество стержни-поглотители поглотитель	79 18 В <sub>4</sub> С –	53 24 Ag-Jn- Cd+В <sub>4</sub> С	81 (89) – Ag-Jn-Cd титанат диспрозия	102 18 В <sub>4</sub> С – верх; титан дис- прозия – низ
«серые» сборки, шт.: количество стержни-поглотители поглотитель	–	12 8 Ag-Jn-Cd	– – –	19 6–12 Титанат дис- прозия
сборки выгорающего поглотителя (первая загрузка АЗ): количество количество стержней выгорающий поглотитель	36 18 Cr <sub>2</sub> B+Al	80 836 Силикат бора	– –	~90 18 Бор или га- долиний
Линейная мощность, кВт/м: средняя максимальная	16,74 41,0	17,02 42,0	15,5 47,0	13–15 27,0
Коэффициент запаса до кризиса кипения: минимальный при нормальных ре- жимах минимальный при аномальных ус- ловиях	1,90 1,20	1,77 1,17	2,46 1,10	1,6–2,0 1,17
Обогащение, %: первая загрузка перегрузка	1,6/2,4/4,0 4,0	1,5/2/4/2,95 3,1	1,9/3,0/3,6 До 5,0	2,2 (средн.) <5
Средняя глубина выгорания (стацио- нарный цикл), МВт·сут/кгU	43,0	37,4	55–60	52,5 (7000 ч) 55,8 (7500 ч)
<b>Первый контур</b>				
<b>Объемы</b>				
Вода, м <sup>3</sup> : номинальная мощность горячий останов холодный останов	372 352 276	394 375 407	380 – –	500 (с КД) – –
Пар, м <sup>3</sup> : номинальная мощность горячий останов	24 44	25 40	– –	40 60

1	2	3	4	5
<b>Корпус реактора</b>				
Общая высота, м	10,9	13,591	12,74	10,7
Внутренний диаметр, м	4,07	4,394	5,3	5,1
Толщина стенки (у активной зоны), мм	233	220	244	244
Минимальная толщина наплавки, мм	–	7,5	–	–
Масса, т	330	325,7	420	390
<b>Парогенератор</b>				
Количество на один энергоблок, тип	4, горизонтальный 2 коллектора первого контура	4, вертикальный с U-образными трубками	4, вертикальный с U-образными трубками	4, вертикальный с горизонтальной трубной системой 1 коллектор первого контура
Общая высота, м	5,61	22,138	19,5	18,7
Масса, т: незаполненный в нормальном режиме работы	400 550	430 528	550 –	645 –
Общая поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	5174	6936	7960	8400
Температура теплоносителя, °С на входе на выходе	320 292	328,0 293,4	329,9 295,3	327 297/296
Давление теплоносителя на входе, бар	160	155	155	160
Расход теплоносителя, м <sup>3</sup> /ч	21 200	22 320	27 080	29 000
Давление пара, бар	64	73,1	77,2	70–72
Температура пара, °С	278,5	316/289	288	286,4
Максимальная влажность пара, %	0,20	0,25	–	0,1
Расход пара, кг/с	408	537	600	600
<b>Компенсатор давления</b>				
Количество на один энергоблок, тип	1	1	1	1
Общая высота, м	13,6	13,526	–	~17
Внутренний диаметр (без наплавки), м	3,0	2,540	–	3,0
Общая толщина (min), мм	150	130	–	150
Давление, бар	160	171,3/155	156	160
Температура, °С	348	345	350	348

Продолжение табл. 3.36

1	2	3	4	5
Масса, т: в незаполненном состоянии при нормальных режимах	193 229	117 142	– –	– –
<b>Главные циркуляционные насосы</b>				
Количество на один энергоблок, тип	4 ГЦНА-1391	4	4 электроприводной вертикальный, центробежный, одноступенчатый с уплотнением вала	4
Скорость вращения, об/мин	1000/750	1485	1485	1000/750
Высота напора, м	64,8	99,0	105,5	117
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	21 200	22 890	24 500	29 500
Давление (на всасе), бар	156	172,3	–	–
Общая высота (с двигателем), м	9,1	8,3	–	9,9
Общая масса (без воды и масла), т	120	103,5	–	130
Общая инерция вращающихся деталей, кг·м <sup>2</sup>	7500	3800	–	–
Мощность, кВт: на горячей воде на холодной воде номинальные условия	– 6700 5000	5420 8610 6500	– – 7100	6200 5400 8400
<b>Гермооболочка</b>				
<b>Внутренняя оболочка</b>				
Высота с куполом, м	67,1	61,6	63,0	62–67
Внутренний диаметр, м	44,0	43,8	48,0	44
Толщина стенки, м	1,2	1,2	1,3	1,2
Толщина купола, м	1,2	0,92	–	1,2
Общий объем полости, м <sup>3</sup>	60 000	71 500	90 000	–
<b>Эксплуатационные характеристики</b>				
<b>Показатели уровня надежности</b>				
Средний коэффициент готовности	0,95	–	0,87	>0,9
Среднегодовой КИУМ при работе в базовом режиме	0,80	–	Не оговорен	0,85
Срок службы корпусного оборудования и ГЦТ, лет	40	–	60	60
Срок службы ТВС активной зоны, лет, не менее	4	–	5–6	6

Окончание табл. 3.36

1	2	3	4	5
Срок службы привода, лет, не менее	20	–	–	20
Срок службы выемной части ГЦН, лет	10	–	–	>10
Срок службы электродвигателя ГЦН, лет	30	–	–	30
Ресурс уплотнения вала ГЦН, ч, не менее	24 000	–	–	20 000
Ресурс подшипниковых узлов ГЦН, ч, не менее	28 000	–	–	> 60 000
Срок службы парогенератора, лет	30	–	–	60
В том числе трубной системы	30	–	–	30
Срок службы арматуры (выемной части), лет, не менее	20	–	–	25
Срок службы бассейна выдержки, лет, не менее	40	–	–	65
Срок службы вспомогательных насосов, лет, не менее	20	–	–	25

# ГЛАВА 4. ТЕПЛООБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ АЭС

## 4.1. Горизонтальные парогенераторы

**Парогенератор ПГВ-1000М.** Конструктивное оформление теплообменников – парогенератор АЭС (рис. 4.1) – во многом определяется свойствами теплоносителей и применяемых при их изготовлении материалов. В качестве теплоносителя в семействе реакторов типа ВВЭР используется вода.

Обычная вода – наиболее дешевый и распространенный теплоноситель. Сочетание ее физических и теплофизических свойств (плотность, теплопроводность, вязкость, теплоемкость), определяющих интенсивность теплообмена и расход теплоносителя, весьма благоприятно.

Коэффициенты теплоотдачи для воды достигают больших значений при относительно малых скоростях и резко увеличиваются с их ростом. Так, если при скорости воды около 0,3 м/с коэффициент теплоотдачи равен примерно  $2 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), то при скорости 5 м/с он увеличивается до  $20 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Благодаря высокой теплоемкости, малой вязкости и большой плотности затраты на перекачку воды по контуру невелики.

К положительным свойствам воды относятся также ее хорошая устойчивость к ионизирующему излучению и практически невысокая склонность к активации. Самым серьезным недостатком воды является высокое давление насыщенного пара, которое быстро растет с увеличением температуры. Так, при давлении 0,1 МПа температура насыщения 99,6 °С, а при 22,11 МПа – только 374,1 °С. Таким образом, при увеличении давления более чем в 200 раз температура насыщенного пара повышается всего в 3 раза. На рис. 4.2 показана поверхность теплообмена ПГ.

Температурный уровень отвода тепла из реактора типа ВВЭР невысок, поэтому невысоки и параметры рабочего пара ( $P$  и  $t$ ), вырабатываемого ПГ, обогреваемыми водой под давлением.

Определенным недостатком воды как теплоносителя является зависимость ее плотности от температуры (влияние давления на плотность мало), существенно увеличивающаяся с ростом температуры. Например, при давлении 10,0 МПа и изменении температуры от 250 до 300 °С удельный объем воды увеличивается на 11 %. При разогреве реактора ВВЭР-1000 с холодного (температура первого контура меньше 70 °С)

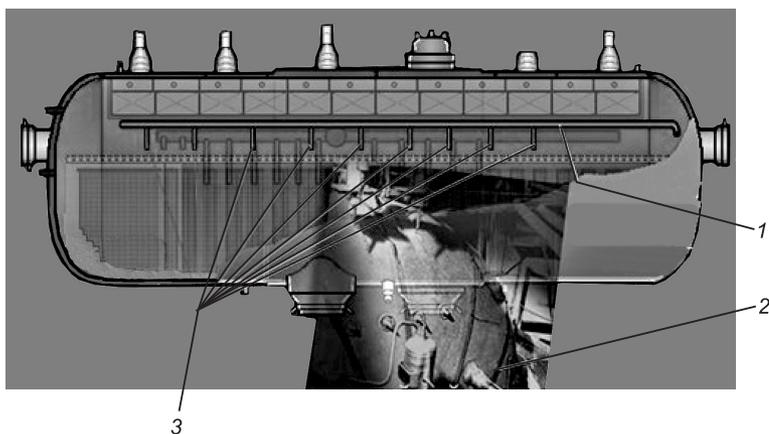


Рис. 4.1. Парогенератор ПГВ-1000М:

1 – коллектор Ду80; 2 – патрубок входа аварийной питательной воды; 3 – раздающие трубы Ду25

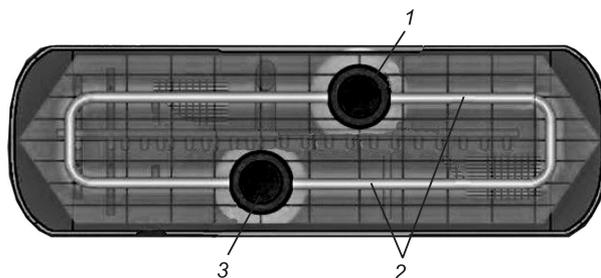


Рис. 4.2. Поверхность теплообмена ПГ:  
1 – «холодный» коллектор; 2 – теплообменные трубки; 3 – «горячий» коллектор

до горячего (температура 280 °С) состояния плотность теплоносителя первого контура уменьшается на 30 %. Это обстоятельство делает необходимым установку в первом контуре специального компенсирующего объема (компенсатора объема, или компенсатора давления).

Вода – хороший растворитель, что значительно усложняет водоподготовительные установки, которые должны очищать воду не только от взвешенных и коллоидных частиц, но и от растворенных.

Наличие в воде первого контура растворенных примесей приводит к повышению ее радиоактивности за счет возникновения долгоживущих нуклидов. Выпадение активных веществ из реактора в контуре (в том числе и в ПГ) затрудняет его ремонт и ревизию.

Вода – весьма коррозионно-активное вещество. Интенсивность коррозионных процессов при контакте с водой различных конструкционных материалов зависит от температуры, наличия в воде свободных ионов водорода (рН) и других факторов. В качестве примера можно привести выход из строя парогенераторов Южно-Украинской АЭС, отработавших всего 7 тыс. ч (292 сут) при самых низких рН продувочной воды ПГ.

Коррозионные процессы, даже если они протекают с небольшими скоростями, загрязняют воду как растворенными, так и твердыми частицами, активизируемыми в реакторе. Продукты коррозии, как правило, содержат элементы, нейтронное облучение которых приводит к возникновению долгоживущих радиоактивных нуклидов.

В настоящее время основным конструкционным материалом поверхностей нагрева ПГ для ВВЭР является аустенитная нержавеющая сталь. Она обладает очень высокой общей коррозионной стойкостью при наличии в воде любых примесей. Допустимое значение рН воды 3–12.

Однако аустенитные нержавеющие стали склонны к таким специфическим видам коррозии, как щелочная хрупкость, щелевая коррозия и коррозия под напряжением (коррозионное растрескивание). Коррозионные разрушения из-за щелочной хрупкости этих сталей имеют те же причины и тот же характер, что и для углеродистых сталей. В особенности они проявляются при наличии в металле остаточных напряжений.

Щелевая коррозия развивается в деталях, выполненных из аустенитных сталей при наличии в воде заметного количества кислорода. Основным недостатком аустенитных нержавеющих сталей как конструкционного материала поверхностей нагрева ПГ является их склонность к коррозионному растрескиванию, которое вероятно в местах остаточного напряжения, возникающего при изготовлении поверхностей нагрева и их деталей. Остаточные напряжения присутствуют в рассматриваемой конструкции ПГ для ВВЭР-1000 вследствие холодной гибки трубок без последующей термообработки при изготовлении трубного пучка, а также развальцовки теплообменных труб в стенке коллекторов методом взрыва (что применялось вплоть до 1990 г.).

Коррозионное растрескивание возникает и развивается при воздействии на напряженный металл водной среды, содержащей кислород и хлориды. Следует иметь в виду, что влияние кислорода более существенное, а наличие хлоридов при этом резко интенсифицирует процесс. Поэтому их содержание жестко ограничивается нормами водно-химического режима первого и второго контуров.

К усилению коррозионных процессов ведет повышение концентрации водородных ионов. Это плохо сказывается на углеродистых сталях, из которых изготавливаются корпуса и коллекторы ПГ для ВВЭР. Для них подходящими будут рН около 8. Неблагоприятна также роль хлоридов и нитридов: первые активно разрушают защитные окисные пленки на поверхности металла, вторые являются хорошими окислителями.

Создание ПГ большой единичной мощности в транспортабельном исполнении обусловлено необходимостью размещения значительной теплопередающей поверхности и получения нужного сепарационного объема в одном корпусе.

Использование для этих целей широко известных корпусных углеродистых сталей при значительном диаметре корпуса ПГ и повышенных параметрах генерируемого пара превратило бы корпус ПГ в уникальный сосуд высокого давления, имеющий значительные толщины стенок (до 220 мм) и массу (до 250 т). Для снижения массы и габаритов корпуса ПГ для ВВЭР-1000 в качестве конструкционного материала применена высокопрочная низколегированная сталь перлитного класса марки 10ГН2МФА.

Параметры теплоносителя первого контура ВВЭР-1000 обусловили необходимость использования в конструкции коллекторов теплоносителя сталей с высокими механическими характеристиками. В целях унификации изделий по применяемым материалам для коллекторов теплоносителя принята та же сталь, что и для корпуса ПГ. Для надежной обварки концов труб внутренняя поверхность коллектора плакирована антикоррозионной аустенитной наплавкой.

Коллектор пара и система питательной воды ПГВ-1000 изготавливаются из конструкционной углеродистой стали марки 20. Указанная сталь обладает высокой пластичностью, широко применяется в изготовлении теплообменной аппаратуры, работающей под давлением до 16,0 МПа при температуре до 450 °С, технологична, сваривается всеми видами сварки.

В связи с жесткими нормами содержания продуктов коррозии в воде первого контура для изготовления трубок поверхности теплообмена применена хромоникелевая сталь аустенитного класса 08X18H10T, обладающая высокой общей коррозионной стойкостью, технологичная, хорошо свариваемая. Однако аустенитные стали этого класса склонны к специфическим видам коррозии, рассмотренным ранее.

**Развитие конструкций ПГ для АЭС с ВВЭР.** Производство рабочего пара для турбогенератора на АЭС осуществляется или в ядерных реакторах (одноконтурные реакторы), или в специальных теплообменных установках (ПГ в двухконтурных схемах). В парогенераторе АЭС с ВВЭР, передача питательной воде тепла, отводимого теплоносителем из активной зоны реактора. Наряду с реактором, главным циркуляционным насосом и турбогенератором ПГ относится к основному оборудованию АЭС. Из всех узлов ядерной энергетической установки, находящихся вне корпуса реактора, парогенераторы наиболее сложны в отношении выбора материала и технологии изготовления. Некоторые их детали контактируют с теплоносителями обоих контуров, поэтому должны обладать высокой коррозионной стойкостью при двустороннем коррозионном воздействии сред контуров.

Соединения элементов и деталей ПГ должны обеспечивать плотность, исключаящую возможность протечек из одного контура в другой. Протечки теплоносителя

во второй контур выше регламентных пределов (5 л/ч для ВВЭР-1000) недопустимы, так как второй контур не имеет биологической защиты и связан с окружающей средой. Попадание рабочего тела второго контура в первый (например, при гидроиспытаниях второго контура) из-за снижения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура может привести к ядерно-опасному режиму эксплуатации реакторной установки.

В парогенераторах первого блока Нововоронежской АЭС (рис. 4.3) подогрев питательной воды до температуры насыщения  $t_s$ , генерация, сепарация и сушка рабочего пара осуществляются в одном корпусе. Горизонтальный корпус диаметром 3000 мм и длиной 12 500 мм, выполненный из перлитной стали, состоит из цилиндрической обечайки и эллиптических днищ. Верхняя часть корпуса предназначена для сепарации пара, а нижняя – для размещения поверхности теплообмена, которая выполнена из нержавеющей труб диаметром 21×1,5 мм, максимальной длиной 12 000 мм. Входные и выходные концы труб завальцованы с подваркой в вертикальные коллек-

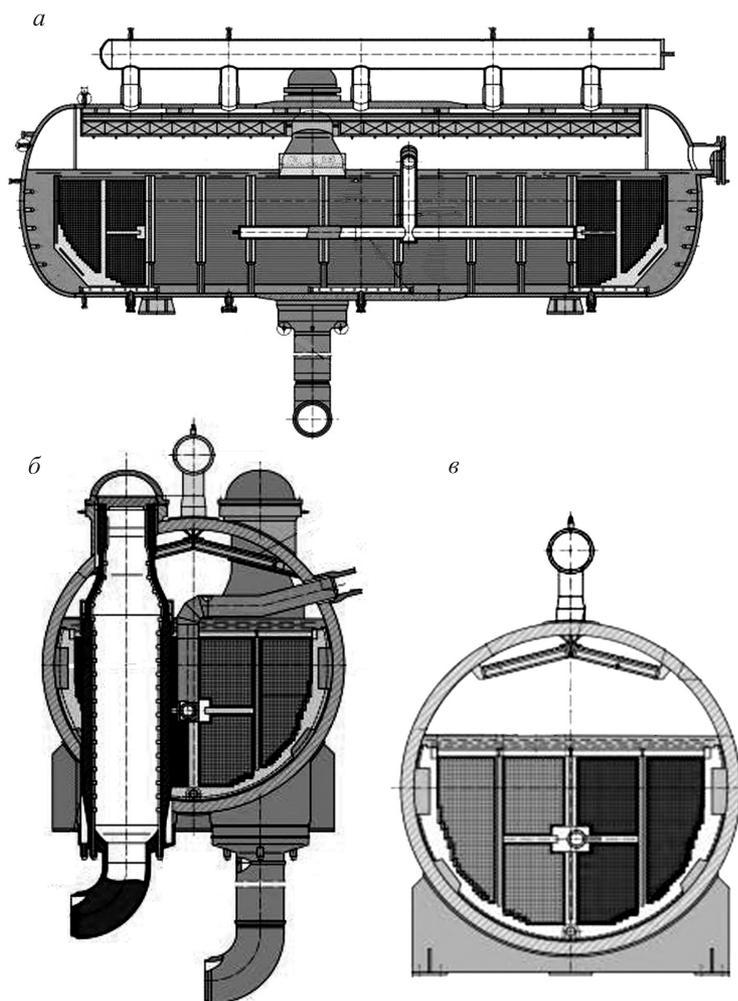


Рис. 4.3. Парогенератор первого блока Нововоронежской АЭС:  
а – продольный разрез; б, в – поперечный разрез

торы. Коллекторы и узлы их ввода в корпус – сложные инженерные конструкции. Коллекторы внутренним диаметром 750 мм и толщиной 75 мм выполнялись из стали 12X18H9T и имели 2074 отверстия под теплообменные трубы. В корпус они вводились через штуцеры диаметром 1040 мм. Между стенками коллекторов и штуцерами предусматривалась водяная рубашка.

Опыт эксплуатации ПГ первого и второго блоков Нововоронежской АЭС показал, что принятые конструкционные решения обеспечили надежную работу при всех разрешенных режимах. Поэтому при проектировании ПГ для более мощных модификаций реакторов ВВЭР эти решения были практически полностью сохранены.

У ПГ реакторных установок, начиная с ВВЭР-440, люки на коллекторах первого контура для осмотра и ремонта узла заделки трубного пучка были перекомпонованы и расположены сверху. Они обслуживаются сверху из центрального зала здания реакторного отделения. Такое решение позволило значительно сократить размеры ПГ, но усложнило конструкцию его корпуса (за счет дополнительных фланцевых разъемов на корпусе).

Рост единичной мощности ПГ при ограниченных по условиям транспортабельности габаритах приводит к тому, что трубные пучки таких ПГ выполняются очень тесными, с относительно малыми шагами ( $S/d = 1,15-1,3$ ). Кроме того, повышение мощности, как правило, сопровождается повышением тепловых и паровых нагрузок вследствие более высоких температурных напоров.

При разработке ПГ реакторной установки ВВЭР-1000 были рассмотрены различные варианты конструкций и технологических схем, включая вертикальный ПГ. Однако для изготовления и внедрения в проект реакторной установки также был принят тип горизонтального ПГ, несмотря на несколько лучшие компоновочные решения по зданию реакторного отделения при вертикальном типе ПГ.

Для реакторной установки ВВЭР-1000 пятого энергоблока Нововоронежской АЭС были разработаны парогенераторы ПГВ-1000. В реакторной установке ВВЭР-1000 используются парогенераторы ПГВ-1000М, в основу которых была положена конструкция ПГВ-1000.

Увеличение мощности ПГВ-1000 по сравнению с ПГ для ВВЭР-440 было достигнуто за счет не только увеличения площади теплопередающей поверхности, но и интенсификации теплообмена, полученной изменением диаметра труб теплопередающей поверхности и увеличением скорости теплоносителя.

Конструктивно ПГВ-1000 практически повторяют ПГ для реакторов ВВЭР-440, но отличаются существенным увеличением внутреннего диаметра корпуса (4000 мм вместо 3200 мм для ВВЭР-440), уменьшением диаметра теплообменных труб ( $16 \times 1,5$  мм вместо  $21 \times 1,5$  мм для ВВЭР-440), увеличением количества теплообменных труб до 11 000 штук, более эффективными сепарационными устройствами.

Для уравнивания скоростей выходящего пара и равномерного распределения пароводяной смеси по паровому объему ПГ в конструкцию ПГВ-1000 введен погруженный дырчатый лист.

Для ПГВ-1000, как и для всех остальных ПГ реакторов семейства ВВЭР, заделка теплообменных труб в трубные коллекторы производилась завальцовкой на всю толщину коллектора с использованием энергии взрывчатых веществ и последующей обваркой торцов труб с коллектором.

По сравнению с ПГВ-4 (ПГ для ВВЭР-440) в ПГ блоков ВВЭР-1000 температуры рабочих сред по первому и второму контуру на  $20-30$  °С выше. В среднем в 2–2,5 раза выше теплонпряженность трубного пучка. Это предопределяет более строгие требования к ПГВ-1000М и соблюдению условий, предотвращающих возникновение и развитие процессов коррозионного растрескивания стали 08X18H10T (трубок ПГ).

**Конструкция парогенератора ПГВ-1000М.** Парогенератор ПГВ-1000М (рис. 4.4, 4.5) предназначен для выработки насыщенного пара давлением 6,4 МПа с влажностью 0,2 % при температуре питательной воды 220 °С (в режиме без ПВД 164±4) в составе энергоблока АЭС с водо-водяным энергетическим реактором ВВЭР-1000 (РУ В-320) и является составной частью циркуляционного контура. Парогенераторы ПГВ-1000 и ПГВ-1000М изготавливались на двух заводах: ЗИО (завод им. Орджоникидзе, г. Подольск) и ПО «Атоммаш» (г. Волгодонск).

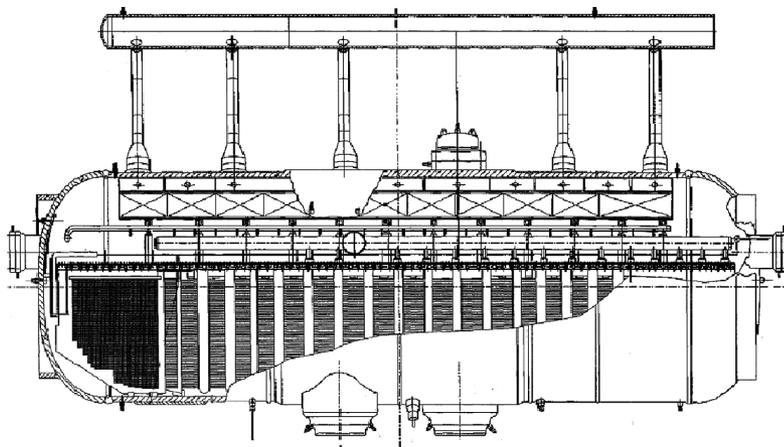


Рис. 4.4. Парогенератор (эскиз сборочный)

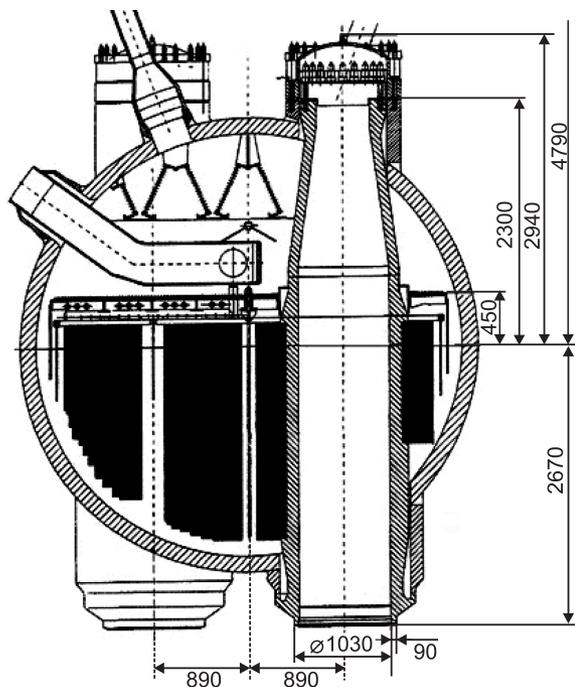


Рис. 4.5. Парогенератор ПГВ-1000М

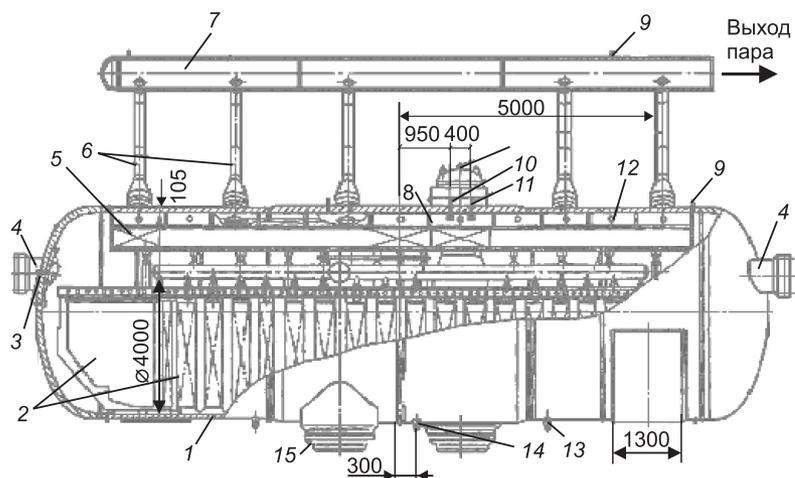


Рис. 4.6. Парогенератор ВВЭР-1000:

1 – корпус; 2 – трубный пучок; 3 – штуцера уравнимеров; 4 – люк-лаз по второму контуру; 5 – секция жалюзийного сепаратора; 6 – пароводящие трубы; 7 – паровой коллектор; 8 – штуцер контроля плотности разьема по второму контуру; 9 – штуцер воздушника по второму контуру; 10 – штуцер контроля плотности разьема по первому контуру; 11 – штуцер воздушника по первому контуру; 12 – коллекторы раздачи питательной воды; 13 – штуцер продувки; 14 – дренаж; 15 – штуцер продувки

Конструктивное исполнение ПГВ-1000М основано на следующих требованиях к ПГ АЭС (рис. 4.6):

- технологическая отработанность конструкции (освоенность производства), надежное расхолаживание реактора при минимальных разностях высотных отметок между реактором и ПГ, обеспечение охлаждения теплоносителя первого контура до требуемого уровня температур во всех проектных режимах;
- резервирование подачи питательной воды в ПГ по отдельной линии;
- ограничение габаритных размеров для транспортировки по железным дорогам;
- исключение возможности перетечек из одного контура в другой (регламентный предел протечек 5 л/ч).

Указанные требования определили конструкцию ПГ.

Парогенератор ПГВ-1000М – горизонтальный, однокорпусный парогенератор с погруженной в воду второго контура трубчатой поверхностью теплообмена и встроенными паросепарационными устройствами, системой раздачи питательной воды, паровым коллектором, погруженным дырчатым листом, системой раздачи аварийной питательной воды.

В состав парогенератора входят следующие сборки, поставляемые отдельно от него: две опоры, один паровой коллектор, одна труба с проставышем, комплекты закладных деталей, контрольных монтажных соединений и монтажных частей.

Парогенераторы размещены попарно в боксах герметичного объема и установлены каждый на две опорные конструкции. Для предотвращения динамических перемещений (например, при землетрясении) ПГ раскреплены с помощью гидроамортизаторов.

Масса ПГ с опорами в сухом виде – 694 т, без опор – 322 т. Масса ПГ с опорами, полностью заполненного по первому и второму контурам, – 842 т (без учета теплоизоляции).

Конструкция ПГ с восемью гидроамортизаторами разработана с учетом землетрясения до 9 баллов и эксплуатации в условиях тропического климата. Основные технические характеристики ПГ-1000М представлены в табл. 4.1.

Основные технические характеристики ПГ-1000М

Технические характеристики	Значение
Тепловая мощность на 1 ПГ, МВт	750
Число ПГ на 1 реактор, шт.	4
Электрическая мощность на 1 ПГ, МВт	250
Паропроизводительность, т/ч	1470
Расход теплоносителя первого контура через ПГ, т/ч: при работе на 4 петлях при работе на 2 петлях	21 200 26 000
Сопrotивление ПГ по первому контуру при номинальном расходе, МПа	0,125
Сопrotивление ПГ по второму контуру при номинальных параметрах, МПа	0,11
Скорость теплоносителя в трубках, м/с	4,89
Скорость выхода пара с зеркала испарения, м/с	0,42
Влажность пара на выходе из ПГ, не более, %	0,2
Средняя длина теплообменной трубки, мм	11 100
Количество/диаметр теплообменных труб, мм	11 000/16×1,5
Поверхность нагрева, м <sup>2</sup>	6115
Удельный тепловой поток (средний), кВт/м <sup>2</sup>	123
Объем воды для заполнения ПГ до рабочего уровня, м <sup>3</sup>	81,5
Внутренний диаметр корпуса, мм	4000
Объем воды для полного заполнения по второму контуру, м <sup>3</sup>	127
Длина, мм	13 840
Объем воды первого контура в ПГ, м <sup>3</sup>	20,5
Толщина корпуса в средней части/на днищах, мм	145/120
Материал корпуса и коллекторов	Сталь 10ГН2МФА
Материал теплообменных труб	Сталь 08Х18Н10Т
Материал коллектора питательной воды	Сталь 20

Парогенератор состоит из следующих элементов и основных узлов:

- корпус;
- поверхность теплообмена (трубного пучка);
- «горячий» и «холодный» коллекторы;
- сепарационное устройство жалюзийного типа;
- устройство раздачи основной питательной воды;
- устройство раздачи аварийной питательной воды;

- устройство выравнивания паровой нагрузки (погруженный дырчатый лист);
- опорные конструкции и гидроамортизаторы;
- устройство измерения уровня в ПГ (уровнительные сосуды, врезки и импульсные линии);

- система продувок и дренажа.

Корпус ПГВ-1000М – сварной цилиндрический сосуд, воспринимающий давление второго контура. Включает цилиндрическую часть, состоящую из трех обечаек различной толщины, и эллиптические днища. На обоих днищах корпуса имеются люки для осмотра и ремонта внутрикорпусных устройств ПГ.

В верхней части корпуса есть патрубки для отвода генерируемого пара, патрубки для подвода питательной воды и люки в коллекторах теплоносителя для доступа к узлам заделки теплообменных труб (рис. 4.7).

Длина корпуса ПГ – 13 840 мм, внутренний диаметр – 4000 мм, толщина стенок корпуса в средней части – 145 мм, на концевых участках – 105 мм, толщина стенок днищ – 120 мм. В корпусе парогенератора размещены:

- десять патрубков Ду350 в верхней части для отвода насыщенного пара;
- штуцер Ду100 в средней нижней части для отвода котловой воды в линию дренажа;
- патрубков Ду400 в центральной верхней части для подвода питательной воды;
- два штуцера Ду80 снизу в крайних частях для отвода котловой воды в линию продувки;
- патрубков Ду100 на днище симметрично люку Ду500 для подвода аварийной питательной воды;
- два штуцера Ду20 – по одному на каждом люке Ду800 для контроля плотности фланцевых соединений второго контура;
- два штуцера Ду20, воздушники второго контура, расположенные по одному на каждом люке Ду800;
- 20 штуцеров Ду20 на корпусе и днищах для присоединения линий КИП;
- два люка Ду500 по одному на каждом эллиптическом днище для доступа в объем второго контура ПГ;
- два штуцера Ду20 по одному на каждом люке Ду500 для контроля плотности фланцевых соединений второго контура.

В нижней части корпуса вварены переходные патрубки Ду1200 для приварки коллекторов теплоносителя первого контура: «горячего» и «холодного». Коллекторы расположены симметрично относительно вертикальной оси ПГ на расстоянии 1150 мм от нее в продольном и на 890 мм в поперечном направлениях (рис. 4.8). Коллекторы первого контура выполнены из легированной конструкционной стали. Внутренняя поверхность коллекторов, включая крышки фланцевых разъемов, плакирована антикоррозионной наплавкой из нержавеющей стали. Коллекторы по принятой технологии изготовления

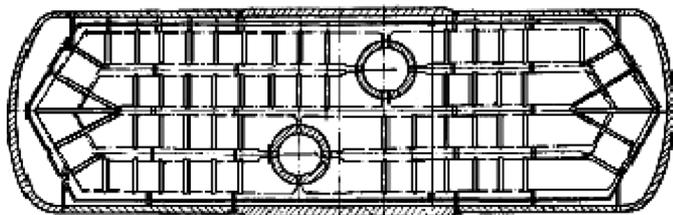


Рис. 4.7. Схема расположения теплообменных труб в ПГ

имеют кольцевой сварной шов, который при номинальных условиях эксплуатации ПГ находится выше уровня котловой воды в ПГ.

Каждый коллектор имеет:

- переходное кольцо Ду850 для входа (выхода) теплоносителя и соединения с главным циркуляционным трубопроводом;

- штуцер Ду20 для непрерывной продувки;
- два штуцера Ду10, воздушник и контроль плотности фланцевого соединения первого контура.

Корпус в средней части сварен с двумя вертикальными коллекторами первого контура, предназначенными для соединения с 11 000 теплопередающих труб, согнутых в U-образные змеевики. Змеевики изготавливаются методом холодной гибки и, согласно принятой технологии, впоследствии термически не обрабатываются. В них сохраняются напряжения, полученные в результате наклепа. Поэтому для исключения коррозионных повреждений в котловой воде ПГ нормируется содержание примесей и при превышении удельной загрязненности трубного пучка более 150 г/м<sup>2</sup> необходимо проведение химической отмывки ПГ.

Змеевики скомпонованы в два U-образных пучка, что обеспечивает самокомпенсацию разных температурных удлинений корпуса и труб, и имеют по три вертикальных коридора шириной около 200 мм для обеспечения организованной гидродинамики циркулирующей котловой воды. Змеевики изготавливаются из труб, не имеющих сварного шва по длине трубы. Применяются трубы с внутренней электрохимполированной и наружной шлифованной поверхностями с дополнительным контролем качества ультразвуком. Максимальная развернутая длина змеевика составляет 15 100 мм, минимальная – 10 100 мм. Трубки в пучках размещены в шахматном порядке с шагами 19 мм по высоте и 23 мм по ширине. Верхний ряд труб расположен на 190 мм выше поперечной оси парогенератора.

Трубный пучок с элементами дистанционирования и крепления занимает около 78 % площади части поперечного сечения корпуса, ограниченной сверху последним рядом труб пучка. В соответствии с формой поперечного сечения пучка труб количество змеевиков в горизонтальных рядах изменяется: оно максимально в первых (верхних) рядах и уменьшается по мере увеличения номера ряда. В ПГВ-1000М для ВВЭР-1000 количество змеевиков уменьшается от 120 (верхние ряды) до 16 (нижний ряд). Высота трубного пучка – 2200 мм.

В целях унификации изделий по применяемым материалам в проекте для коллекторов первого контура была использована та же сталь, что и для корпуса ПГ. Для надежной обварки концов нержавеющей труб и защиты от коррозии внутренняя поверхность коллекторов, включая крышки фланцевых разъемов, плакирована антикоррозионной аустенитной наплавкой (первый слой – ЗИО-8, второй – ЭА 898/21Б).

Змеевики дистанционируются в трубном пучке специальными элементами, которые, в свою очередь, закреплены в опорных конструкциях, расположенных на корпусе ПГ. Дистанционирующие элементы представляют собой волнообразные полосы в сочетании с промежуточными плоскими планками. Дистанционирующие элементы изготовлены из стали 08Х18Н10Т. С учетом более высоких скоростей теплоносителя в трубках и пара в межтрубном пространстве в конструкции ПГВ-1000М для увеличения жесткости конструкции теплообменного пучка увеличено количество опор и дистанционирующих элементов пучка по сравнению с ранее спроектированными конструкциями ПГ.

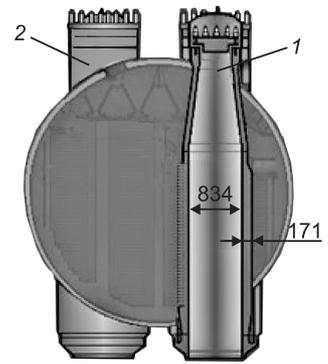


Рис. 4.8. Коллектор ПГ:  
1 – «горячий» коллектор; 2 – «холодный» коллектор

Теплоноситель из реактора поступает в «горячий» коллектор, проходя внутри теплопередающих труб, отдает тепло воде второго контура, выходит в «холодный» коллектор и далее на всас ГЦН. Питательная вода по трубопроводу Ду400 через коллектор питательной воды с раздаточными лучами подается на «горячую» часть теплообменного пучка ПГ, чем достигается частичное выравнивание паровой нагрузки по сечению ПГ за счет конденсации части пара.

Циркуляция воды второго контура в ПГ естественная. Пар, выходя с зеркала испарения (со скоростями порядка 0,42 м/с), осушается в паровом объеме между зеркалом испарения и входным сечением жалюзийных сепараторов за счет гравитационных сил (первая ступень сепарации) и поступает в жалюзийный сепаратор (вторая ступень сепарации), где дополнительно осушается до необходимой степени (влажность пара не более 0,2 %).

Сепарационные устройства (рис. 4.9) состоят из пакетов жалюзи волнистой формы толщиной 0,5–0,8 мм, выполненных из нержавеющей стали. Пакеты располагаются под углом 26° к вертикали в паровом объеме ПГ на высоте 750 мм от погружного дырчатого листа. За секциями жалюзийных сепараторов во всех рядах установлены дырчатые пароприемные щиты. Пароприемный дырчатый лист предназначен для выравнивания поля скоростей пара.

Исследования сепарационной схемы ПГ, проведенные ОКБ «Гидропресс», показали, что за счет сепарации в паровом объеме ПГ влажность пара перед жалюзи колеблется в пределах 0,05–0,1 %, что значительно ниже допустимой влажности перед жалюзи (5–10 %). Было установлено, что увеличение весового уровня воды в ПГ от номинального на 200 мм приводит к резкому росту влажности пара.

Отсепарированный конденсат собирается в корыто и отводится системой трубок под уровень воды. Осушенный пар выходит из ПГ через 10 паровых патрубков Ду350. Патрубки с помощью переходников и гнутых труб Ду200 объединены в общий паровой коллектор Ду600, по которому пар подается на турбину.

Для равномерного распределения пароводяной смеси по паровому объему ПГ применен погруженный дырчатый лист, представляющий собой набор листов с отверстиями диаметром 13 мм, установленных на металлической раме. Он расположен на расстоянии 260 мм от верхнего ряда труб теплопередающей поверхности, живое сечение дырчатого листа для прохода пара составляет около 5 %. Конструктивный материал изготовления дырчатого листа – сталь 12Х18Н10Т толщиной 6 мм. Для стока воды со щита между корпусом и щитом (вдоль него) оставлены проходы шириной 150 мм. По всему периметру к щиту приварены листы шириной 700 мм (иногда их на-

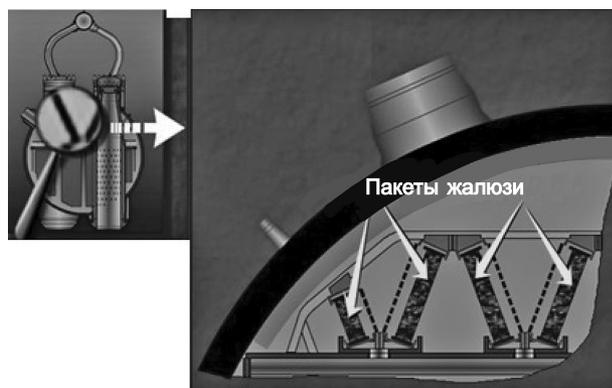


Рис. 4.9. Сепарационные устройства

зывают закраинами), препятствующие выходу пара из межтрубного пространства через проходы для воды. Закраины изготовлены из нержавеющей стали толщиной 8 мм.

При заполнении ПГ котловой водой ее уровень устанавливается примерно на расстоянии 100 мм над погруженным дырчатым листом. Расчетная высота зеркала испарения над дырчатым листом в зоне максимальных паровых нагрузок (над входным участком трубного пучка) равна 340 мм.

В верхней части коллектора первого контура имеется фланцевый разъем Ду500 с плоской крышкой для осмотра и ремонта сварных соединений приварки теплообменных труб к плакирующему слою внутренней поверхности коллектора. Разъем снабжен плоской крышкой с вытеснителем из стали 10ГН2МФА. Поверхность крышки, обращенная в сторону теплоносителя первого контура, и плоскость разъема плакированы нержавеющей сталью. В парогенераторах ПГВ-1000М расточки под прокладки выполнены не на плоской крышке (как на ПГВ-1000 пятого блока Нововоронежской АЭС), а на торцевой поверхности коллекторов первого контура. Крышка с вытеснителем также выполняет роль дросселирующего устройства, предназначенного для уменьшения проходного сечения до Ду100 и ограничения истечения теплоносителя первого контура во второй при отрыве крышки коллектора.

Для доступа к этому люку предусмотрен люк с отверстием Ду800 и эллиптической крышкой на корпусе ПГ. Для доступа в ПГ со стороны второго контура на эллиптических днищах корпуса ПГ имеются два люка Ду500 с разъемными фланцевыми соединениями. Уплотнения всех фланцевых соединений выполнены с помощью двух никелевых прокладок (6 мм) с организацией контроля плотности межпрокладочной полости. Контроль выведен на блочный щит управления (БЩУ).

Устройство раздачи основной питательной воды состоит из трубопроводов, коллекторов и раздающих труб, имеющих по своей длине «лучи» для выхода питательной воды. К патрубку питательной воды через проставыш с трубой присоединен коллектор Ду400, расположенный в паровом объеме ПГ, разветвляющийся на две раздающие трубы Ду250, находящиеся над погруженным дырчатым листом.

Конструкция патрубка выполнена таким образом, что труба подвода питательной воды непосредственно не соприкасается с корпусом ПГ. Это предотвращает возникновение температурных напряжений, в том числе и переменных, в корпусе ПГ в месте прохода трубы.

Питательная вода по проекту ПГВ-1000М подается на «горячую» сторону трубного пучка в верхней его части под погружной дырчатый лист через 16 раздающих коллекторов Ду80, каждый из которых соединен с 32 раздающими трубками Ду20, имеющими по своей длине отверстия для выхода питательной воды.

Подвод аварийной питательной воды (рис. 4.10) осуществляется через специальный патрубок с проставышем Ду100 на эллиптическом днище ПГ, к которому присоединен раздающий коллектор Ду80, смонтированный над трубопроводом основной питательной воды Ду250. Вода подается через 38 перфорированных трубок Ду25 в паровую часть корпуса ПГ. При обесточивании АЭС или падении уровня в ПГ по отдельной магистрали подается аварийная питательная вода из баков с температурой 5–45 °С, создавая условия для расхолаживания в первом контуре до давления 1,5 МПа.

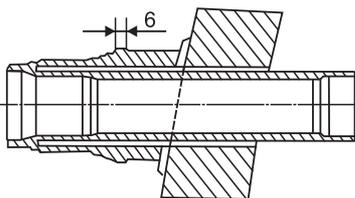


Рис. 4.10. Узел подвода аварийной питательной воды в корпус ПГ

Однако следует помнить, что подача аварийной питательной воды с температурой ~25 °С в «горячий» ПГ с температурой 280 °С вызывает крайне негативные воздействия теплового удара и допустима

лишь в крайних случаях. В условиях нормальной эксплуатации следует отказываться от подпитки ПГ по линии аварийной питательной воды во избежание выработки его ресурса.

Снаружи корпус ПГ покрыт тепловой изоляцией, которая предназначена для снижения тепловых потерь от ПГ в окружающую среду (гермообъем) и удовлетворяет следующим требованиям, разработанным главным конструктором реакторной установки:

- крепление несущих элементов изоляции к корпусу ПГ выполнено без сварки, на бандажах;
- изоляция сделана в виде отдельных легкосъёмных матов, обшитых стеклотканью, снаружи теплоизоляция закрыта обшивкой из алюминиевых листов;
- материал теплоизоляции не вызывает коррозию поверхностей ПГ;
- тепловой поток от поверхности изоляции не превышает  $200 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , обшивка изоляции допускает обмывку дезактивирующими растворами;
- тепловая изоляция сохраняет работоспособность при авариях под гермооболочкой в режимах «большой» и «малой» течей.

Особенностью конструкции коллектора ПГ является осевая несимметричность зоны перфорации, что обусловлено уровнями размещения теплообменных трубок в принятых габаритах корпуса ПГ. Эта несимметричность образует вдающийся в поле перфорации клин неперфорированного металла.

Конструкция и технология изготовления обоих коллекторов одинакова. Разница между ними в рабочей температуре:  $320^\circ\text{C}$  в «горячем» коллекторе,  $290^\circ\text{C}$  в «холодном» при температуре воды во втором контуре  $279^\circ\text{C}$ . Из-за разной длины теплообменных трубок температура «холодного» коллектора по периметру отличается на  $7^\circ\text{C}$ .

Техническими условиями на ПГВ-1000М установлены: проектный срок службы 30 лет, а также требования к эксплуатации: водно-химический режим, номенклатура и количество циклов нагружения. Конструкция ПГВ-1000 обоснована комплексом расчетно-теоретических и экспериментальных работ и одобрена к применению в составе энергоблоков с ВВЭР-1000.

Активность котловой воды ПГ нормируется согласно требованиям действующего «Регламента безопасной эксплуатации...», активность продувочной воды отдельных ПГ по  $^{131}\text{I}$  должна быть не более  $1 \cdot 10^{-8}$  Ки/л. Повышение активности продувочной воды ПГ обуславливается протечками теплоносителя первого контура во второй. Возможные места утечки теплоносителя первого контура во второй показаны на рис. 4.11.

Как показывает опыт эксплуатации, кардинальным решением устранения утечки теплоносителя является обследование предполагаемых мест на расхоленном и разуплотненном ПГ в останов энергоблока. Из всех указанных мест наиболее вероятное – повреждение теплообменных трубок, однако за истекший период эксплуатации ПГВ-1000 происходили и другие течи. Так, на ПГ пятого блока Нововоронежской АЭС имели место два случая выхода из строя трубок контроля плот-

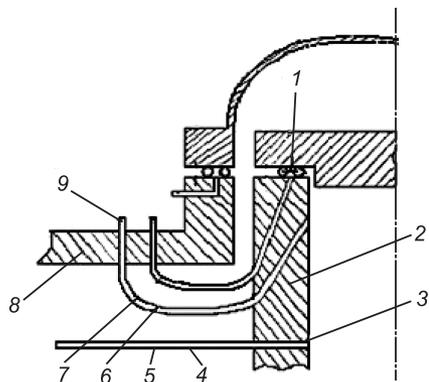


Рис. 4.11. Возможные места течи в ПГ:  
1 – неплотность прокладок крышки коллектора;  
2 – коллектор первого контура; 3 – неплотность коллектора или шва обварки теплообменной трубки; 4 – одна из трубок; 5 – неплотность теплообменной трубки; 6 – неплотность воздушника первого контура; 7 – неплотность трубки контроля плотности разъема коллектора; 8 – корпус ПГ;  
9 – подшипник по первому контуру

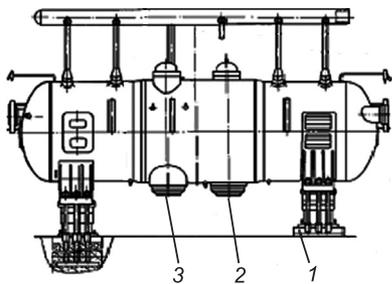


Рис. 4.12. Схема установки и крепления ПГ:  
1 – опора; 2 – вход; 3 – выход

колец и фундаментных болтов, а также опорных колонн ПГ. На колонны установлены роликовые опоры. Постоянные опоры ПГ (ложементы) на этапе монтажа собраны в блоки совместно с тягами.

Верхние плиты роликовых опор подвижны в направлении продольной и поперечной осей ПГ. При этом перемещение в направлении продольной оси должны быть  $\pm 100$  мм, а в направлении поперечной оси – 70–100 мм. При наличии таких перемещений ПГ будет свободно следовать на роликовых опорах за тепловыми перемещениями трубопроводов главного циркуляционного контура.

Для восприятия сейсмических нагрузок на ПГ также предусмотрена система гидроамортизаторов. На каждом ПГ установлено по восемь гидроамортизаторов с нагрузкой 450 т, по четыре с противоположных боковых поверхностей ПГ у противоположных люков-лазов ПГ по второму контуру. При этом с каждой из сторон ПГ гидроамортизаторы попарно расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Устанавливаемые на ПГВ-1000М гидроамортизаторы имеют следующие технические характеристики (табл. 4.2).

Таблица 4.2

#### Технические характеристики гидроамортизаторов

Технические характеристики	Значение
Допустимая нагрузка, т	450
Усилие закрытия перепускного клапана, % от дополнительной нагрузки	2
Чувствительность гидроамортизатора, мм/с	1–3
Скорость перемещения поршня при закрытом перепускном клапане и вoздействии статической нагрузки, мм/с	0,5–2

Гидроамортизатор состоит из корпуса, в котором перемещается поршень. Корпус с одной стороны закрыт крышкой с проушиной, с другой – крышкой с отверстием для прохода штока поршня. Поршень делит цилиндр на две полости, заполненные жидкостью. Жидкость при перемещении поршня может перетекать из полости в полость через клапанную коробку, в которой установлены два клапана.

Гидроамортизатор одним концом (проушиной) закреплен к ПГ, перемещение которого при сейсмических нагрузках необходимо ограничить, а другим концом – к неподвижной опоре.

При температурных (медленных) перемещениях оборудования при скоростях менее 1 мм/с клапаны гидроамортизатора открыты, и жидкость свободно перетекает

из одной полости гидроцилиндра в другую, при этом оборудование свободно смещается в направлении своего движения.

При сейсмическом воздействии оборудование перемещается со скоростью, при которой клапан закрывается, жидкость не может перетекать из одной полости в другую, и гидроамортизатор работает как жесткая связь.

**Парогенератор ПГВ-4М реактора ВВЭР-440** предназначен для генерации сухого насыщенного пара требуемого количества и качества за счет отвода тепла от теплоносителя первого контура (рис. 4.13–4.15).

В составе блока работают шесть ПГ (по одному на петлю), которые выполняют следующие функции:

- создают условия для нормального функционирования при сейсмическом воздействии, равном проектному землетрясению (ПЗ);
- гарантируют надежное охлаждение теплоносителя первого контура до требуемого уровня температур во всех проектных режимах;
- обеспечивают охлаждение теплоносителя первого контура в режиме естественной циркуляции при останове всех ГЦН;
- являются границей теплоносителя первого контура;
- охлаждают реактор в проектных авариях при переходе к расхолаживанию;
- являются системой отвода остаточного тепловыделения.

Парогенератор спроектирован и изготовлен таким образом, что обладает следующими свойствами:

- блочность и полная собираемость в заводских условиях (кроме сборки с паровым коллектором, уравнительными сосудами и опорами), включая возможность проведения всех видов производственных контрольных испытаний;
- транспортабельность узлов ПГ, возможность доставки на АЭС железнодорожным или водным транспортом;
- технологичность монтажа в условиях строительства атомной станции с минимальным количеством сварочных работ в монтажных условиях;
- удобство и простота обслуживания;

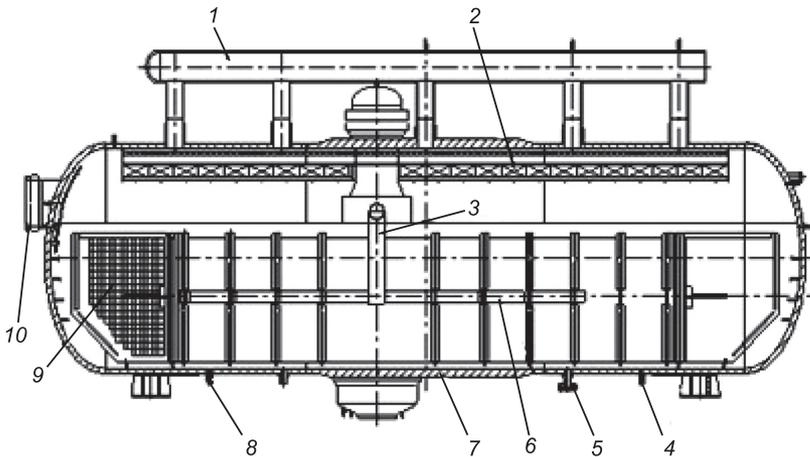


Рис. 4.13. Парогенератор ПГВ-4М (фронтальный разрез):

1 – паровой коллектор; 2 – жалюзийный сепаратор; 3 – труба подвода питательной воды; 4, 8 – штуцер продувки; 5 – штуцер дренажа и ДСАПП; 6 – раздающий коллектор; 7 – корпус; 9 – теплообменные трубы; 10 – люк-лаз

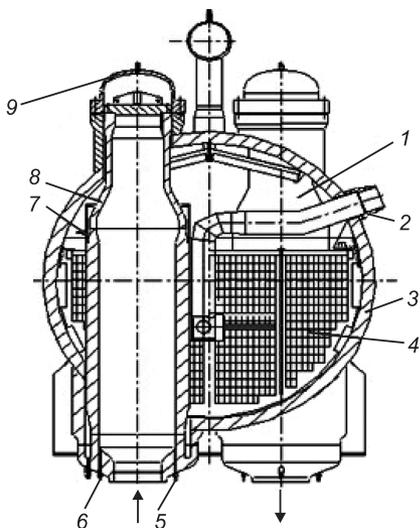


Рис. 4.14. Парогенератор ПГВ-4М (профильный разрез):

1, 8 – горячий и холодный коллекторы; паровой коллектор; 2 – патрубок питательной воды; 3 – корпус; 4 – теплообменные трубы; 5 – штуцер контроля МПП первого контура; 6 – воздушник первого контура; 7 – линия КВП; 9 – люк Ду700

- обеспечения возможности проведения контроля сварных соединений и основного металла с помощью современных диагностических средств, в том числе:
    - инспекции и глушения теплообменных труб в условиях эксплуатации;
    - ремонтпригодности всех основных узлов с выполнением работ;
    - проведения дезактивации элементов первого контура и проведения химических промывок.
- Парогенератор должен выдерживать все статические и динамические нагрузки, ожидаемые при проектных режимах.

Нормальное функционирование ПГ обеспечивают системы:

- контроля измерения уровня воды в ПГ;
- контроля плотности фланцевых разъемов;
- технологического контроля (межконтурной плотности, давления пара, расхода непрерывной и периодической продувки, расхода питательной воды, температуры корпуса ПГ);
- дренажа, воздушников и организованных протечек радиоактивных сред;

К системам, которые обеспечивают безопасность РУ и надежность работы ПГ, предъявляются следующие требования:

- подачи основной питательной воды;
- подачи аварийной питательной воды;
- аварийного питания ПГ с дизельнасосными установками (дополнительная система);
- паропроводов свежего пара;
- продувки ПГ;
- поддержания и корректировки водно-химического режима.

К системам, которые обеспечивают безопасность РУ и надежность работы ПГ, предъявляются следующие требования:

- система подачи питательной воды по основной линии в номинальном режиме должна обеспечивать поддержание в ПГ номинального уровня в пределах  $\pm 50$  мм по сигналам уровнемера от двухкамерного уравнительного сосуда. В режимах с нарушением нормальных условий эксплуатации и аварийных режимах изменение уровня

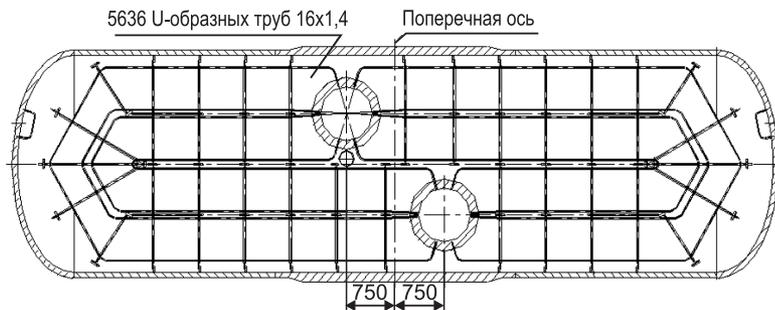


Рис. 4.15. Парогенератор ПГВ-4М (вид сверху, горизонтальный разрез)

не должно выходить за допустимые пределы значений. Температура питательной воды в аварийных режимах допускается не ниже 5 °С;

- система продувки ПГ должна обеспечивать определенный проектом расход непрерывной и периодической продувки для поддержания качества воды второго контура ПГ в нормируемых пределах;

- количество и суммарная пропускная способность предохранительных клапанов каждого ПГ должны обеспечивать непревышение расчетного давления в ПГ более 10 %;

- исключить протечки теплоносителя из первого во второй контур и протечки в уплотнениях фланцевых разъемов, эксплуатационные и предельные величины которых фиксируются отбором проб на активность и замерами активности от паропроводов;

- приборный контроль и диагностические средства контроля металла во время профилактических работ должны позволять обнаружить дефекты в начальной стадии их возникновения.

Парогенератор представляет собой однокорпусный рекуперативный теплообменный аппарат горизонтального типа с погруженной теплообменной поверхностью и состоит из основных узлов:

- корпуса с патрубками различного назначения;
- теплообменной поверхности с опорными узлами;
- коллекторов теплоносителя первого контура;
- устройства подвода и раздачи основной питательной воды;
- устройства подвода и раздачи питательной воды от дополнительной системы аварийного подвода питательной воды (ДСАППВ);

- линии воздушников и контроля плотности фланцевых разъемов и выгородок;
- жалюзийного сепаратора;
- пароприемного дырчатого листа.

Корпус ПГ предназначен для размещения в нем коллекторов с теплообменной поверхностью и других внутрикорпусных устройств. Он состоит из обечаек, штампованных эллиптических днищ и кованых патрубков, сваренных между собой. Конструкция корпуса обеспечивает доступ для осмотра внутрикорпусных устройств со стороны второго контура. Для этой цели на эллиптическом днище имеется люк Ду500 с разъемным фланцевым соединением.

Для осмотра коллекторов первого контура есть два люка Ду700 с разъемными фланцевыми соединениями. Конструкция сварных соединений корпуса позволяет проводить все виды неразрушающего контроля.

Теплопередающая поверхность состоит из 5536 труб диаметром 16×1,4 мм из стали 08Х18Н10Т, гнутых в U-образные змеевики и расположенных горизонтально коридорным размещением в пучке с шагом 30 мм по высоте, 24 мм по горизонтали.

Змеевики подсоединяются к коллекторам первого контура. Концы их сварены на внутренней поверхности коллекторов. Гарантированная глубина проплавления – не менее 1,4 мм. Теплообменные трубы развальцованы методом вальцовки взрывом по толщине стенки коллектора.

Трубы дистанционируются с помощью гнутых и плоских пластин дистанционирующих планок, обеспечивающих равномерное расположение труб в теплообменном пучке.

Конструктивное исполнение узлов дистанционирования и применяемый материал в них исключают повреждение труб, в том числе коррозионного характера. При этом обеспечивается возможность перемещения труб внутри ПГ вдоль их осей при температурных расширениях.

Коллекторы первого контура предназначены для раздачи теплоносителя по теплообменным трубам, сбора и отвода теплоносителя. Коллектор в нижней части приварен к патрубку корпуса через переходное кольцо, а верхняя часть располагается свободно в патрубке корпуса с кольцевым зазором 4 мм. Крышки коллекторов снабжены кольцевыми обечайками (вытеснителями) для ограничения течи теплоносителя из первого во второй контур до условного диаметра Ду38 при отрыве крышки из-за возможных коррозионных повреждений уплотняющих коллектор шпилек М48.

В центральной части коллектора первого контура располагаются отверстия, в которых закреплены теплообменные трубы.

В верхней части корпуса ПГ установлен жалюзийный сепаратор из пакетов жалюзи и дырчатый лист, предназначенный для выравнивания скорости пара в сепарационных устройствах ПГ. Устройство раздачи основной питательной воды состоит из коллектора и раздающих труб, имеющих по своей длине отверстия для выхода питательной воды. Питательная вода подается на «горячую» сторону трубного пучка. При нормальной эксплуатации расход основной питательной воды равен суммарному расходу пара и продувки и поддерживается основным регулятором питания по сигналу измерения уровня в ПГ. При этом в ПГ поддерживается уровень котловой воды  $2100 \pm 50$  мм.

Вода нагревается теплоносителем до кипения (температура насыщения  $258,9$  °С). Образующийся пар осушается гравитационно в паровом пространстве, проходит жалюзи, паровой дырчатый лист и по пяти паровым патрубкам Ду250 мм отводится в коллектор пара и паропровод.

Коллектор пара расположен над ПГ. Он состоит из трубы Ду400 мм, доньшка, пяти патрубков коллектора.

К корпусу ПГ через подкладные листы привариваются две опоры, изготовленные из листового материала в виде жестких ферм. Парогенератор в боксе устанавливается на подвесках, закрепленных в верхней части на закладных балках строительной конструкции перекрытия бокса, а в нижней части они соединены с опорами ПГ.

Подвески выполнены гибкими из листового материала и шарнирно соединены с резьбовыми тягами, через которые прикреплены к несущим опорным конструкциям. Границами проектирования ПГ являются соответствующие патрубки штуцера к трубопроводам питательной воды Ду250, пара Ду400, ГЦТ Ду500, продувочным трубопроводам Ду25, Ду50 и Ду80, трубопроводам дополнительной подачи питательной воды, импульсным линиям соответствующих систем контроля межпрокладочного пространства и паровой выгородки, уровнемеров, к приборам, установленным на БЦУ. Основные технические характеристики парогенератора ПГВ-4М приведены в табл. 4.3.

Основные узлы ПГ изготавливаются из следующих *материалов*.

*Сталь углеродистая конструкционная 22К* используется в виде поковок и листов для изготовления корпуса ПГ. Сталь освоена в производстве изделий для АЭС с ВВЭР, хорошо сваривается, устойчива к коррозионному воздействию со стороны водной среды второго контура, обладает хорошей пластичностью и высокими механическими свойствами.

Сталь хромоникелевая аустенитного класса 08X18H10T используется в виде труб, листов, поковок и сортового проката, сталь 12X18H10T – в виде листов, ленты, проволоки и сортового проката для изготовления узлов и деталей ПГ. В основном сталь 08X18H10T применяется для производства коллекторов ПГ и в виде труб диаметром  $16 \times 1,4$  мм для изготовления змеевиков трубной теплопередающей поверхности, а также жалюзийных сепараторов, патрубка для дополнительной системы аварийной подачи питательной воды. Стойкость труб в водной среде ПГ, в условиях теплопередачи и парообразования, с учетом наличия коррозионно-активных компонентов про-

Основные технические характеристики парогенератора ПГВ-4М

Технические характеристики	Значение
Тепловая мощность, МВт	229,2
Паропроизводительность, т/ч	452
Давление генерируемого пара на выходе из ПГ, МПа	4,6
Температура генерируемого пара, °С	258,9
Температура теплоносителя первого контура на входе в ПГ, °С	300
Температура теплоносителя первого контура на выходе из ПГ, °С	270–275
Температура питательной воды, °С	225
Температура питательной воды с отключенными ПВД, °С	158
Влажность пара на выходе из ПГ, %, не более	0,25
Расчетное давление первого контура, МПа	13,73
Расчетное давление второго контура, МПа	5,15
Давление теплоносителя первого контура на входе в ПГ, МПа	12,3
Расход непрерывной продувки, т/ч (на один ПГ)	2,5
Расход суммарной (непрерывной и периодической) продувки, т/ч (на 6 ПГ)	25–30
Номинальный уровень воды в ПГ (от нижней образующей корпуса), мм	2100±50
Давление гидроиспытаний по первому контуру, МПа	17,16
Давление гидроиспытаний по второму контуру, МПа	7,3

верена лабораторными методами, стендовыми экспериментами и натурным опытом эксплуатации на АЭС с ВВЭР.

Парогенераторы АЭС с ВВЭР-440 с трубами диаметром 16×1,4 мм отработали 30 лет на Нововоронежской АЭС и продолжают эксплуатироваться. На Кольской АЭС, АЭС «Козлодуй» (Болгария) наработка ресурса – более 20 лет. Случаев массового повреждения труб не отмечалось, кроме связанных с серьезными нарушениями водно-химического режима. При появлении неплотностей теплообменных труб производится их глушение по соответствующей технологии.

Из стали 12Х18Н10Т изготавливаются устройства дистанционирования труб в пучке и его закрепления.

Сталь 20 применяется в виде труб и листов для изготовления коллектора пара и отдельных деталей ПГ.

Стали углеродистые обыкновенного качества (Ст3сп2, Ст3сп5, Ст3пс2, Ст3пс5, Ст3сп, Ст3сп3, Ст3Гпс5) применяются для различных узлов и деталей ПГ. Они хорошо известны и освоены в широком ассортименте. Для крепежных изделий фланцевых соединений, работающих под давлением в среде второго контура или атмосферной среде, используются стали ХН35ВТ-ВД (шпильки коллектора первого контура), 25Х1МФ (шпильки и гайки второго контура), 40Х (шпильки, гайки и шайбы люка-лаза, шайбы люков второго контура).

## 4.2. Вертикальные парогенераторы насыщенного пара

В связи с ростом единичной мощности ПГ, расширением их производства, а также необходимостью соблюдения условий транспортабельности возникла задача, с одной стороны, ограничить единичные мощности разумными пределами, а с другой – сократить сроки изготовления ПГ.

При разработке ПГ единичной тепловой мощностью 750 МВт был предусмотрен ряд вариантов вертикальных парогенераторов (рис. 4.16), которые представляют собой теплообменный аппарат с погружным трубным пучком.

Корпус ПГ с пучком расхолаживания (рис. 4.16, б), одновременно являющийся сепарационным барабаном, – вертикальный сосуд, выполненный, как и горизонтальный ПГ, из низколегированной перлитной стали. В его верхней части размещены сепарационные устройства и система подвода питательной воды. В средней и нижней частях корпуса расположен трубный пучок с коллектором теплоносителя и раздающей камерой. К торцам корпуса приварены два эллиптических днища. В верхнем днище предусмотрены люки для обслуживания вертикального коллектора и для осмотра внутрикорпусных устройств, а также два патрубка для отвода пара. В нижнем днище имеется люк для обслуживания и дренажный патрубок. В средней цилиндрической части под углом 90° один к другому размещены два патрубка раздающей камеры теплоносителя.

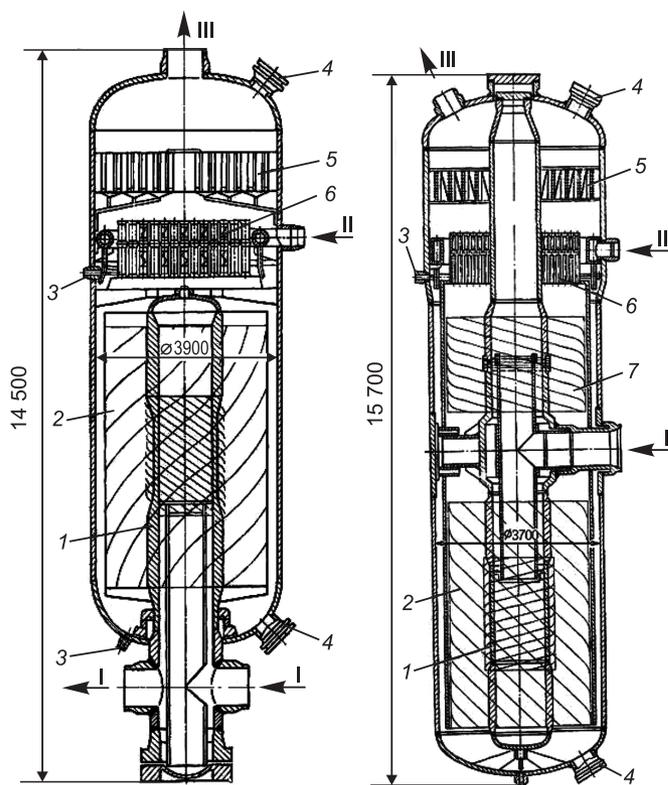


Рис. 4.16. Вертикальный ПГ:

*a* – без пучка расхолаживания; *б* – с пучком расхолаживания; 1 – коллектор; 2 – трубный пучок; 3 – штуцер продувки; 4 – люки для обслуживания; 5, 6 – сепараторы с жалюзи и циклонные; 7 – пучок расхолаживания; I–III – теплоноситель, питательная вода, пар

Конструкция и компоновка трубного пучка, расположение патрубков подвода и отвода теплоносителя выбраны таким образом, что при снятой крышке реактора теплоноситель заполняет трубки теплообменного пучка и образует контур естественной циркуляции, что позволяет использовать парогенератор в качестве теплообменника расхолаживания. Трубный пучок разделен на верхнюю и нижнюю части, между которыми размещена камера подвода и отвода теплоносителя. Каждая из частей теплообменного пучка представляет собой витую теплообменную поверхность, образованную концентрически расположенными трубами. Концы труб заделаны в камеры теплоносителя (вертикальный коллектор) развальцовкой методом взрыва с последующей обваркой торца трубы. На внутреннюю поверхность коллектора нанесен плакирующий слой.

Таким образом, имеются два самостоятельных, включенных параллельно по теплоносителю трубных пучка и соответствующие им коллекторы подвода и отвода теплоносителя. Дистанционируются трубы в слоях вертикальными планками, проложенными между слоями. Планки имеют пазы, угол наклона которых равен углу навивки трубок соответствующего слоя. Планки сварены с опорными ребрами на коллекторе и между собой. На прямых участках дистанционирование осуществляется кольцевыми планками с пазами. Диаметры кольцевых планок равны диаметрам соответствующих слоев труб, что обеспечивает свободный проход пара. Конструкции верхнего и нижнего пучков аналогичны.

Вертикальный коллектор с внутрикollectорным устройством также состоит из двух самостоятельных частей и имеет входную и выходную камеры теплоносителя, которые представляют собой цилиндры с внутренним диаметром 1150 мм. Вертикальный коллектор выполнен из низколегированной перлитной стали, его внутренняя поверхность плакирована коррозионно-стойкой сталью. В камерах предусмотрены отверстия для заделки концов трубок. Отверстия расположены кольцевыми рядами с расстоянием между рядами 20 мм. Шаги между отверстиями в кольцевом ряду различны для каждого ряда. Обе части коллектора соединены камерой, в которую под углом 90° сварены два патрубка. Внутри камеры размещена обечайка, разделяющая входные и выходные камеры коллекторов щелевыми уплотнениями, образованными торцами обечайки и фланцами, сваренными между входными и выходными камерами. В обечайке просверлено отверстие, которое соединяется с входным штуцером раздающей камеры посредством переходного патрубка. Между торцом патрубка и разделительной обечайкой также предусмотрено щелевое уплотнение.

Движение теплоносителя осуществляется следующим образом. Из трубопровода теплоноситель поступает в подводящий штуцер, а затем через промежуточный патрубок проходит в разделительную обечайку. Далее поток теплоносителя разделяется и попадает во входные камеры верхнего и нижнего пучков, а по трубкам пучка – в выходные камеры. Потоки из верхнего и нижнего коллекторов соединяются в раздающей камере и выходят в отводящий патрубок. Для проведения дистанционного ремонта и осмотра внутренних полостей коллекторов предусмотрена возможность удаления разделительной обечайки и закрепления ее в полости, соединяющей коллектор теплоносителя с люком для обслуживания.

Система подвода питательной воды представляет собой кольцевой коллектор. Вход питательной воды выполнен в виде двух патрубков «с горячими рубашками». Питательная вода подается в кольцевое пространство между корпусом и трубным пучком, отгороженное обечайкой со стороны пучка. Кольцевое пространство является опускным участком циркуляционного контура. Расчетная скорость выхода пара с зеркала испарения равна 1,45 м/с. Так как расчетная скорость значительно превышает критические скорости выхода пара с поверхности ( $w_{кр} = 0,36$  м/с), применение лишь гравитационной системы сепарации не обеспечивает необходимой влажности

пара ( $x = 0,2 \%$ ). В вертикальном ПГ применены две ступени сепарации. Грубую сепарацию осуществляют двухступенчатые осевые циклоны, а тонкую – вертикальные жалюзи. Ожидаемая влажность за циклонами – 6–8 %. Общая поверхность жалюзи обеспечивает влажность пара на выходе из ступени тонкой сепарации не более 0,1 %.

Система непрерывной продувки представляет собой кольцевой коллектор, установленный в опусном участке вблизи слива котловой воды с наибольшим солеудержанием. Вывод магистралей продувки осуществляется через два штуцера. Дренаживание ПГ и периодическую продувку производят через штуцер, расположенный в нижнем днище корпуса ПГ.

Вертикальные ПГ имеют по сравнению с горизонтальными следующие преимущества: возможность дальнейшего повышения мощности ПГ, более совершенную систему сепарации пара, четкую естественную циркуляцию котловой воды. Однако для вертикальных ПГ необходимо проведение дополнительных исследований по сепарации пара, а также создание специального технологического оборудования для механизации процесса сборки (навивки) трубного пучка.

Проектируется вертикальный ПГ на основе имеющегося зарубежного и отечественного опыта эксплуатации и технологии изготовления существующих парогенераторов, разрабатывается под параметры унифицированной тепловой схемы АЭС, приведенные в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Параметры тепловой схемы АЭС

Параметры	Значение
Тепловая мощность, МВт: реактора ПГ	3200 (3000) 792 (750)
Паропродуктивность, т/ч	1486 (1470)
Давление пара, МПа: рабочее расчетное по второму контуру	7,2 (6,4) 8,5 (8,0)
Температура, °С: пара питательной воды	286,4 (278,5) 200 (220)
Максимальная влажность пара на выходе из ПГ, %	0,2
Непрерывная продувка по второму контуру от паропродуктивности, %	0,5
Кратность циркуляции по второму контуру	5
Давление в первом контуре, МПа: рабочее расчетное	16,0 (16,0) 18,0 (18,0)
Температура воды первого контура, °С: на входе в ПГ на выходе из ПГ	322,3 (322,0) 288 (290)
Расчетная температура по первому контуру, °С	350 (350)
Расход воды первого контура: массовый, т/ч объемный при температуре выхода, м <sup>3</sup> /ч	14 680 (14 834) 19 800 (19 860)

Парогенератор ПГВ-250 (рис. 4.17) представляет собой вертикальный однокорпусный теплообменный аппарат рекуперативного типа со встроенным сепарационным устройством. Вдоль центральной оси ПГ расположен вертикальный цилиндрический коллектор, к которому крепится теплообменный трубный пучок. Движение теплоносителя первого контура в трубном пучке, а также теплоносителя второго контура на экономичном участке – вынужденное. На испарительном участке по второму контуру предусмотрена естественная циркуляция. Теплоноситель первого контура движется внутри труб сверху вниз, а теплоноситель второго контура – в обратном направлении. Сепарационное устройство расположено над трубным пучком.

Корпус ПГ представляет собой вертикальную сварную оболочку внутренним диаметром 4000 мм. Оболочка состоит из цилиндрических обечайек толщиной 105 мм и эллиптических днищ толщиной 120 мм. Корпус ПГ разделен на две части: верхнюю с обечайкой длиной 3415 мм с верхним эллиптическим днищем и нижнюю с обечайкой длиной 10 900 мм, к которой приварено нижнее днище с предварительно собранным коллектором и трубным пучком. В обечайку верхней части корпуса вварен патрубок для подачи воды аварийным питательным насосом. Патрубок может быть использован также для подачи части питательной воды основного тракта для охлаждения теплоносителя в опускной ветви контура естественной циркуляции.

На верхнем днище имеется патрубок для отвода пара, к которому приварен вертикальный паросборник со съемной крышкой и радиальным патрубком, подсоединяемым к паропроводу. В нижнюю обечайку вварен штуцер для крепления линии непрерывной продувки, через который может осуществляться отвод воды из ПГ в режиме водяного расхолаживания реакторной установки.

На нижнем днище корпуса предусмотрен патрубок для подвода питательной воды и установки в нем входного патрубка раздающего кольцевого коллектора, а также лаз для обслуживания нижней части ПГ. В нижнее днище вварен вертикальный коллектор теплоносителя первого контура.

Вертикальный коллектор представляет собой цилиндрическую оболочку внутренним диаметром 1250 мм с эллиптическим днищем толщиной в верхней части 108 мм. В нижней части, закрытой съемной крышкой, под углом 120° расположены два патрубка для подвода и отвода теплоносителя. Внутри нижней части коллектора установлена съемная втулка, разделяющая входящий и выходящий потоки теплоносителя и предотвращающая его перетечки.

Часть вертикального коллектора, размещенная внутри корпуса, выполнена из одной гладкой и двух перфорированных обечайек с отверстиями для заделки труб поверхности нагрева. Отверстия в коллекторе расположены в шахматном порядке с шагом 40 мм по высоте и минимальным шагом 23,27 мм на внутренней поверхности коллек-

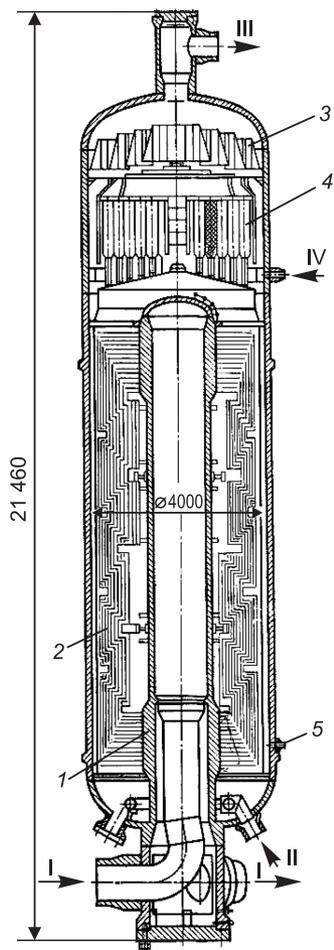


Рис. 4.17. Парогенератор ПГВ-250: 1 – коллектор; 2 – ширма трубного пучка; 3, 4 – сепараторы с жалюзи и циклонные; 5 – штуцер непрерывной продувки; I-IV – теплоноситель, питательная вода, пар

тора. По высоте коллектора имеется несколько поясов для крепления и дистанционирования ширм поверхности нагрева.

Трубный пучок поверхности нагрева набран из 330 предварительно собранных ширм, установленных радиально в вертикальной плоскости. Каждая ширма состоит из 36 рабочих труб размером 16×1,5 мм и двух фальштруб, расположенных по наружному и внутреннему периметру ширмы. Материал труб – аустенитная сталь. Трубы выполнены с перегибом вокруг прямой, параллельной оси коллектора, что позволяет получить их одинаковую развернутую длину. Для обеспечения компенсации разности температурных удлинений труб и коллектора, а также сокращения размеров поверхности нагрева по высоте на трубах имеется 16 гибов.

Торцы теплообменных труб в отверстиях коллектора приваривают к наплавке его внутренней поверхности, а затем подвергают развальцовке методом взрыва. В нижней части трубного пучка предусмотрен экономайзерный участок. Трубный пучок в зоне испарительного участка окружен кожухом толщиной 10 мм. Между кожухом и корпусом предусмотрен зазор шириной 60 мм, представляющий собой опускной участок контура естественной циркуляции. Между обечайкой экономайзерного участка и кожухом испарительного имеется зазор, по которому циркулирующая вода из опускного участка поступает в нижнюю часть испарительного участка.

Центробежный сепаратор ПГВ-250 (рис. 4.18) выполнен с двумя ступенями сепарации. Первая ступень имеет нижний осевой подвод воды и образована 156 центробежными сепараторами, установленными на конусной перегородке по треугольной решетке с шагом 260 мм.

Сепаратор ПГВ-250 представляет собой перфорированную обечайку диаметром 248×3 мм с длиной зоны перфорирования 1100 мм. В обечайке выполнено 2620 отверстий диаметром 6 мм. В нижней части обечайки расположены закручивающее устройство и входной патрубков, сваренный в перегородку. В верхней части сепараторы сварены. Блок сепаратора охвачен бандажом, который опирается через кронштейн на корпус. Таким образом, создается жесткая, устойчивая к вибрации конструкция блока. На кронштейнах монтируют коллектор подвода питательной воды от аварийного питательного насоса. В центральной части блока сепараторов предусмотрен лаз.

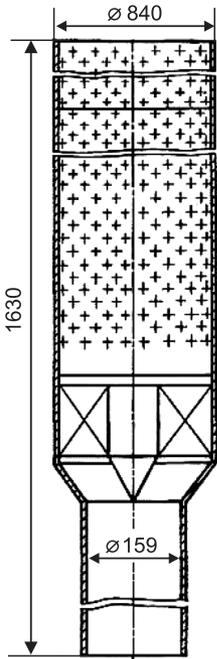


Рис. 4.18. Центробежный сепаратор парогенератора ПГВ-250

Вторая ступень сепарации выполнена из пакетов волнообразных жалюзи в двух вариантах. В первом варианте пакеты жалюзи расположены концентрически: 60 пакетов размером 780×400 мм размещены по четырем кольцам (уровень их размещения понижается от центра к периферии). Минимальное расстояние от сепаратора до пакета жалюзи – 600 мм. Между кольцами установлены наклонно расположенные листы, образующие в каждом пакете входную и выходную камеры переменного сечения, что способствует равномерному распределению расхода пара по сечению пакета. Пакеты соединены с кольцевыми сборниками сепаратора, связанными между собой перепускными трубами по направлению слива от центра к периферии. К периферийным сепараторосборникам присоединены 12 сливных труб, нижние торцы которых находятся под уровнем воды в корпусе. В центре блока пакетов предусмотрен проем для лаза, закрываемый крышкой.

В соответствии со вторым вариантом блок пакетов жалюзи разработан с их линейным расположением и того же размера.

Такая компоновка позволяет установить 78 пакетов. Сборники сепаратора также расположены линейно с уклоном от центра.

Ввод питательной воды предусмотрен в двух точках: через патрубок в нижнем днище (от основного питательного насоса) и через патрубок в верхней части корпуса от аварийного питательного насоса (АПН).

В нижнем днище корпуса на кронштейнах установлен кольцевой раздающий коллектор диаметром 250 мм, перфорированный отверстиями диаметром 30 мм, что обеспечивает равномерный подвод питательной воды к трубному пучку. Кольцевой коллектор имеет патрубок, соединяющий его с патрубком в днище. В верхней части корпуса на кронштейнах монтируется кольцевой коллектор прямоугольного сечения для подачи питательной воды от АПН. Конструкция ПГ, разработанная на параметры головного блока с реактором ВВЭР-1000, практически не отличается от ПГВ-250, за исключением уменьшения размеров ПГ и ряда его элементов в осевом направлении и отсутствия монтажного шва на корпусе. Толщина обечайки корпуса ПГ – 90 мм. Длина корпуса по днищам составляет 13 520 мм, монтажная длина (с паросборником) – 15 880 мм, масса – 162 т.

Трубный пучок поверхности нагрева набран из 330 ширм, состоящих из 32 теплообменных труб и двух фальштруб. Трубы имеют пространственный перегиб и 12 гибов на 90°. Развернутая длина труб – 10 040 мм, высота ширмы – 7290 мм. Ширма по внутренней стороне имеет три выступа, что приводит к несколько худшему заполнению объема парогенератора нагревательными элементами. Высота вытеснителей на экономайзерном участке – 1700 мм.

Для обоснования конструкции ПГ, подтверждения надежности и эффективности принятых инженерных решений, расчетных методик, проектных характеристик ПГ и коэффициентов запаса осуществлен специальный комплекс исследований, проведенных на моделях, в состав которых входили натурные элементы ПГ (ширмы поверхности нагрева, центробежные сепараторы, экономайзерный участок), используются рабочие теплоносители или теплоносители, моделирующие их.

Одной из основных проблем при отработке конструкции является обоснование работоспособности сепарирующего устройства. В качестве центробежных сепараторов приняты сепараторы с нижним осевым подводом среды и отводом отсепарированной влаги через перфорацию сепаратора. Сепараторы тщательно отработаны на воздухо-водяных стендах. В результате исследований определены предельные допустимые нагрузки, получения зависимости влажности и захвата пара от нагрузки, уровня воды, паросодержания подводимой среды, а также гидравлические сопротивления сепараторов с различной высотой перфорированной части.

При разработке конструкции ПГ проведены исследования блока центробежных натуральных сепараторов в условиях паровой среды для корректировки данных, полученных на одиночных моделях сепаратора. Кроме того, определено минимальное расстояние между коллектором и входом в сепараторы, при котором нарушается равномерность распределения расходов среды по сепараторам. Это расстояние равно 100 мм.

Значительное внимание при экспериментальном обосновании конструкции ПГ уделено исследованию вибрационных и гидравлических характеристик ширмовой поверхности нагрева. Проведены исследования трех секций из натуральных ширм разной модификации (два прототипных варианта, один штатный) на двух полупромышленных стендах. Решены вопросы геометрического моделирования межтрубного пространства штатной секции и гидродинамического моделирования основных параметров двухфазной среды во втором контуре.

По результатам испытаний прототипных вариантов повышены виброустойчивость и улучшены гидродинамические характеристики штатной конструкции шир-

мовой поверхности нагрева. Получены рекомендации для выполнения уточненного гидравлического расчета вертикального ПГ. Выявлено, что наличие различных гибов труб и пространственного перегиба в средней части штатных ширм обеспечивает хорошее перемешивание двухфазной среды во втором контуре. Выполнены расчеты предельно допустимых тепловых нагрузок, которые показали, что в штатной конструкции не следует ожидать ухудшения теплообмена из-за «запаривания» поверхности нагрева.

Проведены также теплогидравлические исследования натурной модели экономайзерного участка на рабочих параметрах. Так как конфигурация трубного пучка теплообменной поверхности имеет весьма сложный характер и процесс теплообмена невозможно полностью моделировать, экспериментальное обоснование конструкции экономайзерного участка допустимо лишь на модели с трубным пучком контурной геометрии. Получены зависимости для проведения теплогидравлических расчетов.

Однако в ПГ имеется еще ряд элементов, которые требуют дальнейшей отработки, особенно следует обосновать его ресурсные характеристики. С этой целью проводятся следующие исследования:

- теплогидравлические и ресурсные испытания модели натуральных размеров и экономайзерного участка на рабочих параметрах;
- исследование по дальнейшему повышению эффективности работы центробежных сепараторов при увеличении допустимой нагрузки на сепаратор и уменьшении захвата пара отсепарированной водой;
- исследование вибрационных характеристик в динамических режимах и др.

Разработанный вертикальный ПГ насыщенного пара дает возможность при использовании конструкции теплопередающей поверхности с выделенным экономайзерным участком получить оптимальные параметры второго контура – насыщенного пара с давлением 7,2 МПа и температурой питательной воды 200 °С. Это позволяет снизить удельный расход теплоты на турбоустановку К-1000-68/1500 на 0,7 %. Падение давления пара в трубопроводе острого пара от ПГ до входа в турбину снижено на 0,08 МПа при уменьшении массового и объемного расхода среды.

Парогенератор удовлетворяет тепловой схеме АЭС с реактором ВВЭР-1000, унифицированной для всех типов турбоустановок, с реакторами РБМК-1500 и РБМК-2400. Из этой схемы исключены подогреватели высокого давления, осуществлен переход с двухступенчатого на одноступенчатый сепаратор-пароперегреватель (СПП) и применен деаэратор высокого давления. Данные изменения позволяют снизить капиталовложения в оборудование машинного зала.

Использование вертикального ПГ позволяет создать рациональную компоновку паропроизводительной установки, что сокращает объем строительных затрат и снижает массу трубопроводов первого контура.

Сопоставление конструкции ПГ, разработанного российскими специалистами, с зарубежными конструкциями показывает, что по параметрам и единичной мощности парогенератор находится на современном техническом уровне.

В отличие от аналогичных зарубежных конструкций в ПГ нет плоской трубной доски, расположенной горизонтально в нижней части ПГ (в ПГВ-250 применен вертикальный коллектор). Работоспособность вертикального цилиндрического коллектора из коррозионно-стойкой стали той же марки, что и трубы поверхности нагрева, подтверждена опытом эксплуатации горизонтальных ПГ. Применение вертикального коллектора исключает основные недостатки, присущие зарубежным вертикальным ПГ насыщенного пара с плоской трубной доской и U-образными трубами, и сохраняет преимущества вертикальных ПГ, известных из зарубежного опыта.

Разработанная конструкция имеет и определенные недостатки: малая компактность трубного пучка, неравномерность заполнения им объема корпуса, наличие монтажного шва на корпусе между сепаратором и поверхностью нагрева. При единичной мощности ПГ, превышающей 250 МВт, его габаритные размеры не отвечают условиям перевозки по железной дороге. В связи с этим при переходе на установки большей мощности, например ВВЭР-2000, предпочтительнее использовать вертикальный прямоточный ПГ со слабым перегревом пара, который целесообразно применить уже на установках ВВЭР-1000, рассматривая его как прототип ПГ большой мощности.

**Парогенераторы перегретого пара.** Использование перегретого пара на АЭС не только повышает КПД тепловой схемы станции, но и позволяет применять отработанные серийные турбины, широко апробированные на ТЭС. Так, уже на первой в мире АЭС использован выносной пароперегреватель, обогреваемый теплоносителем первого контура, а на Белоярской АЭС внедрен ядерный перегрев пара, при котором пар с давлением 8,0–9,0 МПа нагревается до температуры 500–520 °С. Такие параметры позволили установить серийную паровую турбину мощностью 100 МВт.

Однако подобные тепловые схемы оказались нерентабельны. Они не обеспечивали необходимую надежность АЭС из-за наличия сильно разветвленного первого контура. Рассматривались возможности получения перегретого пара в горизонтальном ПГ при встроенном в него пароперегревателе. Возникла проблема выбора материала, работающего в условиях доиспарения (досыхания) влаги, находящейся в потоке во взвешенном состоянии и бомбардирующей поверхность нагрева. В горизонтальных ПГ ограничен паровой объем, в котором можно было бы разместить пароперегреватель.

Возможность получения и использования перегретого пара на АЭС рассматривалась неоднократно. Интерес к этому вопросу повысился в связи с внедрением на зарубежных АЭС прямоточного ПГ фирмы The Babcock and Wilcox Company (США). Реализация данной идеи на АЭС и извлечение при этом дополнительных, ранее не предусмотренных преимуществ, а также требования достижения большей единичной мощности при ограниченных по условиям транспортировки габаритных размерах вновь выдвинули проблему разработки и внедрения ПГ с перегретым паром. Исследовались возможности получения перегретого пара как в ПГ с естественной циркуляцией, так и в прямоточных ПГ.

Были рассмотрены следующие конструкции вертикальных парогенераторов перегретого пара единичной мощностью 500 МВт:

- с естественной циркуляцией со спиральновитыми теплообменными пучками (однокорпусные и блочные с выносными сепараторами);
- прямоточные со спиральновитыми теплообменными пучками, с теплоносителем первичного контура в трубах и в межтрубном пространстве;
- прямоточный с прямыми теплообменными трубами и плоскими трубными досками.

Температура перегрева пара во всех вариантах равна 40 °С. Для испарительной теплообменной поверхности предусмотрен запас в 15–20 %. Расчетное граничное паросодержание, соответствующее нижней границе зоны ухудшенного теплообмена, в прямоточных ПГ составляет 0,85.

Конструкционным материалом корпуса и коллекторов первичного теплоносителя во всех вариантах служит высокопрочная низколегированная сталь перлитного класса. Жесткие нормы содержания продуктов коррозии в теплоносителе обуславливают плакирование поверхностей всех корпусных элементов и коллекторов со стороны первичного контура антикоррозионной аустенитной наплавкой.

В качестве материала труб, образующих испарительную поверхность ПГ с естественной циркуляцией, может быть использована сталь 08X18H10T. Пароперегре-

вательные пучки ПГ с естественной циркуляцией, трубные пучки прямоточных ПГ, которые могут быть подвержены действию коррозии, рекомендуется изготавливать из коррозионно-стойкой аустенитной стали, содержащей до 45 % никеля.

В ПГ с естественной циркуляцией (рис. 4.19) первоначальная осушка пара осуществляется осевыми сепараторами с однократным закручиванием потока пароводяной смеси. Диаметр внутренней трубы осевого сепаратора – 100 мм, наружной – 160 мм, расчетный расход – 1,1–1,25 кг/с, гидравлическое сопротивление – 0,0294 МПа, ожидаемая влажность пара на выходе – 10–15 %. Устройствами второй ступени сепарации служат вертикальные жалюзи. Расчетная влажность пара на выходе из парогенератора 0,2 %.

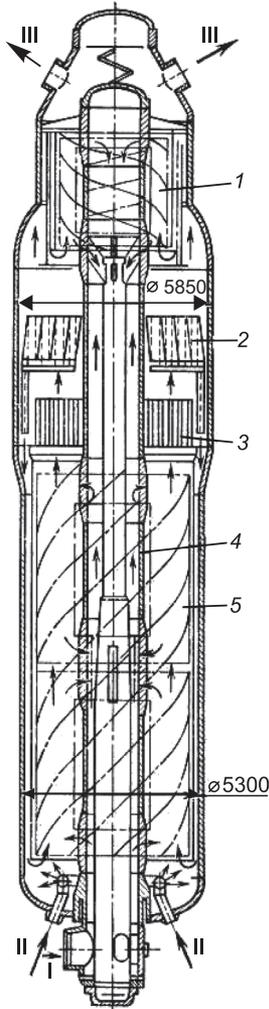


Рис. 4.19. Парогенератор перегретого пара с естественной циркуляцией со спиральными теплообменными пучками в однокорпусном исполнении:

1 – пароперегревательный пучок; 2 – сепаратор с жалюзи; 3 – осевой сепаратор; 4 – испарительные пучки; 5 – испарительный пучок; I–III – теплоноситель, питательная вода, пар

Пароперегревательные теплообменные пучки парогенераторов с естественной циркуляцией имеют двухступенчатую конструкцию. Первая ступень с опускным движением пара, образованная периферийными слоями спирального пучка, предназначена для доупаривания остаточной влаги и перегрева пара на 2–3 °С. Трубы этих слоев, составляющие 10 % общей поверхности перегревателя, выполнены из аустенитной стали с высоким содержанием никеля, устойчивой к воздействию коррозии.

Вторая ступень, составляющая основную долю его поверхности, характеризуется подъемным движением пара, противоточным относительно первичного теплоносителя. Трубки ступени омываются со стороны вторичного контура только перегретым паром, поэтому рекомендуется их выполнять из более дешевой стали 08X18H10T.

Для исследования влияния перегрева пара на технико-экономические показатели ПГ с естественной циркуляцией были рассмотрены соответствующие конструкции аппаратов без перегрева пара. Выполненный на их основе сравнительный анализ свидетельствует о том, что увеличение металлоемкости и стоимости ПГ с перегревом пара ( $\Delta = 40$  °С) по сравнению с ПГ насыщенного пара при оптимальном распределении первичного теплоносителя по теплообменным пучкам составляет около 20 %, а дополнительные гидравлические потери по первичному тракту не превышают 0,196 МПа.

При увеличении термического КПД и возможном повышении маневренности блоков с реакторами ВВЭР применение перегретого пара представляется экономически целесообразным.

Основными недостатками мощных ПГ перегретого пара с естественной циркуляцией являются сложность конструкции и увеличение габаритных размеров и массы. Изготовление и транспортировка таких ПГ на площадку АЭС вызывает дополнительные материальные расходы. Значительные преимущества могут быть получены при применении прямоточных ПГ. Переход на прямоточную схему и обусловленный этим отказ от сепарационных устройств существенно упрощают конструкции ПГ, значительно снижают его массу и размеры, улучшают условия транспортировки на монтажную площадку.

Масса прямоточного ПГ с витыми теплообменными пучками и теплоносителем первичного контура в трубах составляет около 450 т, приблизительно вдвое меньше, чем у ПГ с естественной циркуляцией.

Конструктивно теплообменная поверхность ПГ представляет собой два спиральновитых пучка, подсоединенных к центральному коллектору. Пучки включены параллельно по первичному теплоносителю, протекающему внутри трубок, и последовательно по среде вторичного контура, движущейся снизу вверх по межтрубному пространству. Специальная система внутриколлекторных устройств создает условия для движения первичного теплоносителя таким образом, чтобы теплообмен в обоих спиральновитых пучках осуществлялся по противоточной схеме.

Прямоточный ПГ с «обращенной» гидравлической схемой, в котором вторичный теплоноситель заключен в трубы, а первичный – в межтрубное пространство, по габаритным размерам и массе значительно уступает рассмотренному ранее ПГ.

Техническая характеристика прямоточного ПГ с прямыми теплообменными трубами и плоскими трубными досками практически равноценна характеристике прямоточного ПГ с витыми теплообменными пучками и теплоносителем первичного контура в трубах. Необходимая длина теплообменных труб прямотрубного ПГ составляет 18 000 мм. При внутреннем диаметре корпуса аппарата 3800 мм толщины его трубных досок равна 500–600 мм.

Принципиальная конструктивная схема ПГ с прямыми теплообменными трубами обусловлена способом самокомпенсации температурных удлинений трубок и корпуса. Недостатком является наличие внутри аппарата значительных свободных («холостых») объемов, что приводит к снижению компактности и некоторому увеличению внутреннего диаметра корпуса. Предпочтительнее прямотрубная конструкция по типу ПГ АЭС «Окони». Однако при их внедрении возникают трудности, связанные с необходимостью расширения существующего набора конструкционных материалов для решения вопросов самокомпенсации температурных удлинений трубок и корпуса.

На рис. 4.20 представлена схема ПГ с генерацией в межтрубном пространстве.

Во Всероссийском научно-исследовательском институте атомного машиностроения разработан прямотрубный ПГ с горизонтальными плоскими трубными досками по принципу ПГ «Окони». Трубы изготовлялись из ферритной стали 08X14МФ, корпус и трубная доска – из высокопрочной стали 10ГН2МФА, плакированной сталью 08X18Н10 со стороны, соприкасающейся с теплоносителем первого контура. Парогенератор состоит из вертикального цилиндрического корпуса с наружным диаметром 3360 мм, ограниченного с двух сторон трубными досками, двух полусферических камер толщиной

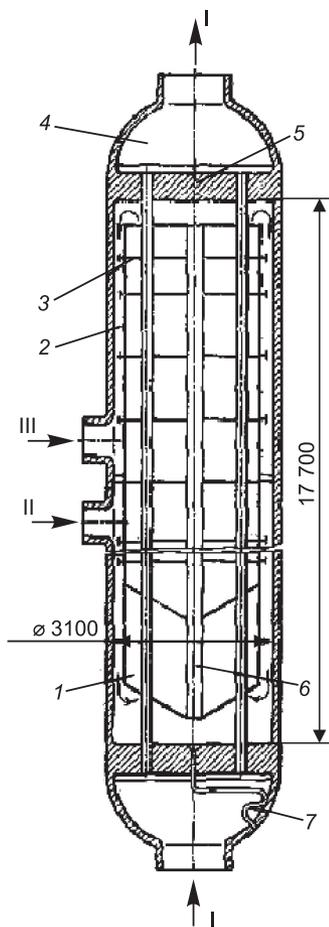


Рис. 4.20. Схема парогенератора с генерацией в межтрубном пространстве: 1 – экономайзерская кассета; 2 – кожух трубного пучка; 3 – дистанционирующая решетка; 4 – камера теплоносителя; 5 – трубная доска; 6 – вытеснитель центральный; 7 – трубка для продувки; I–III – теплоноситель, питательная вода, пар

180 мм, примыкающих к трубным доскам, и трубного пучка, размещенного в кожухе. Трубы закреплены в трубных досках вальцовкой и сваркой. Дистанционирование труб осуществлено с помощью решеток, собранных из штампованных полос. Разбивка труб треугольная с шагом 21 мм.

Трубы пучка в зонах некипящего экономайзера и пароперегревателя на некотором расстоянии от трубной доски размещены в кассетах, собранных из труб 20×0,5 мм, концентрично расположенных по отношению к трубам поверхности теплообмена. Концы труб кассеты шестигранные, обваренные по граням. Каждая кассета по периметру сварена на торцах с кольцами.

Нижняя экономайзерная кассета спрофилирована по радиусу таким образом, что торцы шестигранников с обеих сторон образуют двенадцатигранную пирамиду. Это позволяет получить постоянную радиальную скорость омыwania трубной доски. Под нижней экономайзерной кассетой, по периферии пучка труб, установлено цилиндрическое распределительное устройство, состоящее из двух концентрично расположенных перфорированных обечаяек и предназначенное для распределения питательной воды. Отверстия в обечайках смещены одно относительно другого. Сечение отверстий в наружной обечайке увеличено в направлении к трубным доскам для равномерного распределения питательной воды по кольцевым зазорам.

В центре трубного пучка расположен цилиндрический вытеснитель диаметром 300 мм. В центре нижней трубной доски сделано коническое отверстие для сбора и отвода шлама из застойной зоны под вытеснителем по специальной трубе, проходящей через нижнюю камеру ПГ. Корпус выполнен с переменной толщиной стенок по длине. Внутренний диаметр корпуса постоянный – 3100 мм. В нижней части корпуса расположен патрубок подвода питательной воды диаметром 800 мм, а над ним – патрубок отвода перегретого пара диаметром 850 мм. В верхней и нижней частях корпуса предусмотрены монтажные люки.

Кожух, концентрично расположенный внутри корпуса ПГ и соединенный с нижним кольцом верхней кассеты и с верхним кольцом нижней, образует кольцевой зазор по периферии ПГ. К корпусу кожух крепится поперечным кольцом, разделяющим кольцевой зазор на два участка: верхний – перегретого пара, нижний – питательной воды. Патрубки диаметром 1200 мм для подвода и отвода теплоносителя расположены в верхней и нижней камерах соответственно. В камерах предусмотрены люки для производства ремонтных работ.

Парогенератор работает по прямоточному принципу. Питательная вода по кольцевому зазору опускается вниз и через распределительное устройство подается в щели кассет, в которых вода подогревается, а затем поступает в межтрубное пространство. В межтрубном пространстве происходит дополнительный подогрев воды до температуры насыщения. Сухой насыщенный пар входит в щели верхней кассеты, перегревается и удаляется из ПГ через кольцевой зазор, образованный корпусом и кожухом.

Для сравнения разработан прямоточный ПГ с «обращенной» гидравлической схемой, в котором вторичный теплоноситель заключен в трубы, а первичный – в межтрубное пространство.

Парогенератор состоит из вертикального цилиндрического корпуса максимальным диаметром 3520 мм, ограниченного с двух сторон трубными досками, толщиной 650 мм, двух эллиптических камер толщиной 140 мм, трубного пучка, состоящего из 13 500 труб диаметром 16×1,4 мм. По периферии трубного пучка установлены цилиндрические распределительные устройства. Разбивка труб в пучке треугольная с шагом 21 мм. Дистанционирование труб выполнено с помощью двухъярусных решеток, составленных из штампованных полос таким образом, что несущие полосы образуют ромбы со стороной, равной пяти шагам разбивки труб. Промежуточные полосы вставлены в несущие сверху с шагом 21 мм под углом один к другому 60°.

В трубах поверхности нагрева на участках некипящего экономайзера и пароперегревателя размещены вставки диаметром 10 мм. Экономайзерные вставки скомбинированы с дроссельным устройством. Корпус имеет переменную толщину: в средней части – 160 мм, у трубной доски и в зоне патрубков – 210 мм. Внутренний диаметр корпуса постоянный – 3100 мм. В верхней части корпуса расположен патрубок отвода того же диаметра. В нижней части корпуса предусмотрен монтажный люк. Внутри корпуса эксцентрично к нему расположен кожух. К корпусу кожух крепится поперечным кольцом, разделяющим зазор между корпусом и кожухом на два участка: верхний – «горячего» и нижний – «холодного» теплоносителя. Патрубок для подвода питательной воды расположен в нижней камере, а для отвода перегретого пара – в верхней. В нижней и верхней камерах предусмотрены люки для производства ремонтных работ.

Парогенератор работает по прямоточному циклу. Питательная вода поступает в нижнюю камеру, проходит по трубам, в которых подогрывается до температуры насыщения и испаряется. Перегретый пар удаляется из ПГ через патрубок в верхней камере. Теплоноситель поступает через верхний патрубок в корпус, распределяется по межтрубному пространству и, пройдя его, отводится через нижний зазор между корпусом и кожухом. Проходя по зазору, теплоноситель охлаждает корпус и тем самым понижает температурную разность между корпусом и трубным пучком.

В одном из вариантов конструкции прямоточного ПГ применен специальный способ компенсации разности температурных удлинений трубчатки и корпуса – использование оригинальной поверхности нагрева, которая представляет собой трубный пучок, выполненный из 13 197 витых труб 16×1,4 мм с рабочей длиной каждой трубы 17 100 мм. Трубы расположены по треугольной решетке с шагом 21 мм и закреплены в трубных досках.

Витые трубы представляют собой винтовую трубу с малым радиусом навивки. Для данного ПГ использованы трубы с наружным диаметром витой трубы 19,7 мм. Шаг навивки трубы принят 80 мм. В пучке ПГ трубы дистанционированы специальными решетками, каждая из которых выполнена в виде трубной доски толщиной 90 мм с отверстиями диаметром 20 мм, разбивка последних выполнена в точном соответствии с трубными досками ПГ. Дистанционирование осуществляется через каждые 1560 мм по высоте пучка. Между трубными досками размещены десять дистанционирующих решеток, которые фиксируются с помощью 12 прутко-стяжек. Стяжки диаметром 20 мм ввертываются в нижнюю трубную доску (на глубину 15–20 мм) и привариваются к решеткам, препятствуя смещению дистанционирующих решеток по пучку.

### **4.3. Конструкции парогенераторов ведущих мировых производителей**

В ходе развития атомной энергетики рассматривались различные варианты конструктивного оформления ПГ для АЭС с реакторами, охлаждаемыми водой под давлением. Наиболее широко распространены два основных типа ПГ: с естественной циркуляцией и прямоточные с принудительной циркуляцией.

Наибольшее число работающих и строящихся АЭС с реакторами PWR в США приходится на долю фирмы Westinghouse Electric. Фирма пошла по пути развития конструкции вертикальных однокорпусных ПГ с естественной циркуляцией, вырабатывающих насыщенный пар.

Парогенераторы этого типа представляют собой вертикальный цилиндрический сосуд, внутри которого размещаются U-образные трубы, образующие теплообменную

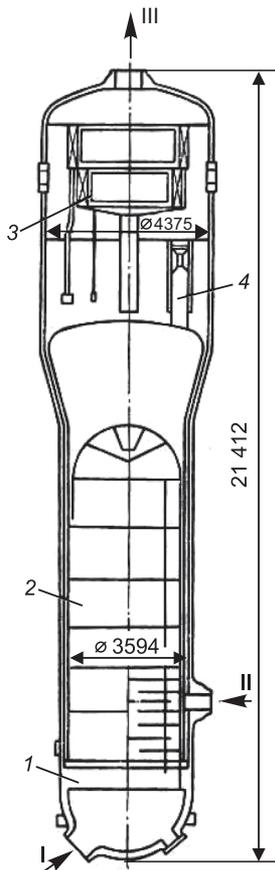


Рис. 4.21. Парогенератор фирмы Westinghouse Electric (модель E):

1 – трубная доска; 2 – трубный пучок; 3, 4 – сепараторы второй и первой ступеней; I–III – теплоноситель, питательная вода, пар

поверхность. В верхней части корпуса ПГ расположены сепарационные устройства, а в нижней – сферическая камера подвода и отвода теплоносителя первого контура. Теплообменные трубы завальцованы и приварены к трубной доске. По высоте трубы дистанционируются с помощью горизонтальных решеток.

В настоящее время фирмой предложены проекты ПГ электрической мощностью 300 МВт (модель Д) и 350 МВт (модель E), предназначенные для установок в трех- и четырехпетлевом исполнении.

На рис. 4.21 показан ПГ модели E, в табл. 4.5 даны его технические характеристики.

Трубы ПГ изготавливают из никелевого сплава инконель-600, а трубную доску – из углеродистой или низколегированной стали, плакированной со стороны теплоносителя сплавом инконель-600.

Таблица 4.5

**Технические характеристики парогенератора фирмы Westinghouse Electric (модель E)**

Технические характеристики	Значение
Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	6225
Диаметр и толщина стенки труб поверхностей нагрева, мм	19×1,07
Материал труб	Инконель-600
Количество U-образных труб, шт.	4864
Диаметр корпуса, мм: максимальный испарительной части	4788 3762
Высота, мм	21 412
Масса, т	385,6

Как показал опыт эксплуатации вертикальных ПГ, теплообменные трубы часто выходят из строя, что требует остановки реакторной установки для проведения ремонтных работ, связанных с межконтурной негерметичностью ПГ. Эти повреждения вносят наибольший вклад в простои энергоблоков. Так, на АЭС США в 1980–1984 гг. снижение коэффициента использования мощности, связанной с отказами ПГ, составило около 5,7 %.

Вид и местоположение повреждений свидетельствуют о том, что первопричиной их появления (а в дальнейшем и развития) являются конструктивные особенности ПГ, обуславливающие интенсификацию коррозионных процессов или инициирующие дентинг. Среди этих особенностей следует выделить:

- нижнее горизонтальное расположение трубной доски, что приводит к скоплению на ней шламовых отложений. Система продувки в условиях плотного расположения труб не позволяет полностью удалить шламы с трубной доски, особенно с ее центральной части;

- наличие недовальцованных зазоров со стороны второго контура в местах заделки труб в трубную доску, вызванное практической невозможностью осуществить вальцовку на всю толщину трубной доски. В щелях происходит выпаривание котловой воды, что влечет за собой повышение концентрации коррозионно-активных примесей и развитие щелевой коррозии;

- горизонтальное расположение дистанционирующих решеток, что в совокупности с минимальными размерами зазоров в местах крепления труб создает условия для выпаривания котловой воды и накопления коррозионно-агрессивных отложений;

- при традиционной схеме дистанционирования труб их тепловое расширение возможно только вдоль оси трубы. Вследствие этого деформации труб, вызванные разностью температур их восходящих («горячих») и нисходящих («холодных») участков, развиваются (накапливаются) однонаправленно, концентрируясь в местахгиба. Это может стать причиной выхода из строя труб, особенно первых рядов, имеющих минимальные радиусы гибов и, следовательно, малую самокомпенсирующую способность;

- общая неравномерность распределения тепловой нагрузки по котловому объему ПГ, обусловленная тем, что все «горячие» участки труб расположены в одной половине ПГ, а все «холодные» – в другой. В результате большая часть пара вырабатывается в «горячей» половине ПГ, что усложняет систему сепарации. Для рассматриваемых ПГ характерна также температурная разверка теплоносителя на выходе из труб, вызванная разницей в их длинах, что приводит к дополнительным температурным напряжениям в трубной доске ПГ;

- вертикальное расположение труб в ПГ. Из-за наличия по высоте теплообменных зон всех характерных теплофизических зон в случае интенсификации коррозионных процессов в одной из зон (например, в зоне шламовых отложений) повреждаются все трубы ПГ;

- неравномерная перфорация трубной доски, вызванная наличием неперфорированной стяжки, что приводит к дополнительным напряжениям в трубной доске.

Недостатки, присущие известным конструкциям ПГ с вертикальным расположением труб, сказываются не только на надежности собственно ПГ, но и на безопасности АЭС в целом. В частности, при снижении уровня теплоносителя в трубах ПГ прекращается циркуляция последнего в первом контуре, что приводит к ухудшению теплоотвода через ПГ.

Следует отметить, что фирмой Westinghouse Electric изготовлены и прямоточные ПГ для двух действующих АЭС («Прайер Айленд» и «Кевайни»).

Фирма Combustion Engineering, Inc. начала свою деятельность с разработки ПГ большой единичной мощности – 400 МВт. Типовым для нее является вертикальный ПГ с естественной циркуляцией, но имеются разработки и прямоточных ПГ (например, АЭС «Майн Янки» мощностью 245 МВт).

Также был разработан ПГ для реактора «Система-80», который включает два вертикальных ПГ с встроенными экономайзерами (рис. 4.22). Все эле-

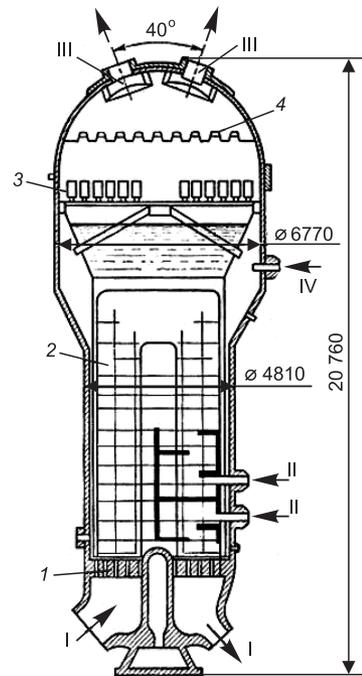


Рис. 4.22. Парогенератор типа «Система-80» фирмы Combustion Engineering, Inc.:

1 – трубная доска; 2 – трубный пучок; 3 – сепараторы; 4 – осушители; I–IV – теплоноситель, питательная вода, пар

менты, работающие под давлением, изготовлены из углеродистой стали, а трубы поверхностей нагрева – из сплава инконель-600.

Трубная доска плакирована наплавкой. Приварка концов труб к наплавке обеспечивает высокую плотность заделки труб в трубную доску, а вальцовка взрывом по всей толщине трубной доски исключает щелевую коррозию. Экономайзерный участок способствует улучшению характеристик ПГ при подогреве питательной воды в зоне низких температур теплоносителя, а наличие нескольких патрубков подвода питательной воды распределяет поток в экономайзере в зависимости от нагрузки.

Фирма The Babcock and Wilcox Company разработала свои первые ПГ, установленные на АЭС «Индиан Пойнт». Они представляли собой горизонтальные U-образные испарители мощностью 64 МВт каждый. Перегрев пара осуществлялся в пароперегревателе, работающем на мазуте. В дальнейших разработках фирма пошла по пути создания прямоточных ПГ, вырабатывающих слабо перегретый пар.

Исследования в области прямоточных ПГ были начаты фирмой в середине 1950-х гг. в связи с программой развития промышленных реакторов PWR. В результате созданы прямотрубные ПГ со встроенным экономайзером, пригодным для использования в PWR. Прямотрубные ПГ имеют следующие преимущества:

- поддержание постоянной средней температуры в первом контуре и постоянного давления во втором контуре во всем диапазоне нагрузки, что позволяет упростить регулирование и понизить температурные градиенты;
- генерация перегретого пара, что дает возможность повысить КПД установки, так как уменьшается удельный расход тепловой энергии. Наличие перегретого пара позволяет исключить из установки сепараторы и осушители.

Применение прямоточных ПГ целесообразно в случаях, когда большая часть тепловой энергии передается в зоне пузырькового кипения с высоким коэффициентом теплоотдачи. Для выявления характера теплоотдачи проведен ряд экспериментальных исследований, которые показали, что вопреки распространенному мнению, основанному на исследовании теплоотдачи кипящей воды от высокотемпературного источника тепловой энергии (1400 °С), пузырьковое кипение при малых скоростях воды и относительно низкотемпературных источниках (300 °С) сохраняется до сухости пара, равной примерно 100 % (рис. 4.23).

На лабораторной модели исследовались тепловые характеристики прямоточного ПГ, возможность его регулирования в переходных режимах, «контактный» подогрев питательной воды. Были изготовлены модели ПГ (семи-, девятнадцати- и тридцатисеми-трубные), часть из которых была оборудована системами регулирования, предлагаемыми фирмой для промышленных установок. Эти модели успешно эксплуатировались в диапазоне температуры, давления и скорости, соответствующих полномасштабным установкам.

При создании прямоточных ПГ фирмы The Babcock and Wilcox Company для АЭС с реакторами с водой под давлением учтен опыт эксплуатации более чем 60 действующих прямоточных ПГ электростанций, работающих на органическом топливе, и результаты шестилетних испытаний прототипов

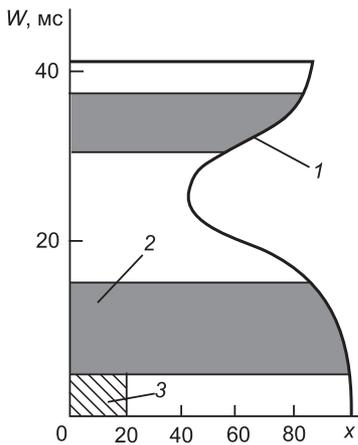


Рис. 4.23. Зависимость сухости пара на границе кризиса теплообмена от скорости смеси для различных типов ПГ: 1 – прямоточные ПГ с высокотемпературным источником тепловой энергии; 2 – прямоточные ПГ с низкотемпературным источником тепла; 3 – ПГ с естественной циркуляцией

ПГ для АЭС. Впервые прямоточные ПГ, вырабатывающие слабоперегретый пар, были установлены на АЭС «Окони» (1973). Парогенератор (см. рис. 4.20) представляет собой прямотрубный теплообменник. Трубы теплообменного пучка сварены в трубные доски. Вдоль трубного пучка установлены специальные опорно-дистанционирующие решетки, предотвращающие вибрацию труб. Теплоноситель первого контура поступает в верхнюю часть ПГ, движется сверху вниз внутри трубок и отводится в его нижней части двумя трубопроводами (по числу ГЦН). Питательная вода поступает в кольцевой канал между корпусом и кожухом теплообменного пучка. Кожух имеет отверстия для перепуска в кольцевой канал части пара, генерируемого в межтрубном пространстве. Питательная вода, перемещаясь по кольцевому каналу, заполненному паром, нагревается до температуры насыщения и через отверстия в нижней части кожуха, расположенные непосредственно над трубной доской, направляется в межтрубное пространство теплообменного пучка. В верхней части пучка осуществляется перегрев пара. Перегретый пар через отверстия в кожухе пучка поступает в кольцевой канал, перемещается по нему сверху вниз и отводится из ПГ через патрубки, расположенные над патрубками питательной воды. Сопротивление испарительного участка преодолевается статическим напором питательной воды в кольцевой щели.

Парогенератор вырабатывает перегретый пар с постоянным давлением во всем диапазоне режимов работы реактора. При номинальной нагрузке температура пара 299 °С, т.е. перегрев примерно 20 °С. По мере уменьшения нагрузки температура пара приближается к температуре теплоносителя на входе в реактор с некоторым увеличением температуры пара. При 15 %-й нагрузке температура пара снижается до температуры насыщения.

В прямоточном ПГ возможно появление колебаний давления, температуры, расхода пара. Такого рода колебания, возникающие вследствие изменения соотношения между перепадами давления в опускном (экономайзерном) участке и трубном пучке, были зарегистрированы при испытании модели ПГ. Колебания уменьшались при увеличении сопротивления входа в трубный пучок. При испытании ПГ «Окони» не наблюдалось колебаний параметров, вызванных нестабильностью двухфазного потока.

Существенной особенностью прямоточного ПГ фирмы The Babcock and Wilcox Company является минимальная разность температур теплообменных труб и корпуса. Повышение температуры корпуса обеспечивается при организации зоны подогрева питательной воды. В этой зоне корпус омывается водой при температуре насыщения в направлении от места ввода питательной воды к нижней трубной доске. На участке перегрева температура труб приближается к температуре теплоносителя первого контура.

Трубы теплообменного пучка ПГ изготавливают из сплава инконель-600, а корпус, работающий под давлением, и трубные доски – из углеродистой стали. Трубные доски со стороны теплоносителя, входная и выходная камеры плакируют сплавом инконель-600 и коррозионно-стойкой сталью. Опорно-дистанционирующие решетки изготавливают из листовой стали сверлением цилиндрических отверстий, прошиваемых в трех направлениях под углом 120°. Таким образом, образуются отверстия для прохода генерируемой среды (рис. 4.24). Следует отметить, что во всем диапазоне нагрузок, вплоть до максимальной (113 %), вибрации труб не обна-

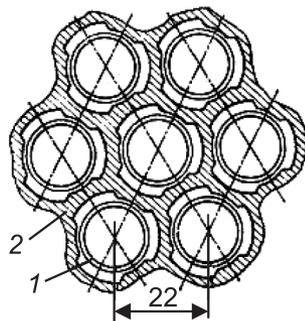


Рис. 4.24. Дистанционирующая решетка парогенератора АЭС «Окони»: 1 – труба диаметром 16 мм; 2 – решетка

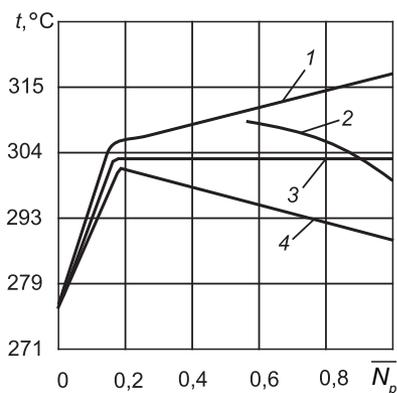


Рис. 4.25. Зависимость температуры теплоносителя и пара от относительной мощности реактора:

1 – температура пара; 2, 4 – температура теплоносителя на входе и выходе в реактор; 3 – средняя температура теплоносителя

ружено. Зависимость температуры теплоносителя и пара от относительной мощности реактора представлена на рис. 4.25.

В настоящее время фирмой разработан проект паропроизводящей установки «Бабкок-241» на предельно допустимую комиссией по атомной энергии США тепловую мощность 3800 МВт. Парогенератор для «Бабкок-241» выполнен по прямоточному циклу с экономайзерным участком без частичной рециркуляции для предварительного подогрева питательной воды.

В прямоточных ПГ (рис. 4.26, 4.27) с прямыми трубами предусмотрены мероприятия по ограничению разницы в температурном расширении труб (подобранные сочетания материалов труб и корпуса, поддерживается необходимая разница температур между ними). Во Франции разработан ПГ «Трепо», в котором используются волнообразно изогнутые

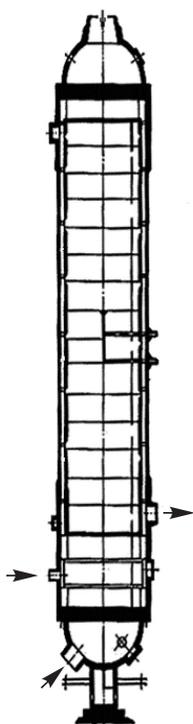


Рис. 4.26. Прямоточный парогенератор установки «Бабкок-241»

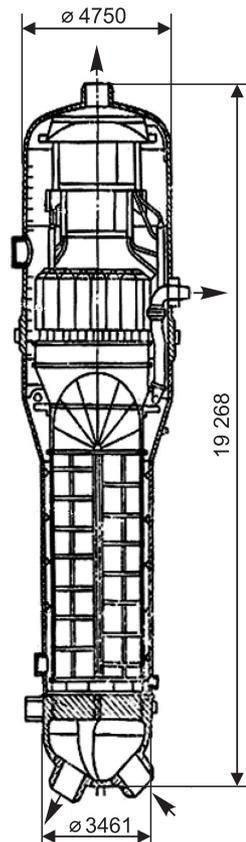


Рис. 4.27. Парогенератор АЭС «Библис»

трубки, закрепленные между двумя трубными досками. Такая форма труб обеспечивает их гибкость, достаточную для поддержания напряжений в допустимых пределах даже при разности температур корпуса и труб, равной 200 °С и превышающей разность температур, наблюдаемую в переходных режимах или при образовании течей. Другой особенностью конструкции этого ПГ является использование трубных досок с центральным патрубком. В центральной части корпуса имеется цилиндрическая полость.

При монтаже трубы располагают concentрическими слоями в направлении от периферии к центру. Дистанционирующие устройства состоят из кольцевых пластин, к которым приварены полые распорки. Кольцевые пластины вслед за трубами монтируют от периферии к центру и последовательно соединяют сваркой. Применение полых распорок позволяет пароводяной смеси проходить свободно.

Рассматриваемая конструкция по единичной мощности и тепловой эффективности не уступает прямотрубной. При электрической мощности 592 МВт ПГ «Трепо» имеет диаметр корпуса 3800 мм при диаметре центральной полости 1400 мм. Теплообмен в ПГ с волнистыми трубами более интенсивен.

Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке труб на 10 % больше, чем в прямотрубном варианте. Выше также и коэффициент теплоотдачи по второму контуру, особенно в зоне начала перегрева. Волнообразная форма труб обеспечивает такую же эффективность теплообмена, как и при поперечном омывании. Использование трубных досок с центральным отверстием позволяет получить дополнительную экономию материалов, снижая толщину трубных досок до 350 мм.

Фирма The Babcock and Wilcox Company разработала и построила ПГ большой мощности с естественной циркуляцией для АЭС «Библис» в 1974 г. (рис. 4.27). При его создании был использован опыт, полученный в ФРГ на АЭС «Обриг-хайм» (1969) и «Штаде» (1972).

В основном конструкция ПГ типовая для вертикального аппарата с естественной циркуляцией и трубным пучком из U-образных труб.

Пароводяная смесь проходит через 52 циклонных сепаратора (грубая сепарация до 5 %) и две параллельные ступени жалюзийных сепараторов (тонкая сепарация до 0,25 % влажности). В циклонных сепараторах пароводяная смесь поднимается по внутренней трубе, закручивается лопатками и выходит наружу. На наружном кожухе происходит первое отделение воды, которая стекает по его внутренней поверхности и через гидрозатвор попадает в кольцевой зазор ПГ. При дальнейшем движении пароводяная смесь дважды закручивается, а содержащаяся в ней вода собирается в двух кольцевых камерах, откуда стекает вниз. Пар направляется на горизонтальный отбойный лист, а затем к сепараторам с жалюзи. Выравнивание скоростей пара в сепараторе обеспечивается установленным за ним дырчатым листом.

Патрубки входа и выхода теплоносителя имеют внутренний диаметр примерно 800 мм. Все поверхности, соприкасающиеся с теплоносителем, плакированы коррозионно-стойкой сталью. Трубная доска для надежной приварки труб плакирована снизу инконелем-600. Ширина кольцевого зазора между стенкой корпуса и кожухом трубного пучка равна 145 мм, что дает возможность питательной воде перемещаться в нем с малой скоростью при незначительных потерях давления в опускном тракте.

В нижней части кольцевого зазора установлено дроссельное устройство для изменения кратности циркуляции, так как опыт эксплуатации ПГ АЭС «Обриг-хайм» показал, что при увеличении кратности циркуляции происходит сильный вынос влаги и ухудшается эффективность работы грубого сепаратора. Дроссельное устройство состоит из двух колец с отверстиями: верхнего – неподвижного и нижнего – поворотного. При смещении нижнего кольца изменяется сечение для прохода воды и, следовательно, сопротивление опускного тракта и кратность циркуляции. Расчетная кратность циркуляции – 5 (влажность 80 %). Особое внимание при проектировании

уделялось дистанционирующим элементам, так как большие массовые расходы среды и поперечные потоки способны привести к возникновению вибраций труб в пучке и при несовершенной конструкции дистанционирующих элементов – к износу труб. Для фиксации положения труб установлены полукруглые решетки с шагом 800 мм в шахматном порядке с левой и правой стороны. Площадь поверхности нагрева ПГ обусловлена высоким термическим сопротивлением загрязнения. В начальный период эксплуатации суммарный коэффициент запаса по поверхности, включающий коэффициенты запаса на переохлаждение питательной воды, конструктивный коэффициент запаса и т.д., составляет 28 %. Большой коэффициент запаса по поверхности нагрева не является опасным для ПГ PWR, так как в этом случае повышаются температурный напор и паропроизводительность.

Выбор материалов для ПГ АЭС в основном осуществляется в соответствии с условиями, определяемыми свойствами теплоносителей первого и второго контуров. Если во втором контуре всем требованиям полностью удовлетворяет углеродистая сталь, то в первом для снижения скорости коррозии как источника радиоактивного загрязнения надо применять коррозионно-стойкие стали. Наиболее труден выбор материала для труб поверхностей теплообмена, так как они контактируют с теплоносителем и первого, и второго контуров. В ПГ первого поколения для труб применялась аустенитная сталь А151 304 (или А151 316) («Шиппингпорт», «Янки», «Индиан Пойнт»). Так как стали подвержены коррозии, то для ПГ второго поколения трубы изготавливают из сплава инконель-600, преимущество которого в более низком коэффициенте теплового расширения, что уменьшает относительное расширение труб и корпуса из низколегированной или углеродистой стали. Для труб ПГ иногда применяют сплав инкаллой-800.

Несмотря на то что эти сплавы коррозионно-стойкие, их применение требует соблюдения определенных мер при изготовлении и эксплуатации ПГ. Они несовместимы с низкоплавкими металлами, чрезвычайно подвержены воздействию щелочи. Корпуса и трубные доски изготавливают из углеродистой стали. Со стороны теплоносителя трубные доски плакируются материалом, совместимым с материалом труб (обычно сплавом инконель-600), а крышки – коррозионно-стойкими материалами.

Накопленный опыт эксплуатации ПГ указывает на следующие вероятные причины возникновения аварий:

- повреждение труб в верхней части пучка в зоне, где имеются неблагоприятные характеристики потоков, или в местах, где антивибрационные стержни из углеродистой стали охватывают поверхности труб;
- разрушение труб в области пучка с малым радиусомгиба, вызванное остаточными механическими напряжениями;
- коррозия в области больших тепловых потоков под действием избытка щелочи в воде второго контура; коррозия повреждает трубы непосредственно над трубной доской, в зазорах между трубной доской и трубами (если последние развальцованы не на всю толщину трубной доски) или под шламом, образующимся на трубной доске;
- межкристаллитная коррозия со стороны первого контура, обусловленная химическими веществами, оставшимися в воде после предэксплуатационных промывок трубного пучка;
- повреждение плакированного слоя, нанесенного методом взрыва;
- коррозия в области дистанционирующих решеток;
- недостаточная точность при сборке и монтаже ПГ.

Существует тесная взаимосвязь между конструкцией ПГ, применяемыми материалами и водно-химическим режимом. Значительные трудности представляет рассмотрение, а тем более моделирование сложных процессов, протекающих в ПГ в не-

благоприятных зонах, в частности в непосредственной близости от поверхности труб. В большинстве случаев неполадки вызваны коррозией, поэтому особое внимание следует уделять соблюдению водно-химического режима работы.

Необходимо учитывать, что повреждения происходят только в том случае, если химикаты, содержащиеся в котловой воде, локально концентрируются. Это обстоятельство является следствием неблагоприятных термодинамических условий.

Прямыми исследованиями выявлены следующие виды дефектов труб прямооточных ПГ:

- трещины в трубах, кольцевые риски, поверхностные кавитационные повреждения на уровне верхней трубной доски и верхней дистанционирующей решетки вдоль контрольного коридора;
- потери металла, вызванные эрозией, фреттингкоррозией и растрескиванием в местах контакта трубок с верхней дистанционирующей решеткой вдоль контрольного коридора;
- потери металла, вызванные ударным воздействием на уровне и выше второй дистанционирующей решетки, вдали от контрольного коридора;
- выборочная питтинговая коррозия в местах контакта с верхней дистанционирующей решеткой, расположенной вдали от контрольного коридора.

Анализ видов дефектов, проявляющихся при эксплуатации ПГ, и места их расположения показывает, что повреждениям подвергается только трубная система ПГ. Поврежденные трубы отглушаются и после исчерпания запасов теплообменной поверхности ПГ заменяется целиком, хотя корпусные конструкции не имеют повреждений.

В настоящее время ведется поиск путей повышения эксплуатационной надежности ПГ АЭС с водяным теплоносителем. За рубежом в целях устранения указанных выше недостатков ПГ ведутся работы по следующим направлениям: применение новых конструкционных материалов, улучшение водно-химического режима, внедрение ремонтной и диагностической робототехники, проведение химических промывок для удаления отложений и совершенствование конструкций ПГ. Однако предложения по совершенствованию ПГ не предполагают принципиального изменения конструкций. Таким образом, негативные последствия конструктивных недостатков полностью не исключаются, а лишь сглаживаются и проявляются в более позднее время.

#### **4.4. Парогенератор реакторного блока ВБЭР-300**

Парогенератор ВБЭР-300 предназначен для выработки пара требуемых параметров. Трубная система ПГ в сборе с корпусом представляет собой модульно-змеевиковый вертикально-цилиндрический теплообменник поверхностного типа, в котором осуществляется теплообмен между теплоносителем первого контура, циркулирующим в межтрубном пространстве, и рабочей средой второго контура, циркулирующей во внутритрубном пространстве.

Основные технические характеристики ПГ ВБЭР-300 приведены в табл. 4.6.

Трубная система ПГ состоит из крышки, парогенерирующих модулей, закрепленных сваркой к нижнему торцу крышки, и питательных коллекторов, размещенных на верхнем торце крышки и закрытых защитным кожухом.

Крышка трубной системы представляет собой плоскую цилиндрическую плиту из нержавеющей стали. В крышке выполнены вертикальные и горизонтальные каналы для отвода пара от парогенерирующих модулей в паросборные коллекторы, которые также сделаны в крышке. Вместе с трубной системой крышка уплотняется в корпусе ПГ шпилечно-торовым соединением.

Общий вид ПГ реакторного блока ВБЭР-300 приведен на рис. 4.28.

## Основные технические характеристики парогенератора

Технические характеристики	Значение
Тепловая мощность, МВт	230
Температура теплоносителя первого контура, °С: на входе на выходе	331 297
Давление теплоносителя первого контура на входе, МПа	16,3
Паропроизводительность, т/ч	365
Давление перегретого пара, МПа	6,38
Температура перегретого пара, °С, не менее	305
Температура питательной воды, °С	185

Основные конструктивные характеристики трубной системы приведены в табл. 4.7.

## Основные конструктивные характеристики трубной системы

Конструктивные характеристики	Значение
Количество модулей поверхности теплообмена, шт.	31
Размеры трубы поверхности теплообмена, мм: диаметр толщина стенки	10 1,4
Материал теплообменной трубы	Титановый сплав
Количество теплообменных труб в модуле, шт.	90
Масса трубной системы в сухом состоянии, кг	41 800



В верхней части обечайки трубной системы выполнены окна для входа греющего теплоносителя.

Трубная система ПГ работает следующим образом. Теплоноситель первого контура подводится в ПГ из реактора по внутреннему патрубку. По зазору между корпусом и кожухом трубной системы теплоноситель поднимается в верхнюю часть и через окна в кожухе попадает в напорную камеру. Далее теплоноситель распределяется по парогенерирующим модулям и движется сверху вниз по межтрубному пространству, отдавая тепло среде второго контура, сливается в полость между кожухом трубной системы и корпусом, поднимается

Рис. 4.28. Парогенератор реакторного блока ВБЭР-300:  
1 – корпус ПГ; 2 – модуль ПГ; 3 – крышка ПГ; 4 – паровой патрубок;  
5 – патрубок питательной воды

вверх и через кольцевой зазор между внутренним и наружным патрубками отводится на всас главного циркуляционного насоса.

Питательная вода через питательные патрубки подается в питательные коллекторы и, опускаясь вниз по питательным трубам, распределяется по теплообменным трубам. Двигаясь снизу вверх во внутритрубном пространстве змеевиков, вода подогревается до кипения, превращается в пар и перегревается до требуемых параметров. Далее пар от модулей поступает в паротводящие каналы крышки и через паровые коллекторы и паровые патрубки отводится в паровые трубопроводы.

#### 4.5. Парогенератор ВПБЭР-600

Парогенератор ВПБЭР-600 предназначен для передачи тепловой энергии теплоносителя первого контура теплоносителю второго контура. В основу проектирования ПГ ВПБЭР-600 положены технические решения, обеспечивающие:

- размещение ПГ непосредственно в реакторе с максимально возможным заполнением кольцевого пространства между блоком труб и устройств блоком труб и устройств (БТУ) и корпусом реактора и обеспечение возможности замены в процессе эксплуатации;
- размещение коллекторов блок-секций ПГ для подвода (отвода) теплоносителя второго контура, выполнение и контроль монтажных сварных швов внутри патрубков реактора в полости второго контура;
- использование конструкции коллектора ПГ для подвода (отвода) теплоносителя второго контура в качестве «ограничителя течи» теплоносителя первого контура на случай аварии с разгерметизацией патрубка вплоть до гипотетической аварии с обрывом патрубка ПГ полным поперечным сечением;
- использование конструкции коллекторов блок-секций ПГ для подвода (отвода) теплоносителя второго контура в качестве «ограничителя течи» теплоносителя первого контура для паровых труб на случай аварии с межконтурной разгерметизацией указанных труб вплоть до аварии с их обрывом полным поперечным сечением;
- работоспособность и надежность ПГ путем использования технических решений, подтвержденных опытом создания, отработки, освоения серийного производства и эксплуатации прямоточных ПГ с перегретым паром для транспортных ядерных энергетических установок;
- надежную непрерывную работу без местного обслуживания периодами по 1,5–2 года в нормальных режимах работы реактора и при условии обеспечения норм качества питательной воды;
- работоспособность при землетрясении 8 баллов по шкале MSK-64, падении на здание реакторной установки самолета или воздействия ударной волны;
- возможность восстановления работоспособности текущего ПГ путем глушения части теплообменной поверхности блок-секции после вскрытия полости коллекторного патрубка.

Парогенератор состоит из независимых блок-секций, которые выполнены в двух модификациях: с прямоугольным и трапецеидальным поперечным сечением. Блок-секции снабжены совмещенными коллекторами питательной воды и пара, выведенными в патрубки, размещенные на боковой поверхности корпуса реактора.

Блок-секция ПГ представляет собой пучок парогенерирующих элементов (ПГЭ), сформированный и обжатый кожухом, состоящим из профилированных обкладок, сваренных между собой и замкнутых на ребра жесткости, размещенные в пучке ПГЭ.

В нижней части кожух блок-секции ПГ снабжен патрубком, уплотненным в гидрокамере насосов, расположенной в корпусе реактора.

Внутри блок-секции ПГ пучок ПГЭ разбит на группы, в которых верхние и нижние концевые переходники ПГЭ объединены коллекторами, в результате чего теплообменная поверхность блок-секции распределяется на отдельные модули (кассеты). Верхние концевые переходники ПГЭ имеют дополнительный прямой участок для повышения эффективности теплоотвода в условиях парогазовой среды в случае аварии с разгерметизацией первого контура.

Как в пределах модулей, так и на стыке модулей ПГЭ скомпонованы по треугольной сетке с шагом, равным диаметру наружной трубы по ребрам, и дистанционированы между собой по схеме «ребро по ребру». Блок-секции ПГ прямоугольного и трапецеидального сечения отличаются количеством входящих в них модулей и их модификаций.

Объединенный коллектор блок-секции ПГ выполнен в виде толстостенного стакана, в периферийной зоне которого находятся 18 пароотводящих каналов – глубоких сверлений диаметром 65 мм, а центральная часть является трубной доской, в которой выполнены 18 отверстий диаметром 35 мм для заделки питательных труб.

Пучок питательных труб выгорожен из тракта циркуляции греющего теплоносителя дополнительным кожухом. Нижний конец каждой питательной трубы соединен с нижними коллекторами группы модулей (кассет).

В каждый пароотводящий канал совмещенного коллектора блок-секции ПГ выведены верхние коллекторы той группы модулей, нижние коллекторы которой объединены одной питательной трубой.

Для обеспечения устойчивой работы параллельно включенных ПГЭ на входе в каждый из них установлен дроссель.

Коллектор питательной воды блок-секции ПГ выполнен в виде съемной сильфонной сборки, размещенной в полости парового объема патрубка.

Основные технические характеристики ПГ ВПБЭР-600 в номинальном режиме работы представлены в табл. 4.8.

Таблица 4.8

**Основные технические характеристики парогенератора ВПБЭР-600**

Технические характеристики	Значение
Паропроизводительность, кг/с, не менее	950
Температура перегретого пара, °С, не менее	305
Давление перегретого пара, МПа, не менее	6,38
Температура питательной воды, °С	230±5
Давление питательной воды, МПа, не менее	7,85
Поверхность теплопередачи, м <sup>2</sup>	14 260
Длина активной части, мм	3900
Масса в сухом состоянии, т	180
Срок службы, лет	20

Применяемые для изготовления ПГ материалы обладают высокой коррозионной стойкостью, достаточным уровнем прочностных характеристик, стабильностью свойств в условиях эксплуатации при температурах до 350 °С.

Парогенератор работает следующим образом. Греющий теплоноситель первого контура, двигаясь через блок-секции ПГ сверху вниз, омывает парогенерирующие элементы со стороны наружной поверхности.

Питательная вода из питательных трубопроводов попадает в питательные коллекторы блок-секций, распределяется по питательным трубам, опускается по ним вниз и поступает в нижние коллекторы модулей теплообменной поверхности. Распределяясь по ПГЭ, питательная вода движется вверх внутри ПГЭ и по мере движения нагревается до кипения, превращаясь в перегретый пар требуемых параметров. Через верхние коллекторы модулей и пароотводящие каналы совмещенного коллектора блок-секций ПГ пар поступает в коллекторные патрубки и далее во внешние паропроводы.

Регулирование уровня паропроизводительности ПГ осуществляется регулированием расхода питательной воды, вывод из действия ПГ – отключением подачи в него питательной воды.

## ГЛАВА 5. ГЛАВНЫЕ ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ НАСОСЫ

### 5.1. Развитие конструкций главных циркуляционных насосов для АЭС с реакторами ВВЭР-1000

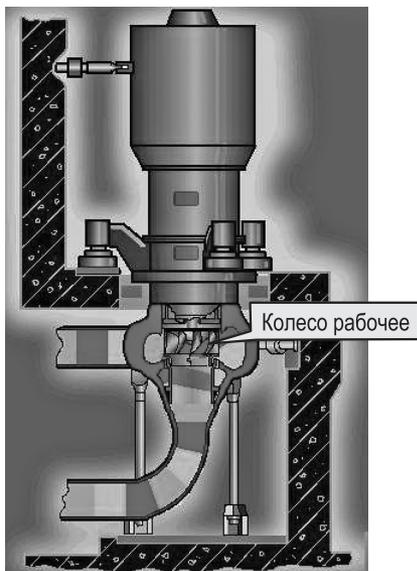
Независимо от схемных особенностей ядерных установок одним из обязательных для реакторных установок видов оборудования являются насосы. Наиболее ответственный агрегат на АЭС – главный циркуляционный насос первого контура (рис. 5.1), обеспечивающий циркуляцию теплоносителя через реактор. На АЭС с реакторами типа ВВЭР главные циркуляционные насосы предназначены для организации принудительной циркуляции теплоносителя через реактор по замкнутому кругу:

ГЦН → реактор → парогенератор → ГЦН.

Надежность эксплуатации реакторной установки, ее работоспособность в нормальных и переходных режимах зависят от наличия циркуляции теплоносителя в первом контуре, т.е. от работоспособности ГЦН.

Основным эксплуатационным требованием, предъявляемым к ГЦН, является высокая ресурсная надежность. Главные циркуляционные насосы должны надежно и устойчиво работать при параметрах окружающей среды, характерных для мест их расположения, без всякого вмешательства обслуживающего персонала в течение длительного времени, равного по меньшей мере периоду между плановыми остановками реактора.

Радиоактивность теплоносителя, загрязнение внутренних поверхностей активными продуктами коррозии, размещение в защитных боксах под гермооболочкой практически исключают возможность ремонта ГЦН с заходом персонала в помещение. В связи с этим предъявляется требование обеспечения замены элементов проточной части и отдельных узлов ходовой части без резки циркуляционных трубопроводов с минимальным временем нахождения ремонтного персонала вблизи ремонтируемого ГЦН.



Конструкция ГЦН по условиям радиационной безопасности должна гарантировать отсутствие протечек наружу радиоактивного теплоносителя. Важность этого требования обуславливается тем, что даже следы радиоактивного теплоносителя на оборудовании требуют достаточно громоздких защитных устройств при проведении ремонтных работ, а наличие полостей с плохо удаляемым теплоносителем усложняет процесс дезактивации. Также для ГЦН должны предусматриваться меры, обеспечивающие приемлемую амплитуду колебаний насосного агрегата. Для машин такого класса допускается вибрация с двойной амплитудой смещения не более 100 мкм в районе верхнего подшипника.

Стабильная работа ГЦН в большой степени зависит от надежности обслуживающих (вспомогательных) систем, поэтому число их должно быть минимальным.

Рис. 5.1. Главный циркуляционный насос

В первых реакторах с водой под давлением (ВВЭР-210, ВВЭР-365 и в первых ВВЭР-440) наблюдалась ярко выраженная тенденция использования бессальниковых герметичных насосов в качестве ГЦН. Герметичные ГЦН первоначально были разработаны для судовых ядерных энергетических установок, для которых существенно важны малая масса и габариты, высокая надежность и малое количество обслуживаемых систем. Характерной особенностью бессальникового герметичного ГЦН является отсутствие устройств, герметизирующих вращающийся вал насоса. В таких насосах собственно насос и электродвигатель соединяются в единый герметичный агрегат.

Однако при последующем конструировании и сооружении реакторов типа ВВЭР с увеличенной единичной мощностью (последующее поколение ВВЭР-440, ВВЭР-1000) проектанты стали ориентироваться на электромеханические насосы с уплотнением вращающегося вала. Переход на насосы с механическим уплотнением вала был обусловлен тем, что при мощностях насоса  $N > 2$  МВт возникали большие технологические сложности при изготовлении герметичных насосов и продиктовано стремлением повысить КПД насосных агрегатов, который в случае использования герметичных насосов был заведомо меньше 60 %, а также неизбежным усложнением конструкционных решений в герметичных насосах с ростом их мощности.

Переходные режимы на АЭС с ВВЭР и необходимость предупреждения недопустимого развития аварийных ситуаций в реакторе при обесточивании и некоторых других неисправностях требовали обеспечения достаточно продолжительного выбега обесточенного насоса. Для герметичных насосов возможность удовлетворения этого требования практически исключена, так как вследствие малых маховых масс они обладают очень небольшим выбегом после отключения (постоянная выбега у герметичного ГЦН-310 для ВВЭР-440 всего 2 с). Для организации теплоотвода от активной зоны в переходных процессах, связанных с потерей циркуляции теплоносителя, для таких насосов выполнялась специальная схема питания ГЦН, основанная на выделении трех независимых источников энергоснабжения.

В то же время в насосах с уплотнением вала эта задача решается без особых трудностей за счет искусственного увеличения момента инерции ротора агрегата установкой в электродвигателе массивного маховика (постоянная выбега у ГЦН-195М с механическим торцевым уплотнением вала равна 30 с, после этого его подача снижается всего лишь в 2,7 раза).

Для реакторной установки ВВЭР-1000 пятого энергоблока Нововоронежской АЭС были разработаны и поныне эксплуатируются главные циркуляционные насосы ГЦН-195. При проектировании последующих реакторных установок ВВЭР-1000 были применены главные циркуляционные насосы ГЦН-195М (рис. 5.2) в сейсмостойком исполнении, отличающиеся от ГЦН-195 более совершенными техническими решениями.

**Конструктивная схема ГЦН с механическим уплотнением вала.** Главный циркуляционный насос ГЦН-195М предназначен для создания циркуляции теплоносителя в первом контуре, обеспечения теплосъема от активной зоны реактора ВВЭР-1000 и передачи тепла в ПГ. ГЦН-195М серийно изготавливался на двух предприятиях: первоначально на Кировском заводе (г. Санкт-Петербург), затем на производственном объединении «Насосэнергомаш».

ГЦН-195М – вертикальный, центробежный, одноступенчатый насос с блоком торцового уплотнения вала, консольным рабочим колесом, осевым подводом перекачиваемого теплоносителя, выносным электродвигателем.

Отличительной особенностью ГЦН такого типа является наличие механического (торцового) уплотнения вращающегося вала. Все насосы этой группы вертикального

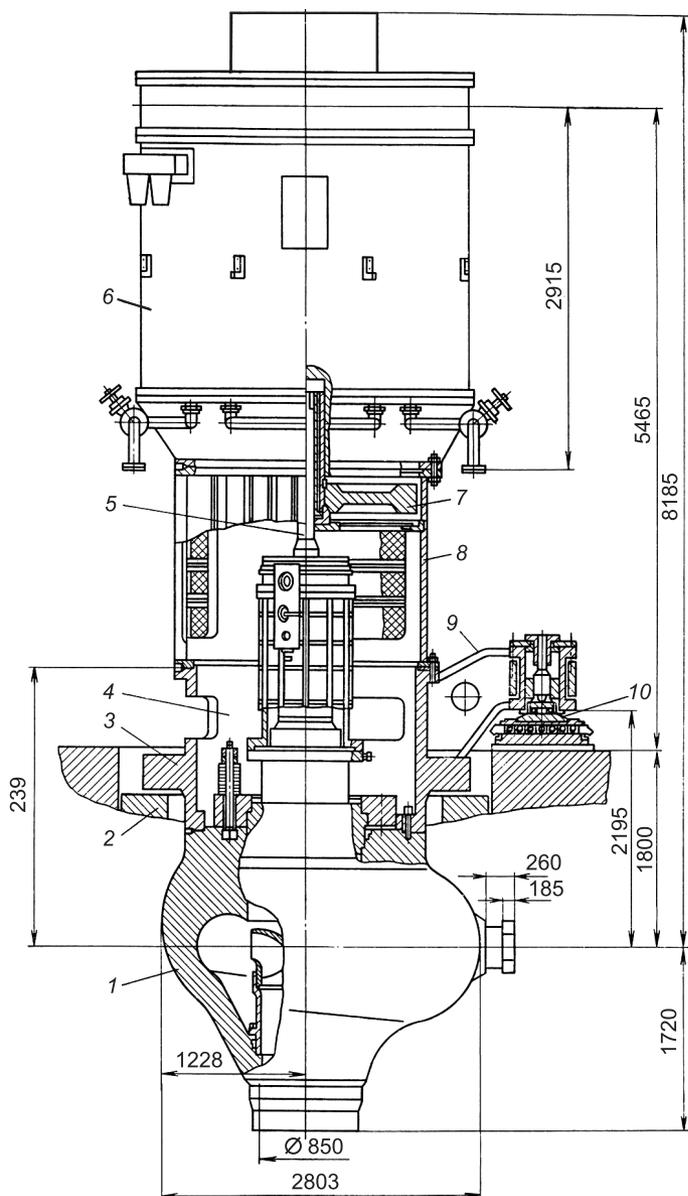


Рис. 5.2. Общий ГЦН-195М для АЭС ВВЭР-1000:

1 – улитка; 2 – кольцо защиты от нейтронного прострела; 3 – перекрывающее кольцо; 4 – нижняя проставка; 5 – торсионный вал; 6 – приводной электродвигатель; 7 – маховик электродвигателя; 8 – верхняя проставка; 9 – кронштейн проставки; 10 – опорное устройство

исполнения, имеют герметичный силовой корпус («улитку») эллиптической формы. Вертикальный насос более компактен и доступен для обслуживания и ремонта, чем горизонтальный.

На рис. 5.3 приведена типовая структурная схема ГЦН в виде комплекса, который включает в себя следующие присутствующие во всех конструкциях этого вида типовые узлы: приводной электродвигатель, подшипниковые опоры с системой смазки,

уплотнение вращающегося вала с системой охлаждения, проточную часть.

На каждом энергоблоке с реактором ВВЭР-1000 установлено четыре ГЦН, каждый из которых совместно с главными циркуляционными трубопроводами Ду850 и ПГ составляет петлю главного циркуляционного контура.

Главный циркуляционный насос размещается в гермооболочке, установлен на «холодной» нитке циркуляционного трубопровода первого контура и подает охлажденную в ПГ воду (теплоноситель первого контура) в реактор.

В соответствии с классификацией по категориям безопасности ГЦН относится к элементам нормальной эксплуатации. При этом ГЦН несет дополнительную функцию, обеспечивая циркуляцию теплоносителя при выбеге во время различных аварий с обесточиванием, что позволяет осуществлять плавный выход на режим естественной циркуляции.

Спроектирован ГЦН таким образом, что обеспечивается:

- нахождение ГЦН в горячем резерве, включая режимы обратного тока в случае неповреждения антиреверсного устройства;

- пуск и устойчивая работа ГЦН при любом сочетании работающих насосов в РУ;

- кавитационный запас во всех переходных режимах работы РУ;

- остановка (выбег) ГЦН без повреждений при перерыве подачи охлаждающей и уплотняющей воды;

- уровень пульсации давления и вибрации ГЦН, не приводящий к нарушениям в насосе и связанных с ним системах;

- отсутствие выхода радиоактивного теплоносителя в атмосферу через уплотнение вала насоса;

- отсутствие летящих предметов при разрушении насоса, представляющих опасность для РУ, во всех проектных режимах;

- отсутствие межкристаллитной коррозии, так как материалы деталей изготовлены из аустенитных марок сталей; химсостав материалов деталей, соприкасающихся с теплоносителем, не содержит специальных добавок кобальта и других элементов, которые образуют долгоживущие изотопы в активной рабочей среде;

- ремонтпригодность – возможность разборки и замены составных частей; при выходе из строя большинства узлов ГЦН и их элементов восстановление может быть произведено как путем замены отдельных элементов, так и всего узла, причем предусмотрены соответствующие запасные инструменты, приборы и приспособления для ремонта;

- возможность ремонта электродвигателя и его элементов без разборки насоса, средняя наработка до отказа – не менее 18 000 ч, средний ресурс между средними ремонтами не менее 16 000 ч, средний срок службы – до списания.

Основные технические характеристики ГЦН-195М представлены в табл. 5.1.

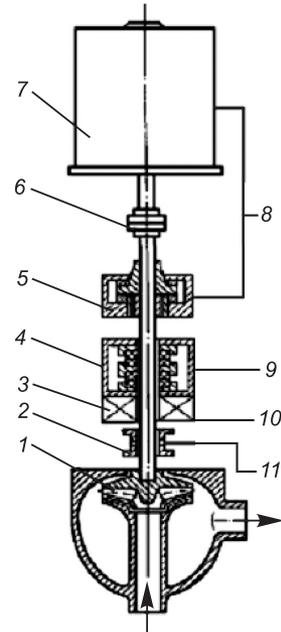


Рис. 5.3. Схема ГЦН с механическим уплотнением вала:

1 – проточная часть насоса; 2 – нижний радиальный подшипник; 3 – холодильник корпуса уплотнения вала; 4 – блок уплотнения вала; 5 – радиально-осевой подшипник; 6 – соединительная муфта; 7 – электродвигатель; 8 – система смазки; 9 – система питания уплотнения вала; 10 – система охлаждения; 11 – система питания радиального подшипника

## Основные технические характеристики ГЦН-195М

Технические характеристики	Значение
1	2
<b><i>Насосная часть</i></b>	
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	20 000
Давление на всасывании, МПа	15,6
Напор, МПа	0,675 ±0,25
Количество оборотов, об/мин	1000
Расчетная температура, °С	350
Расчетное давление на прочность, МПа	18
Потребляемая мощность на холодной/горячей воде, кВт	7000/5300
Время разгона ротора насоса при пуске, с, не более	12
Общая подача воды на уплотнение во всех режимах работы, м <sup>3</sup> /ч, не более	2
Превышение давления уплотняющей воды над давлением на напоре ГЦН, МПа	0,5–0,8
Температура уплотняющей воды, °С, не более	70
Количество механических примесей в уплотняющей воде, г/л	0,03
Протечки уплотняющей воды в первый контур во всех режимах работы, м <sup>3</sup> /ч, не более	0,75
Организованные протечки уплотняющей воды после основных ступеней уплотнения во всех режимах работы, м <sup>3</sup> /ч, не более	1,2
Свободный слив уплотняющей воды через концевую ступень уплотнения во всех режимах работы, м <sup>3</sup> /ч, не более	0,05
Избыточное давление в линии отвода уплотняющей воды, МПа	0,09–0,2
Расход технической воды на 4 ГЦН, м <sup>3</sup> /ч, не менее	486,0
Подача масла на смазку ГЦН, м <sup>3</sup> /ч	26,5–28,5 масло Т-22 или Тп-22
Подача масла на электродвигатель ГЦН, м <sup>3</sup> /ч	5–6
Температура масла на входе в упорный подшипник, °С	20–46
Давление масла в полости упорного подшипника, МПа	0,06–0,125
Расход воды промконтура на один ГЦН, м <sup>3</sup> · ч, не менее	40
Давление воды промконтура в ГЦН, МПа	0,6
Температура воды промконтура на входе в ГЦН, °С	33
Гидравлическое сопротивление ГЦН по среде промконтура, МПа	0,25
Напряжение питания электромагнита разгрузки упорного подшипника ГЦН, В	220

1	2
Мощность, потребляемая электромагнитом, кВт	3
Объем масла, заливаемого в торсионную муфту, л	5,5
Направление вращения вала (если смотреть со стороны электродвигателя)	Против часовой стрелки
Масса установки на АЭС, т	140
В том числе масса электродвигателя ВАЗ 215/109-6АМО5, т	48
<b>Электродвигатель ВАЗ 215/109-6АМО5</b>	
Мощность номинальная, МВт	8
Напряжение номинальное, кВ	6,3
Ток номинальный, А	880
Ток статора при работе насоса на «горячей» воде, А	605
Ток статора при работе насоса на «холодной» воде, А	773
Коэффициент полезного действия, %	96
Количество полюсов, шт.	6
Диаметр ротора, мм	1090
Диаметр статора наружный, мм	2150
Допустимое время перерыва подачи масла при работающем двигателе, с	15
Время выбега двигателя (сцепленного с выемной частью) без подачи масла, мин, не менее	5
Время выбега электродвигателя, расцепленного с выемной частью ГЦН, мин, не менее	25
Скорость вращения, об/мин	1000
Момент инерции ротора с маховиком, кгс · см	7250
Номинальная частота питающей сети, Гц	50
Допустимое количество пусков в год, не более	30
Количество пусков в первый год эксплуатации	100
Мощность электронагревателя в двигателе, кВт	5
Количество электронагревателей в двигателе, шт.	2
Напряжение питания электронагревателей двигателя, В	110
Соппротивление изоляции обмоток электродвигателя, МОм	6
<b>Вспомогательный электронасос ВЦЭН-3 15</b>	
Тип насоса	Моноблочный герметичный

1	2
Производительность насоса, м <sup>3</sup> /ч	6
Напор, МПа	0,5
Скорость вращения, об/мин	2850
Потребляемая мощность, кВт	2,5
Напряжение номинальное, В	380
Ток рабочий, А	8

**Общее устройство главного циркуляционного насоса ГЦН-195М.** Конструктивно ГЦН-195М представляет собой агрегат, состоящий из насоса с антиреверсным устройством, электродвигателя ВАЗ 215/109-6АМ05 и вспомогательных систем.

Основной несущей конструкцией насоса является нижняя проставка с тремя кронштейнами. На верхний фланец нижней проставки устанавливается сварная верхняя проставка, на которую крепится приводной двигатель с маховиком.

Нижняя проставка нижним фланцем соединяется с помощью шпилек с улиткой ГЦН и уплотняется относительно улитки медной прокладкой. В свою очередь, кронштейны нижней проставки опираются на шаровые опоры, установленные на перекрытие отметки 19,2 гермооболочки, что позволяет ГЦН перемещаться, следуя за температурными подвижками трубопроводов первого контура (примерно на 80 мм в любом горизонтальном направлении).

Для обеспечения герметичности главного разъема между улиткой насоса и выемной частью ГЦН устанавливается плоская прокладка из стали 12Х18Н9Т. Уплотнение разъема производится путем затяжки шпилек (30 шт.). Конструкция шпилек позволяет определять их удлинение при вытяжке. В главном разъеме установлено вторичное уплотнение сальникового типа (асбесто-резиновая прокладка), которое уплотняется через отжимные болты и отжимное кольцо и служит для организации камеры контроля протечек через основную прокладку. Из образованной камеры выведена трубка контроля плотности главного разъема ГЦН. Для обеспечения требуемого выбега ГЦН при обесточивании АЭС приводной двигатель снабжен массивным маховиком, представляющим собой стальную отливку диаметром 2150 мм, толщиной 300 мм, массой 5100 кг.

Соединение ГЦН (улитки) с трубопроводом Ду850 первого контура осуществляется на сварке, а с трубопроводами вспомогательных систем – на фланцах.

В качестве подшипниковых опор вала ГЦН использованы радиально-осевой и радиальный гидростатический подшипники.

Ротор приводного асинхронного двигателя и вал насоса соединены через торсионный вал с рабочим колесом зубчатой муфтой (рис. 5.4).

Улитка ГЦН предназначена для организации подвода к рабочему колесу теплоносителя первого контура, установки и уплотнения выемной части ГЦН и является неотъемлемой частью главного циркуляционного контура.

Главный циркуляционный насос ГЦН-195М состоит из следующих основных частей (рис. 5.5): улитка насоса (гидравлическая часть), выемная часть (насос), торсионная муфта, нижняя проставка, верхняя проставка, опорное устройство, электродвигатель, биологическая защита.

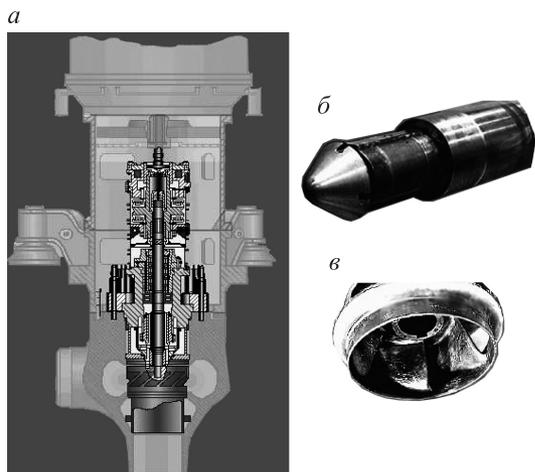


Рис. 5.4. Вал с рабочим колесом:  
 а – общий вид; б – вал с рабочим и вспомогательным колесами; в – рабочее колесо

Улитка представляет собой цельнолитой корпус из нержавеющей стали 06Х12НЗДЛ мартенисто-аустенитного класса с приварными коваными переходниками из стали 10ГН2МФА во всасывающем и напорном патрубках; внутренняя поверхность переходников наплавляется антикоррозионной наплавкой из стали 08Х18Н10Т. Отводной канал в улитке выполнен в виде спирали, переходящей в диффузор.

Нижняя проставка является основной несущей конструкцией насоса, изготовлена с тремя кронштейнами и биологическим кольцом, совмещенными с проставкой. Проставка нижним фланцем крепится к улитке насоса, а на ее верхний фланец устанавливаются радиальные штифты, обеспечивающие центровку агрегата. Она имеет три окна для трубопроводов вспомогательных систем насоса. Кронштейны предназначены для передачи веса на опорные устройства насоса.

Опорные шаровые устройства (рис. 5.6) позволяют ГЦН свободно перемещаться при температурном расширении трубопроводов ГЦК в направлении продольной и поперечной оси на 80 мм. Каждый ГЦН установлен на три шаровые опоры. Усилие на перемещение ГЦН-195М должно быть не более 80 000 Н.

Каждая опора состоит из нижней плиты, на которую уложена плита из высокопрочной стали 9ХВГ, удерживаемая от смещения фланцем; шаров, разделенных сепараторами; обоймы,

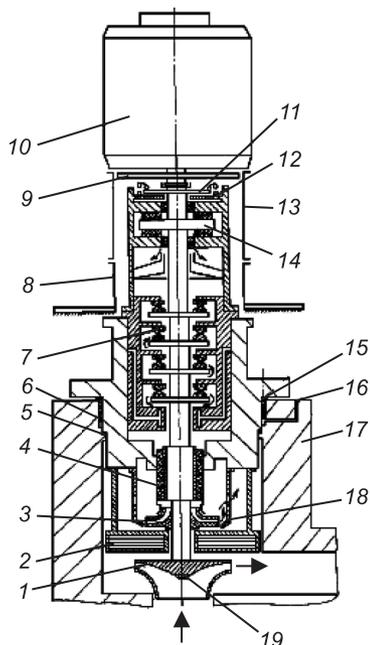


Рис. 5.5. Общее устройство ГЦН-195М:  
 1 – рабочее колесо; 2 – тепловой барьер; 3 – импеллер; 4 – нижний подшипник; 5 – стальная прокладка; 6 – резиновый сальник; 7 – блок торцевого уплотнения; 8 – нижняя проставка; 9 – маховик; 10 – электродвигатель; 11 – разгрузочный диск; 12 – электромагнит; 13 – верхняя проставка; 14 – главный упорный подшипник; 15 – нажимное кольцо; 16 – контроль плотности ГР; 17 – улитка ГЦН; 18 – тепловой экран; 19 – обтекатель

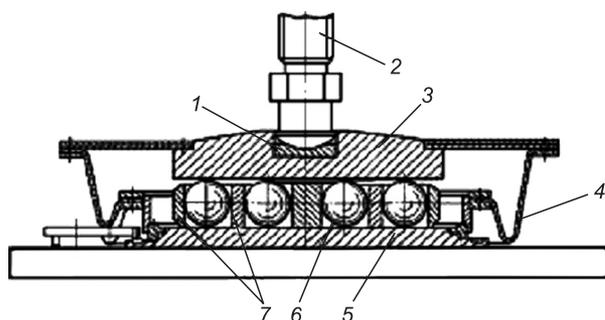


Рис. 5.6. Устройство шаровой опоры ГЦН:

1 – подпятник; 2 – винт; 3 – верхняя плита; 4 – защитный кожух; 5 – нижняя плита; 6 – шар; 7 – сепараторы

в которую вставлена плита из высокопрочной стали 9ХВГ, а сверху – резиновая прокладка; кожуха; верхней плиты; резьбовой втулки; опорного винта. Резьбовая втулка устанавливается в расточку кронштейна нижней проставки и крепится винтами. Для уменьшения момента трения при регулировке поджатия опоры под опорный винт установлен упорный шарикоподшипник. Полости шаровой опоры заполняются консистентной жировой смазкой 1-13 ГОСТ 1631–61. Положение ГЦН-195М по высоте регулируется с помощью опор ГЦН-195М допускает работу при отклонении вертикальной оси не более 1/1000.

Улитка ГЦН также имеет три цапфы (рис. 5.7), конструкция которых обеспечивает присоединение замков с вертикальными тягами (для восприятия сейсмических нагрузок и нагрузок от разрыва всасывающего патрубка) и горизонтальными гидроамортизаторами (для восприятия сейсмических нагрузок). На каждом ГЦН установлено по три аварийные тяги диаметром 170 мм, препятствующие перемещению ГЦН вверх при разрыве главного циркуляционного трубопровода. Верхним концом тяги шарнирно закреплены к корпусу улитки посредством замка на цапфе улитки ГЦН,

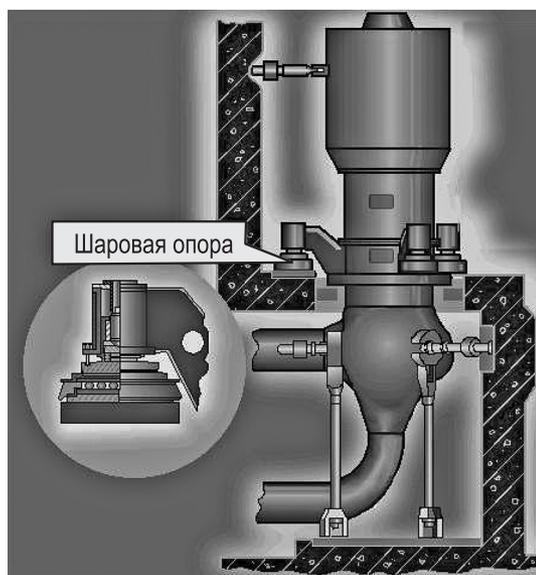


Рис. 5.7. Транспортная сборка ГЦН-195М

нижним – к неподвижному упору, приваренному к закладной детали. На нижнем конце тяга имеет резьбу, на которую навернуты сферическая гайка и контргайка. Между сферической гайкой и сферической поверхностью упора имеется зазор, соответствующий двум оборотам гайки для возможности осуществления термических перемещений ГЦН.

Для восприятия сейсмических нагрузок раскрепление двигателя выполнено гидроамортизаторами. На каждом ГЦН устанавливается по пять гидроамортизаторов с нагрузкой 170 тс: три гидроамортизатора (расположены под углом 120°) воспринимают усилия от улитки ГЦН и два – от электродвигателя.

Верхняя проставка предназначена для установки электродвигателя. В ней установлен поддон маховика электродвигателя, препятствующий выбросу масла из нижней крестовины подшипника электродвигателя. Проставка имеет три окна, которые закрываются сетчатыми щитками.

Биологическая защита: для защиты от нейтронного прострела в районе улитки насоса установлено кольцо толщиной 315 мм из стали 351-1. Его перекрывает биологическое кольцо из стали 08ГДНФЛ-Ш толщиной 300 мм, совмещенное с нижней проставкой насоса. Перекрывающее биологическое кольцо служит также основанием для установки кронштейнов нижней проставки.

Торсионная муфта предназначена для передачи крутящего момента от электродвигателя к насосу. В отличие от жесткого соединения, торсионная муфта обеспечивает значительно большую несоосность валов насоса и электродвигателя. Верхний конец торсиона входит в зацепление с ротором электродвигателя, нижний с помощью эвольвентных шлицов входит в зацепление эвольвентными шлицами с обоймой, которая связана с упорным гребнем также с помощью эвольвентных шлицов.

Крутящий момент передается торсионом через обойму на упорный гребень и далее упорным гребнем через шлицевую втулку на вал. Торсион нижним концом подпружинен пружиной. Материал торсиона – сталь 36Х2Н2МФА. Нижняя рабочая полость торсионной муфты заливается турбинным маслом в объеме 5,5 л. Для заливки масла и удаления воздуха на торсионной муфте выполнены отверстия с пробками.

Следует также отметить, что первоначально в головных насосах ГЦН-195 пятого блока Нововоронежской АЭС торсион был выполнен разборным: вал торсиона шлицами устанавливался во втулку ротора электродвигателя и в центральное отверстие в шестерне, а затем с помощью гайки торсион фиксировался в шестерне. После двух случаев выхода из строя торсиона на ГЦН-1 и ГЦН-2 при проведении пусконаладочных работ на Нововоронежской АЭС его конструкция была изменена: разработана и изготовлена цельнокованая конструкция вала-шестерни, которая по сей день применяется на ГЦН-195 и ГЦН-195М.

Выемная часть насоса ГЦН-195М представляет собой комплекс узлов, которые вместе составляют транспортную сборку. На корпусе выемной части имеется фланец, посредством которого она устанавливается в улитку насоса, образуя его главный разъем. При проведении ревизии такая компоновка выемной части позволяет после извлечения из улитки насоса установить ее в контейнер и транспортировать в мастерскую на спецкорпусе.

Выемная часть ГЦН-195М состоит из следующих деталей и узлов (рис. 5.8): корпуса, вала, нижнего подшипника скольжения, блока торцового уплотнения вала, опорно-упорного подшипника, антиреверсного устройства, электромагнитного разгрузочного устройства, рабочего колеса, вспомогательного колеса, теплового экрана, теплового барьера.

Корпус выемной части представляет собой сварную конструкцию из поковок стали 08Х18Н10Т и служит для установки на нем блока уплотнения вала, нижнего под-

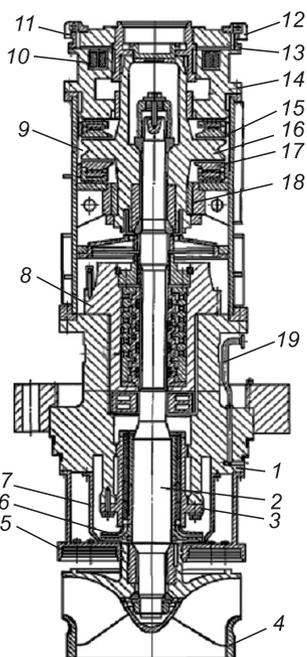


Рис. 5.8. Устройство выемной части ГЦН-195М:

1 – корпус выемной части; 2 – вал; 3 – радиальный подшипник; 4 – рабочее колесо; 5 – тепловой барьер; 6 – импеллер; 7 – тепловой экран; 8 – блок торцового уплотнения вала; 9 – корпус верхнего подшипника; 10, 13 – электромагнитное разгрузочное устройство; 11 – храповое колесо; 12 – упоры; 14, 18 – радиальные подшипники; 15 – верхние колодки; 16 – упорный гребень; 17 – нижние колодки; 19 – контроль плотности главного разъема

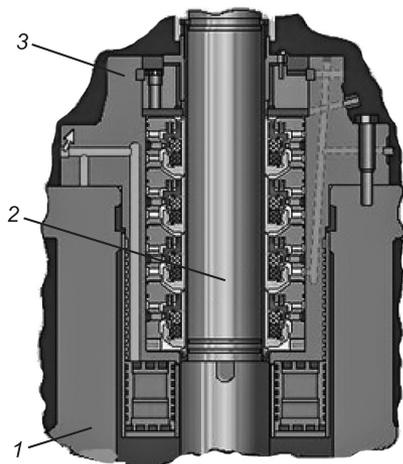


Рис. 5.9. Блок торцового уплотнения вала: 1 – корпус выемной части; 2 – вал; 3 – корпус блока торцового уплотнения

шипника скольжения, теплового барьера и теплового экрана, нажимного фланца главного разъема и прокладок вторичного уплотнения главного разъема.

На верхнем фланце корпуса имеются штуцера свободного слива уплотняющей воды, подвода и отвода воды промконтура в холодильник уплотнения вала, подвода и отвода воды автономного контура, дренажа протечек главного разъема, дренажа протечек верхнего разъема, свободного слива воды отмывки концевой ступени.

Вал (из стали 14X17H2) вращается в двух подшипниках: верхнем опорно-упорном подшипнике и нижнем подшипнике скольжения. На нижнем конце вала по ходовой посадке устанавливаются две втулки, работающие по вкладышам из графитофторпластовой пластмассы нижнего подшипника скольжения. Для предохранения от поворота втулок относительно вала установлена шпонка. На обоих концах вала имеются эвольвентные шлицы для посадки рабочего колеса и гребня упорного подшипника. Такое соединение обеспечивает как надежность установки колеса и гребня на валу, так и их удобную сборку и разборку. Вал насоса динамически балансируется совместно с рабочим колесом и гребнем упорного подшипника.

Блок торцовых уплотнений вала (рис. 5.9) служит для предотвращения протечек теплоносителя из первого контура по валу. Он состоит из четырех ступеней уплотнения, каждая из которых включает роторный элемент, закрепленный на валу, и статорный элемент, закрепленный в корпусе. Блок торцовых уплотнений вала объединяется с корпусом нижнего гидродинамического подшипника и устроен из двух основных дросселирующих ступеней торцового уплотнения, разделительной и концевой ступеней.

В качестве материала пар трения торцовых уплотнений ГЦН используется силицированный графит типа СГП-05, получаемый пропиткой пористого графита кремнием. В процессе пропитки в результате взаимодействия кремния с углеродом образуется карбид кремния. Часть кремния и графита остается несвязанной, поэтому силицированный графит представляет собой трехкомпонентную систему. Карбидная фаза обуславливает высокие физико-механические показатели и химическую стойкость, а свободный графит – анти-

фрикционные свойства. Недостатком силицированного графита является хрупкость, а также то, что он подвергается обработке только алмазным кругом на шлифовальных станках.

Корпус уплотнения со встроенным холодильником выполнен сварным из стали 12Х18Н10Т. В корпусе сделаны многозаходная спиральная канавка для прохода охлаждающей воды промконтура (с расходом 3 м<sup>3</sup>/ч) и тепловой барьер для снижения температуры в зоне уплотнения как по валу насоса, так и по корпусу. Также в нем есть каналы с выходными штуцерами для подвода и отвода запирающей воды, подвода воды отмытки бора, дросселя первой ступени, дросселя второй ступени со штуцером замера давления между торцовыми ступенями.

При температуре теплоносителя первого контура более 50 °С подача промежуточного контура ГЦН на встроенный холодильник корпуса уплотнения вала обязательна для обеспечения работы уплотнений с допустимой температурой.

Рассмотрим подробнее конструкцию ступеней блока торцового уплотнения ГЦН. Ступени торцового уплотнения устанавливаются непосредственно на вал ГЦН, а на защитную втулку, которая, в свою очередь, крепится на вал насоса.

На рис. 5.10 показан разрез 1/4 блока торцового уплотнения вала ГЦН-195М. Основные торцовые дросселирующие ступени одинаковы и состоят из двух элементов: статорного (не вращающегося) и роторного (вращающегося). Статорный элемент может перемещаться по оси и поджиматься к роторному элементу пружинами. Ограничительный штифт удерживает статорный элемент от прокручивания. Для устранения перетечек воды по зазору между корпусом и статорным элементом установлена резиновая O-образная прокладка.

Статорный элемент состоит из корпуса, в который вставлено кольцо из силицированного графита типа СГП-05, удерживаемое в корпусе установочным кольцом. Уплотнение кольца из силицированного графита в корпусе статорного элемента осуществляется резиновым O-образным кольцом. Опорные и торцовые поверхности кольца и корпуса взаимно притираются.

Роторный элемент состоит из корпуса, в который вставлено кольцо из силицированного графита, удерживаемое от выпадения при сборке и разборке установочным кольцом. Уплотнение кольца из силицированного графита в корпусе осуществляется O-образным резиновым кольцом.

Стыковочные торцовые поверхности кольца из силицированного графита и корпуса взаимно притираются. Промежуточные втулки с металлическими корпусами роторов уплотняются с помощью резиновых прокладок.

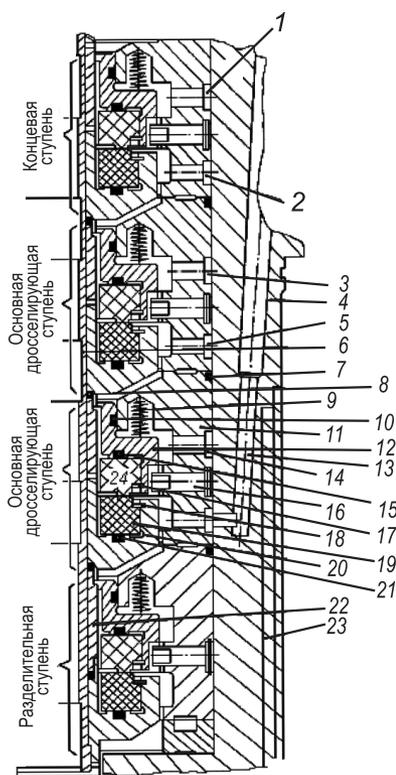


Рис. 5.10. Разрез 1/4 блока уплотнения:  
 1 – организованный слив запирающей воды; 2, 5 – запирающая вода в концевую и во вторую ступени соответственно; 3, 14 – запирающая вода из второй и первой ступеней соответственно; 4 – корпус блока торцового уплотнения; 6 – защитная втулка; 7, 8 – резиновая прокладка; 9 – пружина; 10, 15, 21 – резиновая O-образная прокладка; 11 – корпус дросселирующей ступени; 12, 20 – корпус статорного и роторного элементов соответственно; 13 – запирающая вода в уплотнение; 16 – штифт; 17, 18 – установочное кольцо; 19, 24 – графитовое кольцо статорного и роторного элементов уплотнения соответственно; 22 – промежуточная втулка; 23 – холодильник корпуса блока уплотнения

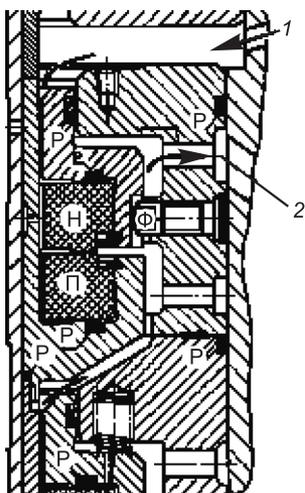


Рис. 5.11. Конструкция концевой ступени уплотнения:

1 – дистиллат на отмывку концевой ступени; 2 – организованный слив запирающей воды; Н – неподвижный элемент; П – подвижный элемент; Р – резиновое кольцо; Ф – фиксирующий штифт

Разделительная ступень уплотнения, как и гидростатические ступени, состоит из статорного и роторного элементов, уплотняющего кольца и пружин.

Статорный элемент разделительной ступени находится в непосредственном контакте с роторным. Уплотняющее графитовое кольцо при подаче запирающей воды работает на растяжение (в основных ступенях – на сжатие). Для обеспечения смачивания трущихся поверхностей рабочий пояска кольца из силицированного графита выполнен в виде эллипса. При такой конструкции уплотнения при перепаде давления до 2,0 МПа протечка запирающей воды в контур не превышает обычно 100 л/ч.

Концевая ступень уплотнения (рис. 5.11) также состоит из корпуса, статорного и роторного элементов, пружин и уплотняющего кольца. На всех режимах работы уплотнения статорный элемент находится в непосредственном контакте с роторным элементом уплотнения. При нормальной работе насоса ( $t = 280\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 16,0\text{ МПа}$ ) протечка не превышает 50 л/ч.

Для надежного предотвращения протечек воды первого контура из насоса через каналы в корпусе в полость уплотнения от системы подпитки-продувки подается очищенная и охлажденная запирающая вода

под давлением, превышающим давление на нагнетании ГЦН на 0,5–0,8 МПа. Для очистки воды от возможных механических загрязнений частицами размером более 10 мкм запирающая вода проходит через гидроциклоны грубой и тонкой очистки. Отделение механических частиц в гидроциклоне происходит под действием центробежных сил, возникающих при закручивании струи воды, входящей в гидроциклон с определенной скоростью по касательной к его цилиндрической части. При этом частицы отбрасываются к стенке и через специальное отверстие попадают в полость «грязного» слива. В центре вихря образуется зона очищенной жидкости, которая через патрубков подается на уплотнение ГЦН.

Запирающая вода через канал (см. рис. 5.10) в корпусе уплотнения подается в полость между разделительной ступенью и основной торцевой. Вход запирающей воды в неподвижную обойму ступени выполнен в виде двух кольцевых проточек с отверстиями. Часть уплотняющей воды проходит через разделительную ступень в первый контур.

Другая часть запирающей воды поступает на первую основную ступень и байпасную дроссельную шайбу. При подаче запирающей воды в уплотнение она отжимает статорный элемент уплотнения на величину рабочего зазора (10 мкм), протекает через него, обеспечивая смачивание рабочих поверхностей и протечку небольшой части запирающей воды через зазор. Отжатие статорного элемента происходит при давлении запирающей воды 1,5–2,0 МПа.

При поступлении на первую ступень основная часть запирающей воды проходит через проточку и каналы в корпусе уплотнения через выносной байпасный дроссель, понижающий давление до половины, и поступает в проточку второй основной ступени. Абсолютно аналогично запирающая вода будет проходить через рабочие поверхности и проточку второй ступени. Для контроля работы уплотнения показания давления за первой дросселирующей ступенью выводится на БЩУ.

Из полости между второй основной ступенью и концевой ступенью осуществляется слив запирающей воды в деаэратор подпитки. Часть запирающей воды, подаваемой в полость над разделительной ступенью (до 0,75 м<sup>3</sup>/ч), проходит через зазор между трущимися поверхностями графитовых колец разделительной ступени и может попадать в первый контур.

При нормальной работе уплотнения давление между основными торцовыми ступенями распределяется примерно поровну, за счет вынесенных байпасных дросселей. В случае выхода из строя одной из торцовых ступеней оставшаяся ступень будет дросселировать полный перепад давления, при этом расход организованных протечек возрастет в 2 раза. В случае выхода из строя обеих торцовых ступеней полный перепад давления дросселирует концевая ступень уплотнения при обязательном отключении ГЦН и закрытии вентилей на линии свободного слива запирающей воды.

Нужно отметить, что уплотнение вала ГЦН-195М, выполненное на торцовых ступенях, обладает высокой эксплуатационной надежностью, что подтверждает опыт эксплуатации этих ГЦН. Установка дроссельных шайб основных ступеней вне блока уплотнения упростила и ускорила пусконаладочные и ремонтные работы по ГЦН.

Опорно-упорный подшипник предназначен для восприятия осевых и радиальных усилий, действующих на вал (рис. 5.12).

Опорно-упорный подшипник включает:

- корпус;
- сливной поддон;
- упорный гребень;
- верхние и нижние колодки;
- разнесенные опорные подшипники;
- верхнее уплотнение вала по маслу;
- поддон сбора протечек и аварийного перелива масла.

Корпус опорно-упорного подшипника ГЦН-195М выполнен сварным из двух частей и не имеет вертикального разъема по высоте (рис. 5.13). Это изменение конструкции корпуса подшипника по сравнению с ГЦН-195 направлено на уменьшение

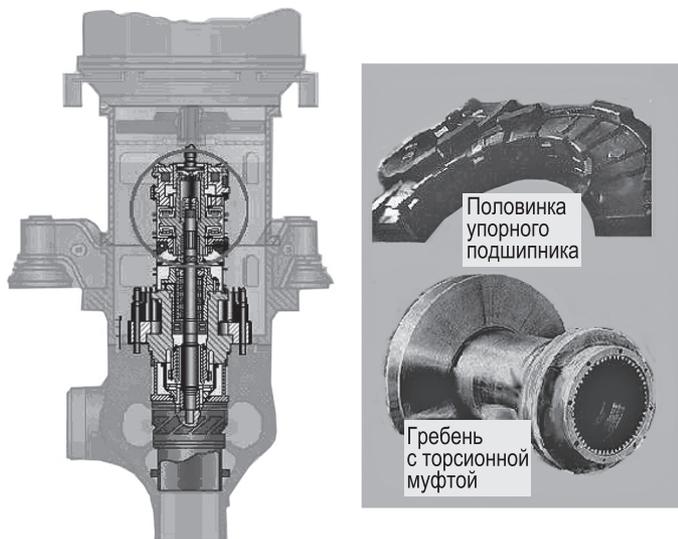


Рис. 5.12. Опорно-упорный подшипник с электромагнитной разгрузкой и антиреверсным устройством

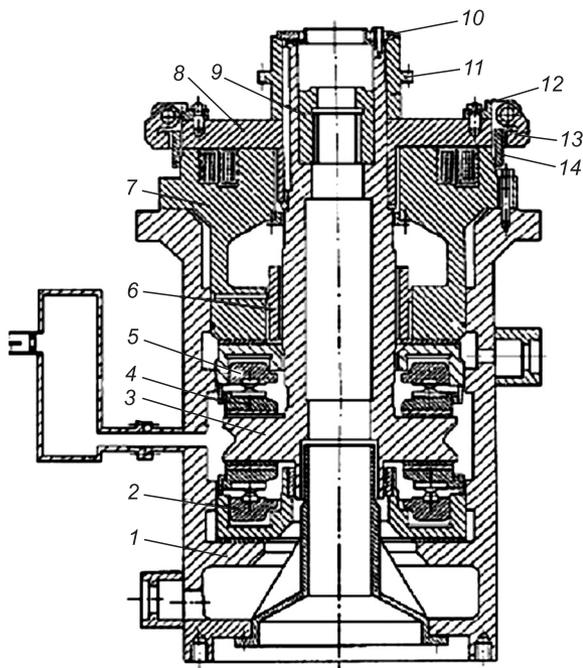


Рис. 5.13. Опорно-упорный подшипник ГЦН:

1 – корпус подшипника; 2 – нижнее упорное кольцо; 3 – упорный гребень; 4 – упорная колодка; 5 – верхнее упорное кольцо; 6 – радиальный подшипник; 7 – корпус электромагнитного устройства; 8 – разгрузочный диск; 9 – втулка; 10 – кольцо; 11 – муфта; 12 – прокладка; 13 – цапфы (упоры); 14 – храповое колесо

возможных протечек масла по подшипнику. Упорный гребень выполнен заодно с шейками радиальных подшипников, насажен на вал насоса и вращается между верхним и нижним упорными кольцами подшипника, воспринимающими осевые усилия вала.

В упорных кольцах закреплены упорные колодки, изготовленные из стали 10 и залитые баббитом Б-83 толщиной 3 мм. Осевые усилия, действующие на вал насоса, через упорный подшипник передаются на упорные колодки, которые опираются на рычажную балансирующую систему типа «Кингсбери» (названа по имени немецкого инженера), обеспечивающую равномерное распределение нагрузки между колодками. Упорные колодки выполнены составными.

Принцип работы смазываемого минеральным маслом упорного подшипника с рычажной уравнивающей системой типа «Кингсбери» (рис. 5.14) можно объяснить следующим образом: диск пяты опирается на восемь колодок, установленных на верхние уравнивающие рычаги, которые, в свою очередь, двумя заплечиками держатся на заплечиках нижних уравнивающих рычагов. Последние цилиндрическими выступами, расположенными радиально по середине, опираются на плоскость обоймы. Таким образом, упорные колодки в ком-

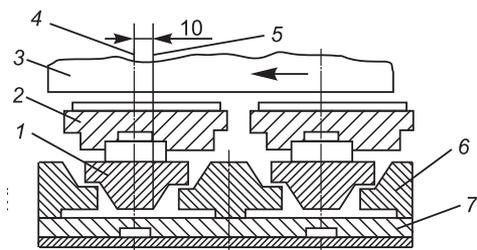


Рис. 5.14. Упорный подшипник:

1 – верхний уравнивающий рычаг; 2 – колодка; 3 – диск пяты; 4 – центр упора колодок; 5 – геометрическая ось симметрии колодки; 6 – нижний уравнивающий рычаг; 7 – обойма опорная

плекте с верхними и нижними рычагами представляют собой замкнутую по кругу рычажную систему.

Для создания масляного клина между упорным диском пяты и колодками центры упоров колодок смещены от оси симметрии рычагов на расстояние и в сторону вращения.

Если некоторые из упорных колодок по каким-либо причинам выйдут из контакта с пятой, то остальные колодки через рычажную систему будут перемещать их до тех пор, пока осевые усилия, действующие на все колодки, не станут одинаковыми. Данная система распределения нагрузки между колодками хотя и представляется сложной и трудоемкой при изготовлении (производится ручная подгонка), однако обеспечивает равномерность осевой нагрузки по всем колодкам.

Упорный подшипник в насосе ГЦН-195М выполнен в одном блоке с двумя радиальными гидродинамическими подшипниками. Главные упорные подшипники (ГУП) воспринимают радиальные усилия, действующие на вал насоса, и каждый представляет собой самоустанавливающуюся втулку, залитую баббитом Б-83. Подвод масла к опорным вкладышам производится из полости упорных подушек через осевые пазы во вкладышах.

При работе ГЦН-195М на номинальных оборотах в ГУП выделяется 140–150 кВт энергии. Это требует подачи больших объемов масла не столько для смазки, сколько для охлаждения подшипника (подача масла на ГУП – 22 м<sup>3</sup>/ч, а на двигатель – 5–6 м<sup>3</sup>/ч).

Смазка и охлаждение опорно-упорного подшипника производится маслом Т-22С (Тп-22), подаваемым под давлением маслосистемой ГЦН. Нормальное давление масла в полости ГУП составляет 0,6–1,25 кгс/см<sup>2</sup>, при отклонении от него ГЦН аварийно отключается действием защиты. Температура подаваемого на ГЦН масла должна быть в пределах 20–47 °С, при ее переходе выше уставки ГЦН аварийно отключается действием защиты. Жесткие требования по поддержанию давления и температуры масла, подаваемого на ГЦН, продиктованы условиями создания и поддержания масляных клиньев в подшипниках. Транспортное время подачи масла от маслонасосов и маслоохладителей к подшипникам ГЦН составляет около 1 мин, а термоконтроль по температуре масла находится на входе в каждый ГЦН. Это необходимо учитывать при регулировании температуры масла, подаваемого на ГЦН.

Масло, проходя через зазор опорных подшипников, стекает в сливной поддон, а с упорного подшипника – в сливной бачок, откуда через дроссельное отверстие по переливной трубе Ду80 поступает в сливной трубопровод Ду150. При этом давление масла дросселируется до атмосферного.

При работающем ГЦН циркуляция воды в системе автономного контура обеспечивается вспомогательным рабочим колесом (импеллером) – центробежного типа, с закрытыми цилиндрическими лопатками. Оно установлено за рабочим колесом по посадке движения с помощью гайки, застопоренной шайбой на вал основного насоса. Расположение импеллера на валу под нижним подшипником служит дополнительным барьером для предотвращения попадания горячей воды в нижний подшипник. На неработающем ГЦН циркуляция воды обеспечивается специальным герметичным насосом типа ВЦЭН-315, установленным в обвязке ГЦН.

Тепловой барьер (пакет пластин) выемной части служит для экранирования теплового потока со стороны «горячей» среды первого контура от охлажденной зоны автономного контура за колесом насоса. Тепловой барьер испытывает значительные нагрузки из-за наличия большого температурного перепада (+288 °С в проточной части ГЦН и +40...+60 °С в автономном контуре). На случай усталостного и температурного разрушения шпилек крепления теплового барьера к корпусу выемной части ниже его расположения во время реконструкции ГЦН были приварены три страховочных упора. Они не позволяют теплового барьеру при разрушении крепления упасть на рабочее колесо (что имело место на Запорожской АЭС).

Тепловой экран защищает вкладыш нижнего подшипника скольжения от прямого воздействия горячей воды первого контура при возможном ее забросе в зону автономного контура в период полного обесточивания блока.

Электромагнитное разгрузочное устройство предназначено для частичной компенсации осевого усилия, действующего на упорный подшипник. Оно состоит из разгрузочного диска и корпуса с катушкой. Корпус электромагнита – цельнокованный, изготовлен из магнитной углеродистой стали, установлен на корпус опорно-упорного подшипника и одновременно служит для него крышкой. Имеется подвод и отвод охлаждающей технической воды к холодильнику, установленному в корпусе электромагнита. В корпус холодильника укладываются две электрокатушки, последовательно соединенные между собой. Катушки изолированы от корпуса кремнийорганической изоляцией, класс изоляции – Н. Электромагнит питается постоянным током, питание подводится к клеммнику, установленному на корпусе электромагнита.

Разгрузочный диск закреплен на обойме, связанной с гребнем ГУП, и передает ему действующее вниз усилие 28–30 тн, создаваемое электромагнитом. При неработающем разгрузочном устройстве возникающее осевое усилие приводит к «всплыванию» вала ГЦН и передаче больших нагрузок на верхние колодки ГУП. Поэтому разрешается работа ГЦН при давлении свыше 11,0 МПа не более 5 ч при неработающем электромагнитном разгрузочном устройстве.

С целью уменьшения нагрузки на антиреверсное устройство рекомендуется ограничение числа пусков и времени работы при давлении в первом контуре менее 2,0 МПа. При отключении ГЦН, работающего при давлении в первом контуре до 4,0 МПа, электромагнит должен быть включенным. Это связано с тем, что при таком давлении сила, действующая на вал ГЦН со стороны первого контура, уравнивает массу вала, поэтому сила трения между гребнем и колодками ГУП незначительна. Таким образом, сила динамического воздействия потока теплоносителя на рабочие колеса неработающих ГЦН будет восприниматься только кулачками их антиреверсных устройств. При запитке электромагнитов разгрузки отключенных ГЦН гребни ГУП будут прижиматься к нижним упорным колодкам, т.е. сила воздействия потока теплоносителя на рабочие колеса неработающих ГЦН будет компенсироваться с помощью кулачков антиреверсных устройств и трением между гребнем и упорными колодками ГУП. Следовательно, нагрузка на кулачки становится меньше.

Рабочее колесо предназначено для перекачивания теплоносителя первого контура от всасывающего патрубка насоса к напорному. Рабочее колесо – трехлопастное, центробежное, закрытого типа, с лопатками двойной кривизны, выполнено из стали 10X18H9ТЛ. В ступицу рабочего колеса запрессована втулка, которая имеет центрирующие конусы, что обеспечивает беззазорную посадку рабочего колеса на валу независимо от температуры рабочей среды. Рабочее колесо устанавливается на валу с помощью эвольвентных шлицов, выполненных во втулке, и в осевом направлении крепится гайкой елевой резьбой. На нижнем конце вала вплотную к рабочему колесу установлен обтекатель, поджимаемый к рабочему колесу болтом.

## **5.2. Главный циркуляционный электронасос ВВЭР-440**

Главный циркуляционный насос ВВЭР-440 предназначен для создания циркуляции теплоносителя в первом контуре реакторной установки.

В основу проекта ГЦЭН-310 положен принцип обеспечения его герметичности по отношению к внешней среде и выполнения им своих функций в объеме, необхо-

димом для обеспечения надежной циркуляции теплоносителя в первом контуре АЭС при нормальной эксплуатации.

В качестве главного циркуляционного насоса на АЭС применен ГЦЭН-310, изготовленный ОАО «Кировский завод» (г. Санкт-Петербург). Тип насоса: вертикальный, центробежный, одноступенчатый, бессальниковый (герметичный) со встроенным асинхронным электродвигателем трехфазного переменного тока.

Схема установки насоса ГЦЭН-310 показана на рис. 5.15.

Установка насоса ГЦЭН-310 состоит из следующих основных узлов и элементов:

- главного электронасоса ГЦЭН-310, создающего циркуляцию теплоносителя в первом контуре;
- холодильника ХГЦЭН, предназначенного для охлаждения теплоносителя, циркулирующего по автономному контуру;

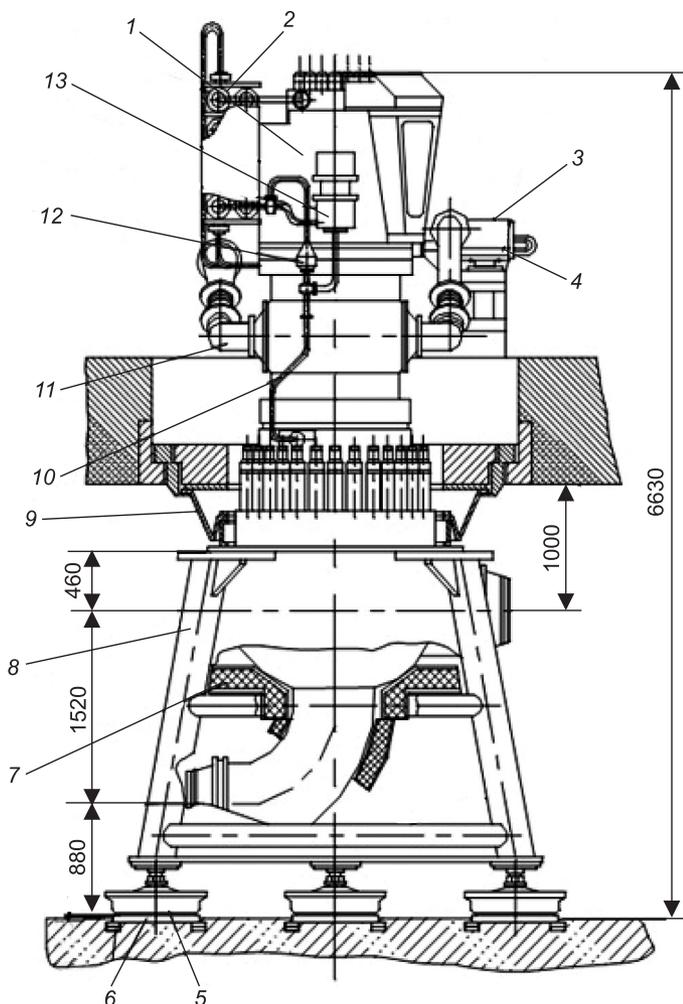


Рис. 5.15. Схема установки насоса ГЦЭН-310:

1 – ГЦЭН-310; 2 – вентилятор; 3 – рама вентилятора; 4 – холодильник; 5 – шаровые опоры; 6 – парные клинья; 7 – обшивка; 8 – опорная рама; 9 – биологическая защита; 10 – автономный контур охлаждения; 11 – система воздухоохлаждения; 12 – обратный клапан; 13 – вспомогательный электронасос

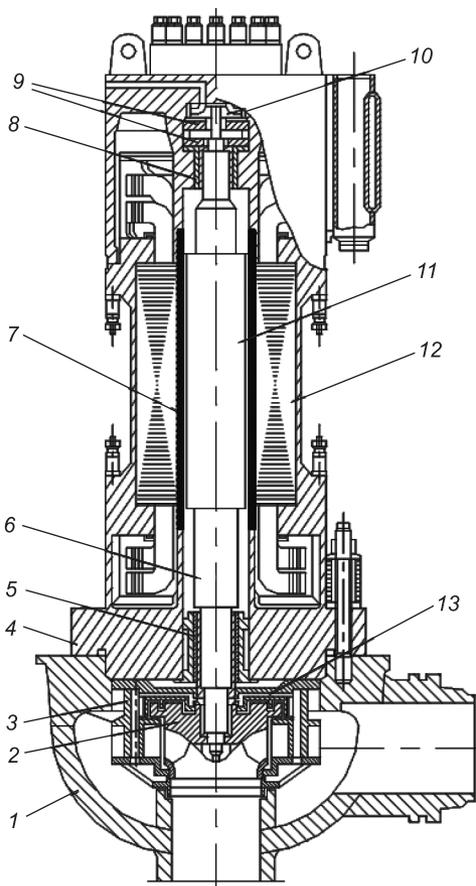


Рис. 5.16. Электронасос ГЦЭН-310:

1 – корпус насоса; 2 – рабочее колесо; 3 – направляющий аппарат; 4 – корпус электродвигателя; 5, 8 – радиальные подшипники; 6 – вал насоса; 7 – нихромовая перегородка; 9 – упорный подшипник; 10 – вспомогательное колесо; 11 – ротор электродвигателя; 12 – статор электродвигателя; 13 – разгрузочная камера

- вентилятора ЭВ-310, создающего циркуляцию воздуха через полости лобовых частей обмотки статора и систему воздухоохладителя;

- рамы для установки вентилятора и воздухоохладителя;

- системы охлаждения ГЦЭН-310, состоящей из трубопровода автономного контура, с обратным клапаном, системы охлаждения водой промежуточного контура, системы воздушного охлаждения статора;

- обшивки;

- воздухоохладителя;

- вспомогательного насоса ВЦЭН-315, создающего циркуляцию теплоносителя в автономном контуре при остановленном главном электронасосе;

- опорной рамы с шаровыми опорами, фундаментными плитами и парными клиньями;

- биологической защиты.

Рассмотрим элементы конструкции и работу электронасоса ГЦЭН-310 (рис. 5.16). Электродвигатель переменного трехфазного тока, асинхронный с короткозамкнутым ротором. Статор электродвигателя отделен от роторной полости тонкостенной нихромовой перегородкой. Роторная полость заполнена теплоносителем. Ротор вращается в подшипниках скольжения. Подшипники смазываются и охлаждаются теплоносителем автономного контура. Разгрузка ротора от осевых усилий осуществляется автоматически

давлением в специальной разгрузочной камере за рабочим колесом, а также в камере за вспомогательным колесом.

При работе насоса давление в разгрузочной камере устанавливается по величине таким, при котором ротор находится во взвешенном состоянии. Частичная разгрузка ротора от радиальных усилий достигается:

- вертикальным расположением ротора;
- динамической балансировкой рабочего и вспомогательного колес;
- динамической балансировкой ротора в сборе.

Избыточные осевые усилия, возникающие вследствие неполной осевой разгрузки, особенно на переходных режимах, воспринимаются упорным подшипником, радиальные усилия – верхним и нижним радиальными подшипниками. В качестве материала трущихся пар радиальных и упорных подшипников применена специальная прессмасса и нержавеющей сталь повышенной твердости.

В гидравлическую часть насоса входит прочный корпус с всасывающим и нагнетательным патрубками и проточная часть, состоящая из рабочего колеса, направляющего аппарата на выходе из колеса и сборной камеры. Рабочее колесо посажено консольно на нижний конец вала ротора.

Электродвигатель состоит из статора, ротора, клеммной системы. Статор электродвигателя включает пакет активного железа, обмотки, корпусные детали, перегородки.

Пакет активного железа набран из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Поверхности листов покрыты электроизолирующей фосфатной пленкой. Пакет активного железа спрессован и удерживается в таком состоянии с помощью нажимных плит, которые крепятся к корпусу статора болтами. Для упрочнения пакет активного железа пропитан бакелитовым лаком.

Обмотка статора однослойная катушечного типа с концентрическим расположением катушек. Изоляция обмотки выполнена из кремнийорганических изоляционных материалов и пропитана кремнийорганическим компаундом. Лобовые части обмотки дополнительно покрыты кремнийорганической эмалью.

Пакет активного железа с обмоткой заключен в корпус с холодильником. Обмотки статора охлаждаются водой, прокачиваемой через холодильник в корпусе, и воздухом, циркулирующим через полости лобовых частей обмотки.

Поверхности экрана со стороны статорной полости охлаждаются водой, циркулирующей во встроенном холодильнике. На внутренние обечайки колпака и экрана со стороны статорной полости нанесена электроизоляция из кремнийорганических материалов.

Перегородка, изготовленная из нихрома толщиной 0,4 мм, герметично разделяет статорную и роторную полости. Электроизоляция перегородки от железа статора выполнена тканью из стеклянного волокна, наклеенной на расточку статора бакелитовым лаком.

По разъемам и местам крепления экрана и колпака к корпусу статора статорная полость герметизируется от внешней среды резиновыми кольцами и прокладками.

Ротор электродвигателя состоит из активного магнитопровода (бочки ротора); короткозамкнутой обмотки («беличьей» клетки), вала. Бочка ротора и вал выполнены цельноковаными из нержавеющей магнитной стали. Короткозамкнутая обмотка защищена от теплоносителя нихромовой рубашкой.

Клеммная система электродвигателя состоит из фазных выводов и клеммной коробки. Фазные выводы служат для подвода электропитания к обмотке статора и представляют собой токоведущие стержни, пропущенные через проходной фарфоровый изолятор.

Конструкция вывода позволяет осуществить передачу электроэнергии от внешнего источника к статору без нарушения требования по плотности, предъявляемого к статорной полости. Клеммная система сделана в брызгозащищенном исполнении.

Холодильник ГЦЭН-310 представляет собой конструкцию, состоящую из четырех U-образных секций, соединенных последовательно по теплоносителю автономного контура и воде промежуточного контура. Каждая секция состоит из корпуса и пакета труб, помещенного внутри секции. Пакеты труб приварены по их торцам к трубным доскам. Секции закрываются крышками.

Теплоноситель автономного контура подается во входной патрубок, проходит по трубкам пакета и охлаждается водой промежуточного контура. Холодильник работает по системе противотока.

ГЦЭН-310 фланцем корпуса крепится на опорной раме (рис. 5.17), которая представляет собой сварную конструкцию, опирающуюся на три шаровые опоры. Это по-

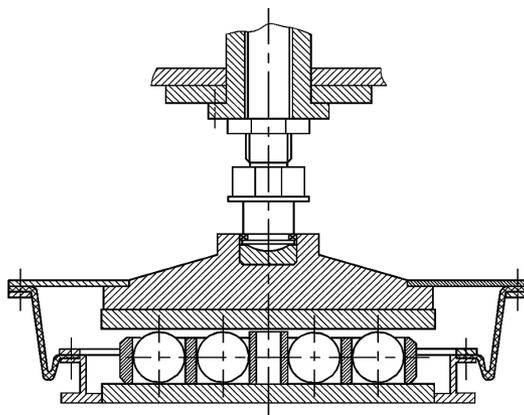


Рис. 5.17. Опора главного циркуляционного агрегата

звolyет насосу и всем вспомогательным узлам двигаться в любом горизонтальном направлении на 70 мм.

Подвижность опорной рамы практически исключает воздействие усилий от температурных расширений трубопровода первого контура на патрубки насоса и аппарата, а также на трубы контура. Опоры допускают возможность регулировки по высоте на  $\pm 50$  мм и имеют специальное защитное устройство от влаги и засорений.

В установке электронасоса предусмотрены две самостоятельные системы охлаждения насоса:

- теплоносителем (автономный контур);
- водой промконтура.

Система автономного контура предназначена для охлаждения и смазки подшипников и снятия тепла от ротора и статора электродвигателя теплоносителем, который при работе главного насоса перекачивается вспомогательным колесом через холодильник, а при остановке главного насоса на горячем теплоносителе первого контура – вспомогательным электронасосом.

Из холодильника теплоноситель поступает в верхнюю полость насоса на всасывание вспомогательного колеса, проходит верхний упорный и радиальный подшипники, роторную полость, нижний подшипник, сверление в корпусе экрана и по сливной трубке через обратный клапан поступает на охлаждение в холодильник.

При остановке главного насоса на «горячем» режиме включается вспомогательный насос.

Обратный клапан при работе вспомогательного насоса автоматически закрывается, и теплоноситель автономного контура циркулирует с помощью рабочего колеса вспомогательного насоса.

Вода промежуточного контура подается по напорной трубе в коллектор, из которого распределяется по трем параллельным потокам:

- холодильник автономного контура 36 м<sup>3</sup>/ч;
- холодильник статора 12 м<sup>3</sup>/ч;
- экран статора 2 м<sup>3</sup>/ч.

Для охлаждения воздуха в воздухоохладителе имеется отдельная трасса с расходом 2 м<sup>3</sup>/ч.

Подводящий трубопровод воды промконтура к воздухоохладителю не требует дополнительного запорного устройства и может быть выполнен путем подключения к главной магистрали.

В конструкции электронасоса предусмотрено охлаждение обмотки статора воздухом. Принята замкнутая система охлаждения от центробежного вентилятора. Выпуск воздуха из полостей установки электронасоса производится как при заполнения насоса теплоносителем, так и периодически во время его работы.

Основные технические характеристики ГЦЭН-310 приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

**Основные технические характеристики ГЦЭН-310**

Технические характеристики	Значение
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	6500
Температура теплоносителя, °С	270
Давление на всасывании (абсолютное), МПа	12,5
Расчетное давление на прочность (избыточное), МПа	14,0
Напор, МПа	0,53
Потребляемая мощность, кВт, не более	2000
Ток, А, не более	292
Напряжение сети (линейное), В	6000
Частота, Гц	50
Пусковой ток, А, не более	1200
Род тока	Трехфазный переменный
Количество оборотов, об/мин	1470
Расход воды промежуточного контура, м <sup>3</sup> /ч, не менее	52
Температура воды промежуточного контура на входе, °С, не более	45
Давление воды в промежуточном контуре, МПа, не более	0,6
Гидравлическое сопротивление промежуточного контура в пределах установки, МПа, не более	0,2
Направление вращения ротора при прямом чередовании фаз (со стороны электродвигателя)	По часовой стрелке
Расход теплоносителя в автономном контуре, м <sup>3</sup> /ч, не менее	15
Температура теплоносителя в автономном контуре на входе в статор, °С, не более	65
Температура теплоносителя в автономном контуре на выходе из статора, °С, не более	110
Температура воздуха на входе в статор, °С, не более	60
Температура воздуха на выходе из статора, °С, не более	75
Масса отъемной части насоса, кг	28 000
Масса установки, кг	50 200

ГЦЭН-310 предназначен для работы в помещении при нормальных условиях: температура воздуха – 50 °С, давление атмосферное, относительная влажность до 80 %. Назначенный срок службы ГЦЭН-310 составляет не менее 30 лет.

### 5.3. Главный циркуляционный насос УВР-1500

Главный циркуляционный насос УВР-1500 предназначен для создания циркуляции теплоносителя в контуре охлаждения активной зоны. Он обеспечивает работу РУ при нарушении нормальных условий эксплуатации и авариях, связанных с обесточиванием, на выбеге, что позволяет снять пик остаточных тепловыделений активной зоны и плавно перейти на режим естественной циркуляции теплоносителя.

Для работы ГЦН должны быть предусмотрены следующие обслуживающие системы:

- запирающей воды;
- организованных протечек;
- охлаждающей воды промежуточного контура;
- смазки подшипников электродвигателя;
- воздухоудаления;
- подачи воды для отмывки бора;
- дренажей;
- технической воды;
- диагностики.

Система запирающей воды. Подаваемая среда – контурная вода, прошедшая очистку в системе спецводоочистки:

- содержание бора – 0–16 г/кг;
- температура – не более 70 °С;
- расход на один ГЦН – не более 1,0 м<sup>3</sup>/ч.

Система организованных протечек должна обеспечивать отвод протечек запирающей воды после первой рабочей ступени уплотнения вала (~200 л/ч) и их возврат в систему запирающей воды.

Система охлаждающей воды промежуточного контура:

- температура воды на входе – не более 45 °С;
- расход на один ГЦН – не более 70 м<sup>3</sup>/ч.

Система смазки подшипников электродвигателя:

- исполнение – блочная, индивидуальная на один ГЦН;
- тип смазки – масло турбинное Т 22 или Тп 22;
- параметры – согласно техническим условиям на поставку электродвигателя.

Система воздухоудаления должна обеспечивать полное удаление воздуха из полостей ГЦН при заполнении и во всех режимах работы.

Система подачи воды для отмывки бора:

- подаваемая среда – конденсат от системы питательной воды;
- температура – не более 60 °С;
- расход на один ГЦН – не более 0,2 м<sup>3</sup>/ч;
- давление – 0,6 МПа.

Система дренажей должна обеспечивать слив теплоносителя первого контура из полостей ГЦН при опорожнении.

Система технической воды:

- температура – от 20 до 30 °С;
- подача на один ГЦН – не менее 120 м<sup>3</sup>/ч.

Система диагностики предполагает контроль, оценку, прогнозирование и управление показателями долговечности и ресурсными характеристиками ГЦН для достижения максимальной эффективности эксплуатации РУ при безусловном и постоянном обеспечении требуемого уровня ее безопасности.

Система диагностики подразделяется на две системы: 1) контроль металла и сварных соединений корпуса; 2) вибродиагностика.

Система контроля металла и сварных соединений корпуса основывается на неразрушающих методах контроля – внешний осмотр, просвечивание, цветная дефектоскопия, ультразвуковой контроль, гидравлические испытания на герметичность и прочность, метод акустической эмиссии. Цель контроля – выявление дефектов, появившихся в процессе эксплуатации, контроль их развития и оценка влияния на ресурс насоса.

Система вибродиагностики позволяет оценить состояние ГЦН в период эксплуатации по изменению вибрационного состояния и связанным с ним развитием неисправностей по известным проектным критериям. Она включает первичные датчики (пьезоакселерометры), установленные на корпусе ГЦН, коммутационные устройства, усилитель, анализатор спектра, ПЭВМ.

Главный циркуляционный насос УВР-1500 представляет собой вертикальный насосный агрегат, состоящий из гидравлического корпуса, выемной части, электродвигателя, проставки, муфты соединения валов насоса и электродвигателя, опор установки насосного агрегата (рис. 5.18).

Тип насоса – центробежный, с механическим уплотнением вала. Электродвигатель – асинхронный, трехфазный, с короткозамкнутым ротором, двухскоростной. Ротор электродвигателя и вал насоса соединяются с помощью компенсирующей муфты с торсионом.

Основные технические характеристики ГЦН в номинальном режиме приведены в табл. 5.3.

Главный циркуляционный насос обеспечивает выбег, достаточный для безаварийной работы РУ в режимах, связанных с полным или частичным обесточиванием.

Выемная часть ГЦН представляет собой единый монтажный блок,

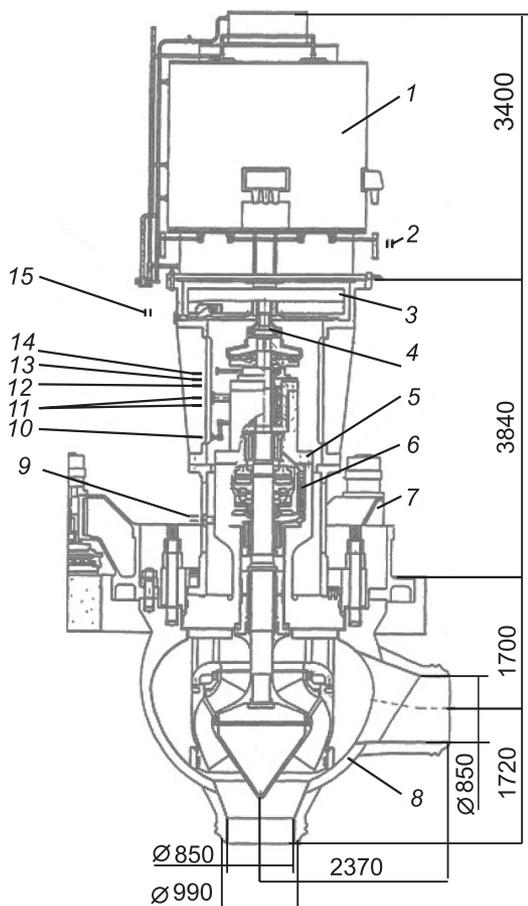


Рис. 5.18. Главный циркуляционный насос УВР-1500: 1 – электродвигатель; 2 – маховик; 3 – зубчатая муфта; 4 – станина электродвигателя; 5 – выемная часть; 6 – опора подвижная; 7 – бак насоса; 8 – вода в термобарьер (из термобарьера); 9 – запирающая вода в уплотнение; 10 – вода в холодильник (из холодильника); 11 – выпуск воздуха из насоса; 12 – свободный слив протечек; 13 – выпуск воздуха из холодильника; 14 – подвод (отвод) охлаждающей воды

Основные технические характеристики ГЦН УВР-1500

Технические характеристики	Значение
Подача, м <sup>3</sup> /с (м <sup>3</sup> /ч)	8,26(29 500)
Напор, м	117
Температура теплоносителя на всасывании, °С	296,8
Давление на всасывании, МПа	15,7
Частота вращения ротора (синхронная), об/мин (с <sup>-1</sup> )	750/1000 (12,5/16,7)
Мощность насоса, кВт, не более, при частоте вращения ротора: 750 об/мин (при работе на холодной воде) 1000 об/мин (при работе на горячей воде)	5400 8400
Номинальное напряжение питающей сети, В	6000
Частота питающего тока, Гц	50

устанавливаемый в гидравлический корпус (бак) с помощью шпилек и уплотненный металлической прокладкой.

Выемная часть включает крышку с горловиной, ротор, нижний радиальный подшипник, рабочее колесо, направляющий аппарат, радиально-осевой подшипник, уплотнение вала, узел электромагнитной разгрузки осевого усилия.

Крышка с горловиной – сварная конструкция из деталей, выполненных из поковок, материал – сталь перлитного класса 15Х2НМФА. Со стороны теплоносителя первого контура поверхности крышки имеют двухслойную антикоррозионную наплавку.

Уплотнение вала – трехступенчатое, представляет собой блок уплотнительных ступеней торцового типа. Нижняя ступень – разделительная (контурная), ограничивает протечки запирающей воды в контур циркуляции. Запирающая вода подается между контурной и первой ступенями, на которой срабатывает ~80 % полного перепада давления. Вторая ступень препятствует выходу запирающей воды в атмосферу и является резервной: при нормальной работе первой ступени функционирует на малом (~20 % от полного) перепаде давления, а при выходе из строя рабочей ступени способна работать на полном перепаде давления. Материал колец уплотнительных ступеней – силицированный графит.

Для обеспечения возможности длительного нахождения насоса в «горячем» резерве при нулевых протечках запирающей воды (при выходе из строя первой ступени уплотнения и повышенной протечке через атмосферную ступень, остановке ГЦН) применено стояночное уплотнение механического типа, которое расположено над атмосферной ступенью уплотнения вала.

Ротор насоса вращается в двух радиальных подшипниках. Осевая сила, действующая на него, воспринимается осевым подшипником скольжения.

Нижний радиальный подшипник – гидростатический, его питание осуществляется перекачиваемой водой с напора рабочего колеса. Пара трения – сталь 20Х13 по стали 20Х13. Для исключения контакта рабочих поверхностей подшипника при пуске (остановке) насоса, снижении перепада давления на ГСП, «запаривании» проточной части в конструкции подшипника предусмотрен поясok из силицированного графита в паре с наплавкой ПГ – С2 (роторная втулка).

Рабочее колесо – диагонального типа, сварно-литой конструкции. Материал ведущего, покрывного дисков – сталь 12Х18Н10Т (поковка), лопастей – сталь 12Х18Н12МЗТЛ (точное литье). Рабочее колесо установлено на валу на конусах. Направляющий аппарат – лопаточный, сварно-литой конструкции. Примененные материалы – сталь 12Х18Н10Т и 12Х18Н12МЗТЛ. Напорный коллектор направляющего аппарата снабжен разрезными уплотнительными кольцами из стали 07Х16Н4Б.

Радиально-осевой подшипник – на водяной смазке, включает осевой подшипник скольжения и верхний радиальный гидростатический подшипник. Осевой подшипник – гидродинамический, колодочный, двустороннего действия. Материалы пары трения – силицированный графит.

Верхний радиальный подшипник – гидростатический, камерный. Материалы пары трения – силицированный графит по наплавке ПГ-С (роторная втулка). Циркуляция запирающей воды в полости радиально-осевого подшипника (протечка через контурную ступень уплотнения поступает в полость подшипника) производится вспомогательным рабочим колесом, установленным на валу насоса ниже осевого подшипника. Питание верхнего радиального подшипника осуществляется с напора вспомогательного рабочего колеса.

Между полостями нижнего ГСП и радиально-осевого подшипника установлен холодильник, выполняющий роль термобарьера. Устройство электромагнитной разгрузки предназначено для создания осевого усилия, направленного в противоположную сторону осевому усилию ротора насоса, что позволяет уменьшить нагрузку на осевой подшипник. Создаваемое устройством расчетное усилие равно 45–50 т.с. Оно состоит из электромагнита постоянного тока, закрепленного на корпусе узла уплотнения вала, и гребня из магнитной стали, совмещенного с нижней полумуфтой муфты соединения вала насоса и электродвигателя.

Гидравлический корпус представляет собой бак сферической формы с радиальным всасывающим и осевым напорным патрубками. Это сварная конструкция из штампованных деталей и деталей из поковок, выполненных из стали перлитного класса 15Х2НМФА. Гидравлический корпус, направляющий аппарат и рабочее колесо образуют проточную часть насоса.

Со стороны теплоносителя первого контура в корпусе выполнена двухслойная антикоррозионная наплавка. Герметизацию разъема «гидравлический корпус – выемная часть» обеспечивает металлическая прокладка (никель). Выемная часть крепится к баку с помощью нажимного фланца и шпилек. Материал фланца – сталь 25Х2МФА, шпилек – сталь 38ХНЗМФА. Затяжка шпилек предусматривается гидроключами.

Валы насоса и электродвигателя соединены муфтой зубчатого типа с торсионом.

Антиреверсивное устройство – это механизм с зубчатым кольцом, закрепленным на фланце станины электродвигателя (проставки), и двумя храповиками, размещенными на осях в полостях маховика, установленного на валу электродвигателя. Зубья кольца имеют односторонний скос в сторону нормального вращения, за счет чего храповики при пуске насоса выходят из зацепления с зубчатым кольцом под действием центробежных сил, а при начале вращения в обратном направлении под действием силы тяжести входят в зацепление с зубчатым кольцом и фиксируют ротор в этом положении.

Подвижная опора насосного агрегата представляет собой кольцевую раму с тремя кронштейнами, крепящуюся к фланцу гидравлического корпуса. Кронштейны опираются на установленные на перекрытии роликовые опоры, каждая из которых состоит из трех плит, между ними – два ряда роликов в сепараторах.

Такая установка позволяет агрегату перемещаться в горизонтальной плоскости (~80 мм).

Для привода насоса применен вертикальный, двухскоростной асинхронный электродвигатель. Обмотка статора двигателя выполнена полносно-переключаемой и обеспечивает ступенчатый пуск сначала до частоты вращения 750 об/мин ( $12,5 \text{ с}^{-1}$ ), а затем до номинальной частоты 1000 об/мин ( $16,6 \text{ с}^{-1}$ ). Электродвигатель имеет индивидуальную циркуляционную систему смазки подшипников. В качестве нее используется турбинное масло Т22 по ГОСТ 32–74 или Тп22. Вентиляция двигателя осуществляется по замкнутому контуру за счет самовентилирующего действия ротора с применением встроенных воздухоохладителей. Двигатель выполнен в сейсмостойком исполнении и рассчитан на аварийные ситуации в условиях его размещения под защитной оболочкой АЭС (по температуре, влажности и давлению окружающей среды).

На валу электродвигателя устанавливается маховик, обеспечивающий требуемый по режимам работы РУ выбег ГЦН при обесточивании. Он выполнен из поковки стали перлитного класса, прошедшей полную проверку механических свойств ультразвуковой и капиллярной дефектоскопией.

Маховик рассчитан на нормальные условия эксплуатации и работу в переходных режимах. Величина напряжений в его теле не превосходит допускаемых для этого металла. Имеется положительный опыт эксплуатации маховиков данного типоразмера при той же частоте вращения в составе насосов ЦВН-8 РБМК-1000.

Торсион, передающий крутящий момент на вал насоса, устанавливается в шлицевую втулку, закрепленную в расточке ротора двигателя.

Все детали и узлы ГЦН, соприкасающиеся с теплоносителем первого контура, запирающей водой, водой промежуточного контура охлаждения, изготовлены из сталей (или снабжены наплавками), стойких против коррозии, межкристаллитной коррозии, эрозии. Химический состав материалов деталей, соприкасающихся с теплоносителем первого контура и запирающей водой (включая материалы подшипников и торцового уплотнения вала), не содержит специальных добавок, образующих долгоживущие изотопы.

**Преимственность конструктивных решений.** В ГЦН использованы узлы, конструкция которых отработана в процессе испытаний на стендах и при длительной эксплуатации в составе ГЦН действующих АЭС.

Аналогом нижнего радиального гидростатического подшипника является подшипник насоса ЦВН-8 установки РБМК-1000. Указанный насос эксплуатируется в составе РУ на Ленинградской, Курской, Смоленской АЭС. В настоящее время наработка отдельных ГЦН составляет более 80 000 ч, отказов по вине подшипников не зарегистрировано.

Радиальный подшипник, аналогичный по конструкции и материалам пары трения примененному в узле радиально-осевого подшипника ГЦН, прошел длительные испытания на стенде предприятия и используется в насосе ЦВН-12 установки РБМКП. Аналогом осевого подшипника является подшипник, разработанный для насоса ЦВН-12 РБМКП. Длительность испытаний составила  $\sim 6000$  ч при удельной нагрузке  $\sim 5$  МПа (максимальная достигнутая удельная нагрузка  $\sim 7$  МПа). За это время износа рабочих поверхностей подшипника не было обнаружено.

Аналогом антиреверсивного устройства является устройство насоса ЦВН-8 РБМК-1000, которое при эксплуатации в составе ГЦН действующих АЭС показало надежную работу.

**Сравнение с проектами ГЦН.** По назначению, условиям эксплуатации в составе установки ближайшими аналогами разрабатываемого ГЦН являются насосы ЦВН-8 установки РБМК-1000, ГЦН-195М и ГЦНА-1391 – ВВЭР-1000.

Накопленный опыт применения этих насосов позволяет определить направление совершенствования конструкции ГЦН для реакторных установок нового поколения – АЭС-92 и УВР-1500.

Конструктивная схема и общая компоновка насоса УВР-1500 идентичны рассматриваемым: насосный агрегат, состоящий из гидравлического корпуса, выемной части и электродвигателя, валы насоса и электродвигателя соединены компенсирующим звеном-муфтой с торсионом. Выемная часть включает вал с двумя радиальными и осевым подшипником, механическое уплотнение вала.

Материалы, примененные при проектировании основных узлов ГЦН, выбраны исходя из положительного опыта эксплуатации насоса ЦВН-8 в отличие от которого из-за значительно меньшего перепада давления на уплотнении, возможно его срабатывание на одной уплотнительной ступени, а в разрабатываемом насосе УВР-1500 применено трехступенчатое уплотнение вала со срабатыванием перепада на двух уплотнительных ступенях.

Такое уплотнение вала применено в конструкции насосов ГЦН-195М и ГЦНА-1391. Оно состоит из разделительной (контурной) ступени, двух основных (рабочих) ступеней с делением перепада давления между ними за счет перепуска и дросселирования, концевой ступени, которая является резервной и предназначена для предотвращения утечек при стоянке насоса. В отличие от уплотнения насосов ГЦН-195М и ГЦНА-1391, уплотнение разрабатываемого ГЦН предусматривает непропорциональное деление перепада давления между уплотнительными ступенями: ~80 % перепада срабатывает на первой ступени, а вторая ступень (резервная) функционирует на низком перепаде давления и при выходе из строя основной ступени способна длительно воспринимать полный перепад давления.

Для предотвращения утечек через атмосферную ступень при длительной стоянке насоса в горячем резерве предусматривается стояночное уплотнение механического типа, расположенное выше атмосферной ступени уплотнения вала.

В уплотнительных ступенях уплотнения разрабатываемого насоса применен тот же материал пары трения, что и у насоса ЦВН-8 – силицированный графит. Надежность уплотнения подтверждена длительной эксплуатацией в составе насосов.

В ГЦН УВР-1500, как и у насоса ГЦНА-1391, применен узел радиально-осевого подшипника на водяной смазке, что позволяет исключить выносную масляную систему, необходимую для работы насосов ЦВН-8 и ГЦН-195М.

С учетом использования приводного электродвигателя с картерной системой смазки негорючим маслом (типа ОМТИ), исключение масляной системы насоса повышает пожаробезопасность насосного агрегата.

В отличие от насосов ГЦН-195М и ГЦНА-1391, у которых нижний радиальный подшипник работает на охлажденной воде автономного контура, в конструкции разрабатываемого ГЦН применен радиальный гидростатический подшипник на контурной воде, подаваемой с напора рабочего колеса. Как показывает опыт, применение насосов ГЦН-195М, нижнего подшипника на холодной воде снижает надежность насоса из-за зависимости его работы от надежности внешней обслуживающей системы автономного контура.

Примененный в конструкции разрабатываемого ГЦН нижний радиальный подшипник на горячей воде показал надежную работу при эксплуатации насосов ЦВН-8 установки РБМ-К-1000, наработка отдельных экземпляров которых составляет более 80 000 ч. Выходов из строя по вине нижнего радиального подшипника не зафиксировано.

В отличие от насосов ЦВН-8 и ГЦН-195М в ГЦН УВР-1500 и ГЦНА-1391 применен двухскоростной электродвигатель, позволяющий осуществлять ступенчатый пуск насоса. Электродвигатель запускается до частоты вращения 750 об/мин, а затем пере-

ходит на номинальную частоту – 1000 об/мин. Такой режим позволяет уменьшить мощность электродвигателя на номинальной частоте вращения (работа на холодной воде производится на малой частоте вращения), снижает пусковые токи.

Высокое качество разработки ГЦН УВР-1500 достигается за счет:

- максимального использования надежных отработанных узлов, проверенных многолетним опытом эксплуатации;
- применения и строгого соблюдения правил контроля, основных положений, документации Госатомнадзора Российской Федерации, государственных стандартов, стандартов предприятия и инструкций, предусматривающих контроль исходных материалов, процессов производства, готового изделия;
- применения качественных основных и сварочных материалов;
- освоения новых технологий производства;
- осуществления авторского надзора за изготовлением и испытаниями опытного образца ГЦН;
- разработки системы диагностики;
- расчетного обоснования конструкции;
- проведения экспериментальной отработки отдельных узлов и насоса в целом;
- проведения приемочных испытаний опытного образца ГЦН.

Непрерывная работа ГЦН во всех эксплуатационных режимах – не менее 20 000 ч. Назначенный ресурс уплотнения вала – не менее 20 000 ч, выемной части ГЦН до капитального ремонта – 60 000 ч. Назначенный срок службы корпусных деталей – 60 лет.

**Обеспечение безопасности** ГЦН осуществляется измерительной системой с помощью управления и контроля всех режимов работы ГЦН, предусматривающих сигнализацию, а в случае превышения предельно допустимых параметров – автоматическое отключение ГЦН.

Для обеспечения требуемой сейсмостойкости ГЦН проектом предусматриваются соответствующие технические средства (тяги, гидроамортизаторы), тип и количество которых уточняется при дальнейшем проектировании. Также создана комплексная система вибродиагностики, позволяющая оценивать и прогнозировать работоспособность ГЦН. Среднеквадратичное значение виброскорости в диапазоне частот 10–1000 Гц должно быть не более 3,6 мм/с.

**Работа ГЦН при отказах обслуживающих систем, проектных авариях РУ и внешних воздействиях.** К отказам обслуживающих систем относится выход технологических параметров системы за установленный допуск, приводящий к остановке насоса защитными системами.

Главный циркуляционный насос допускает работу при прекращении подачи:

- запирающей воды в течение 2–3 суток;
- охлаждающей воды промконтур в течение 30 мин;
- запирающей и охлаждающей воды в течение ~4 мин.

ГЦН трудоспособен в условиях совместного воздействия эксплуатационных и сейсмических нагрузок до проектного землетрясения (ПЗ) включительно. Его конструкция сохраняет прочность и обеспечивает выбег при увеличении суммарных нагрузок, соответствующих максимальному расчетному землетрясению (МРЗ), а также целостность агрегата при одновременном воздействии нагрузок, соответствующих МРЗ с максимальной проектной аварией (мгновенный разрыв трубопроводов первого контура).

Главный циркуляционный насос допускает работу при авариях, соответствующих условиям режима «малой течи» при обеспечении подачи охлаждающей и запирающей воды. Если значения параметров под оболочкой, превысили параметры режима «малой течи» и достигли режима «большой течи», то ГЦН должен быть отключен.

**Экологические показатели ГЦН.** Проектирование ГЦН проводилось с учетом современных требований к оборудованию АЭС по снижению неблагоприятных воздействий на окружающую среду как при нормальных условиях эксплуатации, так и в аварийных ситуациях.

В конструкции ГЦН выполнение этих требований выразилось:

- в снижении до минимально возможного для данного типа насоса количества внешних обслуживающих систем;
- исключении масляной системы насоса и применении картерной системы смазки подшипников электродвигателя негорючим маслом;
- исключении утечек теплоносителя в окружающую среду и ограничении утечек запирающей воды (не более 25 л/ч);
- полном исключении утечек через уплотнение вала при длительной стоянке ГЦН (аварийное отключение) за счет применения стояночного уплотнения.

#### **5.4. Главный циркуляционный насос реакторного блока ВБЭР-300**

Главный циркуляционный насос ВБЭР-300 (рис. 5.19) предназначен для перекачивания теплоносителя первого контура внутри реакторного блока. Это агрегат, состоящий из диагонального насоса и герметичного электродвигателя, выполненных в едином блоке. Основные технические характеристики главного циркуляционного насоса приведены в табл. 5.4.

*Таблица 5.4*

**Основные технические характеристики ГЦН ВБЭР-300**

Технические характеристики	Значение
Подача номинальная, м <sup>3</sup> /ч	4607
Напор при номинальной подаче, м, не менее	61
Температура перекачиваемой среды, °С, не более	320
Давление на всасывании, МПа, не более	15,7
Частота вращения ротора, синхронная, с <sup>-1</sup>	50
Время выбега до частоты вращения ротора 35 с <sup>-1</sup> , с, не менее	1,4
Род тока	Переменный трехфазный
Напряжение питающей сети, В	1000
Частота питающей сети, Гц	50
Сила тока, потребляемая из сети, А, не более	730
Мощность, потребляемая из сети: активная, кВт, не более полная, кВА, не более	1050 1250
Масса электронасоса в сухом состоянии, кг, не более	15 700
Назначенный срок службы, лет	20
Назначенный ресурс, ч, не менее	140 000
Период непрерывной работы, ч, не менее	16 000

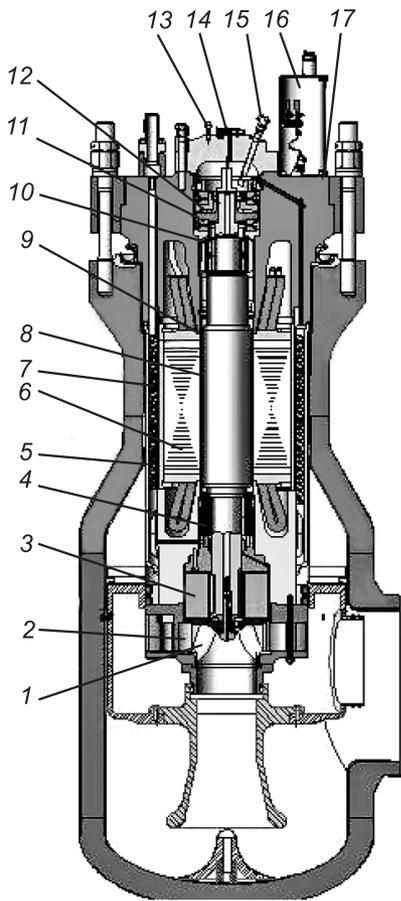


Рис. 5.19. Главный циркуляционный насос ВБЭР-300:

1 – рабочее колесо; 2 – направляющий аппарат; 3 – маховик; 4 – радиальный подшипник; 5 – холодильник; 6 – обмотки статора; 7 – корпус статора; 8 – ротор; 9 – статорная перегородка; 10 – радиальный подшипник; 11 – упорный подшипник; 12 – вспомогательное колесо; 13 – датчик температуры; 14 – датчик оборотов; 15 – датчик уровня; 16 – электропровод; 17 – крышка

Рабочее колесо и направляющий аппарат насоса охлаждаются водой промежуточного контура, циркулирующей по винтовым канавкам между корпусом статора и наружным корпусом электронасоса.

Крепление электронасоса на гидрокамере производится шпильками. Уплотнение разъема между корпусом электронасоса и гидрокамерой осуществляется тором, приваренным к гидрокамере и корпусу электронасоса.

## 5.5. Насосы для реакторов, охлаждаемых водой

До настоящего времени для больших установок с водой под давлением лучшими являлись дорогостоящие насосы с герметизированными электродвигателями.

Стоимость главных насосов, осуществляющих циркуляцию воды, охлаждающей реактор, на атомной энергетической установке электрической мощностью 300 МВт

Проточная часть насоса включает направляющий фланец, консольное рабочее колесо диагонального типа и направляющий аппарат. Рабочее колесо монтируется на нижнем конце ротора.

Прототипом данного электродвигателя является статор и ротор изделия ТАУ-2 50МСП, имеющего аналогичную конструкцию, сопоставимую мощность, одинаковый класс по напряжению и изоляции, разработанного, изготовленного и испытанного ОКБМ. Результаты испытаний подтвердили все заявленные характеристики.

Ротор электродвигателя вращается в двух подшипниках скольжения. В качестве пары трения в подшипниковых узлах используется силицированный графит. Осевое усилие, действующее на ротор, воспринимается упорным подшипником и пятой, смонтированной на верхнем конце ротора.

На верхнем конце ротора установлен маховик. Крышка электродвигателя уплотняется линзовой прокладкой.

Смазка и охлаждение подшипников, а также охлаждение ротора и статора электродвигателя осуществляются перекачиваемой водой автономного контура с помощью вспомогательного колеса, объединенного с пятой упорного подшипника.

Вода автономного контура от вспомогательного колеса поступает через упорный подшипник в зазор между ротором и статором, затем через нижний радиальный подшипник и радиальные сверления в корпусе в трубчатый змеевик холодильника, расположенного в винтовых канавках между корпусом статора и наружным корпусом электронасоса, затем – по радиальным сверлениям в корпусе через верхний радиальный подшипник во всасывающую полость вспомогательного колеса.

Вода автономного контура и корпус электронасоса охлаждаются водой промежуточного контура, циркулирующей по винтовым канавкам между корпусом статора и наружным корпусом электронасоса.

составляет около 35 % от полной стоимости установки. Электродвигатели потребляют 2–4 % от всей электроэнергии, вырабатываемой станцией. При разработке надежных и менее дорогих насосов следует руководствоваться эксплуатационным опытом, накопленным на действующих станциях.

До настоящего времени большинство сооруженных энергетических установок с реакторами, охлаждаемыми водой, для циркуляции теплоносителя используют насосы с герметизированным электродвигателем и нулевой утечкой. Такие насосы были разработаны для обеспечения абсолютной надежности. По-видимому, они будут широко использоваться для транспортных судовых реакторов и на стационарных атомных электростанциях большей мощности и с более высоким давлением теплоносителя. На корабле трудно собрать и обработать утечку радиоактивной воды, а соответствующих уплотнений для больших насосов обычного типа не создано. Но, так как обычные насосы могут стоить на 20–50 % меньше и иметь КПД на 10 % выше, чем у герметизированных насосов, необходимо разработать плотные уплотнения вала для обычных насосов. В создании таких уплотнений добились определенных успехов, однако их надежность и возможность работы без сложных вспомогательных контуров находятся под вопросом. Еще много предстоит сделать по улучшению экономичности герметизированных насосов.

Радиоактивность теплоносителя является основной причиной, отличающей главные насосы реакторного контура от подобных насосов, используемых для обычных целей. Для предотвращения опасной утечки радиоактивной воды применяют специальные «герметизированные насосы», у которых рабочее колесо, электродвигатель и вал герметизированы в общем корпусе, соединенном с системой контура. С другой стороны, если достаточно только ограничить утечки, можно использовать обычные насосы, у которых вращающийся вал привода имеет специальное уплотнение в местах, где он проходит через корпус рабочего колеса (приводной электродвигатель находится снаружи). В некоторых таких установках утечки радиоактивной воды из уплотнений дренируются, очищаются и возвращаются в контур. В других системах через уплотнение внутрь вводят чистую воду с более высоким давлением, чем в контуре, чтобы предотвратить выход радиоактивной воды наружу.

Период полураспада радиоактивности в самой чистой воде при прохождении реактора составляет всего 7 с. Однако, когда под воздействием воды корродирует система трубопроводов, они становятся активными со значительным периодом полураспада. Принимаются различные меры для решения этой проблемы. Одно из таких мероприятий заключается в непрерывном обессоливании части реакторной воды, другое – в понижении коррозионности воды за счет поддержания в ней небольшого избыточного количества водорода для уменьшения окисления. Третий путь заключается в изготовлении трубопроводов, корпусов насосов и рабочих колес из нержавеющей стали, которая корродирует меньше углеродистой (предпочтительнее нержавеющей стали марки 304, так как она сохраняет прокорродировавший слой лучше, чем другие марки стали, стоимость ее ниже). Для уменьшения количества загрязнений, которые могут отложиться на внутренней поверхности насосов и затруднить дезактивацию и ремонтные работы необходимо, чтобы корпуса насосов или рабочих колес не имели трещин, щелей или раковин.

Рассмотрение конструктивных особенностей различных работающих насосов, их рабочих характеристик, стоимостей и предлагаемых усовершенствований помогает определить направление развития установки в будущем.

**Типы водяных уплотнений.** При использовании питательных насосов на обычных энергетических станциях сталкивались с проблемой создания уплотнения для снижения величины утечек. Когда температура и давление воды возросли до 232 °С и 2,46 МПа, начали использовать соответствующие конструкции уплотнений. При

разработке реакторов с водой под давлением конструкторы насосов внезапно столкнулись с задачей создания уплотнений, работающих при давлении 14,1 МПа и температуре 316 °С. Ни одно из обычных уплотнений не могло бы работать при таких условиях, особенно с учетом того, что чрезмерные утечки или выход из строя уплотнения будут сопровождаться трудностями, связанными с радиологической опасностью, и потребуют проведения перед ремонтом дезактивации помещения. Чтобы избежать этих трудностей, был разработан насос с герметизированным электродвигателем, конструктивным принципом которого было полное отсутствие утечек.

**Уплотнения герметизированного насоса с герметизированным электродвигателем.** Насос и приводной электродвигатель полностью заключены в герметичный корпус, находящийся под давлением; утечки воды наружу отсутствуют, так как вращающийся приводной вал не проходит через корпус (рис. 5.20).

Для того чтобы обмотки электродвигателя были сухими, его статор и ротор закрывают тонкими листами из нержавеющей стали или инконеля. Вспомогательная крыльчатка обеспечивает циркуляцию небольших количеств воды в зазоре между защитными чехлами статора и ротора шириной 0,762–1,27 мм. Эта вода смазывает графитовые цапфы и упорные подшипники и отводит тепло, выделяемое электродвигателем. Вода выходит из насоса, циркулирует через охлаждающую трубку, навитую на корпус электродвигателя, и возвращается в насос. Герметичный чехол, окружающий этот охлаждающий змеевик, обеспечивает канал для прохода внешней охлаждающей воды. Корпус электродвигателя крепится с помощью болтов, а иногда приваривается плотным швом к корпусу насоса. Все электрические выводы и вводы охлаждающей воды заделаны герметично в наружном корпусе с целью предотвращения любой наружной утечки, даже в случае внутреннего разрушения корпуса электродвигателя.

**Уплотнения с ограниченной утечкой.** В последние годы конструкция уплотнений значительно усовершенствована. Однако все еще не разработано такое обычное уплотнение, для которого можно заранее точно рассчитать величину протечки, ожидаемый срок службы или надежность при его использовании в больших главных насосах реакторной установки. Величины утечек или вводимой снаружи чистой воды велики и опасность выхода из строя уплотнения препятствует интенсивному использованию насосов с ограниченной утечкой, но многие конструкторы уплотнений понимают, что различные сочетания механических уплотнений с контактирующими поверхностями и с плавающим кольцом являются многообещающими. Проводится много опытов в реакторных условиях для определения срока службы уплотнений, их эксплуатации, влияния захваченных твердых частиц и тенденции уплотнений к накоплению радиоактивных отложений.

Разработанные сальниковые уплотнения вала насосов с ограниченной протечкой имеют следующее устройство (рис. 5.20). Сальник с набивкой имеет втулку, напрессованную на вал и удерживаемую гайкой. Болты удерживают набивочные кольца сальника внутри его корпуса. При водяном охлаждении это уплотнение работает вплоть до 204,4 °С и 20 МПа. Однако даже одногодичный срок службы зависит от качества монтажа и частоты регулировки, повреждение набивки вызывает большие протечки. Хотя одно уплотнение не пригодно для главных насосов реакторов, оно может быть использовано в качестве вспомогательного в комбинированном уплотнении.

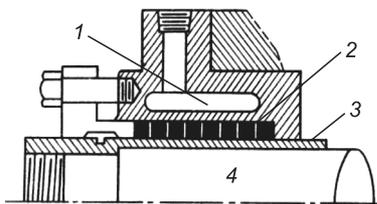


Рис. 5.20. Основные уплотнения вала насосов с ограниченной утечкой:  
1 – охлаждающая среда; 2 – набивочные кольца; 3 – втулка; 4 – вал

Лабиринтные уплотнения состоят из тонких полос, присоединенных к обойме или валу в виде

преграждающих сужений, уменьшающих поток (рис. 5.21). Зазоры между движущимися частями обычно составляют 0,254–0,508 мм, чтобы избежать истирания в тех случаях, когда размеры вала изменяются под влиянием термического расширения, и когда вал будет изгибаться динамически; таким образом, понадобилось бы слишком много ступеней, чтобы уплотнить качественно главные насосы первого контура реактора. Лабиринтные уплотнения могут быть использованы в сочетании с другими видами уплотнений.

Большинство насосов с ограниченной утечкой требует большего количества вспомогательных систем, чем герметизированные насосы.

Герметизированным насосам не нужны внешние источники охлаждающей воды высокого давления. Вместо этого небольшое количество реакторной воды циркулирует в корпусе электродвигателя для смазки графитовых подшипников и отвода тепла, выделяемого электродвигателем, при температуре примерно 66 °С к встроенному охлаждающему змеевику, расположенному между двумя стенками наружного корпуса. Это тепло отводится водой низкого давления из контура технической воды установки. Термопары в обмотках электродвигателя и в контуре теплоносителя показывают оператору, что изоляция обмоток и графитовые подшипники находятся при температуре, не превышающей 93 °С (температура, выше которой они работать не могут). В верхней части корпуса предусмотрена также замеряемая сдвуха в атмосферу для удаления любого газа, образовавшегося в ходе химической обработки теплоносителя или за счет радиолитической диссоциации реакторной воды.

Почти все насосы с ограниченной утечкой требуют внешней системы ввода воды высокого давления и увеличенных контуров обессоливания и удаления отходов. Количество вводимой воды или выходящих утечек колеблется от 3,8 до 18,9 л/ч в зависимости от давления, количества оборотов и размера вала и того, какой тип уплотнения использован: механическое с контактирующими поверхностями или с дросселирующим устройством. Так как давление вводимой воды должно быть на 0,18–0,35 МПа выше давления реакторной воды, в схеме ее подачи должен быть использован маленький питательный котельный насос или поршневой насос с буферными устройствами. Вместе с регулированием любая система ввода воды будет стоить 30 тыс. дол.

Так как рост нормальной температуры уплотнения и увеличение утечек указывают на то, что трение стало ненормальным и возникли неисправности уплотнения, в камере уплотнения и в контуре устанавливают термопары и устройства, измеряющие величину утечки.

Герметичные насосы изготавливают производительностью до 94,6 м<sup>3</sup>/мин для работы на воде при 176 кг/см<sup>2</sup> и 316 °С. Герметизированные насосы для установки EDISON в Южной Калифорнии были запроектированы на производительность около 170 м<sup>3</sup>/мин. Насосов с ограниченной протечкой, подобной гидравлической конструкции на такую производительность, создано не было. В настоящее время их верхний предел по производительности составляет 53 м<sup>3</sup>/мин при таких же давлениях и температурах, как и в насосах с герметизированным двигателем.

Насосы с ограниченной протечкой требуют большей регулировки и более частого ремонта, чем герметизированные насосы. Однако большинство видов ремонта насосов с ограниченной протечкой может быть произведено на месте их установки, т.е. непосредственно на энергетической установке. Например, уплотнение или второстепенные детали могут быть заменены, а запасной электродвигатель легко установлен на

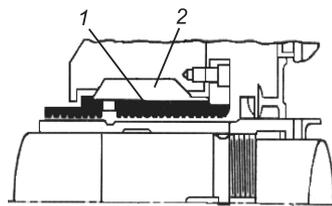


Рис. 5.21. Лабиринтные уплотнения вала насосов с ограниченной утечкой: 1 – дросселирующая втулка; 2 – охлаждающая вода

место. С другой стороны, хотя подшипники герметизированных насосов могут быть заменены на месте, почти любое повреждение оболочек ротора или статора, обмоток, вала, системы охлаждения или герметичного корпуса требует исправления в заводских условиях. Кроме того, резервные или запасные детали для герметичного насоса стоят относительно дорого.

Герметичный насос в системе циркуляции котла станции в Поссум-Пойнте находится в работе свыше 35 000 ч без всякого обслуживания. Среди более 1000 работающих герметичных насосов имело место всего около 12 случаев поломок, три из которых произошли на АЭС «Шиппингпорт».

«Шиппингпорт». В 1958 г., спустя две недели после начала работы, один насос вышел из строя в связи с трудностями, вызванными непредвиденным расширением. Поставленный насос был еще раз заменен после разрушения подшипника. Защитная оболочка второго замененного насоса разрушилась в результате накопления в зазоре газа и вызванного этим перегрева. В настоящее время операторы при регулировании системы химической очистки внимательно следят за тем, чтобы в контур не попали пузырьки газа. В новых конструкциях герметизированных насосов имеются детекторы газа и устройства для сброса газа в атмосферу. Остальные три насоса в «Шиппингпорте» работали без поломок в течение трех лет.

*Национальная станция по испытанию реакторов (штат Айдахо).* Когда насос прототипного реактора для транспортных целей Национальной станции по испытанию реакторов в Айдахо-Фолс был вскрыт и осмотрен во время запланированного предупредительного ремонта, операторы отметили, что контргайка рабочего колеса упала. К счастью, само рабочее колесо все еще оставалось на валу. В настоящее время стало обязательной практикой прихватывать все детали, закрепляющие рабочее колесо, сваркой.

*Реактор фирмы Maine Yankee Atomic Power Company («Янки»).* В ходе начальной работы нескольких установок наблюдались затруднения с насосами. На установке необходимо было тщательно уплотнить фланцевые уплотнения, чтобы прекратить небольшое просачивание воды. Пришлось применить плотную сварку. В реакторе при использовании твердых никелевых прокладок текли фланцевые соединения, подтяжка не решила проблему, но привела к деформации фланцев примерно на 0,305 мм. Демонтаж насоса и перешлифовка фланцев заняли две недели. Этого можно было избежать, заварив соединение плотным швом, что затруднило бы проведение последующих ремонтных работ. Если бы болты затягивались в холодном виде, то при повышении температуры возникли бы осевые и изгибающие усилия, создающие во фланцах напряжения, превышающие предел текучести. Вначале утечка была ликвидирована переходом на медные прокладки, однако они также дали течь, когда температура и давление в системе циклично изменялись от величин, соответствующих окружающей атмосфере, до рабочих условий. При эксплуатации реактора было установлено, что насосы могут работать без плотной сварки и без утечек, если не затягивать фланцевые болты так сильно, как рекомендовано, и перед повышением давления в системе до 14,1 МПа производить нагрев до 260 °С, а перед снижением давления – охлаждение. В других отношениях все четыре насоса работали вполне удовлетворительно более 5300 ч.

*Хален SPERT-3.* Небольшой герметизированный насос, который обеспечивал циркуляцию воды на установке в Халене, работал вполне удовлетворительно около 12 месяцев с момента его пуска (июнь 1958 г.). Для предотвращения захвата воздуха, способного вызвать локальный перегрев или повреждение подшипников, операторы перед пуском насоса после длительных остановок производили тщательную сдувку со сбросом воздуха в атмосферу. Четыре герметизированных насоса на установке

(пуск – сентябрь 1958 г.) ни разу не были остановлены для какого-либо ремонта. Когда установка SPERT-3 не работает, насосы в соответствии с правилами плановых ремонтов установки в целом продолжают вращаться и их подшипники поддерживаются залитыми водой.

*HRE-1, HRE-2.* В этих гомогенных реакторах для циркуляции водного топливно-го раствора использовали отдельные небольшие герметизированные насосы; никаких текущих ремонтов этих насосов не проводилось. Замена вышедшего из строя насоса на резервный осуществлялась обычно дистанционно. В течение 15 месяцев работы HRE-1 после установки насоса в январе 1952 г. имели место четыре случая поломок: три электрических (мощность электродвигателя была недостаточной для требовавшихся рабочих условий) и одна механическая (после замены треснувших подшипников насос был снова введен в работу).

За 20 месяцев работы в октябре 1956 г. HRE-2 после установки насоса он выходил из строя дважды. Когда произошел разрыв электропроводки, операторы дистанционно произвели ремонт. Вторично насос вышел из строя при нарушении нормальных условий работы – рабочее колесо из титана и кольцевые прокладки терлись друг о друга и загорались, так как циркулирующая в системе вода имела высокое содержание кислорода. Чтобы избежать повторения подобных случаев, этот насос был заменен другим насосом с рабочим колесом из нержавеющей стали. По-видимому, ни одна из этих поломок не может быть приписана плохой конструкции самого насоса.

*Насосы с ограниченной утечкой.* Опыт работы атомных установок с насосами с небольшой утечкой был ограничен установками производительностью примерно до 38 м<sup>3</sup>/мин и давлением до 8,4 МПа. Как и в случае обычных установок, упорные подшипники и уплотнения требовали периодической регулировки и иногда замены.

В течение четырехмесячной работы с момента установки в марте 1960 г. двух циркуляционных насосов с механическим уплотнением на реакторе с кипящей водой в Вальеситосе (VBWR) имели место два срабатывания системы аварийной остановки реактора из-за повреждения насоса. В одном случае перегрелись подшипники насоса после прекращения поступления к ним охлаждающей воды. При этом аварийный температурный сигнал не сработал, и оператор не знал о возникшей неисправности. В результате подшипники вышли из строя, был установлен новый тип аварийного сигнала. Второй насос был остановлен, когда в масле, смазывающем трубопровод (электрический двигатель приводил в действие другой насос), накопилась вода. Это было вызвано недостатками системы эжекции воды. После демонтажа и очистки турбины операторы VBWR модифицировали систему охлаждения циркулирующей эжекторной воды. Текущий технический осмотр насосов VBWR в основном заключается в проверке смазки, однако периодически проверяют и калибруют приборы регулирования системы ввода уплотнявшей воды и трубопровода.

В течение шестимесячной работы двух насосов с механическим уплотнением после их установки в октябре 1960 г. на реакторе для исследования плутониевого топливного цикла (PRTR) неисправности насосов в трех случаях вызвали их остановку. В ходе исследований операторы установили, что механические уплотнения высокого давления интенсивно истираются, когда вращающаяся насосная сборка, включая маховик массой 1089 кг, колебалась более 0,0254 мм. Для ликвидации этого потребовались более жесткие посадки в подшипниках и рабочем колесе, а также отверстия в маховике для правильной динамической балансировки вращающейся сборки.

Когда при полных рабочих давлениях имели место нестабильные осевые усилия, разгружавшие упорные подшипники насосов реактора PRTR, «плавающие» усилия приводили к возникновению колебаний величиной около 0,0762 мм, разрушающих уплотнения. Эта проблема решена с помощью пружин, создающих дополнительное усилие в 907 кг, прижимающее вращающуюся сборку.

**Тенденции в развитии насосов.** В настоящее время помимо улучшения самих насосов усилия направлены на создание более надежной схемы установки, обеспечивающей естественную циркуляцию теплоносителя реактора, так как на циркуляцию воды через высокие вертикальные ПГ затрачивается меньше энергии, чем через низкие горизонтальные аппараты. Создание реактора с естественной циркуляцией теплоносителя позволило бы отказаться от главных насосов теплоносителя. Другой тенденцией является использование вспомогательных насосов двухцелевого назначения. Так, насос, охлаждающий выравнивающую емкость низкого давления, помогает расхладивать реактор при его остановке. Тем самым уменьшается число насосов, необходимых для одной установки.

Считается, что насосы с ограниченной утечкой благодаря меньшей стоимости заменят герметизированные насосы. Поэтому ряд лабораторий работает над созданием лучших уплотнений вала. Однако сторонники создания надежных герметизированных насосов указывают на то, что системы с инъекцией уплотняющей воды или с устранением утечки увеличивают сложность и стоимость насосов с ограниченной утечкой. Они считают также, что даже если удовлетворительные уплотнения с ограниченной утечкой будут разработаны, то потребуют большего регулирования и обслуживания, чем герметизированные. Существующие тенденции в развитии реакторов тормозят широкое использование насосов с ограниченной утечкой для атомных установок. Некоторыми из этих тенденций являются:

- повышение давления в реакторах с кипящей водой от 4,2 до 7,0–8,0 МПа и в реакторах с водой под давлением от 8,4–14,1 до 15,5–17,6 МПа;
- повышение электрических мощностей реакторов и требуемых производительностей насосов от 50–100 МВт и 45,4–91 м<sup>3</sup>/мин до 300–400 МВт и 151,4 м<sup>3</sup>/мин соответственно на насос в каждой из четырех петель установки. Производительность герметизированных насосов для реактора фирмы «Янки» составляет 142 % от производительности насосов в «Шиппингпорте», равной 63 м<sup>3</sup>/мин, а производительность насосов, принятых для установки EDISON в Южной Калифорнии, будет вдвое больше, чем у первых.

Опыт эксплуатации насосов в атомных установках привел к усовершенствованиям, давшим экономию и улучшение рабочих характеристик. Почти не возникало никаких проблем по обслуживанию с радиоактивными отложениями, поэтому теперь проектанты установки меньше обращают внимание на отделку поверхности насосов, особенно наружных поверхностей. По требованиям конструкторов шероховатость смачиваемых поверхностей корпусов и рабочих колес должна быть такой, чтобы среднеквадратичная величина высоты выступов не превышала 125, для этого необходимо применять продольное шлифование и полировку. Технические условия в настоящее время допускают использование поверхностей со среднеквадратичной величиной выступов (поверхность корпусов промышленных насосов, для которых не предусмотрена специальная отделка поверхности, имеет выступы со среднеквадратичной величиной 400–500). Многие конструкторы требуют только удовлетворительного рентгенографического контроля и проверки с помощью проникающих красок отсутствия трещин и дефектов, способных вызвать разрыв корпуса под давлением. Кроме того, учитывая растущий интерес к обеспечению надежных рабочих характеристик, ожидают, что технология изготовления корпусов будет настолько улучшена, что проверка готового корпуса сможет быть ограничена только опрессовкой.

Для герметизированных насосов усовершенствования включали:

- лучшие составы графитера (графито-углеродная смесь на органическом связующем) для подшипников;
- лучшие материалы защитных чехлов (нержавеющая сталь была заменена инконелем, обладающим большей коррозионной стойкостью и лучшими электрическими свойствами);

- более тонкие защитные оболочки 0,337–0,382 мм чаще, чем 0,508–1,27 мм;
- улучшение гидравлических характеристик путем замены диффузора на меньшее устройство с направляющими лопатками и установка в схему насоса контрольного клапана.

Усовершенствованы также герметичные обмотки. Имеются указания на то, что теперь герметизирующую оболочку можно не ставить на ротор, что понизит стоимость и увеличит КПД установки. Если будет строиться больше атомных установок, использующих герметичные насосы, стоимость изготовления последних уменьшится.

В этом отношении должна помочь стандартизация конструкций (хотя у насосов фирмы «Янки» и в Индиан-Пойнте рабочие колеса и улитки разные, для их привода применяют одинаковые герметичные электродвигатели). Увеличение использования герметизированных насосов на обычных энергетических станциях понижает стоимость этих насосов – в основном за счет увеличения производительности, а также потому, что насосы на этих станциях изготовлены из более дешевых материалов (рабочие колеса и улитки – из углеродистой стали) и требуют менее строгих норм технического контроля при изготовлении.

Стоимость герметичных насосов на 40–100 % выше стоимости насосов с ограниченной утечкой в основном за счет высокой цены специальных электродвигателей (60–80 дол. от полной стоимости). Так, было проведено сравнение стоимости насосов, изготовленных полностью из нержавеющей стали с валом диаметром 152,4–177,4 мм для прокачки 151,4 м<sup>3</sup>/мин воды при температуре 329,4 °С и давлении 17,58 МПа с полным динамическим напором 45,7 м и чистым напором всасывания 9,1 м. Стоимость изготовления герметичного насоса для работы в таких условиях составила бы около 450 тыс. дол., не считая примерно 250 тыс. дол. стоимости проектирования и экспериментальной отработки первого образца.

С другой стороны, насос с ограниченной протечкой стоит около 250 тыс. дол. (после того как будет разработано удовлетворительное уплотнение). К этому должны быть добавлены непредвиденные расходы на увеличившееся оборудование установок обессоливания и удаления отходов для обработки загрязненной воды в случае выхода из строя уплотнения. Введение системы для инъекции воды потребует еще около 30 тыс. дол. Для каждого насоса необходимо 10 тыс. дол. на установку и начальную обкатку, а для насосов с ограниченной протечкой возможны большие суммы, если уплотнение или вспомогательные устройства достаточно сложны. Таким образом, установка герметичных насосов может стоить 450 тыс. дол., а насосов с ограниченной утечкой – 290 тыс. дол. и более (включая систему ввода уплотняющей воды, но не учитывая расходы на оборудование для переработки дополнительных количеств сбросов и обессоливания дополнительного количества воды, а также стоимость разработки уплотнений; разработка уплотнений может стоить 2–3 млн дол.). Это дает разницу в 160 тыс. дол. для одного насоса.

Общий КПД больших герметичных насосов обычно составляет 60–70 %, а у насосов с ограниченной протечкой около 75–81 %, в зависимости от потерь в результате трения в уплотнении и инъекции воды.

Если принять 10 %-ю разницу в КПД, герметичный насос, перекачивающий 151,4 м<sup>3</sup>/мин воды при температуре 315,6 °С и полном динамическом напоре (ПДН) 45,7 м, потребует дополнительной мощности на 150 кВт больше, чем насос с ограниченной протечкой, работающий в тех же условиях. При коэффициенте нагрузки установки 10 %, термическом КПД цикла 28 % и стоимости топлива 30 центов за 252 000 ккал дополнительные годовые затраты на топливо составят 4525 дол. на один герметичный насос.

Исходя из этих цифр, реакторная установка с четырьмя герметичными насосами стоила бы больше, чем аналогичная установка с насосами с ограниченной протечкой. В противовес этой разнице должны быть подсчитаны расходы, связанные с увеличе-

нием дезактивации и очистки оборудования для обессоливания воды и удаления отходов, необходимых для установки, использующей насосы с ограниченной протечкой. Также необходимо учитывать разницу в стоимостях установки, пусковых работ, эксплуатации и времени простоя, стоимость создания пригодного уплотнения. К тому же можно предположить, что стоимость герметичного насоса снизилась бы до 350 тыс. дол., если бы внимание при его разработке было обращено на уменьшение стоимости, и если использование таких насосов в обычных и атомных энергетических установках будет увеличиваться.

Разработка надежных больших герметичных насосов сделала технически осуществимым создание атомных энергетических станций большой мощности. Чтобы насосы с ограниченной утечкой оказались экономически выгодными для обслуживания больших энергетических реакторов, необходимы более плотные уплотнения большего размера. Для насоса любого типа разработка менее дорогих материалов и норм контроля должна уменьшить его стоимость.

**Нормы контроля.** Жесткие требования в отношении надежности оправданы для насосов, используемых на борту корабля. Однако для электростанции общего назначения обычной практикой является остановка реактора для случайных ремонтов без снижения надежности. Промышленные нормы контроля могут уменьшить стоимость насосов для реакторных установок на 10–20 %. Считается, что литье, идущее на нужды атомной промышленности, стоит на 30–50 % дороже литья для промышленности общего назначения.

В настоящее время любой дефект, обнаруженный с помощью рентгеноскопии или течеискания в литье насоса, должен быть зашлифован или вырублен, заполнен наплавленным металлом, отшлифован, а насос повторно испытан. Необходимо изучить величину надежности, определяемую существующими нормами контроля, возможно, путем сравнения результатов опрессовки литья, имеющего известные дефекты (внутренние раковины, поверхностные трещины и т.п.), и литья, удовлетворяющего нормам контроля в атомной промышленности.

**Материалы.** Для сведения к минимуму накопления радиоактивных продуктов коррозии в воде большинство реакторов, детали или их покрытия были выполнены из нержавеющей стали. Стоимость была бы значительно ниже, если бы использовались сплавы с низким содержанием хрома либо углеродистая сталь или если бы детали насосов из нержавеющей стали изготавливались из материалов, плакированных нержавеющей сталью (герметизированный насос с деталями из углеродистой стали стоит на 10–15 % меньше насоса, выполненного полностью из нержавеющей стали). Кроме того, регулировать химический состав воды можно значительно качественнее, что позволит использовать в насосах и другом реакторном оборудовании более дешевые материалы.

Опыт эксплуатации нового реактора (NPR) в Ханфорде и тяжеловодного реактора (HWSTR) в Саванна-Ривере, которые используют трубопроводы из углеродистой стали в одном из прототипных реакторов для двигателей на Национальной станции по испытанию реакторов, поможет установить, насколько радиоактивность продуктов коррозии и осаждение их на теплопередающих поверхностях ухудшают работу реактора.

**Насосы с ограниченной утечкой.** Использование уплотнений с инъекцией воды может решить проблему утечки радиоактивной воды, но только с помощью дорогой и сложной вспомогательной системы, подающей холодную воду в реакторный контур. Для создания надежных механических уплотнений с малыми величинами утечки (50–100 см<sup>3</sup>/ч) Комиссия по атомной энергии приступила к осуществлению нескольких программ разработки.

В Ханфорде для испытания различных уплотнений, не требующих инъекции воды, используют насос с ограниченной утечкой фирмы Wagon Jackson Company. При

выполнении более широкой программы создания уплотнений насоса фирма «Дюной» в Саванна-Ривере достигла определенных успехов при испытаниях на моделях валов диаметром от 25 мм.

Уплотнение с контактирующей поверхностью (называемое также контактным или механическим) (рис. 5.22) используют в питательных насосах высокого давления. Первичное уплотнение проходит по поверхности, по которой уплотняющее кольцо, прикрепленное к неподвижной обойме, контактирует с заплечиками вала.

Этот тип уплотнения, когда он включает несколько таких ступеней или используется в сочетании с другими типами уплотнения, обладает наибольшими возможностями для главных насосов первого контура реактора с ограниченной утечкой. Механические уплотнения разрабатываются фирмами Bingham Pump, Byron Jackson Company, Peerless Pump and Packing. Эти фирмы испытывают уплотнения до 3600 об/мин при давлении 17,58 МПа. Фирма Peerless Pump and Packing в своей исследовательской программе использует четыре уплотнения с контактирующей поверхностью, расположенные в двух ступенях понижения давления с внутренним или наружным обводами; при температуре воды 260 °С и диаметре вала 114,3 мм утечки составляют всего 3,8–7,6 л/мин. Уплотнение, предложенное фирмой Bingham Pump, для вала диаметром 114,5 мм состоит из одного уплотнения с контактирующей поверхностью, перед которым установлено дросселирующее устройство, ограничивающее инжекцию воды в корпус 3,8–7,6 л/ч при давлении 112,5 кг/см<sup>2</sup> и температуре воды 287,8 °С. Уплотнения фирмы Byron Jackson Company в виде ряда механических уплотнений с контактирующей поверхностью (с самоустанавливающимся распределением давления между ними) на валу диаметром 50,8 мм дают утечку воды при давлении 10,55 МПа на уровне всего 37,8 л/ч без инжекции воды. Уплотнение с контактирующей поверхностью фирмы Peerless Pump and Packing на валу диаметром 111,1 мм дает утечку воды при температуре 148,9 °С и давлении 17,58 МПа значительно меньше 3,6 л/мин; наружный теплообменник отводит тепло, образующееся в уплотнении.

Для насосов первого контура Worthington Corporation разрабатывает новый тип уплотнения, которое не будет растрескиваться или чрезмерно истираться при на перепаде давления 14,06–16,87 МПа (в этом случае данное уплотнение используется вместе с обычным уплотнением с контактирующей поверхностью, работающим на перепаде 0,35–0,7 МПа и предотвращающим утечку воды). Это новое уплотнение с контактирующей поверхностью изготавливается и функционирует совершенно иначе, некоторые его детали работают по обычному принципу гидродинамических упорных подшипников. Между его неподвижными и вращающимися частями поддерживается жидкостный слой заранее определенной толщины, что обеспечивает гидродинамическую смазку контактирующих поверхностей. Оператор может изменять толщину слоя наружной диафрагмой, с помощью которой измеряют протечки. Испытания такого уплотнения с валом диаметром 44,5 мм на давлении вплоть до 14,06–17,58 МПа при 3600 об/мин дали протечки, составляющие 3,8 л/ч.

Для создания уплотнения, ограничивающего утечку из промышленного реактора воды с температурой 343,3 °С и давлением 12,58 МПа, величиной до 3,8–18,9 л/ч, Worthington Corporation расширила исследования нового типа уплотнения, для предварительных испытаний использовали модели уплотнений. Этой фирмой к 1963 г. было разработано и испытано уплотнение диаметром 152,4–177,8 мм для установки в насосе первого контура производительностью 151,4 м<sup>3</sup>/мин с полным динамическим напором 76,2 мм.

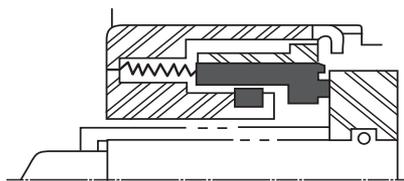


Рис. 5.22. Уплотнение с контактирующей поверхностью

**Другие типы уплотнений.** Вугон Jackson Company создает дросселирующие устройства с линейным изменением давления. Фирма Ingersoll-Rand для котельного питательного насоса, работающего при давлении 30,94 МПа и температуре воды 298,9 °С, первоначально создает уплотнение, состоящее из большого числа плавающих колец (рис. 5.23), перед которыми установлено дросселирующее устройство. Это уплотнение имеет несколько ступеней инжекции воды для охлаждения и смазки. Фирма Chalmers также разрабатывает уплотнения с плавающими кольцами.

Высокоэластичные уплотняющие кольца различной формы часто используют в качестве невращающихся вторичных уплотнений в узлах механических уплотнений, хотя сами по себе они недостаточно плотны для главных насосов первого контура реактора. Эти кольца изготавливают из резины, тефлона, нитрона марки А или других подобных материалов. Уплотнение с плавающей втулкой состоит из втулки, тесно посаженной на вал. Характеристика втулки позволяет достаточно свободное перемещение, которое исключает возникновение истирания при движении вала и его искривлениях. При больших давлениях воды можно использовать ряд втулок или колец, расположенных последовательно. Поскольку каждое узкое кольцо движется независимо от других, можно допускать значительные искривления вала и обоймы.

Даже при успешном выполнении этих программ нет уверенности в возможности создания удовлетворительно плотных уплотнений для больших насосов, необходимых для мощных атомных реакторов, работающих под давлением.

**Герметизированные насосы.** Первоначально надежные герметизированные насосы были разработаны для реакторов военных двигателей. Некоторые специалисты считают, что слишком мало усилий направлено на уменьшение стоимости или увеличение КПД таких насосов.

**Герметизирующий чехол.** КПД герметизированных электродвигателей составляет 6,85 %, а для больших обычных электродвигателей 92–95 %. Значительная часть этой разницы (7–15 %) является следствием потерь от гистерезиса с индуцированным током в материале защитного чехла (3 % – потери вследствие того, что для уменьшения толщины корпуса, работающего под давлением, используют узкие и длинные электродвигатели). Замена нержавеющей стали инконелом и уменьшение толщины герметизирующего чехла с 1,17 до 0,38 мм повысили КПД герметизированного насоса. Дальнейшие улучшения возможно получить при разработке защитных чехлов из хастеллоя (2–3 %). Также представляют интерес неметаллические материалы для чехлов. Технологические усовершенствования, которые позволяют иметь меньший зазор, понизят потери с жидкостью.

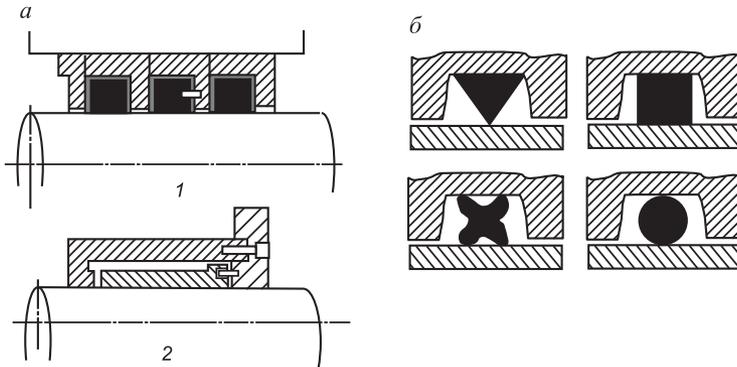


Рис. 5.23. Типы уплотнений:

*a* – уплотнение с плавающей втулкой (1 – составное; 2 – одиночное); *б* – высокоэластичные уплотняющие кольца

*Подшипники.* Упорный и опорный подшипники, смазываемые водой, для большинства герметизированных насосов получают из графитера. Изготовление таких подшипников, удовлетворительно работающих при температуре, превышающей 148,9 °С, является сложной задачей (разрушается связывающий материал). Для производства подшипников необходим менее чувствительный и более надежный материал.

*Мокрые электродвигатели.* У электродвигателей, успешно работающих в циркуляционных котельных контурах, в условиях атомных установок могут возникнуть трудности, связанные с загрязнением. Величина этих трудностей и влияние облучения на изоляцию должны быть установлены.

**Влияние типа реактора на выбор насосов первого контура.** В реакторах с кипящей водой главные насосы теплоносителя первого контура работают при давлении на всасе, меньшем 7,03–8,44 МПа. Поэтому корпус и конструкция уплотнения не так сложны, как для насосов на реакторах с водой под давлением. В условиях, когда перекачиваемая среда находится при температуре и давлении насыщения, чистый напор всасывания (давление воды, необходимое на всасе, в дополнение к давлению насыщения для предотвращения вскипания в рабочем колесе) равен только разнице между высотами уровня теплоносителя (воды) и уровнем расположения всаса насоса. Таким образом, насос должен быть установлен на самой низшей отметке установки.

Теплоноситель может циркулировать через контуры реактора с кипящей водой только за счет одной естественной конвекции (прямоточная схема). Однако 25–35 %-я циркуляция реакторной воды с температурой 287,8 °С через промежуточный парогенератор повышает тепловую мощность активной зоны и увеличивает КПД цикла (генерируемый насыщенный водяной пар при давлении 3,16 МПа направляется в ступень низкого давления турбины). Так как потери напора в первом контуре (более 38,1 м) нежелательны, циркуляционный насос первого контура требует только одну ступень. Если используют отдельный или встроенный пароперегреватель, питательный насос реактора должен создавать дополнительный напор в 0,35–0,88 МПа для преодоления гидравлического сопротивления в пароперегревателе.

В реакторе с кипящей водой конденсат и контур питательной воды начинается в конденсаторе-деаэраторе, в котором отводятся оставшиеся радиоактивные газы, не ушедшие при прохождении парового вытяжного эжектора уплотнения турбины. Давление нагнетания конденсатного насоса должно быть больше всех потерь давления в конденсатной системе и должно обеспечить для питательного насоса реактора достаточный чистый напор всасывания во всех возможных переходных условиях. Таким образом, полный динамический напор питательного насоса реактора равен разнице между требуемым давлением нагнетания и чистым напором всасывания.

*Реактор с водой под давлением.* Главные насосы первого контура работают при больших давлениях всасывания (14,06–17,58 МПа). Так как эти насосы перекачивают весь теплоноситель реактора, они обычно больше насосов для реактора с кипящей водой, которые перекачивают только 25–30 % всего теплоносителя. Проблема уплотнения для этих насосов является более серьезной. Однако контур теплоносителя в реакторе с водой под давлением работает при давлении, превышающем давление насыщения на десятки атмосфер, и поэтому вероятность вскипания в рабочем колесе насоса небольшая. Здесь проблема чистого напора всасывания настолько мала, что насосы могут быть установлены вблизи средней отметки установки по высоте.

Насосы второго или парового контура атомной станции с реактором с водой под давлением подобны таким же насосам в ПГ с топками. Они обладают сравнительно умеренными производительностями, но создают высокий полный динамический напор и работают при больших давлениях нагнетания.

*Реактор, охлаждаемый тяжелой водой.* Главные насосы первого контура имеют уплотнения, которые сводят к минимуму утечку, так как тяжелая вода стоит 14–28 дол.

за 0,454 кг. Кроме того, незащищенные утечки тяжелой воды опасны из-за их радиоактивности и токсичности, поскольку нейтроны превращают дейтерий в тритий.

*Гомогенный реактор.* Главные насосы первого контура всегда имеют электродвигатель герметизированного типа, чтобы предотвратить любую протечку высокоактивных топливных растворов (уранилсульфат, растворенный в воде или в тяжелой воде, или в фосфорной кислоте).

## 5.6. Главный циркуляционный электронасос ВПБЭР-600

Главные циркуляционные электронасосы предназначены для организации принудительной циркуляции первичного теплоносителя в контуре охлаждения активной зоны. Шесть главных циркуляционных электронасосов размещены в патрубках корпуса реактора. Тип электронасоса – центробежный, горизонтальный, со встроенным герметичным электродвигателем. Электродвигатель – асинхронный, трехфазный, с короткозамкнутым ротором и водозаполненным статором. Установка электронасоса – горизонтально, внутри страховочного корпуса реактора. Основные технические характеристики электронасоса приведены в табл. 5.5

Таблица 5.5

Основные технические характеристики ГЦЭН ВПБЭР-600

Технические характеристики	Значение	Дополнительные указания
Подача, м <sup>3</sup> /с (м <sup>3</sup> /ч)	2,33 (8400)	
Напор, м	75	Без учета сопротивления проточной части
Температура теплоносителя на входе, °С	294,8	
Давление на входе, МПа	15,7	Без учета гидростатического давления
Температура расчетная, °С	350	
Давление расчетное, МПа	18,0	
Частота вращения ротора (синхронная), об/мин (с <sup>-1</sup> )	1500 (25)	
Напряжение питающей сети, В	6000	
Частота, Гц	50	
Мощность на роторе, кВт	2400	
Мощность, потребляемая из сети, кВт	2470	
Габаритные размеры электронасоса, мм: длина диаметр	6120 1440	
Масса, кг	38 000	

Главный циркуляционный насос конструктивно разделен на выемную часть, включающую электродвигатель с рабочим колесом, устанавливаемую снаружи в патрубок корпуса реактора, и направляющий аппарат с элементами крепления, устанавливаемый со стороны внутренней полости корпуса реактора.

Рабочее колесо – диагонального типа, сварно-литой конструкции. Материал ведущего и покрывного дисков – сталь 12X18H10T (поковка), лопастей – сталь типа 12X18H12M3ТЛ (литье).

Направляющий аппарат – лопаточный, сварно-литой конструкции. Примененные материалы – сталь 12X18H10T, 12X18H12M3ТЛ.

Электродвигатель состоит из статора, установленного в прочном корпусе, в котором размещаются холодильник автономного контура, электропроводы ротора, крышки со встроенным вспомогательным электронасосом.

Вода автономного контура циркулирует через пазы статора с обмоткой и через роторную полость. Статор электродвигателя шихтованный, набран из отдельных листов электротехнического железа и имеет водостойкое покрытие. Обмотка статора выполнена проводом с водостойкой изоляцией на основе радиационно-модифицированного полиэтилена (провод ПДПОВ 5,9), места соединений в схему выполнены термоусаживаемой радиационно-модифицированной полиэтиленовой лентой (лента ЛПИРМ).

Подвод электропитания (6000 В) осуществляется посредством трех герметичных электропроводов, состоящих из керамической втулки с переходными деталями, токоведущего стержня, наружного защитного покрытия. Наружное покрытие (со стороны воды автономного контура) представляет собой комплект термоусаживаемых втулок из радиационно-модифицированного полиэтилена (по ЛЭ 15594 ТУ), изоляция соединений электропроводов с обмоточным проводом выполнена лентой ЛПИРМ.

Корпус статора – сварная конструкция, выполненная из поковок, сталь 12X18H10T. Во внутренней полости корпуса размещается холодильник автономного контура. Холодильник змеевикового типа, трехрядный, труба 28×4, сталь 08X18H10T. Вода автономного контура циркулирует в межтрубном пространстве, охлаждающая вода промежуточного контура – внутри трубок.

Ротор электронасоса состоит из вала, представляющего собой поковку из стали 09X17H, в средней части которого выполнена короткозамкнутая «беличья» клетка, и навешанных на него колеса автономного контура, диска пяты осевого подшипника, втулок радиальных подшипников, маховика, рабочего колеса. Стержни «беличьей» клетки (медь М2) имеют по всей длине боковых поверхностей полости, связанные системой отверстий с напорной и всасывающей полостями автономного контура, что обеспечивает их интенсивное охлаждение.

Ротор электродвигателя вращается в двух радиальных гидростатических подшипниках, питание которых осуществляется от вспомогательного колеса автономного контура. Материалы пары трения радиальных подшипников – наплавка ПГ-С2 (роторная втулка) по силицированному графиту ПРОГ-2400С.

Осевой подшипник – колодочный, двустороннего действия, рабочая среда – вода автономного контура. Материалы пары трения подшипника – силицированный графит ПРОГ-2400С по силицированному графиту ПРОГ-2400С.

Предотвратить обратное вращение отключенного электронасоса при остальных работающих можно за счет применения антиреверсивного устройства механического типа, размещенного на торце маховика.

Антиреверсивное устройство представляет собой механизм с зубчатым кольцом, закрепленным на фланце выгородки маховика, и четырьмя подпружиненными храповиками, установленными на осях в нишах маховика. Зубья неподвижного кольца имеют односторонний скос в сторону нормального вращения, за счет чего храповики при пуске насоса в прямом направлении выходят из зацепления с зубчатым кольцом под действием центробежных сил, а при начале вращения (при  $n = 0$ ) в обратном направлении под действием пружин входят в зацепление и фиксируют ротор в этом положении. Для уменьшения динамических нагрузок контактирующих деталей при

установке храповика на зуб в конструкции применено демпфирование зубчатого кольца за счет его связи с фланцем выгородки через рессоры пластинчатого типа.

Для обеспечения возможности выравнивания температуры ротора, корпуса электронасоса перед пуском во избежание заклинивания ротора (вследствие горизонтального исполнения электронасоса возможно неравномерное поле температуры воды автономного контура по высоте поперечного сечения) в крышке корпуса электронасоса установлен вспомогательный электронасос.

Вспомогательный электронасос – герметичный, центробежного типа, со статорной перегородкой ( $U_p = 380$  В,  $n = 3000$  об/мин,  $N_c = 15$  кВт). Рабочее колесо вспомогательного электронасоса размещено внутри навешенного рабочего колеса автономного контура, и при работе вспомогательного электронасоса перед пуском основного вода автономного контура проходит через рабочее колесо автономного контура в трассу питания подшипниковых узлов, роторную полость, обеспечивая выравнивание поля температур ротора и его «всплытие» в радиальных ГСП. Чтобы ограничить истечение теплоносителя первого контура при авариях, связанных с образованием трещины или полным отрывом патрубка, в котором установлен электронасос, применено фиксирование корпуса электронасоса в патрубке с помощью байонетного соединения с ограничением истечения разрезными металлическими кольцами ( $d_{\text{экр}} = 20$  мм).

В качестве обоснования принятых конструктивных решений необходимо отметить, что в электронасосе использованы узлы, конструкция которых отработана в процессе испытаний на стендах предприятия, а также в процессе длительной эксплуатации в составе ГЦН действующих АЭС.

Конструкция водозаполненного статора электронасоса основывается на данных о работе насосов такого типа на действующих установках – насосы фирм KSB, Hayward Tyler, а также на результатах опытно-конструкторских работ по созданию обмоточного провода, мест внутримашинных соединений, электровводов, проведенных НИИ ЛПЭО «Электросила» (г. Санкт-Петербург), положительных результатах ресурсных испытаний электронасоса-прототипа ГЦЭН – электронасоса 33СП (герметичный, центробежный, с водозаполненным статором,  $N_c = 390$  кВт,  $U_p = 6000$  В, со штатными электровводами, обмоточным проводом, примененной технологией выполнения мест внутримашинных соединений. Нарботка к настоящему времени составляет 3400 ч при штатных значениях температуры воды, охлаждающей обмотку, давления, напряжения питающей сети).

Радиальные подшипники, аналогичные по конструкции и материалам пары трения, примененным в электронасосе, прошли длительные испытания на стенде, а также были применены в насосе ЦВН-12 РБМКП, и в его составе прошли испытания на стенде.

Осевой подшипник, используемый в электронасосе, был разработан применительно к насосу ЦВН-12 РБМКП и прошел испытания на стенде СТ-680Г. Длительность испытаний составила 6000 ч при 100 пусках под нагрузкой до 40 т.с. (при удельной нагрузке до 7 МПа), что значительно превышает возможные осевые нагрузки в ГЦЭН. Износа рабочих поверхностей подшипника за указанное время испытаний не было обнаружено.

Аналогом при разработке антиреверсивного устройства может служить устройство вертикального насоса ЦВН-8, которое за период эксплуатации в составе ГЦН действующих АЭС показало надежную работу. Такого же типа антиреверсивное устройство применяется в конструкциях ГЦН для установок ВВЭР-440, ВВЭР-1000 – насосы ГЦН-317, ГЦН-195.

Применение в ГЦЭН узлов, работоспособность которых подтверждена испытаниями на стендах предприятия и длительной эксплуатацией в составе насосов на АЭС, позволяет значительно снизить объем опытно-конструкторских работ по ГЦЭН.

## ГЛАВА 6. КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТА АЭС-2006

### 6.1. Основные принципы и подходы при проектировании

Основой проекта Белорусской АЭС является серийный проект АЭС-2006 с реактором технологии ВВЭР, выполняемый в современной информационной среде и в соответствии с требованиями ядерной и радиационной безопасности.

Белорусская АЭС – результат эволюционного развития наиболее распространенного и технически совершенного типа станций – АЭС с ВВЭР. В качестве теплоносителя и замедлителя нейтронов в таком реакторе используется «легкая» (обычная) вода. Принятая в мире аббревиатура – PWR (pressurized water reactor) – реактор с водой под давлением. Ближайший аналог – Ленинградская АЭС, строящаяся по серийному проекту. Проект АЭС-2006 является развитием Тяньваньской АЭС, построенной в Китае и сданной в коммерческую эксплуатацию в 2007 г. По мнению ведущих экспертов, это одна из самых передовых и безопасных действующих атомных станций в мире.

Параметры реакторной установки, характеристики оборудования машинного зала и конфигурация систем безопасности выбирались исходя из следующих основных принципов и подходов:

- максимальное использование решений и обоснований уже разработанных проектов с реакторами ВВЭР (действующие АЭС с РУ типа В-320, Тяньваньская АЭС в КНР);
- минимизация рисков и улучшение эксплуатационных характеристик за счет использования апробированных технических решений и референтного оборудования;
- улучшение характеристик оборудования и систем за счет снятия избыточного консерватизма и оптимизации проектных запасов;
- обеспечение требуемого уровня безопасности, в том числе и при запроектных авариях, на основе выбора рациональной конфигурации систем защиты с применением активных и пассивных элементов, позволяющих более широко реализовать принцип разнообразия и снизить влияние человеческого фактора;
- снижение капитальных и эксплуатационных затрат за счет:
  - применения серийного оборудования и сокращения номенклатуры оборудования;
  - оптимизации решений по обращению с радиоактивными отходами и отработавшим топливом;
  - усовершенствования технологии ремонтных работ;
  - оптимизации численности эксплуатационного и ремонтного персонала.

Основные технико-экономические показатели проекта Белорусской АЭС приведены в табл. 6.1.

**Общая характеристика.** Каждый энергоблок оснащен реакторной установкой В-491 с водо-водяным энергетическим реактором с водой под давлением, а также турбиной К-1200-6,8/50 (число оборотов 3000 об/мин) с генератором переменного тока ТЗВ-1200-2УЗ электрической мощностью не менее 1195 МВт. Тепловая схема – двухконтурная.

В составе энергоблока АЭС работа РУ предусматривается в базовом режиме и в режимах маневрирования. Реакторная установка включает следующее основное оборудование и системы:

- водо-водяной энергетический реактор корпусного типа номинальной тепловой мощностью 3200 МВт под давлением теплоносителя 16,2 МПа. Теплоносителем и замедлителем является вода с борной кислотой, концентрация которой изменяется в процессе эксплуатации. В качестве топлива в активной зоне реактора используется слабо обогащенный диоксид урана;

## Основные технико-экономические показатели проекта Белорусской АЭС

Показатели	Планируемая величина
Срок службы энергоблока, лет	50
Установленная номинальная мощность энергоблока, МВт (эл.)	1194
Коэффициент полезного действия, %: брутто нетто	37,17 34,51
Расход электроэнергии на собственные нужды, %	7,15
Коэффициент готовности	0,92
Среднегодовой отпуск электроэнергии от одного блока при работе АЭС в базовом режиме без отпуска теплоты, млн кВт·ч	8517,8
Сейсмические воздействия, баллы по шкале MSK-64: для строительных конструкций зданий и сооружений, ПЗ/МРЗ для неизменяемой части проекта (в том числе для оборудования реакторной установки)	6/7 7/8

- четыре горизонтальных парогенератора типа ПГВ-1000МКП с разреженной коридорной компоновкой теплообменных труб в трубном пучке, производительность каждого  $1602 \pm 112$  т/ч сухого насыщенного пара под давлением 7,0 МПа;

- четыре главных циркуляционных насосных агрегата типа ГЦНА-1391;
- главные циркуляционные трубопроводы Ду 850;
- систему компенсации давления;
- оборудование бетонной шахты реактора;
- системы безопасности.

Второй контур – не радиоактивный, состоит из паропроизводительной части парогенераторов, главных паропроводов, одного турбоагрегата, вспомогательного оборудования и обслуживающих систем, оборудования деаэрации, подогрева и подачи питательной воды в парогенераторы.

Компоновка каждого энергоблока АЭС выполнена по принципу максимального блокирования основных зданий и сооружений с сохранением территориального разделения зданий с зоной контролируемого доступа и зданий свободного доступа.

Технологическое оборудование, примененное в проекте, имеет многолетний положительный опыт эксплуатации на отечественных АЭС и АЭС за рубежом, построенных по российским проектам.

Проект обладает высокой степенью лицензируемости, которая основывается:

- на критериях безопасности, содержащихся в нормативной документации, действующей в России, учитывая рекомендации МАГАТЭ;
- использовании освоенной технологии предлагаемого оборудования, наличии прототипов, опыте сооружения и эксплуатации отечественных и зарубежных энергоблоков;
- применении общепринятых и апробированных в ядерной энергетике технических решений.

**Защита населения и окружающей среды.** Обеспечение радиационной безопасности организуется и осуществляется для предотвращения недопустимого воздействия источников ионизирующего излучения на персонал, население и окружающую среду в районе размещения АЭС. Концепция по обеспечению радиационной и ядерной безопасности в проекте Белорусской АЭС основана:

- на требованиях российских действующих правил и норм по безопасности в области атомной энергетики с учетом их дальнейшего развития;
- современной философии и принципах безопасности, выработанных мировым ядерным сообществом и закрепленных в нормах безопасности МАГАТЭ;
- работах Международной консультативной группы по ядерной безопасности (INSAG), требованиях EUR;
- комплексе проверенных эксплуатацией технических решений;
- верифицированных и аттестованных расчетных методах, кодах и программах, отработанной методологии анализа безопасности, достоверной базе данных;
- организационных и технических мерах по предотвращению и ограничению последствий тяжелых аварий;
- опыте разработки установок нового поколения повышенной безопасности;
- обеспечении низкой чувствительности к ошибкам и ошибочным решениям персонала;
- условия малых рисков значительных выбросов радиоактивных веществ при авариях;
- возможности выполнения функций безопасности без подвода энергии извне;
- отсутствии необходимости эвакуации населения, проживающего вблизи АЭС, при тяжелых авариях.

В основу обеспечения безопасности в проекте АЭС заложен принцип глубоко-эшелонированной защиты – применение системы барьеров на пути распространения ионизирующих излучений и радиоактивных веществ в окружающую среду, системы технических и организационных мер по сохранению барьеров и их эффективности, защите населения.

Для АЭС с реакторами ВВЭР такими барьерами (рис. 6.1) являются:

- топливная матрица;
- герметичные оболочки ТВЭЛов;
- границы контура теплоносителя, охлаждающего активную зону реактора (реактор, компенсатор давления, главные циркуляционные насосы, коллекторы первого контура парогенераторов, соединительные трубопроводы первого контура);
- герметичное ограждение помещений, внутри которых находится оборудование и трубопроводы реакторной установки.



Рис. 6.1. Барьеры безопасности

Система технических и организационных мер состоит из пяти уровней защиты.

*Первый уровень* основан на использовании современных норм, обеспечении качества на всех стадиях создания АЭС, контроле состояния барьеров безопасности при эксплуатации и культуре защиты.

*Второй уровень* включает управление при нарушениях эксплуатации и обнаружении отказов, защиту и блокировку, резервные механизмы нормальной работы для обеспечения постоянной целостности барьеров.

*Третий уровень* состоит из защитных, управляющих, локализирующих и обеспечивающих систем безопасности, которые предусматриваются в проекте для предотвращения отказов и ошибок персонала в проектных и запроектных авариях и для удержания радиоактивных продуктов внутри системы локализации.

*Четвертый уровень* включает управление аварией, в том числе защиту локализирующих функций.

*Пятый уровень* содержит противоаварийные меры вне площадки с целью ослабления последствий выброса радиоактивных продуктов во внешнюю среду.

Принцип глубокоэшелонированной защиты позволяет выполнить требования по учету возможных состояний АЭС и обеспечить меры безопасности.

**Защита от внешних воздействий.** Системы и элементы АЭС в составе базового варианта проекта разработаны исходя из следующих природных и техногенных воздействий (рис. 6.2):

- максимального расчетного землетрясения до 8 баллов по шкале MSK-64 с максимальным горизонтальным ускорением на свободной поверхности грунта 0,25 g;

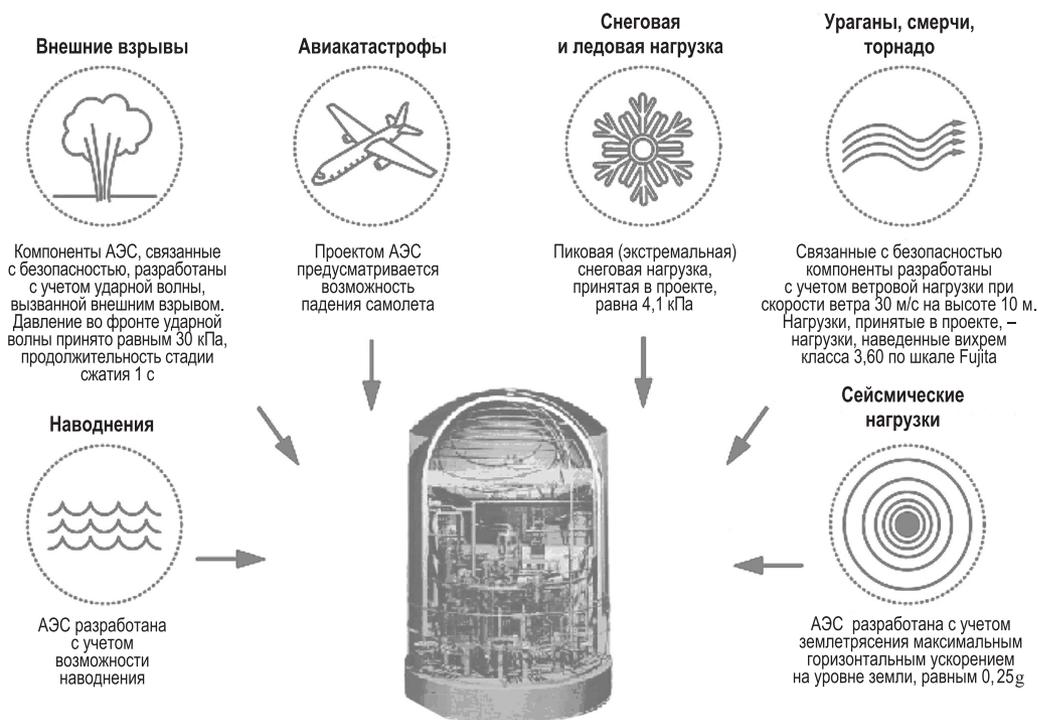


Рис. 6.2. Наиболее значимые воздействия, учтенные в проекте

- проектного землетрясения до 7 баллов по шкале MSK-64 с максимальным горизонтальным ускорением на свободной поверхности грунта 0,12 g;
- падения самолета и прочих летящих предметов массой 5,7 т со скоростью 100 м/с;
- внешней ударной волны с давлением сжатия во фронте 30 кПа и продолжительностью фазы сжатия до 1 с;
- ветровой нагрузки при скорости ветра до 30 м/с на высоте 10 м.

Вокруг реактора предусмотрена двойная защитная оболочка: наружная (защищает от вышеуказанных внешних воздействий) и внутренняя герметичная оболочка с металлической облицовкой (позволяет выдерживать давление и высокие колебания температур при проектных авариях).

**Концепция систем безопасности.** Системы безопасности состоят из четырех независимых каналов. Мощность, быстрота действия и другие характеристики каждого из них выбраны исходя из условий обеспечения ядерной и радиационной безопасности при любых исходных событиях, рассматриваемых в проекте.

За счет расположения каналов систем безопасности в разных помещениях достигнута высокая степень физического разделения: они изолированы друг от друга огнестойкими барьерами по всей границе, включая коммуникации между зданиями. Прямые связи между разными каналами безопасности не допускаются, а также предусматривается физическая защита от несанкционированного доступа персонала.

Основные принципы проектирования технических и специальных технических средств (табл. 6.2), обеспечивающих безопасность АЭС-2006, соответствуют требованиям действующих нормативно-технических документов России и рекомендациям МАГАТЭ.

Таблица 6.2

**Основные принципы проектирования технических и специальных технических средств**

Принцип проектирования	Реализация в проекте
Единичный отказ	Положен в основу всех систем безопасности (СБ) за счет применения четырехканальной структуры
Пассивность	Применяется для отдельных элементов СБ (например, для обратного клапана, гидроемкости систем аварийного охлаждения активной зоны под давлением азота, разрывной мембраны (барботер)). Используются пассивные технические средства управления запроектными авариями, резервирующие критические функции безопасности: система пассивного отвода тепла через парогенератор, система пассивного отвода тепла от защитной оболочки
Разнообразие	Резервирование систем безопасности по выполнению основных функций осуществляют системы, использующие отличное от СБ оборудование и, по возможности, принцип действия
Физическое разделение	Все четыре канала СБ территориально разделены, что обеспечивает защиту от отказов по общей причине при пожаре, падении самолета, терроре. Пункты управления энергоблоком (блочный пульт управления (БПУ), резервный пульт управления (РПУ), защищенный пульт управления противоаварийными действиями (ЗПУПД)) также разнесены по различным помещениям и зданиям

Перечень систем безопасности приведен в табл. 6.3.

## Перечень систем безопасности

Наименование	Количество каналов, шт.	Эффективность, %
<b><i>Защитные, локализирующие, обеспечивающие и управляющие системы безопасности</i></b>		
Система аварийного охлаждения активной зоны высокого давления	4	100
Система аварийного охлаждения активной зоны низкого давления	4	100
Система аварийного ввода бора	4	50
Системы аварийной питательной воды и отвода тепла через БРУА	4	100
Спринклерная система защитной оболочки	4	50
Система отвода остаточного тепла и расхолаживания РУ через первый контур	4	100
Система промконтра охлаждения ответственных потребителей	4	100
Система технической воды ответственных потребителей	4	100
Системы вентиляции помещений систем безопасности	4	100
Система локализирующей арматуры герметичной оболочки	2	100
Система хранения борированной воды	2	100
Система аварийного газоудаления	2	100
Система защиты первого контура от превышения давления	2	100
Система защиты второго контура от превышения давления	2	100
Система отсечения главных паропроводов (быстродействующий запорно-отсечной клапан)	2	100
Система обеспечения аварийного электропитания от дизель-генератора	4	100
<b><i>Пассивные системы безопасности</i></b>		
Система гидроемкостей системы аварийного охлаждения активной зоны	4	50
<b><i>Системы по управлению запроектными авариями</i></b>		
Система пассивного отвода тепла через ПГ	4	33
Система пассивного отвода тепла от защитной оболочки	4	33
Система локализации расплава	1	100
Система контроля и удаления водорода из защитной оболочки	1	100
Система химического связывания летучих форм йода	1	100
Средства по аварийному снижению давления в первом контуре	2	100
Вентиляционная система для поддержания разрежения в пространстве между оболочками	2	100

При прекращении подачи электроэнергии предусмотрены системы по управлению запроектными авариями, а при аварии – системы охлаждения реакторной установки, которые могут работать в течение длительного времени в автономном режиме, отводя тепло от реактора и поддерживая его в безопасном состоянии.

Система пассивного отвода тепла от защитной оболочки (рис. 6.3) предназначена для длительного (автономный режим не менее 24 ч) отвода тепла от защитной оболочки при ЗПА и обеспечивает снижение и поддержание в заданных проектом пределах давления внутри защитной оболочки и отвод конечному поглотителю тепла, выделяющегося под защитную оболочку, при запроектных авариях, включая аварии с тяжелым повреждением активной зоны.

Система пассивного отвода тепла через парогенераторы предназначена для длительного отвода остаточного тепла активной зоны конечному поглотителю через второй контур при запроектных авариях. Эта система дублирует соответствующую активную систему отвода тепла к конечному поглотителю в случае невозможности выполнения ее проектных функций.

Система (или устройство) локализации расплава (рис. 6.4) – уникальная российская технология безопасности, которая является одним из технических средств, специально предусмотренных для управления тяжелыми запроектными авариями на внекорпусной стадии. В нем осуществляется прием, размещение и охлаждение расплава материалов активной зоны, внутрикорпусных устройств и корпуса реактора вплоть до полной кристаллизации.

Система контроля и удаления водорода из защитной оболочки состоит из двух независимых подсистем: системы удаления водорода из защитной оболочки и системы контроля концентрации водорода под защитной оболочкой.

Система удаления водорода из защитной оболочки обеспечивает:

- при проектных авариях поддержание концентраций водорода в смеси с водяным паром и воздухом ниже концентрационных пределов распространения

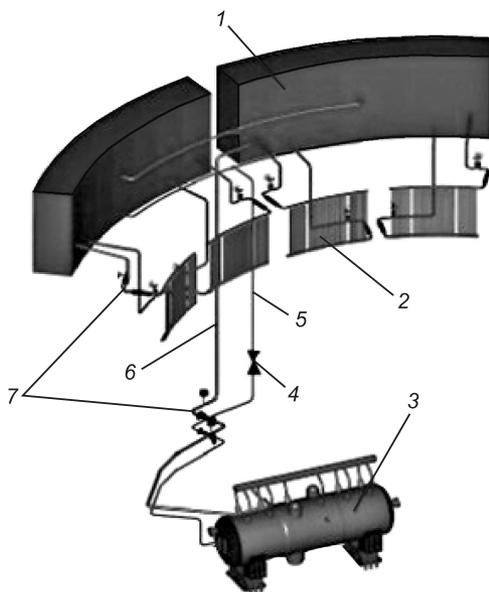


Рис. 6.3. Система пассивного отвода тепла от защитной оболочки:

- 1 – баки аварийного отвода тепла; 2 – теплообменники системы пассивного отвода тепла ЗО; 3 – парогенератор; 4 – клапаны системы пассивного отвода тепла ПГ; 5 – трубопроводы конденсата; 6 – паропроводы; 7 – отсечная арматура

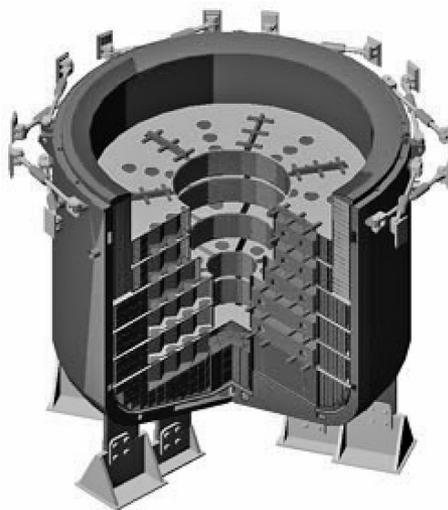


Рис. 6.4. Устройство локализации расплава

пламени в расчетном диапазоне изменения параметров среды в помещениях под защитной оболочкой;

- при запроектных авариях поддержание концентрации водорода на уровнях, исключающих детонацию и развитие быстрого горения в больших объемах (соизмеримых с размерами основных отсеков контаймента).

В состав оборудования системы удаления водорода входят комплект пассивных автокаталитических рекомбинаторов водорода (ПАРВ) и стенд для проведения контрольно-выборочных испытаний.

*Устойчивость АЭС к воздействиям, аналогичным произошедшим на АЭС «Фукусима».* В запроектной ситуации энергоблока АЭС «Фукусима-1» не выдержали действия перекрестных факторов – землетрясения и цунами, хотя при проектировании была предусмотрена защита от воздействия каждого в отдельности природного явления. Катастрофа, которая произошла на «Фукусиме», в принципе невозможна на Белорусской АЭС. Все технические решения, которые закладываются в проект, являются достаточными, чтобы обеспечить ее безопасную эксплуатацию.

Энергоблоки в Японии образца 60-х гг. XX в. относились к I поколению реакторов. Проект Белорусской АЭС – это проект атомной электростанции поколения III+. Он был разработан в качестве базового для разных стран, в том числе сейсмоактивных.

Проект Белорусской АЭС рассчитан на сейсмическую активность в 7 баллов, а реакторная установка – на 8 баллов. Однако землетрясений такой силы в районе ее размещения быть не может.

Для Белорусской АЭС дополнительно предусмотрены следующие меры по защите от запроектных аварий:

- двойная защитная оболочка вокруг реактора: наружная (предохраняет от внешних воздействий (ветровые нагрузки, торнадо, землетрясения, наводнения, ураганы, падение легкого самолета и др.)), внутренняя герметичная с металлическим покрытием (позволяет выдерживать давление и высокие колебания температур при проектных авариях);

- четыре активных канала систем безопасности обеспечивают выполнение функции защиты независимо друг от друга, а оборудование каждого из них помещено в обособленные помещения;

- система пассивного отвода тепла от парогенератора и от защитной оболочки;

- система рекомбинаторов водорода в случае его образования исключит вероятность взрыва и разрушения строительных конструкций гермооболочки;

- «ловушка расплава» обеспечит удержание и охлаждение топлива даже в гипотетической ситуации, когда тепло от реактора не отводится и происходит плавление активной зоны с выходом радиоактивного вещества из корпуса реактора.

В случае возникновения нештатных ситуаций системы безопасности обеспечат безвредный останов и расхолаживание Белорусской АЭС.

## **6.2. Проект активной зоны для РУ АЭС-2006**

Проект АЭС-2006 базируется на отработанном проекте с РУ типа В-320. Целью разработки является достижение высоких технико-экономических параметров установки.

Выполнение установленных требований может быть реализовано путем адаптации конструкции модернизированной ТВС-2М, находящейся в настоящее время в опытной эксплуатации. Для обоснования работоспособности используется также референтный опыт применения ее прототипа – ТВС-2 – на Балаковской АЭС, где он переведен в промышленную эксплуатацию.

Для АЭС-2006 на основании анализа различных конструкций ТВС, результатов работы в качестве прототипа выбрана конструкция ТВС-2М (рис. 6.5), отвечающая всем требованиям на РУ. Основные показатели к активной зоне реакторной установки представлены в табл. 6.4.

Основные требования к активной зоне для ВВЭР-1200 можно сформулировать как обеспечение современного уровня надежности, безопасности, экономических показателей (КИУМ и т.д.).

*Надежность активной зоны* обеспечивается выполнением следующих требований к конструкции ТВС и ПС СУЗ:

- использование лучших апробированных технических решений с учетом эволюционного подхода к модернизации, обеспечивающих максимальную унификацию и преемственность по отношению к разработанным ТВС;
- обеспечение разборности конструкции ТВС с возможностью замены дефектных ТВЭЛОВ;

Таблица 6.4

Основные показатели к активной зоне РУ

Показатели	ВВЭР-1000	ВВЭР-1200
Номинальная тепловая мощность реактора, МВт	3000	3200/3300
Коэффициент использования установленной мощности	0,78	0,92
Давление теплоносителя на выходе из активной зоны, МПа	15,7	16,2
Температура теплоносителя, °С: на входе в реактор на выходе из реактора	290 319,6	298,6 329,7
Максимальный линейный тепловой поток, Вт/см	448	420
Топливные циклы	3×1; 3×1,5; 4×1; 5×1	4×1; 3×1,5; 5×1; 2×2
Максимальное выгорание топлива в ТВС, МВт·сут/кгU	68	70
Режимы работы с изменением мощности, максимальная скорость	Базовый режим 3% $N_{\text{ном/мин}}$	Базовый + маневренный режим 5% $N_{\text{ном/мин}}$
Количество регулируемых ТВС, шт.	61	121
Расположение измерительного канала	Центральное	Вынесенное
Максимальное удлинение активной зоны, мм	150	200–250
Относительное положение нижних концов топлива и ПЭЛ на жестком упоре, мм, номинальное	52,5	0



Рис. 6.5. ТВС-2М

- работоспособность при высоких выгораниях;
- применение в маневренном режиме со скоростью до 5 % в широком диапазоне изменения мощности;

- использование при повышенных параметрах теплоносителя.

*Безопасность* активной зоны обеспечивается:

- высокой надежностью конструкции ее элементов;
- высокой геометрической стабильностью элементов конструкции;
- качеством конструкторских решений, связанных с выполнением функций аварийного останова реактора и исключением чрезмерных реактивных эффектов, приводящих к нарушениям проектных критериев.

Современные *экономические показатели* определяются выполнением следующих требований к ТВС:

- обеспечение максимально возможной загрузки топлива в ТВС для получения высоких КИУМ;

- достижение наибольшего обогащения топлива (до 5 %);

- обеспечение топливных циклов с максимальным выгоранием топлива до 70 МВт·сут/kgU.

Из существующих ТВС этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяет ТВС-2М, которая в настоящее время проходит опытно-промышленную эксплуатацию на первом блоке Балаковской АЭС. Ее прототип – ТВС-2 с жестким каркасом, образованным приваркой 12 ДР к НК, – в 2006 г. успешно завершил опытную эксплуатацию и переведен в промышленную эксплуатацию.

Конструкции ТВС-2 и ТВС-2М (рис. 6.6) являются эволюционным развитием предшествующих бесчехловых ТВС, по сравнению с которыми в сборку не добавлено ни одного нового элемента. Все появившиеся качества получены путем применения положительно зарекомендовавших себя в эксплуатации решений и усовершенствования отдельных элементов.

Конструкция ТВС-2 наиболее проста, надежна и технологична, что подтверждено опытом изготовления и эксплуатации ее на АЭС. Она показала высокую геометрическую стабильность и качество конструкторско-технологических решений.

Структура ТВС-2М обеспечивает возможность максимального удлинения топливного столба. Она более приспособлена к любым усовершенствованиям и применима для различных внедряемых или планируемых топливных циклов.

Увеличение загрузки топлива для разных ТВС приведено в табл. 6.5.

Конструкция ТВС-2М (с учетом разработанных решений по снижению ее коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) до уровня КГС усовершенствованной ТВС (УТВС)) обеспечивает теплотехническую надежность и повышение мощности реактора. КГС уменьшается за счет оптимизации геометрии ячеек дистанционирующих решеток (рис. 6.7) без изменения их количества и с сохранением изгибной жесткости каркаса.

Конструкция ТВС-2М обеспечивает полную визуальную инспекцию всех периферийных твэлов, в том числе самых нагруженных угловых, а также ремонтпригодность без риска потери съемных элементов (рис. 6.8, 6.9). При этом не требуются затраты на утилизацию заменяемых частей.

Работоспособность и быстротъемность конструкции обоснована опытом неоднократных ремонтов послереакторными исследованиями на шести прототипах (УТВС) с такими же головками. ТВС-2М лучше по сравнению с УТВС противостоит аварийным и сейсмическим нагрузкам. Отсутствие «лишних» элементов конструкции обеспечивает большую надежность при перегрузках топлива со скоростями до 4 м/мин. На АЭС не отмечено ни одного случая повреждения ТВС-2 и ТВС-2М, каркасы которых проверены испытаниями на моделях для режимов быстрого сброса мощности, которые опасны для новых ТВС.

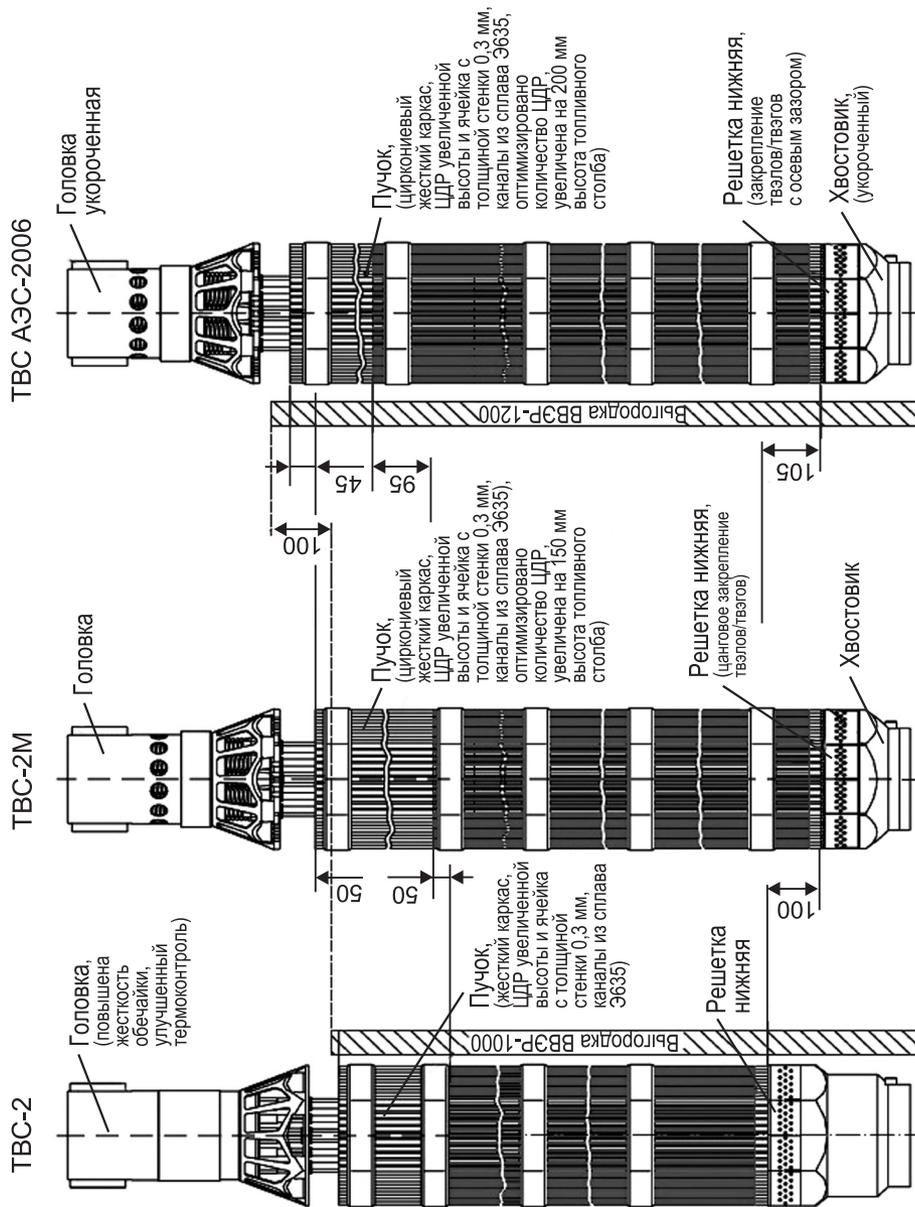


Рис. 6.6. Эволюция ТВС в части удлинения топливного столба

## Увеличение загрузки топлива

Реактор	ТВС	Диаметр таблетки / диаметр отверстия, мм	Высота топливного столба, мм	Масса топлива в твэле / в ТВС / в активной зоне, кг	Увеличение, %	Зерно, мкм
ВВЭР-1000	ТВС-2	7,57 1,4	3530	1,575 491,4 80 098	—	10
	ТВС-2М	7,6 1,2	3680	1,671 521,3 84 973	6,1	10
	ТВС-2М	7,8 0,0	3680	1,805 563,1 91 793	—	20–30
ВВЭР-1200	ТВС-1200 I этап	7,6 1,2	3730	1,694 528,4 86 128	7,5	10
	ТВС-1200 II этап	7,8 0,0	3730	1,829 570,8 93 040	16,2	20–30
	ТВС-1200 III этап	7,8 0,0	3730	1,854 578,5 94 287	17,7	45–60

Тип ТВС	УТВС	ТВСА-α	ТВС-2 / ТВС-2М / ТВС АЭС-2006	
			Имеется	Предлагается
Ячейка ДР				
КГС ДР	0,33	0,41	0,56	0,36–0,4

Рис. 6.7. Ячейки дистанционирующих решеток разных типов ТВС

Основные элементы ТВС-2М (головка, хвостовик, НК) признаны наиболее удачными и приняты за основу конструкции ТВС АЭС-2006. Поглощающие стержни СУЗ реактора АЭС-2006 и его элементы полностью повторяют (кроме длины ПЭЛ и поглотителя) конструкцию поглощающих стержней СУЗ ВВЭР-1000 (рис. 6.10).

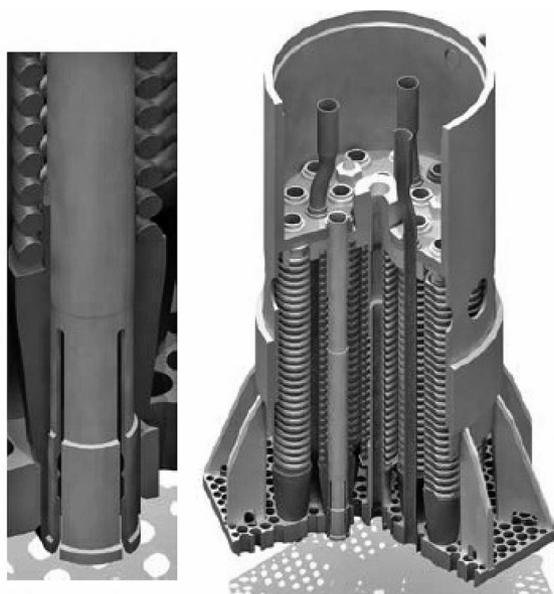


Рис. 6.8. Головка и цанговый узел ТВС-2М

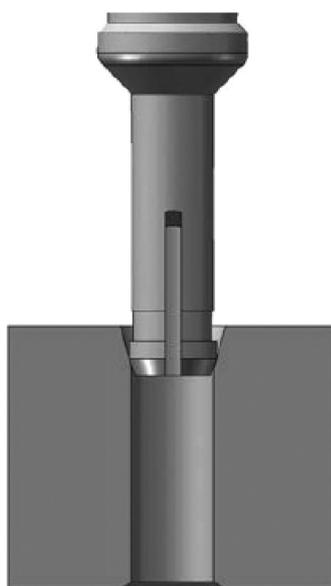


Рис. 6.9. Цанговый узел твэла ТВС-2М

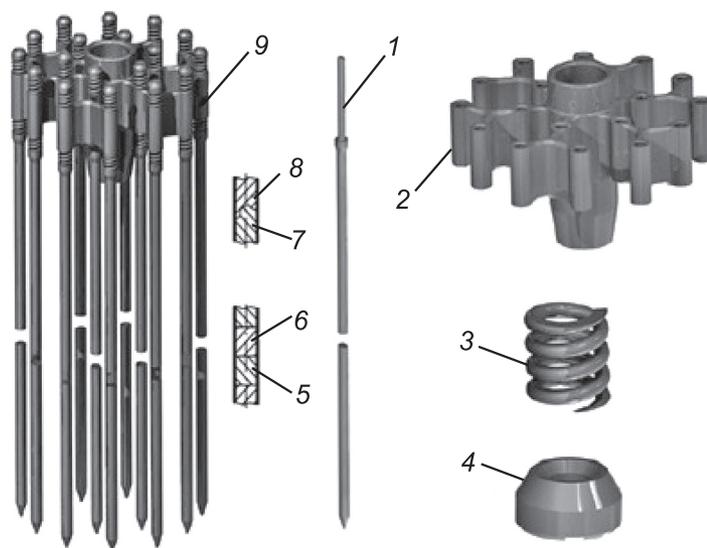


Рис. 6.10. Поглощающие стержни СУЗ:

1 – ПЭЛ; 2 – траверса; 3 – пружина; 4 – гайка; 5 – таблетка  $Dy_2O_3TiO_2$ ; 6 – таблетка  $B_4C$ ; 7 – порошок  $Dy_2O_3TiO_2$ ; 8 – порошок  $B_4C$ ; 9 – ПС СУЗ

Конструкция хвостовика осуществляет требование технического задания на РУ в части перекрытия топливного столба поглотителем при нахождении ПС СУЗ на жестком упоре. Для этого крепление НК выполняется на специальной решетке, что позволяет удлинить их ниже крепления твэлов. Данное решение несколько усложняет технологию, но попутно усиливает (по прочности) конструкцию хвостовика (рис. 6.11).

Для обеспечения требований по эффективности аварийной защиты и поддержания ее в этом состоянии при расхолаживании приблизительно до 100 °С при текущей концентрации бора в воде первого контура в любой момент кампании без одного наиболее эффективного органа регулирования СУЗ количество приводов в активной зоне РУ АЭС-2006 увеличено до 121 шт. (рис. 6.12).

Снижение гидравлического сопротивления ТВС позволило разработать для установки в пучке твэлов перемещающиеся решетки сотовой конструкции, кото-

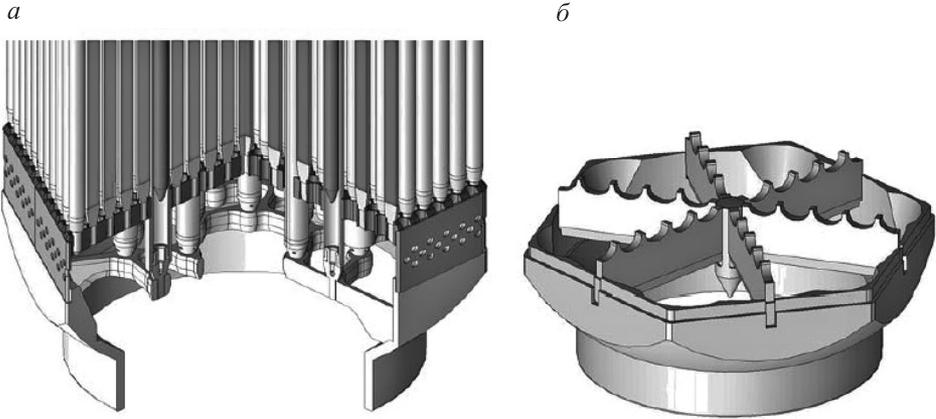


Рис. 6.11. Хвостовик ТВС-2М:  
а – хвостовик с удлиненными НК; б – штатный хвостовик ТВС-2М

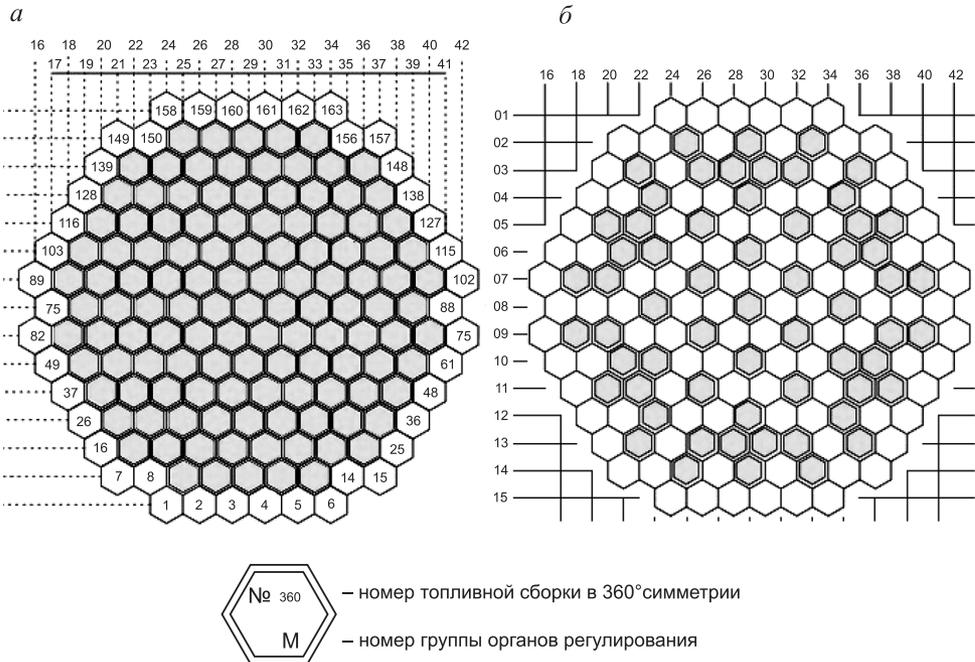


Рис. 6.12. Схемы положения органа регулирования СУЗ:  
а – ВВЭР-1200; б – ВВЭР-1000

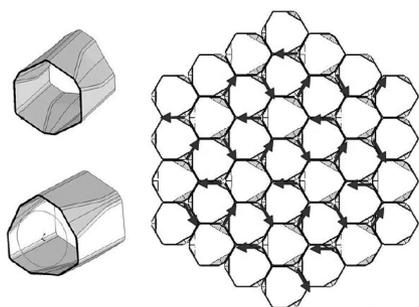


Рис. 6.13. Ячейки и фрагмент перемешивающей решетки типа «Циклон»

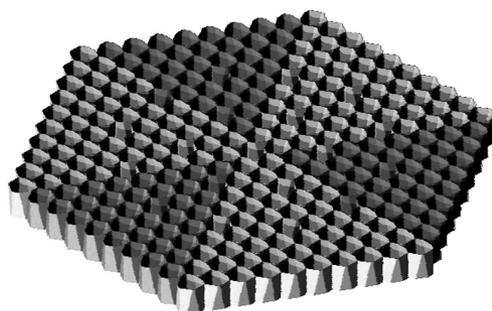


Рис. 6.14. Ячейка и перемешивающая решетка типа «Секторная»

рые организуют закрутку теплоносителя вокруг твэла (тип «Циклон») (рис. 6.13) и межкасетное перемешивание теплоносителя (тип «Секторная») (рис. 6.14).

Внедрение этих решеток обеспечит повышение теплопередачи, снижение паро-содержания в теплоносителе и в конечном итоге возможность повышения мощности реактора. При этом каркас ТВС не препятствует межкасетному перемешиванию теплоносителя. Внедрение перемешивающих решеток предполагается выполнить на этапе повышения мощности до 3300 МВт.

## ЛИТЕРАТУРА

- Безносков, А.В.* Основное оборудование атомных электростанций с реакторами типа ВВЭР / А.В. Безносков, Л.А. Зверева, В.А. Фарафонов. Горький, 1981.
- Безносков, А.В.* Основное оборудование атомных электростанций с уран-графитовыми реакторами / А.В. Безносков, С.М. Дмитриев, В.А. Фарафонов. Горький, 1983.
- Будов, В.М.* Конструирование основного оборудования АЭС / В.М. Будов, В.А. Фарафонов. М., 1985.
- Будов, В.М.* Насосы АЭС / В.М. Будов. М., 1986.
- Будов, В.М.* Насосы и газодувные машины АЭС / В.М. Будов, Е.Н. Черномордик. Горький, 1982.
- Будов, В.М.* Основное оборудование АЭС / В.М. Будов, А.В. Безносков, В.А. Фарафонов. Горький, 1979.
- Будов, В.М.* Форсированные теплообменники ЯЭУ / В.М. Будов, С.М. Дмитриев. М., 1989.
- Галин, Н.М.* Теплообмен (в ядерной энергетике) / Н.М. Галин, П.Л. Кириллов. М., 1997.
- Доллежал, Н.А.* Канальный ядерный энергетический реактор / Н.А. Доллежал, И.Я. Емельянов. М., 1980.
- Зверева, Л.А.* Теплогидравлические и прочностные расчеты парогенераторов АЭС / Л.А. Зверева, В.А. Фарафонов. Горький, 1982.
- Зверев, Д.Л.* Реакторные установки средней и малой мощности на основе технологий атомного судостроения: докл. на встрече директоров российских и американских ядерно-оружейных лабораторий. 1–7 июня 2011 г. Калифорния, 2011.
- Кириллов, П.Л.* Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. М., 1984.
- Кирюшин, А.И.* Основы проектирования защиты реакторных установок / А.И. Кирюшин, Е.А. Шлокин; под ред. Г.Б. Усынина. М., 1991.
- Кокорев, Б.В.* Парогенераторы ядерных энергетических установок с жидкометаллическим охлаждением / Б.В. Кокорев, В.А. Фарафонов. М., 1990.
- Конструирование ядерных реакторов / И.Я. Емельянов [и др.]; под ред. Н.А. Доллежала. М., 1982.
- Котов, Ю.И.* Оборудование атомных электростанций / Ю.И. Котов, В.В. Кротов, Г.А. Филиппов. М., 1982.
- Кузнецов, Н.М.* Энергетическое оборудование блоков АЭС / Н.М. Кузнецов, А.А. Канаев, И.З. Кооп. М., 1979.
- Лаврова, М.П.* Модульное строительство как перспективный способ сооружения АС ВВЭР: тез. докл. 16-й Нижегородской сессии молодых ученых. 14–17 февраля 2011 г. Н. Новгород, 2011.
- Лапшин, Р.М.* Расчет основного оборудования ядерных энергетических установок на ЭВМ / Р.М. Лапшин, В.А. Фарафонов, Е.Н. Черномордик. Горький, 1978.
- Мощностной ряд реакторных установок для АЭС малой и средней мощности / Д.Л. Зверев [и др.] // Малая энергетика: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. М., 2008.
- Митенков, Ф.М.* Главные циркуляционные насосы АЭС / Ф.М. Митенков, Э.Г. Новинский, В.М. Будов. М., 1990.
- Митенков, Ф.М.* Усовершенствование водо-водяных реакторов повышенной безопасности нового поколения: доклад на МАГАТЭ / Ф.М. Митенков, О.Б. Самойлов. Вена, 1991.
- Насосное и теплообменное оборудование АЭС / С.М. Дмитриев [и др.]. Н. Новгород, 2004.
- Обеспечение безопасности атомной станции с реакторной установкой ВВЭР-300 / В.В. Петрунин [и др.] // Ядерная энергетика в Республике Казахстан (ЯЭ-2008): тез. докл. междунар. конф. Курчатова, 2008.
- Обеспечение радиационной безопасности населения при размещении РУ ВВЭР-300 вблизи города / В.Н. Вавилкин [и др.] // Ядерная энергетика в Республике Казахстан (ЯЭ-2008): тез. докл. междунар. конф. Курчатова, 2008.
- Обеспечение безопасности РУ ВВЭР-300 / О.Б. Самойлов [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР-300: тез. докл. конф. Подольск, 2009.
- Основы физики реакторов / С.А. Макаров [и др.]. Иваново, 2001.
- Пассивные системы аварийного теплоотвода для АЭС малой и средней мощности / В.В. Петру-

нин [и др.] // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: тез. докл. VI междунар. науч.-техн. конф. (МНТК-2008). М., 2008.

Пассивные системы аварийного теплообмена для АЭС с РУ ВБЭР-300 / В.В. Петрунин [и др.] // Ядерная энергетика в Республике Казахстан (ЯЭ-2008): тез. докл. междунар. конф. Курчатов, 2008.

Пат. RU № 2141539, C22C16/00. Сплав Э110. Оpubл. 20.11.1999.

Пат. RU № 2141540, C22C16/00. Сплав Э635. Оpubл. 20.11.1999.

*Петрунин, В.В.* Реакторные установки разработки ОАО «ОКБМ Африкантов» для атомных станций малой и средней мощности / В.В. Петрунин, Л.В. Гуреева, С.Е. Скородумов // Атомная энергия. М., 2011.

Проектирование теплообменных аппаратов АЭС / Ф.М. Митенков [и др.]. М., 1988.

Разработка перспективных реакторных технологий / Д.Л. Зверев [и др.] // Ядерная энергетика в Республике Казахстан (ЯЭ-2008): тез. докл. междунар. конф. Курчатов, 2008.

*Рассохин, Н.Г.* Парогенераторные установки атомных электростанций / Н.Г. Рассохин. М., 1987.

Реакторная установка атомной станции теплоснабжения АСТ-500 / Ф.М. Митенков [и др.] // Атомная энергия. М., 1985. Т. 58. Вып. 5.

Реакторные установки ВБЭР – технологическая база создания энергоблоков региональных АС / Д.Л. Зверев [и др.] // Бюллетень по атомной энергии. 2008. № 7. С. 12–17.

Реакторная установка ВБЭР-300 и энергоблоки на ее основе для региональной атомной энергетики / В.И. Костин [и др.] // Атомная энергия. М., 2007. Т. 102. Вып. 1.

Реакторная установка пассивной безопасности ВПБЭР-600 для энергоблока АЭС средней мощности нового поколения / Г.М. Антоновский [и др.] // Ядерная энергия и безопасность: материалы ежегодной науч.-техн. конф. Ядерного общества. Н. Новгород, 1993.

Реакторная установка УВР-500 для блоков большой мощности: рекламный буклет ФГУП «ОКБМ Африкантов». Н. Новгород, 2005.

Региональная энергетика. Атомные станции с реакторными установками ВБЭР: рекламный буклет ОАО «ОКБМ Африкантов». Н. Новгород, 2008.

*Самойлов, О.Б.* Безопасность ядерных энергетических установок / О.Б. Самойлов, Г.Б. Усынин, А.М. Бахметьев. М., 1989.

*Самойлов, О.Б.* Реакторная установка ВБЭР-300 на базе судовых технологий для региональных АЭС, АТЭС и плавучих АЭС: материалы 16-й науч.-техн. конф. Ядерного общества. Н. Новгород, 2006.

ТВСА для ВВЭР-1000. Состояние, опыт эксплуатации и перспективы развития / О.Б. Самойлов [и др.]: тез. докл. болгарско-российского науч.-техн. семинара по опыту эксплуатации и внедрения топлива ВВЭР-1000 нового поколения. 20–24 сентября 2010 г. Несебр, 2010.

Тепловыделяющая сборка ТВСА ВВЭР-1000: направления развития и результаты эксплуатации / В.Б. Кайдалов [и др.] // Атомная энергия. М., 2007. Т. 102. Вып. 1.

Технология реакторостроения / В.С. Кореаков [и др.]. М., 1977.

*Уолтер, А.* Реакторы-размножители на быстрых нейтронах / А. Уолтер, А. Рейнольдс. М., 1986.

*Усынин, Г.Б.* Реакторы на быстрых нейтронах / Г.Б. Усынин, Е.В. Кусмарцев; под ред. Ф.М. Митякова. М., 1985.

*Фадеев, Ю.П.* Инновационная реакторная установка ВБЭР-300 для региональной энергетики / Ю.П. Фадеев, А.Е. Арефьев, А.В. Кураченко // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. №1.

*Фадеев, Ю.П.* Инновационная региональная установка ВБЭР-300 для региональной энергетики: сб. докл. 1-й междунар. инновационной школы. Актау, 2011.

*Фадеев, Ю.П.* Разработка реакторных установок ВБЭР и КЛТ-40С // Настоящее и будущее АЭС и ЧР: тез. докл. междунар. конф. Ржеж, 2011.

Энергоблоки АЭС и АТЭС средней мощности с унифицированными реакторными установками типа ВБЭР на основе технологий атомного судостроения / Д.Л. Зверев [и др.] // Региональная атомная энергетика (АтомРегион-2009): тез. докл. межотраслевой науч.-техн. конф. Н. Новгород, 2009.

Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов / Ф.Я. Овчинников [и др.]. М., 1977.

Эксплуатация ядерного топлива на Калининской АЭС / В.С. Каекин [и др.]. Иваново, 2001.

Review of designs approaches of advanced pressurized LWR. IATA-NTCDOC-861, 1996.

Status of innovative small and medium sized reactor designs. IATA-NTCDOC-1485, 2005.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых сокращений . . . . .	3
Предисловие . . . . .	4
<b>Глава 1. Описание принципиальных схем атомных электростанций . . . . .</b>	<b>5</b>
1.1. Схемы АЭС с реакторами типа ВВЭР . . . . .	5
1.2. Описание и обоснование схемно-конструктивных решений ВПБЭР-600 . . . . .	7
1.3. Принципиальная схема УВР-1500 . . . . .	14
1.4. Принципиальная схема АТЭЦ с реактором ВБЭР-300 . . . . .	21
1.5. Схема АЭС с реактором ВВЭР-440 . . . . .	37
<b>Глава 2. Тепловыделяющие сборки ядерных реакторов . . . . .</b>	<b>40</b>
2.1. Ядерное топливо реактора . . . . .	40
2.2. Тепловыделяющая сборка ВВЭР-1000 . . . . .	42
2.3. Тепловыделяющие сборки . . . . .	53
2.4. Тепловыделяющая сборка УВР-1500 . . . . .	59
2.5. Тепловыделяющие сборки ВВЭР-440 . . . . .	67
2.6. Тепловыделяющая сборка ВБЭР-300 . . . . .	73
2.7. Твэлы и ТВС реакторов PWR . . . . .	75
2.8. Материалы оболочек твэлов . . . . .	78
<b>Глава 3. Конструкции водо-водяных энергетических реакторов . . . . .</b>	<b>85</b>
3.1. Реактор ВВЭР-440 . . . . .	86
3.2. Серийный ядерный реактор ВВЭР-1000 . . . . .	90
3.3. Реактор ВПБЭР-600 . . . . .	113
3.4. Реакторный блок ВБЭР-300 . . . . .	135
3.5. Реактор УВР-1500 . . . . .	141
3.6. Водо-водяные реакторы-размножители типа LWBR . . . . .	153
<b>Глава 4. Теплообменное оборудование АЭС . . . . .</b>	<b>183</b>
4.1. Горизонтальные парогенераторы . . . . .	183
4.2. Вертикальные парогенераторы насыщенного пара . . . . .	202
4.3. Конструкции парогенераторов ведущих мировых производителей . . . . .	213
4.4. Парогенератор реакторного блока ВБЭР-300 . . . . .	221
4.5. Парогенератор ВПБЭР-600 . . . . .	223
<b>Глава 5. Главные циркуляционные насосы . . . . .</b>	<b>226</b>
5.1. Развитие конструкций главных циркуляционных насосов для АЭС с реакторами ВВЭР-1000 . . . . .	226
5.2. Главный циркуляционный электронасос ВВЭР-440 . . . . .	242
5.3. Главный циркуляционный насос УВР-1500 . . . . .	248
5.4. Главный циркуляционный насос реакторного блока ВБЭР-300 . . . . .	255
5.5. Насосы для реакторов, охлаждаемых водой . . . . .	256
5.6. Главный циркуляционный электронасос ВПБЭР-600 . . . . .	268
<b>Глава 6. Концепция проекта АЭС-2006 . . . . .</b>	<b>271</b>
6.1. Основные принципы и подходы при проектировании . . . . .	271
6.2. Проект активной зоны для РУ АЭС-2006 . . . . .	278
Литература . . . . .	286