

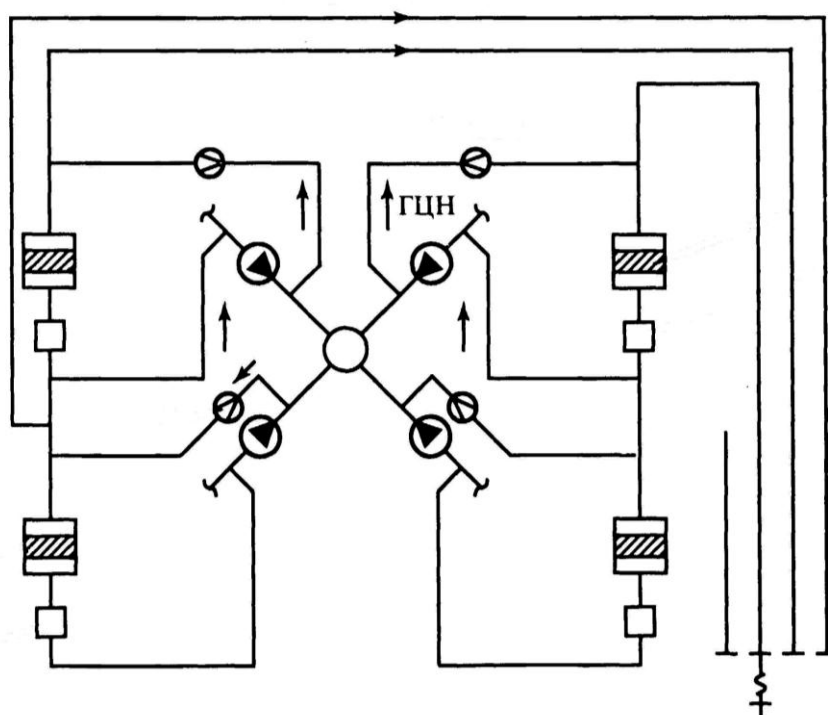
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.М. Акимов, С.А. Котельникова

ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПЕРВОГО КОНТУРА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-1000

Учебное пособие



Севастополь
СевГУ
2018

УДК 621.311.25 (075)
ББК 31.47
А391

Р е ц е н з е н т:

А.Ю. Тараховский – к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Химическая инженерия и дозиметрия»

Акимов А.М.

А391 Водно-химический режим первого контура АЭС с реакторами ВВЭР-1000: учеб. пособие / А.М. Акимов, С.А. Котельникова. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 31 с.

Рассматриваются химические и радиохимические процессы, происходящие в первом контуре и их влияние на материалы оборудования контура и активной зоны. Рассматриваются нормируемые показатели теплоносителя первого контура, их значения в режиме нормальной эксплуатации и переходных режимах, уровни действия и эксплуатационные пределы при отклонении значений химических показателей ВХР первого контура от нормируемых.

В пособии описываются методы поддержания ВХР первого контура и системы, которые обеспечивают коррекционную обработку теплоносителя первого контура и ее очистку от нежелательных примесей.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению 18.05.02 «Химическая технология материалов современной энергетики» специализации «Технология теплоносителя и радиоэкология ЯЭУ».

УДК 621.311.25 (075)
ББК 31.47

Учебное пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Химические технологии атомных станций», протокол № 3 от 28 сентября 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Список сокращений	4
Введение	6
1. Тепловая схема АЭС с реакторами ВВЭР-1000	7
2. Назначение и основные задачи ВХР первого контура	8
3. Нормирование показателей ВХР первого контура и их характеристики	9
4. Действия при отклонении нормируемых показателей качества теплоносителя	16
5. Методы и средства поддержания водно-химического режима первого контура	18
5.1 Система байпасной очистки теплоносителя первого контура (СВО-1)	20
5.2 Система спецводоочистки теплоносителя первого контура (СВО-2)	26
Контрольные вопросы	30
Литература	31

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЭС – атомная электростанция;
БН – быстрые нейтроны;
БВ – бассейн выдержки;
БО – байпасная очистки;
БОУ – блочная обессоливающая установка;
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;
ВКУ – внутрикорпусные устройства;
ВПУ – водоподготовительная установка;
ВРХЛ – водная радио-химическая лаборатория;
ВРУ – верхнее распределительное устройство;
ВХР – водно-химический режим;
ВТФ – высоко-температурный фильтр;
ГПД – газообразные продукты деления;
ГЦН – главный циркуляционный насос;
EDF – Агентство ядерной энергии Франции;
ЖРО – жидкие радиоактивные отходы;
КИП – контрольно-измерительные приборы;
КО – конденсатоочистка;
КПТ – конденсатопитательный тракт;
МАГАТЭ – международное агентство по атомной энергетике;
НРУ – нижнее распределительное устройство;
НУЭ – нормальные условия эксплуатации;
ПГ – парогенератор;
РО – реакторное отделение;
СВО – специальная водоочистка;
ТВС – тепловыделяющая сборка;
ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;
ТРО – твердые радиоактивные отходы;
ТЭС – тепловая электростанция;
ФСД – фильтр смешанного действия;
ФЛЗМ – фильтр-ловушка зернистых материалов;
ФЛИ – фильтр-ловушка ионитов;
ХВО – химводоочистка;
ХОВ – химически обессоленная вода;
ЯЭ – ядерная энергетика;
ЯЭУ – ядерная энергетическая установка.

ВВЕДЕНИЕ

Безопасное и экономическое ведение основного технологического процесса на АЭС обеспечивается в числе прочих мероприятий и поддержанием оптимального водно-химического режима с учетом конструкционных материалов и процессов, происходящих в первом контуре.

При выборе того или иного водно-химического режима оценивается его влияние на работы активной зоны и оборудования первого контура.

Для активной зоны предметом рассмотрения должны быть целостность оболочек твэлов, их коррозия, выход продуктов деления, мягкое регулирование реактивности, радиолиз теплоносителя и корректирующих добавок. Оценивая работоспособность остального оборудования первого контура при выбранном водно-химическом режиме, самое серьезное внимание обращается на проблемы коррозии и износа оборудования, переноса активности и загрязнения контура радиационными продуктами.

Основу водно-химического режима составляют нормы качества теплоносителя, разрабатываемые для всех эксплуатационных режимов АЭУ (пуск, стационарный и переходные режимы).

В первую очередь нормы предусматривают высокую чистоту теплоносителя и являются компромиссными между оптимальными и реально достижимыми при существующих средствах водоочистки.

На первых реакторах с водой под давлением были опробованы нейтральные водно-химические режимы с $\text{pH} = 5,5 \dots 7,5$. В процессе эксплуатации реакторов выяснилось, что нейтральному режиму свойственны существенные недостатки, связанные с большим выносом продуктов коррозии в теплоноситель и высоким уровнем излучения от коррозионных отложений. Попадание в контурную воду кислорода приводило к отклонению pH теплоносителя в кислую сторону, что способствовало повышению концентрации железа в воде первого контура до значений $0,5 \dots 1,0 \text{ мг/дм}^3$.

Было отмечено, что при наличии в контурной воде растворенных азота (при условии отсутствия кислорода) и водорода, образующегося при коррозии металла или специально вводимого в теплоноситель, в результате протекания радиационно-химических реакций из исходных азота (N_2) и водорода (H_2) синтезировался аммиак. В результате наблюдалось повышение pH теплоносителя до значений $9,0-9,5$. Анализы качества воды, произведенные в таких условиях, показали, что концентрация железа снижалась до значений менее $0,1 \text{ мг/дм}^3$ при одновременном спаде активности теплоносителя.

Опыт эксплуатации показал необходимость разработки и осуществления слабощелочного водного режима с дозировкой щелочи в теплоноситель первого контура для повышения значения pH .

Таким образом, в процессе эксплуатации энергоблоков типа ВВЭР разработан и введен в действие стандарт организации (ОАО «Концерн Росэнергоатом») СТО 1.1.1.02.005.0004-2012 «Водно-химический режим первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. Нормы каче-

ства теплоносителя и средства их обеспечения». Этот стандарт предусматривает слабощелочной восстановительный координированный аммиачно-калиевый водно-химический режим. Он обладает рядом преимуществ по сравнению с бескоррекционным режимом и режимом с применением только сильных оснований в силу следующих причин:

- за счет генерации водорода при радиолитическом разложении аммиака исключена необходимость дозирования в первый контур газообразного водорода;
- при использовании катионита для очистки реакторной воды в смешанной аммиачно-калиевой форме он приобретает буферные свойства, позволяющие стабилизировать концентрацию калия в теплоносителе и устранить опасность перещелачивания реакторной воды;
- позволяет удобно нейтрализовать борную кислоту.

В учебном пособии рассматриваются химические и радиохимические процессы, происходящие в первом контуре и их влияние на материалы оборудования контура и активной зоны. Рассматриваются нормируемые показатели теплоносителя первого контура, их значения в режиме нормальной эксплуатации и переходных режимах, уровни действия и эксплуатационные пределы при отклонении значений химических показателей ВХР первого контура от нормируемых.

В пособии описываются методы поддержания ВХР первого контура и системы, которые обеспечивают коррекционную обработку теплоносителя первого контура и ее очистку от нежелательных примесей.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по направлению 18.05.03 «Химическая технология материалов современной энергетики» специализации «Технология теплоносителя и радиоэкология ЯЭУ».

1. ТЕПЛОВАЯ СХЕМА АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-1000

АЭС с реакторами типа ВВЭР имеют двухконтурную тепловую схему, включая основной реакторный (первый) контур со вспомогательными системами (очистки теплоносителя, подпитки и расхолаживания реактора, компенсации объема и т.п.) и парогенерирующий второй контур (рис. 1).

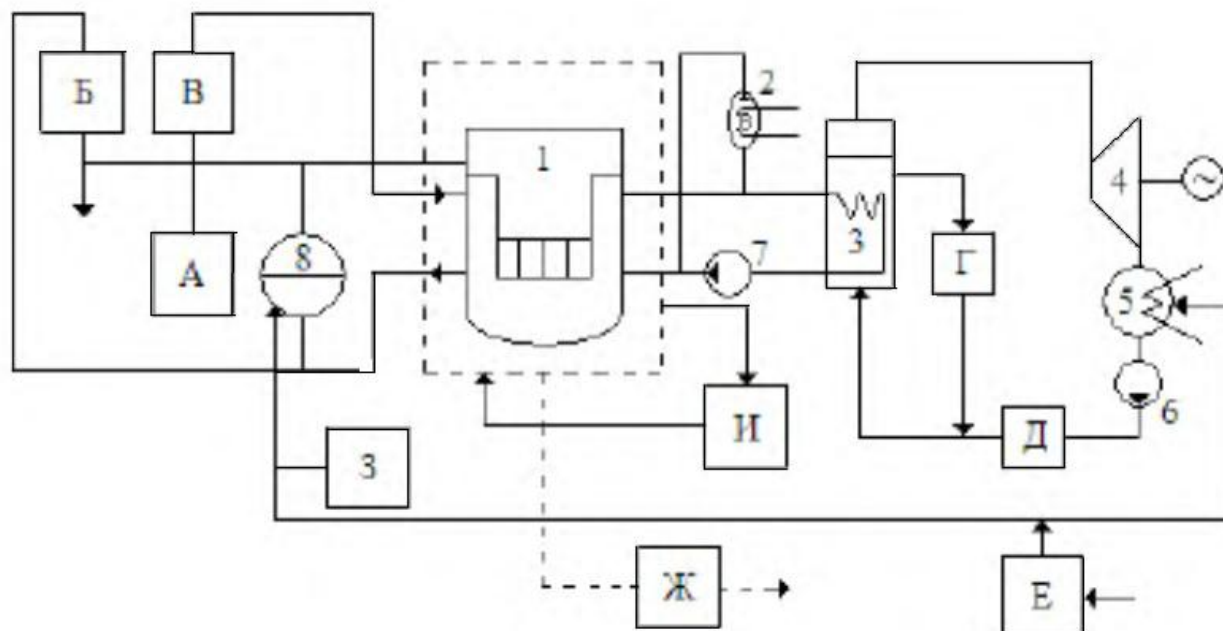


Рис. 1. Принципиальная схема двухконтурной АЭС с водно-химическими системами:
1 – реактор типа ВВЭР; 2 – компенсатор объема; 3 – парогенератор; 4 – турбогенератор;
5 – конденсатор; 6 – конденсатный насос; 7 – ГЦН; 8 – деаэратор подпитки; А – очистка теплоносителя; Б – очистка организованных протечек (СВО-2); В – борорегулирующая система; Г – очистка воды парогенератора (СВО-5); Д – блочная конденсатоочистка;
Е – подготовка добавочной воды (ХВО); Ж – переработка сбросных вод (СВО-3);
З – коррекционная обработка теплоносителя; И – очистка борсодержащих вод (СВО-4, СВО-6)

Поступающая из второго контура в межтрубное пространство парогенераторов питательная вода нагревается при контакте с теплообменными трубками, внутри которых циркулирует теплоноситель первого контура с температурой 320 °С, и превращается в насыщенный пар. Насыщенный пар, выработанный в парогенераторах, поступает в цилиндр высокого давления (ЦВД) турбины по паропроводам. В проточной части турбины происходит превращение внутренней энергии пара за счет его расширения в механическую энергию на валу турбины. Механическая энергия передается с вала турбины на вал генератора, в котором преобразуется в электрическую энергию.

Отработав в цилиндрах высокого давления, пар направляется в сепараторы-пароперегреватели, где освобождается от образовавшейся влаги и одновременно нагревается до 250 °С. Далее отработанный пар из трех цилиндров низкого давления (ЦНД) поступает в три конденсатора, в которых происходит его

полная конденсация. В конденсаторах поддерживается вакуум за счет конденсации пара и работы основных эжекторов.

Забираемый из конденсатора конденсат прокачивается насосами через установку конденсатоочистки, а также регенеративные подогреватели низкого давления и поступает в деаэратор для дополнительного подогрева и удаления из конденсата растворенных газов. После этого питательная вода турбопитательным насосом подается в парогенераторы.

2. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ВХР ПЕРВОГО КОНТУРА

Водно-химический режим – это система организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение и поддержание норм качества водного теплоносителя и допустимого состояния внутренних поверхностей оборудования основного контура в целях достижения безаварийной и экономичной работы оборудования в течение проектного срока эксплуатации.

Несмотря на то, что первый контур заполняется водой требуемой чистоты, при любых условиях эксплуатации оборудования протекают химические, радиохимические и коррозионные процессы, в результате которых в теплоносителе переходят окислы конструкционных материалов, образуются нерастворимые соединения.

Продукты коррозии при многократном облучении в активной зоне в процессе циркуляции теплоносителя активируются на внутренних поверхностях оборудования, отрицательно влияют на технические характеристики ремонтных работ, вызывают необходимость дезактивации оборудования.

Основными радиоактивными изотопами коррозионного происхождения являются ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{59}Fe , ^{95}Zr . Особенно опасны отложения продуктов коррозии на поверхностях твэлов, так как эти отложения могут привести к повышению температуры металла оболочки и в предельных случаях – к пережогу оболочек твэлов и повышению активности теплоносителя вследствие повышенного перехода в него продуктов деления ядерного топлива.

Основным конструкционным материалом оборудования первого контура является аустенитная хромоникелевая стабилизированная титаном сталь 08X18H10T. Корпус реактора ВВЭР-1000 изготавливается из углеродистой стали марки 15X2НМФА с коррозионо-стойкой двухслойной наплавкой из сталей аустенитного класса (Св-07Х25Н13 и Св-04Х20Н10Г2Б соответственно, для первого и второго слоя). Использование нержавеющей сталей обусловлено их высокой коррозионной стойкостью и способностью к пассивации в условиях эксплуатации ядерных реакторов. Факторами, определяющими скорость коррозии нержавеющей сталей, являются содержание в теплоносителе хлорид-ионов и кислорода. Особую опасность для аустенитных (нержавеющих) сталей представляет коррозия под напряжением, коррозионное растрескивание. Это явление протекает при наличии коррозионно-агрессивной среды, содержащей активаторы и окислители. Активатором процесса коррозии нержавеющей сталей является хлорид-ион, окислителем является кислород.

Примеси содержащиеся в воде первого контура, могут откладываться на оборудовании: в реакторе, парогенераторе, насосах, арматуре.

Если отложения в парогенераторе не так опасны для металла в плане его механического разрушения (температура металла всегда ниже температуры теплоносителя) а в большей степени оказывает влияние на коэффициент теплопередачи (снижение экономичности), то отложения на тепловыделяющих элементах реактора не только снижают коэффициент теплопередачи, но и могут вызвать аварийную ситуацию, связанную с разрушением оболочек ТВЭЛ (температура оболочек ТВЭЛов всегда выше температуры теплоносителя) и как следствие значительной активации теплоносителя за счет выхода в него продуктов деления. Отложения на элементах циркуляционного насоса и арматуры могут ухудшить их работу, привести к повышению радиоактивности оборудования и затруднению ремонта.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что основными задачами водно-химического режима первого контура являются:

- подавление образования окислительных продуктов радиолиза при работе на мощности;
- обеспечение проектной коррозионной стойкости конструкционных материалов оборудования и трубопроводов в течение всего срока эксплуатации энергоблока;
- обеспечение минимального количества отложений на поверхностях тепловыделяющих элементов активной зоны реактора и теплообменной поверхности парогенераторов;
- обеспечение минимального количества накоплений активированных продуктов коррозии;
- минимизация количества радиоактивных технологических отходов.

3. НОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВХР ПЕРВОГО КОНТУРА

Водно-химический режим первого контура ВВЭР-1000 является коррекционным. В качестве корректирующих добавок в теплоноситель вводят борную кислоту H_3BO_3 , гидроокись калия KOH либо гидроксид лития $LiOH$ (на зарубежных реакторах PWR), аммиак, гидразин-гидрат $N_2H_4 \cdot 2H_2O$.

Стандартом организации (ОАО «Концерн Росэнергоатом») СТО 1.1.1.02.005-2012 «Водно-химический режим первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. Нормы качества теплоносителя и средства их обеспечения» предусмотрено разделение показателей качества теплоносителя на нормируемые и диагностические (рис. 2).

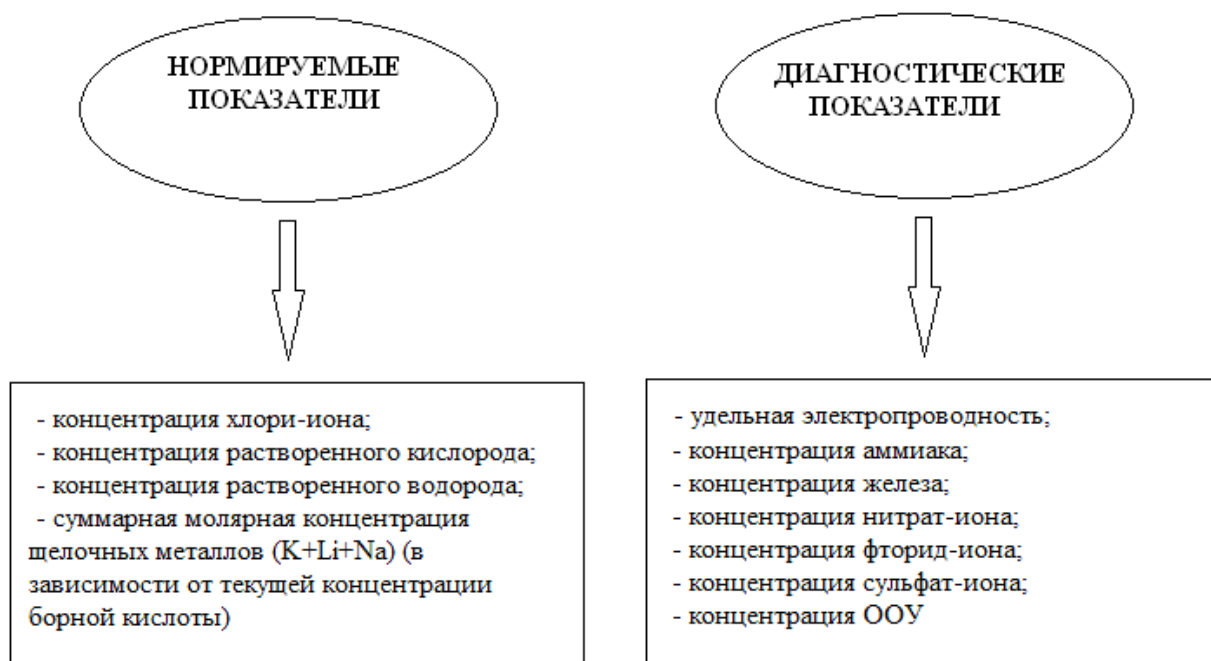


Рис. 2. Нормируемые и диагностические показатели качества теплоносителя

Нормируемые показатели – это те показатели качества теплоносителя, поддержание которых в диапазоне допустимых значений обеспечивает целостность элементов активной зоны, назначенный срок эксплуатации оборудования первого контура и удовлетворительную радиационную обстановку на энергоблоке.

К диагностическим показателям относятся показатели качества теплоносителя, обеспечивающие получение дополнительной информации о причинах изменения нормируемых показателей или ухудшения водно-химического режима.

Рассмотрим подробнее значение корректирующих добавок и их показатели для слабощелочного водно-химического режима первого контура.

Бор, введенный в виде борной кислоты, используется при мягком регулировании реактивности реактора.

Борная кислота устойчива в радиационных полях, не разлагается при высоких температурах, хорошо растворима в воде, не образует шлама и накипи, в присутствии щелочей является ингибитором коррозии. Концентрация борной кислоты устанавливается в зависимости от реактивности активной зоны. Введение непосредственно в теплоноситель борной кислоты приводит к резкому снижению величины pH и к необходимости коррекции водного режима путем подщелачивания. Для нейтрализации борной кислоты и возможного водородного охрупчивания сталей и циркониевых сплавов в контур циркуляции теплоносителя вводится раствор сильного основания. К сильным основаниям относятся LiOH, NaOH, KOH.

Применение NaOH для подщелачивания реакторной воды недопустимо, так как натрий, взаимодействуя с нейтронами, образует изотоп ^{24}Na , обладающий жестким γ -излучением с периодом полураспада 15 часов.

При использовании LiOH образуется радиоактивный тритий, который в основном входит в состав воды и не может быть удален из первого контура. Тем самым создается радиационная опасность для персонала при разгерметизации контура. Надо иметь в виду, что в ряду агрессивности щелочей к циркониевым сплавам LiOH стоит на первом месте.

Поэтому выбор остановлен на КОН, который устраняет возможность образования избыточного трития. КОН также активируется с образованием изотопа, но так как активность его невелика, он не создает больших радиационных полей. ^{42}K не образует труднорастворимых соединений с типичными анионными примесями реакторной воды и поэтому не накапливается в отложениях.

Степень нейтрализации влияния борной кислоты КОН имеет большое значение и должна строго контролироваться, так как при высокой температуре концентрация свободной щелочи может быть высокой (местное упаривание) и опасной с точки зрения щелочного охрупчивания аустенитной стали и сплавов циркония.

Необходимо отметить, что в первый контур дозируется КОН, но следует учитывать поступление в теплоноситель некоторого количества других щелочных ионов:

- изотоп лития $^7\text{Li}^+$, накапливается при облучении бора нейтронами $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$
- Na^+ , поступающий в первый контур с подпиточной водой.

Поэтому нормирование производится не по концентрации K^+ , а нормируется концентрация суммы щелочных металлов ($\text{K}^+, \text{Li}^+, \text{Na}^+$):

$$\sum \text{Щ} = \frac{C_{\text{Li}^+}}{7} + \frac{C_{\text{Na}^+}}{23} + \frac{C_{\text{K}^+}}{30} \text{ моль/дм}^3. \quad (1)$$

Суммарная концентрация ионов щелочных металлов должна поддерживаться в строгой зависимости от концентрации борной кислоты.

Значение pH.

Значение pH реакторной воды устанавливается из соображений коррозионной устойчивости конструкционных материалов. Поддержание pH в пределах норм позволяет снизить скорость коррозии конструкционных материалов и уменьшить поступление продуктов коррозии в теплоноситель. Регламентирование значения pH по нижнему (5,9) пределу обуславливается увеличением сверх допустимых величин скорости коррозии металла основного оборудования и по верхнему (10,3) пределу – опасностью коррозионного растрескивания циркониевых сплавов оболочек ТВЭЛов.

Концентрация хлорид- и фторид-ионов.

Из растворенных минеральных примесей хлорид- и фторид-ионы представляют наибольшую опасность, т.к. являются сильнейшими активаторами коррозионных процессов. Они препятствуют образованию защитной пленки и увеличивают скорость коррозии почти всех металлов. В сочетании с кислородом даже небольшие концентрации хлоридов и фторидов вызывают коррозионное растрескивание аустенитных сталей и язвенную коррозию циркония. Уста-

новлено, что концентрации хлорид- и фторид-ионов $< 0,1 \text{ мг/дм}^3$ практически не влияют на стойкость конструкционных материалов. Дальнейшее повышение концентрации увеличивает пористость защитных пленок и снижение их защитных свойств.

Источником поступления хлорид-ионов в теплоноситель первого контура могут служить реагенты, дозируемые для коррекции ВХР. Поэтому качество реагентов и ионообменных материалов, применяемых для поддержания ВХР должно соответствовать установленным требованиям.

Источником фторид-ионов в основном является плавиковая кислота, которой обрабатывается поверхность твэлов при их изготовлении.

Концентрация фторид-ионов контролируется в течение первых 1000 часов работы реактора после перегрузки топлива.

Концентрация кислорода.

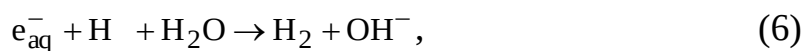
Накопление свободного кислорода в теплоносителе первого контура происходит в результате радиолиза воды (с образованием коррозионно-активных промежуточных радикалов $\text{H}^\bullet$, $\text{OH}^\bullet$, e_{aq}^- , H_2O_2 , O_2 и H_2) и за счет его поступления с подпиточной водой.

Взаимодействие ионизирующего излучения с водой представляет собой сложный процесс – явление радиолиза, протекающий в три стадии: физическую, физико-химическую и химическую. В общем виде радиолиз воды сопровождается образованием радикалов и молекулярных продуктов по схеме:

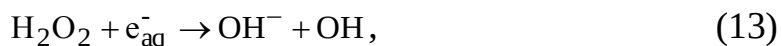


На физической стадии происходят только электронные процессы. К моменту времени примерно 10^{-16} с после прохождения ионизирующей частицы в воде образуются возбужденные ($\text{H}_2\text{O}^\bullet$) и сверхвозбужденные ($\text{H}_2\text{O}^{\bullet\bullet}$) молекулы воды, ионы H_2O^+ и вторичные электроны e^- .

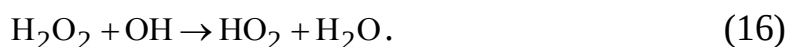
На химической стадии образовавшиеся частицы диффундируют от мест своего образования (из шпор) и реагируют друг с другом, а также с растворенными веществами. С наибольшей вероятностью протекают реакции рекомбинации радикалов с образованием молекулярных продуктов радиолиза:



Если активные частицы на последней стадии распределены достаточно гомогенно, то одновременно протекают радикал-молекулярные реакции, приводящие к цепному механизму разложения водорода и его пероксида и тем самым к установлению динамического равновесия в радиолитической системе:



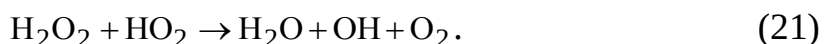
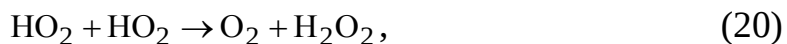
Кроме того, при радиоллизе воды образуются гидропероксидные радикалы HO_2 по реакциям



Особенно интенсивно этот радикал образуется в воде, содержащей растворенный кислород:



В свою очередь гидропероксидный радикал приводит к образованию радиолитического кислорода:



Роль кислорода в коррозионных процессах весьма противоречива. С одной стороны, являясь активным деполяризатором, кислород усиливает коррозию металлов, а с другой стороны, он входит как составная часть в оксиды металлов, образуя защитные окисные пленки.

С ростом толщины оксидной пленки из-за разницы плотностей металла и пленки увеличивается внутренние напряжения, что приводит к потере сплошности пленок и снижению их пассивирующих свойств.

Кислород является деполяризатором электрохимической коррозии. Поэтому концентрация кислорода в теплоносителе первого контура величина строго нормируемая. Поддержание концентрации кислорода в теплоносителе в пределах норм (не более $0,005 \text{ мг/дм}^3$) обеспечивается работой деаэраторов или же связыванием избыточного кислорода, вводимым в подпиточную воду гидразингидратом.

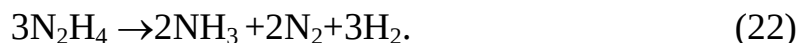
Концентрация водорода.

Водород необходим в теплоносителе первого контура для подавления радиолиза воды. Содержание водорода в теплоносителе в пределах 2,2...4,5

мг/дм³ практически полностью подавляет радиолит контурной воды (верхний предел содержания водорода ограничен величиной 4,5 мг/дм³ из-за водородного охрупчивания циркониевых сплавов).

Концентрация аммиака.

Аммиак в первый контур вводится непосредственно или образуется разложением гидразина после введения в контур по реакции:



Аммиак является источником водорода в теплоносителе первого контура, поэтому равновесная концентрация аммиака в теплоносителе поддерживается на уровне, обеспечивающем безопасную концентрацию водорода, т.е. в пределах 2,2...4,5 мг/дм³. При этом верхний предел равновесной концентрации аммиака должен определяться верхним пределом концентрации водорода в теплоносителе.

Концентрация железа.

Ограничение содержания железа в теплоносителе позволяет уменьшить скорость образования отложений на различных поверхностях контура.

Отложения на поверхностях твэл АЭС вследствие их малой теплопроводности могут привести к повышению температуры металла оболочки, а в предельном случае – к пережогу оболочки и выходу ядерного топлива в теплоноситель.

Образование отложений интенсифицирует также процессы неравномерной коррозии. Это объясняется тем, что потенциал продуктов коррозии отличается от потенциала металла, в результате возникают коррозионные элементы.

Продукты коррозии при многократном облучении в активной зоне активируются, что приводит к повышению радиоактивности оборудования и затруднению ремонта.

Способность различных соединений образовывать отложения определяется в первую очередь тем, достигнут ли предел растворимости (насыщения) по тому или иному соединению. Соединения железа, как продукта коррозии, находятся в теплоносителе как в растворенном, так и во взвешенном состоянии. С увеличением общей концентрации возрастает доля взвешенных продуктов коррозии, которые образуются в результате агломерации (объединения) коллоидных частиц окислов железа и эрозионного смыва потоком воды разрушающейся окисной пленки. Поэтому, чем ниже концентрация железа, тем меньше вероятность их укрупнения и отложения на поверхности первого контура.

При концентрации железа в теплоносителе <0,05 мг/дм³ контроль над содержанием хрома и никеля может не производиться. При концентрации железа в теплоносителе 0,05 мг/дм³ обязательно производиться контроль концентрации

хрома и никеля. Хром и никель является легирующими добавками конструкционных материалов оборудования. Увеличение их концентрации говорит о разрушении металла и необходимости принимать меры к поиску и устранению причин увеличения концентрации продуктов коррозии.

Нормы качества теплоносителя при работе энергоблока мощностью более 50 % $N_{\text{НОМ}}$ (СТО 1.1.1.02.005.0004-2012) приведены в табл. 1. Зависимость суммарной молярной концентрации ионов щелочных металлов (K, Li, Na) в теплоносителе первого контура от текущей концентрации борной кислоты представлена на рис. 3.

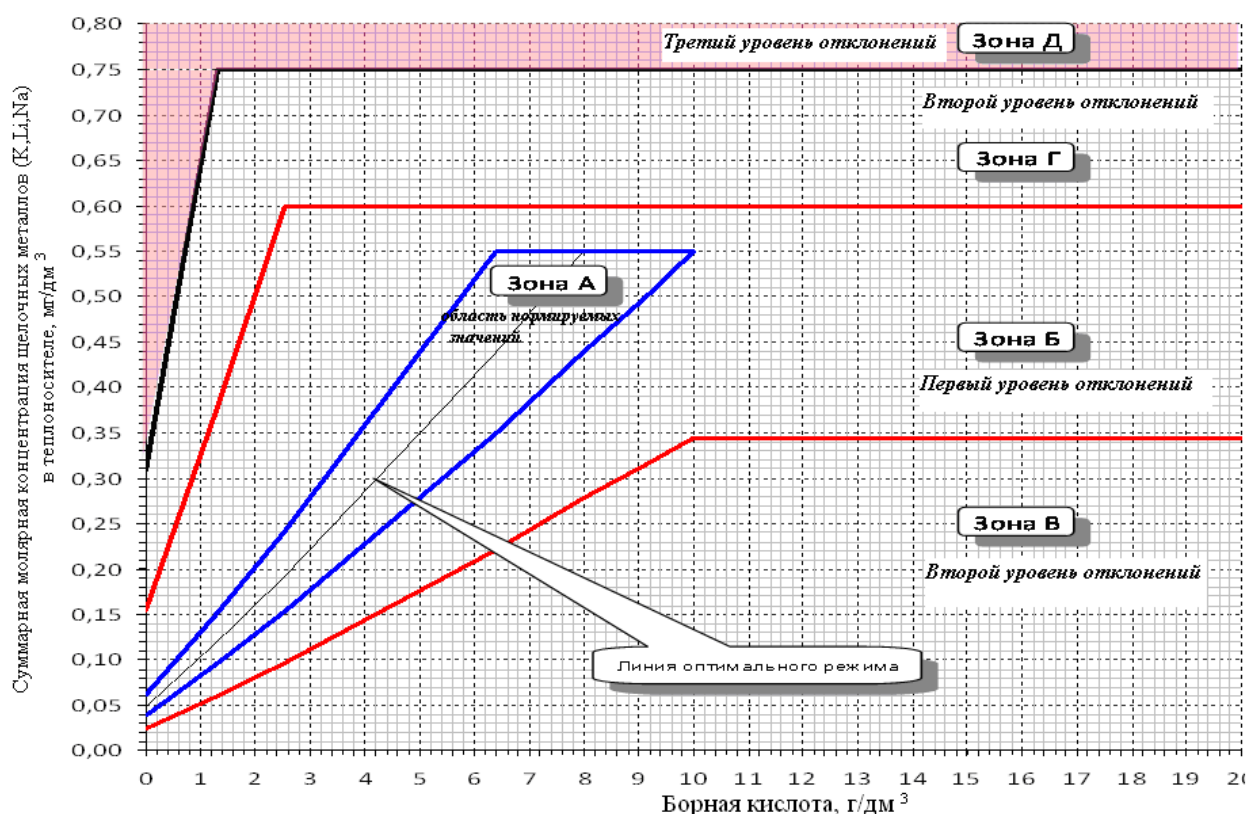


Рис. 3. Зависимость суммарной молярной концентрации ионов щелочных металлов (калия, лития и натрия) в теплоносителе первого контура от текущей концентрации борной кислоты: зона А – область нормируемых значений; зона Б – первый уровень отклонений; зоны В и Г – второй уровень отклонений; зона Д – третий уровень отклонений

**Нормы качества теплоносителя при работе энергоблока
на мощности более 50 % $N_{ном}$**

Нормируемые показатели				
Наименование показателей	Диапазон допустимых значений	Отклонения от допустимых значений		
		первый уровень	второй уровень	третий уровень
Концентрация хлорид-иона, мг/дм ³	не более 0,1	-	свыше 0,1 до 0,2	свыше 0,2
Концентрация растворенного кислорода, мг/дм ³	не более 0,005	свыше 0,005 до 0,02	свыше 0,02 до 0,1	свыше 0,1
концентрация растворенного водорода, мг/дм ³	от 2,2 до 4,5	свыше 4,5 до 7,2 или менее 2,2 до 1,3	свыше 7,2 до 9,0 или менее 1,3 до 0,5	свыше 9,0 или менее 0,5
Наименование показателей			Контрольные уровни	
Суммарная молярная концентрация щелочных металлов (K+Li+Na) (в зависимости от текущей концентрации борной кислоты)	Зона А на рис.3	Зона Б на рис.3	Зоны В и Г на рис. 3	Зона Д на рис. 3
Диагностические показатели				
Удельная электропроводность, мкСм/см		От 20 до 200		
Концентрация аммиака, мг/дм ³ , не менее		5,0		
Концентрация железа, мг/дм ³ , не более		0,05		
Концентрация нитрат-иона, мг/дм ³ , не более		0,2		
Концентрация фторид-иона, мг/дм ³ , не более		0,05		
концентрация сульфат-иона, мг/дм ³ , не более		0,1		
Наименование показателей		Контрольные уровни		
Концентрация ООУ, мг/дм ³ , не более		0,5		

4. ДЕЙСТВИЯ ПРИ ОТКЛОНЕНИИ НОРМИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Отклонение нормируемых показателей качества теплоносителя подразделяется на уровни (см. табл.1). Для каждого уровня установлены максимальные отклонения показателей качества теплоносителя и максимально допустимое время работы блока при таких отклонениях.

Нарушением водно-химического режима первого контура является:

- отклонение нормируемых показателей качества теплоносителя от диапазона допустимых значений в пределах первого, второго и третьего уровней, не устраненные в течение установленного для каждого уровня времени;
- превышение при работе на энергетических уровнях мощности суммарной продолжительности отклонений показателей в пределах первого и второго

уровней более тридцати суток и в пределах второго уровня более пяти суток за топливную компанию;

– достижение нормируемыми показателями качества теплоносителя третьего уровня;

– отклонение диагностических показателей от контрольных уровней, не устраненные в течении установленного времени.

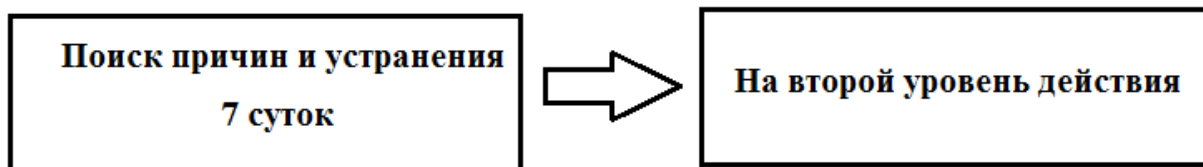
Установление времени работы энергоблока в пределах первого и второго уровней начинается с момента обнаружения отклонений нормируемых или диагностических показателей.

Рассмотрим варианты действий при отклонении нормированных показателей качества теплоносителя при работе энергоблока на мощности более 50 % $N_{ном}$.

ПЕРВЫЙ УРОВЕНЬ

Если продолжительность работы энергоблока на мощности более 50 % $N_{ном}$ с отклонением одного или нескольких нормативных показателей, указанных в таблице 1 в пределах первого уровня, превышают семь суток с момента обнаружения отклонений, то фиксируется нарушение ВХР с обязательным анализом причин нарушения и принимаются меры по устранению нарушений.

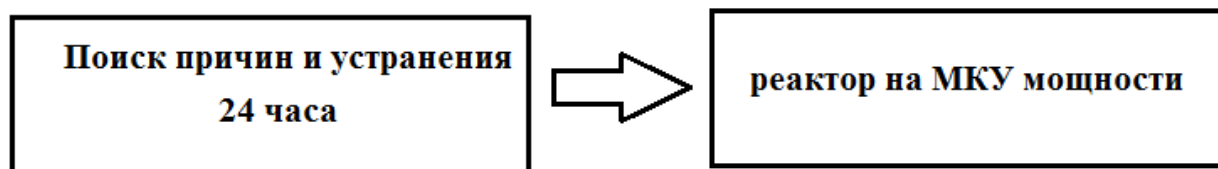
C_{O_2} , мг/дм ³	C_{H_2} мг/дм ³	$\sum C(K, Li, Na)$ в зависимости от $C_{H_3BO_3}$
Свыше 0,005 До 0,02	Свыше 4,5 до 7,2 или менее 2,2 до 1,3	Зона Б на рис. 3



ВТОРОЙ УРОВЕНЬ

Продолжительность работы энергоблока на мощности более 50 % $N_{ном}$ при отклонении одного или нескольких нормативных показателей, указанных в табл. 1, в пределах второго уровня не должна превышать 24 часов с момента их обнаружения. Если в течение 24 часов не устранены отклонения нормируемых показателей, то энергоблок должен быть приведен в состояние «реактор на МКУ мощности», а также должны быть приняты меры по устранению нарушения ВХР. Последующий подъем мощности энергоблока допускается после устранения отклонений показателей.

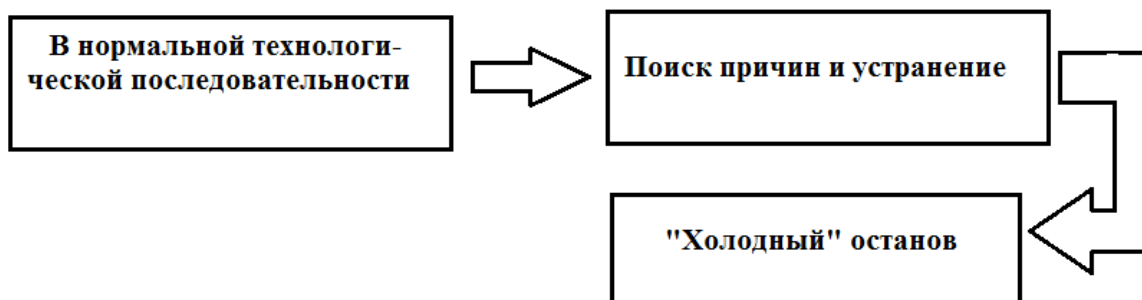
C_{Cl^-} , мг/дм ³	C_{O_2} , мг/дм ³	C_{H_2} мг/дм ³	$\sum C(K, Li, Na)$ в зависимости от $C_{H_3BO_3}$
Свыше 0,1 до 0,2	Свыше 0,02 до 0,1	Свыше 7,2 до 9,0 или менее 1,3 до 0,5	Зоны В и Г на рис. 3



ТРЕТИЙ УРОВЕНЬ

При достижении одним или несколькими нормируемыми показателями значений третьего уровня, указанного в табл. 1, энергоблок должен быть в нормальной технологической последовательности переведен в «холодное» состояние, а также должны быть приняты меры по устранению нарушения ВХР.

C_{Cl^-} , мг/дм ³	C_{O_2} , мг/дм ³	C_{H_2} мг/дм ³	$\sum C(K, Li, Na)$ в зависимости от $C_{H_3BO_3}$
Свыше 0,2	Свыше 0,1	Свыше 9,0 или менее 0,5	Зона Д на рис. 3



5. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОДДЕРЖАНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРВОГО КОНТУРА

Источниками радиоактивных примесей в первом контуре являются

- продукты коррозии (^{59}Fe , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{54}Mn , ^{51}Cr и др.);
- радионуклиды разрушенных твэлов (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{106}Ru и др.);
- примеси добавочной воды (^{24}Na , ^{38}Cl , ^{42}K и др.);
- продукты деструкции сорбентов;
- ядра отдачи с поверхностей, работающих в нейтронном поле реактора;
- корректирующие добавки (N_2H_4 , ^{42}K , ^{16}N).

Основные радионуклиды, образующиеся в теплоносителе и конструкционных материалах действующего реактора, представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Ядерно-физические характеристики радионуклидов

Радионуклид	Реакция образования	Сечение образования σ , см ⁻¹	$T_{1/2}$	Тип распада
¹⁶ N	(n, p)	$1,9 \cdot 10^{-5}$	7,38 с	β^- , γ
¹⁸ F	(p, n)	$8 \cdot 10^{-6}$	111 мин	β^+ , γ
¹⁹ O	(n, γ)	$2,1 \cdot 10^{-4}$	29 с	β^- , γ
³ H	(n, γ)	$5,4 \cdot 10^{-4}$	12,3 г	β^-
³ H	(n, α)	945	12,3 г	β^-
³ H	(n, 2 α)	0,02	12,3 г	β^-
³ H	(n,n, α)	71	12,3 г	β^-
²⁴ Na	(n, γ)	0,53	14,9 ч	β^- , γ
²² Na	(n,2n)	$6,0 \cdot 10^{-6}$	2,6 г	β^+ , γ , э.з
³⁸ Cl	(n, γ)	0,56	37,7 мин	β^- , γ
⁵¹ Cr	(n, γ)	16,6	27,8 сут	γ
⁵⁴ Mn	(n, p)	$6,5 \cdot 10^{-2}$	303 сут	γ
⁵⁹ Fe	(n, γ)	1,1	45 сут	β^- , γ
⁵⁸ Co	(n, p)	$9 \cdot 10^{-2}$	71 сут	β^+ , γ
⁶⁰ Co	(n, γ)	20	5,26 г	β^+ , э.з
⁶⁵ Zn	(n, γ)	0,47	245 сут	β^- , γ
⁹⁵ Zr	(n, γ)	$7,5 \cdot 10^{-3}$	65 сут	β^- , γ
⁹⁵ Nb	(n, γ)	-	35,1 сут	β^- , γ

Удельную активность теплоносителя в равновесных условиях без учета влияния системы очистки рассчитывают по следующей формуле:

$$A_i = \Phi \cdot \sigma_{ai} \cdot N_i \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot \tau)}{1 - \exp(-\lambda_i \cdot T)}, \quad (23)$$

где Φ – усредненная плотность потока нейтронов деления в зоне облучения, н⁰/см²·с; σ_{ai} – сечение активации, см²; N_i – ядерная плотность материнского изотопа, см⁻³; λ_i – постоянная распада образующегося нуклида, с⁻¹; τ – время пребывания теплоносителя в зоне облучения, с; T – период циркуляции теплоносителя, с.

Удельную активность нуклида, образовавшегося в материале конструкции, без учета выгорания ядер, определяют из выражения:

$$A = n \cdot \Phi \cdot \sigma \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot t_c)] \cdot \exp(\lambda \cdot t_s), \text{ распад/с} \cdot \text{г}. \quad (24)$$

Здесь n – число ядер на 1 г мишени; t_c – время облучения, с; t_s – время выдержки после останова реактора, с.

Остальные символы соответствуют принятому в выражении (23).

Большое количества радионуклидов, продуктов коррозии, растворенных солей, коллоидных и грубодисперсных продуктов, образующихся и поступающих с подпиточными водами в первый контур, отрицательно влияет на работу и техническое состояние энергоблока и могут привести к преждевременному останову и выводу из эксплуатации реактора.

Повышенный γ -фон, производимый радионуклидами, увеличивает дозовые нагрузки на обслуживающий персонал, особенно в периоды останова и проведения ППР.

Поддержание установленного нормами слабощелочного восстановительного координированного аммиачно-калиевого водно-химического режима энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 осуществляется путем:

- введение в теплоноситель корректирующих химических добавок;
- очистка теплоносителя от продуктов коррозии;
- очистка теплоносителя от нежелательных примесей и радионуклидов;
- плавное аммиачно-калиевое регулирование;
- деаэрация и дегазация подпиточной воды;
- соблюдение норм качества подпиточной воды;
- применение химических реагентов и фильтрующих материалов высокого качества.

5.1. Система байпасной очистки теплоносителя первого контура (СВО-1)

Очистка теплоносителя от дисперсных (не растворимых в воде) продуктов коррозии конструкционных материалов осуществляется системой байпасной очистки воды первого контура.

Система СВО-1 (ТС) предназначена для механической очистки теплоносителя первого контура от радиоактивных продуктов коррозии конструкционных материалов с целью снижения уровней удельной активности на поверхности участков оборудования первого контура и других вспомогательных систем, уменьшая дозовые нагрузки на персонал при их обслуживании и ремонте.

Установка располагается внутри защитной оболочки реакторного отделения в герметичном помещении, доступ в которое осуществляется по разрешению дозиметрических служб станции.

Принцип работы СВО-1 заключается в отводе части теплоносителя с напора ГЦН на очистку через систему и возврат на всас ГЦН.

Очистка части теплоносителя через СВО-1 позволяет снизить удельную активность теплоносителя первого контура до уровней $10^{-4} \dots 10^{-5}$ Ки/л, снизить накопление продуктов коррозии в 1 контуре, уменьшить радиационные поля от активного оборудования в 5-10 раз.

СВО-1 каждой РУ состоит из 4 ниток (по количеству работающих петель главных циркуляционных контуров (рис. 4))

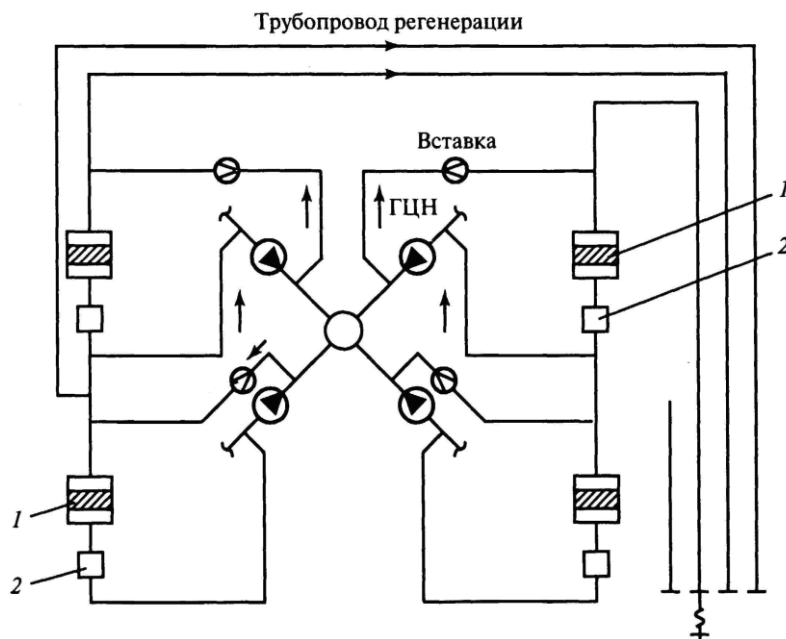


Рис. 4. Схема расположения систем СВО-1 по работающим петлям главных циркуляционных контуров блока ВВЭР-1000:
1 – высокотемпературный фильтр; 2 – фильтр-ловушка зернистых материалов

Установка СВО-1 находится в оперативном ведении НСБ и обслуживается персоналом РО.

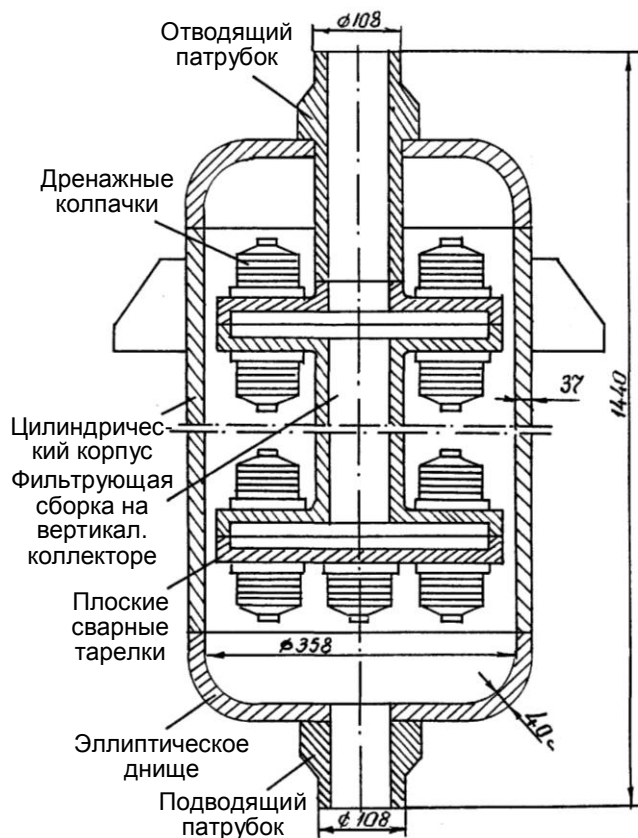
Но отмывку сорбента и металла оборудования, а также дезактивацию осуществляет оперативный персонал химического цеха и реакторного отделения.

Каждая нитка СВО-1 состоит:

- из высокотемпературного механического фильтра (ВТФ (рис. 5));
- фильтра-ловушки (ФЛЗМ) (рис. 6);
- фильтра-контейнера (один на 4 нитки (рис. 7));
- устройство гидроперегрузки;
- трубопроводов и арматуры;
- КИП.

Оборудование СВО-1 рассчитано на работу при давлении и температуре первого контура ($P_p = 180 \text{ кгс/см}^2$; $T_p = 350 \text{ }^\circ\text{C}$).

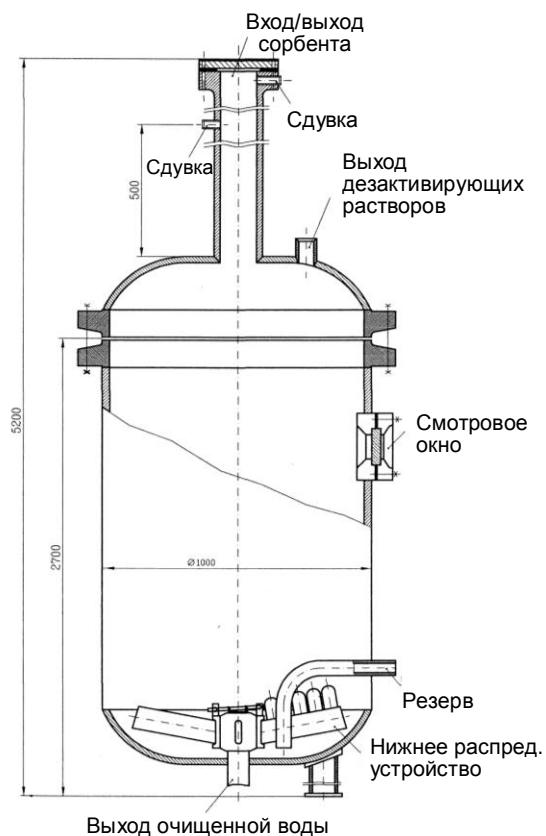
ВТФ предназначен для внутриконтурной очистки от радиоактивных продуктов коррозии неохлажденного теплоносителя первого контура. Он представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд с обвязкой, обеспечивающей вход и выход очищаемой воды, а также загрузку и выгрузку сорбента. В качестве сорбента используется титановая крошка, состав которой приведен в табл. 3.



Технические данные АФЛВТ

Давление рабочее	кгс/см ²	160
Температура рабочая	°С	270
Давление расчетное	кгс/см ²	180
Температура расчетная	°С	350
Давление гидроиспытаний	кгс/см ²	250
Расход при рабочих параметрах	м ³ /час	30-100
Размер щели колпачка	мм	0,3
Количество фильтрующих колпачков	шт	33
Емкость в колпачках при 30 м ³ /час		0,708
при 100 м ³ /час		2,36
Емкость в подводящих гидропроводах при 30 м ³ /час		0,9
при 100 м ³ /час		3
Максимально допустимый перепад давления на фильтре-ловушке	кгс/см ²	5,0

Рис. 6. Схема и технические данные фильтра-ловушки



Технические данные АФЛВТ

Давление рабочее в корпусе	кгс/см ²	10,0
Давление расчетное	кгс/см ²	10,0
Давление пробное (гидравлическое)	кгс/см ²	15,5
Температура испытательной среды	°С	5-40
Максимально допустимая температура	°С	100
Объем	м ³	1,9

Рис. 7. Схема и технические данные фильтра-контейнера для перегрузки сорбента

Высота загрузки сорбента 800 мм (объем 0,7 м³). Титановая крошка, пропускающая через себя воду, задерживает мельчайшие частицы продуктов коррозии. Тем самым проводится механическая очистка теплоносителя первого контура.

Фильтр-ловушка зернистых материалов предназначен для предотвращения выноса сорбента в тракт теплоносителя первого контура в случае разрушения дренажной системы ВТФ установки СВО-1.

Технология очистки теплоносителя первого контура СВО-1. Теплоноситель первого контура с напора ГЦН через вентиль и байпас поступает в ВТФ. При прохождении через ВРУ фильтра поток теплоносителя равномерно распределяется по всему объему фильтрующей засыпки, где происходит очистка от мелкодисперсных продуктов коррозии.

Пройдя НРУ, теплоноситель поступает в ФЛЗМ. В дренажной системе ФЛЗМ происходит задержание проскочившего из ВТФ сорбента. Пройдя ФЛЗМ, очищенный теплоноситель поступает на всас ГЦН. Вот суть технологии очистки теплоносителя на СВО-1 при нормальной работе.

Принципиальная технологическая схема установки СВО-1. Технологическая схема установки СВО-1 представлена на рис. 8.

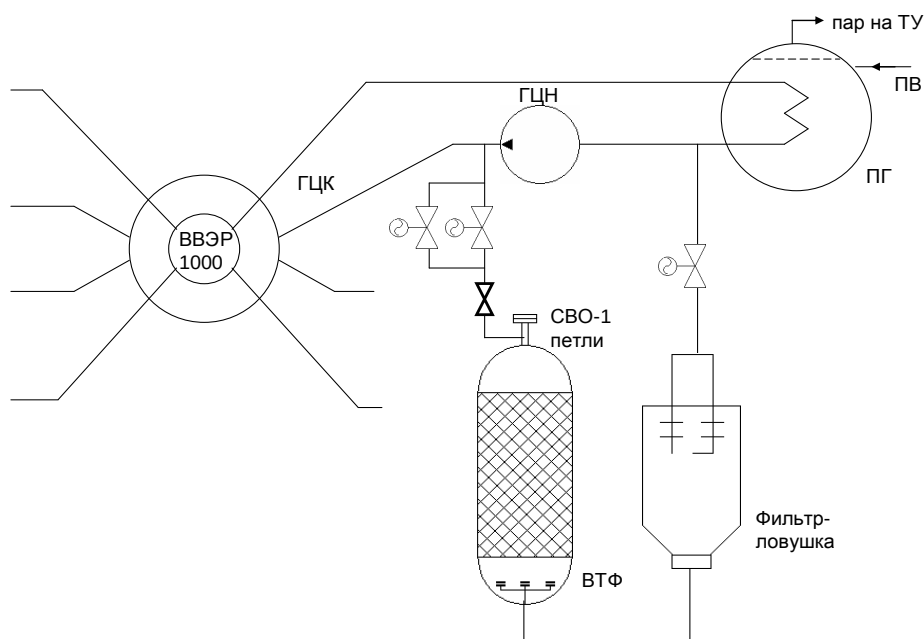


Рис. 8. Технологическая схема установки СВО-1

Контролируемые параметры:

- производительность каждой нитки СВО-1 – 100 т/ч;
- перепад давления на ВТФ – 2,7 кгс/см² (допускается до 5 кгс/см²);
- перепад давления на ФЛЗМ – 0,5 кгс/см² (допускается до 5 кгс/см²);
- рабочее давление – 160 кгс/см²;
- Т_{раб} – 290 °С.

Промывка фильтра СВО-1.

Промывка фильтра производится с целью удаления из него накопленного коррозионного шлама. Промывка выполняется в период ППР, когда система ТС выведена из работы. Основанием для проведения промывки является:

- увеличение перепада давления на фильтре до 5 кгс/см²;
- перед проведением гидроперегрузки сорбента.

Перед промывкой фильтра производится промывка ФЛЗМ. Если этого не сделать, то скопившийся в ловушке шлам при промывке фильтра попадет в дренажную систему фильтра и может засорить ее.

Промывка ловушки и фильтра выполняется посредством подачи водовоздушной смеси обратным потоком по сравнению с направлением движения фильтрующего теплоносителя. Продолжительность промывки ловушки – 15 минут, фильтра – 1 час.

Деактивация фильтра СВО-1 производится после выгрузки из него сорбента в фильтр-контейнер перед проведением ремонтных работ или техническим обслуживанием фильтра. Деактивация производится двухваннным способом.

Рецептура дезактивирующего раствора 1-й ванны:

$$C_{\text{NaOH}} = 30 \text{ г/л};$$

$$C_{\text{KMnO}_4} = 3 \text{ г/л}.$$

Рецептура дезактивирующего раствора 2-й ванны:

$$C_{\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4} = 15 \text{ г/л};$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}_2} = 1 \text{ г/л}.$$

После заполнения фильтра 1-й ванны производится барботаж сжатым воздухом в течение 2-х часов. Затем дезраствор дренируется в трап спецканализации, а фильтр промывается дистиллятом.

По окончании промывки фильтр заполняется дезраствором второй ванны и барботируется воздухом в течение 30 минут. Затем фильтр дренируется и промывается дистиллятом. Деактивация фильтра производится при температуре 85...90 °С.

Деактивация сорбента в фильтре-контейнере. Деактивация и отмывка сорбента в фильтре-контейнере производится с целью восстановления его способности задерживать дисперсные продукты коррозии и для снижения дозовых нагрузок на персонал от оборудования СВО-1.

Деактивация пустого фильтра-контейнера производится теми же дезрастворами и технологией, что и ВТФ.

Деактивация сорбента в фильтре-контейнере производится только кислотным дезраствором следующего состава:

$$C_{\text{HNO}_3} = 2 \text{ г/л};$$

$$C_{\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4} = 10 \text{ г/л}.$$

Раствор барботируется в фильтре-контейнере в течение 2 часов сжатым воздухом. Затем сливается, и операция повторяется вновь. Когда повторная

деактивация окончена, сорбент промывается дистиллятом путем заполнения и дренирования до достижения $pH = 6$ в промывочной воде после контейнера.

5.2. Система спецводоочистки теплоносителя первого контура (СВО-2)

Система СВО-2 (ТЕ) предназначена:

- для очистки теплоносителя первого контура и вод организованных протечек от продуктов коррозии, осколков деления ядерного топлива (в случае повреждения твэлов), химических примесей в виде ионов и посторонних примесей, поступающих в первый контур с подпиточной водой и дозируемыми коррекционными реагентами;

- плавного регулирования концентрации щелочных металлов (Na, K, Li) и аммиака в первом контуре;

- выведения избыточной щелочности из теплоносителя;

- выведения борной кислоты из теплоносителя в конце компании.

Оперативное обслуживание СВО-2 осуществляет персонал РО.

Контроль за ВХР СВО-2 осуществляет персонал ВРХЛ по результатам химанализов.

С целью повышения живучести и надежности выполнения функций система ТЕ выполнена двумя параллельными нитками: одна рабочая, одна резервная.

Каждая нитка включает в себя следующее оборудование (рис. 8):

- 2 катионитовых фильтра;
- анионитовый фильтр;
- фильтр-ловушку зернистых материалов;
- 2 импульсных предохранительных устройства;
- обвязка, состоящая из трубопроводов и арматуры;
- КИП.

Т а б л и ц а 4

Технические характеристики ионитового фильтра

Объем	м ³	2,0
Давление рабочее	кгс/см ²	20
Давление пробное	кгс/см ²	25
Температура макс. допустимая среды	°С	58
Масса пустого сосуда	кг	1232
Масса сосуда, заполненного водой	кг	3085
Производительность фильтра	м ³ /ч	40
Соппротивление дренажной системы	кгс/см ²	0,4
Допустимый перепад на фильтре	кгс/см ²	3,0
Размер щели фильтрующего узла	мм	0,25-0,05
Высота загрузки	мм	1100

Материал и объем загрузки: катионитовых фильтров анионитовых фильтров	м ³	1,4 КУ-2-8чс ГОСТ 20298-74 АВ-17-8чс Гост 20301-74
Срок службы ионообменных смола катионит для ТЕ10(20)N03 анионит для ТЕ10(20)N03		2 года 1 год
Срок службы корпуса фильтра		не менее 30 лет

Т а б л и ц а 5

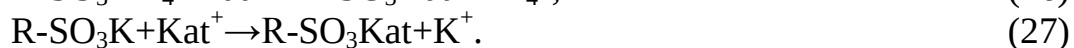
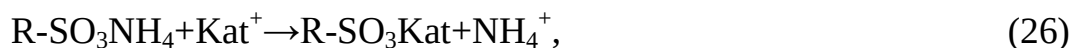
Технические характеристики фильтра-ловушки

Тип		АФЛ-0,4-0,2
Объем	м ³	0,22
Давление рабочее	кгс/см ²	20
Давление пробное	кгс/см ²	25
Температура макс. допустимая среды	°С	58
Масса пустого сосуда	кг	340
Масса сосуда, заполненного водой	кг	560
Производительность ловушки	м ³ /ч	40
Соппротивление дренажной системы	кгс/см ²	0,3
Допустимый перепад на фильтре	кгс/см ²	3,0

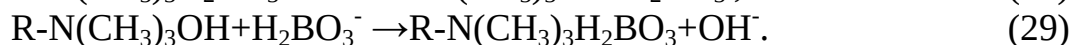
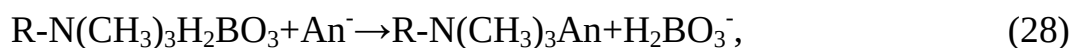
Предназначение ионитовых фильтров. КФ в Н⁺-форме предназначен для вывода избыточной щелочности и очистки теплоносителя первого контура от примесей, находящихся в катионовой форме, особенно от радиоактивных Cs, Sr, Ni.



КФ в смешанной NH₄⁺ и K⁺-форме предназначен для поддержания ВХР теплоносителя первого контура, а также для вывода из теплоносителя примесей в виде катионов.



АФ в BO₃³⁻-форме предназначен для вывода из теплоносителя первого контура примесей в виде анионов радиоактивных нуклидов, а также для вывода борной кислоты из первого контура в конце кампании. При этом фильтр переводится в OH⁻-форму:



При работе на мощности постоянно задействованы КФ в NH_4^+ - K^+ -форме и АФ, а КФ в H^+ -форме подключается кратковременно.

Подключение КФ в H^+ -форме производится при суммарной концентрации щелочности $C_{\Sigma K, Na, Li}$ выше предела, определяемого концентрацией H_3BO_3 в контуре (рис. 3).

В конце кампании реактора (при концентрации H_3BO_3 в теплоносителе менее 1 г/кг), когда водообмен с целью снижения H_3BO_3 неэффективен, в работу вводится АФ в OH^- -форме.

Технологические параметры СВО-2:

Производительность – 40 м³/ч;

$C_{Fe^{3+}} \geq 0,2$ мг/кг;

$T_{пр. воды} - 40 - 55$ °С;

P перед ниткой – 16 – 21 кгс/см²;

ΔP на нитке – 1,5 – 3 кгс/см²;

ΔP на фильтрах – 0,4 – 1,5 кгс/см²;

ΔP на ЛЗМ – 0,3 – 1,5 кгс/см².

Регенерация ионитовых фильтров СВО-2

Регенерация КФ в H^+ -форме. Основанием для регенерации является:

$C_{Na^+} > 1,0$ мг/кг.

Регенерация осуществляется пропуском 5%-го раствора HNO_3 в течение часа. Затем – промывка дистиллятом до следующих значений:

$pH > 4,5$

C_{Na} отсутствует.

Основанием для регенерации являются:

$C_{Na} \geq 1,0$ мг/кг

$pH > 10,2$

$\Sigma C(Li, K, Na)^+$ больше, чем определенная по графику концентрации ионов щелочных металлов.

Регенерация КФ в NH_4^+ - K^+ -форме производится аналогично регенерации КФ в H^+ -форме.

Регенерация АФ. Основанием для регенерации является:

$C_{Cl^-} > 0,1$ мг/кг.

Регенерация осуществляется пропуском 5%-го раствора КОН в течение часа. Затем производится промывка фильтра. Отмывка прекращается при получении следующих химических анализов:

$pH > 9,5$

$C_{Cl^-} \geq 0,05$ мг/кг.

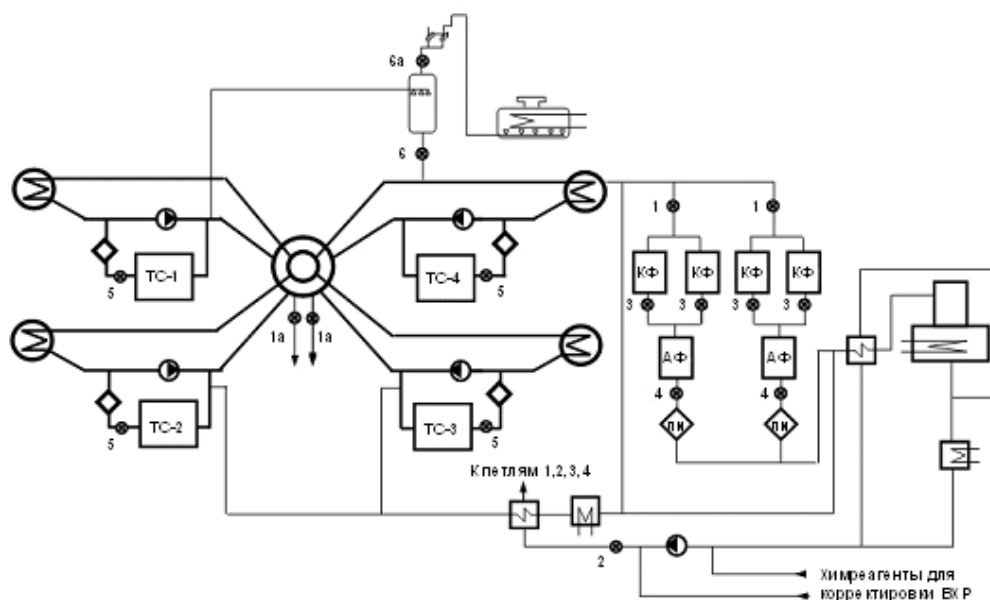


Рис. 9. Принципиальная схема расположения точек пробоотбора для контроля качества теплоносителя:

- 1 – до фильтров СВО-2 (продувка 1-го контура); 1а – из реактора;
 2 – за подпиточными насосами; 3 – за КФ СВО-2; 4 – за АФ СВО-2;
 5 – за высокотемпературными фильтрами СВО-1; 6 – водная среда компенсатора давления; 6а – паровая среда компенсатора объема

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие задачи решает водно-химический режим первого контура?
2. Назовите нормируемые и диагностические показатели качества теплоносителя?
3. Какова роль борной кислоты в первом контуре?
4. Зачем вводится в первый контур КОН?
5. Что представляет собой радиолиз воды?
6. Какова роль аммиака и гидразина в первом контуре?
7. Действия при отклонении нормируемых показателей качества теплоносителя?
8. Назначение и работа СВО-1?
9. Назначение и работа СВО-2?
10. Назовите условия для регенерации ионитовых фильтров СВО-2?

ЛИТЕРАТУРА

1. Ампелогова Н.И., Симановский Ю.М., Трапезников А.А. Дезактивация в ядерной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1982.
2. Руководящий документ «Требования к входному и эксплуатационному контролю ионообменных смол для АЭС с реактором типа ВВЭР» РД ЭО1.1.2.25.0161 – 2009 – М.: Концерн «Росэнергоатом», 2009.
3. Сборник докладов Международного научно-технического совещания «Водно-химический режим АЭС». – М.: Концерн «Росэнергоатом», 2012.
4. Тевлин С.А. атомные электрические станции с реакторами ВВЭР-1000. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
5. ВВЭР-1000. Физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность / А.М. Афронов и др. – М.: Логос, 2006.
6. Климов А.Н. Ядерная физика и ядерные реакторы. – М.: Энергоатомиздат, 2002.
7. Герасимов В.В. Коррозия реакторных материалов. – М.: Атомиздат, 1980.
8. Стандарт организации СТО 1.1.1.02.005.0004 – 2012 «Водно-химический режим первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. Нормы качества теплоносителя и средств обеспечения» - М.: концерн «Росэнергоатом», 2012.
9. Рощектаев Б.М. Водно-химический режим АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК -1000. - М.: «МИФИ», 2010.
10. Акимов А.М., Федорова С.А., Котельникова С.А. Оборудование и материалы ядерных энергетических установок. – Севастополь: СевГУ, 2017.

Учебное издание

**Акимов Александр Михайлович
Котельникова Светлана Александровна**

**ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ
ПЕРВОГО КОНТУРА АЭС
С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-1000**

Учебное пособие

Редактор – О.В. Дмитриева

Изд. № 100/18. Объем 2 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»