

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.В. Сукрушев, Ю.В. Браславский

ОСНОВЫ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА КОНТУРОВ ЯЭУ АЭС

Учебное пособие

Севастополь
СевГУ
2017

УДК 621.311.25.002: 621.18.543 (075.8)
С 895

Р е ц е н з е н т ы:

К.Б. Матузаев - канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой «Ядерные энергетические установки»,

А.А. Скидан - канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой «Системы контроля и управления атомных станций»

А.В. Сукрушев

С895 Основы водного режима контуров ЯЭУ АЭС: учеб. пособие /
А.В. Сукрушев, Ю.В. Браславский. – Севастополь: СевГУ, 2017. –
260 с.: ил.

Содержит основные положения по подготовке воды для заполнения и подпитки контуров ЯЭУ АЭС, основы ведения водно-химического режима первого и второго контуров. В пособии изложены принципы действия и основы эксплуатации средств обеспечения ВХР контуров действующих энергоблоков отечественных АЭС с ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и РБМК-1000. Также рассмотрены вопросы организации химического контроля водного режима контуров ЯЭУ.

Предназначено для студентов университета, обучающихся по специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», а также может быть использовано студентами других специальностей.

УДК 621.311.25.002: 621.18.543 (075.8)

Учебное пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Ядерные энергетические установки», протокол № 5 от 27 октября 2017 г.

© Сукрушев А.В., Браславский Ю.В., 2017
© Издание ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень принятых сокращений	6
Предисловие	8
1. Виды и показатели качества воды, используемой на АЭС	10
1.1. Основные понятия физики и химии воды	10
1.2. Основные виды воды, используемой на АЭС	12
1.3. Основные технологические показатели качества воды	13
2. Подготовка воды для заполнения и подпитки контуров	15
2.1. Предварительная очистка воды методами коагуляции, осаждения и фильтрования	15
2.2. Методы опреснения и обессоливания воды	20
2.3. Очистка воды от растворенных газов	28
3. Водно-химический режим первого контура ЯЭУ с ВВЭР	31
3.1. Физико-химические процессы, протекающие в воде первого контура	31
3.2. Требования к водному режиму реакторов типа ВВЭР	50
3.3. Основы водного режима первого контура ЯЭУ с ВВЭР	52
3.4. Средства обеспечения ВХР первого контура ЯЭУ с ВВЭР-1000	55
3.4.1. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы СВО-1	55
3.4.2. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы СВО-2	65
3.4.3. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы СВО-4	77
3.4.4. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы реагентного хозяйства	82
3.5. Средства обеспечения ВХР первого контура ЯЭУ с ВВЭР-1200	86
3.6. Организация ВХР первого контура при различных состояниях энергоблока	101
3.6.1. Организация ВХР первого контура при работе энергоблока на мощности более 50 % от номинальной	102
3.6.2. Организация ВХР первого контура при работе энергоблока на мощности 30...50 % от номинальной	110
3.6.3. Организация ВХР первого контура при работе энергоблока в «горячем» состоянии, состоянии «реактор на МКУ мощности» и на мощности менее или равной 30 % от номинальной	111

3.6.4.	Организация ВХР первого контура при расхолаживании энергоблока, при его нахождении в «холодном» состоянии, состояниях «останов для ремонта» и «перегрузка топлива»	113
3.6.5.	Организация ВХР первого контура при разогреве энергоблока	114
3.6.6	Требования к качеству подпиточной воды, «чистого» конденсата, воды вспомогательных систем и растворов систем безопасности	115
4.	Водно-химический режим второго контура ЯЭУ с ВВЭР	117
4.1.	Особенности водного режима второго контура ЯЭУ с ВВЭР и основные задачи при его организации	117
4.2.	Средства обеспечения ВХР второго контура ЯЭУ с ВВЭР-1000	120
4.2.1.	Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы химводоочистки	120
4.2.2.	Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации систем конденсации и дегазации	122
4.2.3.	Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы очистки турбинного конденсата	127
4.2.4.	Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации систем продувки парогенераторов и СВО-5	138
4.2.5.	Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы ввода корректирующих добавок во второй контур	148
4.3.	Средства обеспечения ВХР второго контура ЯЭУ с ВВЭР-1200	153
4.4.	Организация ВХР второго контура при различных состояниях энергоблока	167
4.4.1.	Организация ВХР второго контура при работе энергоблока на мощности более 50 % от номинальной	167
4.4.2.	Организация ВХР второго контура при работе энергоблока на мощности менее 50 % от номинальной	179
5.	Восстановление свойств фильтров контуров ЯЭУ АЭС	182
5.1.	Устройство и основы эксплуатации фильтров	182
5.1.1.	Классификация фильтров	182
5.1.2.	Типовые схемы обвязки фильтров	183
5.1.3.	Конструкция фильтров	187
5.1.4.	Основы эксплуатации фильтров	192
5.2.	Взрыхляющая промывка фильтров	194
5.3.	Регенерация ионообменного фильтра	198

6.	Контроль ВХР в контурах ЯЭУ АЭС	202
6.1.	Основы организации лабораторного и автоматического контроля качества воды ЯЭУ АЭС	202
6.1.1.	Основы организации лабораторного химического контроля	204
6.1.2.	Основы организации автоматического химического контроля	208
6.2.	Основы организации химического контроля качества теплоносителя первого контура	208
6.3.	Основы организации химического контроля качества рабочей среды второго контура	215
6.4.	Основные методы контроля показателей качества рабочих сред, используемые на АЭС	219
7.	Системы переработки и утилизации радиоактивных вод	224
7.1.	Назначение, состав и принцип действия системы СВО-3	224
7.2.	Назначение, состав и принцип действия системы СВО-6	228
7.3.	Назначение, состав и принцип действия системы СВО-7	230
8.	Отмывка теплообменных поверхностей парогенераторов	231
8.1.	Водно-химическая отмывка теплообменных поверхностей парогенераторов	231
8.2.	Химическая отмывка теплообменных поверхностей парогенераторов	232
8.2.1.	Требования к химической отмывке парогенераторов	232
8.2.2.	Химическая отмывка в период останова	235
8.2.3.	Химическая отмывка при рабочих параметрах	236
9.	Основы водно-химического режима ЯЭУ с РБМК	237
9.1.	Особенности ВХР ЯЭУ с РБМК	237
9.2.	Организация ВХР ЯЭУ с РБМК	242
9.3.	Средства обеспечения ВХР ЯЭУ с РБМК	246
	Приложение А. Обозначения технологических систем ЯЭУ с ВВЭР	257
	Литература	259

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АФ	– анионитовый фильтр
АЭС	– атомная электрическая станция
АХК	– автоматизированный химический контроль
БВиП	– бассейн выдержки и перегрузки
БГК	– бак грязного конденсата
БЗК	– бак запаса конденсата
БМК	– бак-мерник кислоты
БМЩ	– бак-мерник щелочи
БОВ	– бак отмывочных вод
БОУ	– блочная обессоливающая установка
БРА	– бак регенерации анионита
БРК	– бак регенерации катионита
БРУ-К	– быстродействующая редуccionная установка сброса пара в конденсатор
БЩУ	– блочный щит управления
ВВЭР	– водо-водяной энергетический реактор
ВПЭН	– вспомогательный питательный электронасос
ВРУ	– верхнее водораспределительное устройство
ВТФ	– высокотемпературный фильтр
ВХР	– водно-химический режим
ГЦН	– главный циркуляционный насос
ГЦТ	– главный циркуляционный трубопровод
ДУНЗ	– допустимый уровень нормируемого значения
ЕФМ	– емкость фильтрующих материалов
ЖРО	– жидкие радиоактивные отходы
ИЭ	– инструкция по эксплуатации
КГП	– конденсат греющего пара
КИП	– контрольно-измерительные приборы
КМПЦ	– контур многократной принудительной циркуляции
КПТ	– конденсатно-питательный тракт
КПД	– коэффициент полезного действия
КФ	– катионитовый фильтр
КЭН	– конденсатный электронасос
ЛЗМ	– ловушка зернистых материалов
ЛХК	– лабораторный химический контроль
МКУ	– минимально-контролируемый уровень мощности
МФ	– механический фильтр
НОВ	– насос отмывочных вод
НПВ	– насос промывочной воды
НРУ	– нижнее водосборное устройство

НСБ	–	начальник смены блока
НСРЦ	–	начальник смены реакторного цеха
ОК	–	основной конденсат
ОЯБ	–	отдел ядерной безопасности
ПВД	–	подогреватель высокого давления
ПГ	–	парогенератор
ПНД	–	подогреватель низкого давления
ППР	–	планово-предупредительный ремонт
ПСВ	–	подогреватель сетевой воды
ПТУ	–	паротурбинная установка
РБ	–	радиационная безопасность
РБМК	–	реактор большой мощности канальный
РО	–	реакторное отделение
РУ	–	реакторная установка
САОЗ	–	система аварийного охлаждения активной зоны
СВО	–	спецводоочистка
СПП	–	сепаратор-пароперегреватель
СРУ	–	среднее водораспределительное устройство
СУЗ	–	система управления и защиты реактора
ТВС	–	тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ	–	тепловыделяющий элемент
ТПН	–	турбопитательный насос
УВС	–	управляющая информационно-вычислительная система
УГВС	–	устройство гидровыгрузки сорбента
ФЛ	–	фильтр-ловушка
ФРА	–	фильтр-регенератор анионита
ФРК	–	фильтр-регенератор катионита
ФСД	–	фильтр смешанного действия
ХВО	–	химводоочистка
ХЖО	–	хранилища жидких радиоактивных отходов
ХОВ	–	химически обессоленная вода
ХЦ	–	химический цех
ЦНД	–	цилиндр низкого давления
ЧОВ	–	частично обессоленная вода
ЭБ	–	энергоблок
ЭДТК	–	этилендиаминтетрауксусная кислота
ЭМФ	–	электромагнитный фильтр
ЭУЗ	–	эксплуатационный уровень значения
ЯППУ	–	ядерная паропроизводящая установка
ЯР	–	ядерный реактор
ЯЭУ	–	ядерная энергетическая установка

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эффективность, надежность, безопасность и экономичность работы ЯЭУ во многом зависят от рационального решения химико-технологических задач контуров, правильной организации ВХР контуров, а также физико-химического контроля качества воды и пара.

Физико-химические внутриконтурные процессы ЯЭУ характеризуется рядом принципиальных специфических особенностей, обусловленных одновременным воздействием на вещества высоких давлений и температур, мощных радиационных полей и сильнодействующих гидродинамических факторов. Одновременно все эти факторы не имеют места ни в одной другой системе и полностью не могут быть воспроизведены в лабораторных или стендовых условиях. Поэтому в большинстве случаев практические решения в ядерной энергетике принимаются на основе систематизации, обобщения и анализа эксплуатационных данных действующих ЯЭУ.

К физико-химическим процессам в водном и водно-паровом трактах ЯЭУ относятся:

- радиационные процессы;
- коррозия конструкционных материалов;
- преобразование естественных примесей, попадающих в цикл из внешней среды;
- распределение примесей и продуктов коррозии между водой и образующимся из нее паром;
- выпадение твердых соединений на поверхностях трактов;
- взаимодействие естественных примесей и продуктов коррозии с различными добавками, корректирующими водный режим и др.

Первые же годы эксплуатации ЯЭУ поставили перед персоналом АЭС химико-технологические задачи, не имеющие аналогов в существующих производствах. Это химическая «отмывка» радиоактивных коррозионных отложений с внутренних поверхностей первого контура (деактивация) при обязательном условии сохранности конструкционного материала, переработка и локализация радиоактивных отходов, целенаправленное управление внутриконтурного массопереноса в целях предотвращения оксидных отложений на теплопередающих поверхностях и уменьшения радиоактивного загрязнения вне активной зоны.

Типы реакторов и тепловые схемы работающих и строящихся АЭС весьма разнообразны. Хотя и схемы, и конструкционные решения в ЯЭУ могут значительно отличаться, условия работы пароводяной части установки, а, соответственно, и водный режим сравнительно мало зависят от конструкции реактора или типа замедлителя.

С самого начала развития атомной энергетики большое внимание уделялось водному режиму первого контура, для которого характерна работа

не только реактора, но и всего остального тепломеханического оборудования в радиационно-активных условиях. Эти условия вне активной зоны, в основном, определяются концентрацией примесей в воде, которая, проходя через активную зону реактора, активируется и далее переносит активность по всему остальному контуру. Эти примеси могут попадать в контур с добавочной водой, с корректирующими добавками, а также образовываться в самом контуре при неизбежных процессах коррозии конструкционных материалов, в активной зоне реактора в результате радиационно-химических процессов, и, наконец, проникать в активную зону через неплотности оболочек твэлов. Отложения загрязнений на отдельных элементах оборудования снижают их надежность и экономичность, повышают радиационную активность оборудования, а, следовательно, определяют меньшую его доступность при эксплуатации и ремонте. Особенно опасны отложения на твэлах, которые в отличие от отложений вне активной зоны, вызывающих лишь снижение экономичности, могут привести к термическому разрушению твэлов, и, в конечном счете – к аварийной ситуации.

Высокое качество теплоносителя может быть обеспечено лишь в том случае, если примеси будут систематически удаляться из контуров путем очистки. Поддержание концентраций всех примесей на максимально допустимом уровне наиболее надежными, экономичными и эффективными технологическими методами – первая основная задача рациональной организации водного режима контуров АЭС.

Второй важнейшей задачей правильной организации водного режима является ограничение скорости коррозии всех конструкционных материалов контуров путем создания оптимальных условий взаимодействия между средой и металлом. Допустимая при этом скорость равномерной коррозии ограничивается не столько сроком работоспособности оборудования, сколько допустимой интенсивностью загрязнения среды продуктами коррозии (для язвенной коррозии) и условиями обеспечения требуемой длительности работы оборудования – для коррозии металла под напряжением.

Поддержание надежного ВХР в соответствии с установленными нормами качества воды, пара, конденсата и стоков АЭС является весьма сложной химико-технологической задачей. Оптимизация водного режима контуров АЭС должна проводиться, исходя из задач повышения безопасности, надежности, экономичности, готовности и увеличения длительности межперегрузочного и межремонтного циклов.

1. ВИДЫ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ВОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ НА АЭС

1.1. Основные понятия физики и химии воды

Основные понятия физики воды. Как и большинство веществ, вода состоит из молекул, а последние – из атомов. Молекула воды образована из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Несмотря на то, что вода – вещество, принятое в качестве эталона меры плотности, объема и прочих параметров для других веществ, она сама является самым аномальным веществом среди них. Параметры воды, используемой в ЯЭУ в качестве теплоносителя и рабочего тела, изменяются в широких пределах. Например, в ВВЭР температура воды изменяется в пределах 20...330 °С, а давление – 0,04...165 кгс/см². Изменение параметров воды приводит к изменению ее физико-химических свойств.

Плотность – масса вещества в единице объема. Известно, что все вещества при нагревании увеличивают свой объем и уменьшают плотность. У воды наблюдается то же самое за исключением интервала 0...4 °С, когда с возрастанием температуры объем воды не увеличивается, а наоборот, уменьшается. При понижении температуры ниже 0 °С объем воды продолжает увеличиваться, но только при условии переохлаждения. Максимальная плотность воды наблюдается при температуре 4 °С (эталон плотности).

Точки кипения и замерзания (плавления). При давлении в одну атмосферу аномальны точки замерзания и кипения воды. Если взять ряд соединений водорода с элементами периодической системы с учетом их относительной массы, то окажется, что точки замерзания и кипения воды не укладываются в закономерность, общую для трех других соединений, у которых чем больше относительная молекулярная масса, тем выше точки кипения и замерзания. Точка замерзания воды должна была бы находиться между -90 и -120 °С, а точка кипения – между 75 и 100 °С. Температура кипения воды с увеличением давления возрастает, а температура замерзания – понижается.

Теплоемкость воды в 5...30 раз выше, чем у других веществ (за исключением аммиака и водорода). У всех тел (кроме ртути) удельная теплоемкость с повышением температуры возрастает. У воды же удельная теплоемкость в интервале 0...35 °С снижается, а затем начинает возрастать. Удельная теплоемкость воды при 16 °С условно принята за 1 кал/(г·°С). Теплоемкость льда в интервале температур 0...20 °С в среднем 0,5 кал/(г·°С), т. е. в два раза меньше, чем у жидкой фазы.

Теплота плавления у воды очень высокая, около 80 кал/г (у чистого железа – 6, свинца – 5,5).

Поверхностное натяжение (способность пограничных молекул воды, а также твердых тел самоуплотняться) у воды наиболее высокое из всех известных жидкостей, кроме ртути.

Динамическая вязкость (внутреннее трение) воды существенно зависит от температуры. Например, при повышении температуры от 0 до 75 °С коэффициент вязкости уменьшается в 5 раз.

Вода обладает способностью к диссоциации на противоположно заряженные ионы водорода и гидроксидов. В случае связывания одного из ионов с каким-либо другим веществом вода из нейтральной может стать кислой или щелочной. Изменяют свойства воды и магнитные поля, и переменное электрическое поле, и ультразвуковые воздействия, и радиоактивные излучения.

Основные понятия химии воды. В природе абсолютно «чистой» воды не существует, в ней всегда растворены различные газообразные, твердые и жидкие вещества, создающие огромное разнообразие (по минеральному составу) растворов. В воде могут растворяться все элементы периодической системы, включая почти нерастворимые, такие, как кремний. Все зависит от температуры, давления и присутствия в растворе других компонентов.

Раствор – однородная система переменного состава, состоящая из двух и более компонентов. Компонентами раствора являются растворитель и растворенное вещество. Вода является универсальным растворителем. В зависимости от степени дисперсности растворенного вещества различают истинные растворы, коллоидные растворы и взвеси (грубодисперсные системы). Чем больше размеры частиц дисперсной фазы, тем меньше устойчивость системы. Наименее устойчивы взвеси – с течением времени они разрушаются, и происходит разделение однородной системы на два отдельных компонента: растворитель и растворенное вещество. Различают два вида грубодисперсных систем: суспензии – твердые частицы в жидкостях и эмульсии – жидкие частицы одного вещества в другом жидком веществе. Растворы по своей природе занимают промежуточное положение между химическими соединениями и механическими смесями.

Растворение – сложный физико-химический процесс. С термодинамической точки зрения вещество может растворяться в какой-либо жидкости самопроизвольно при постоянном давлении и объеме, равномерно распределяясь в ней, если в результате этого процесса энергия системы уменьшится. Вещество переходит из упорядоченного твердого состояния в раствор, в котором термодинамическая вероятность состояния его частиц становится значительно больше, и энтропия системы увеличивается. Энтропийный фактор будет особенно ощутим при повышенных температурах, поэтому растворимость твердых веществ при нагревании, как правило, увеличивается. Растворение сопровождается и изменением энтальпии. Рас-

творимость вещества равна концентрации насыщенного раствора при определенной температуре. Растворимость выражают числом единиц массы безводного вещества, насыщающего при данных условиях 100 единиц массы растворителя. Раствор, концентрация которого при данных условиях больше растворимости называется перенасыщенным раствором, и из него самопроизвольно начинает выделяться растворенное вещество до тех пор, пока концентрация раствора не станет равной растворимости.

В природной воде могут также содержаться растворенные газы. Растворимость газов в воде различна и зависит от ряда факторов: температуры, давления, минерализации, присутствия в водном растворе других газов. С повышением температуры до 90 °С растворимость газов в воде снижается, а затем возрастает. Повышение давления влечет за собой увеличение растворимости газов. При повышении минерализации воды растворимость газов падает. Растворимость газа в природной воде при постоянных температуре и степени минерализации прямо пропорциональна давлению газа на жидкость. Для газовых смесей растворимость пропорциональна давлению каждого газа в отдельности.

Гидролиз солей. Гидролизом солей называют взаимодействие ионов, на которые диссоциируют растворенные в воде соли, и воды с образованием слабых кислот и оснований. Гидролиз обычно вызывает изменение реакции среды. Степень гидролиза существенно зависит от температуры и насыщенности раствора.

Радиолиз воды. Под воздействием ионизирующих излучений в воде протекают радиационно-химические реакции. Характер радиационно-химических процессов зависит от агрегатного состояния воды, условий протекания и наличия в воде примесей. Конечными молекулярными продуктами радиолиза воды являются водород, кислород и пероксид водорода. Концентрация продуктов радиолиза при отсутствии в воде примесей стабильна.

1.2. Основные виды воды, используемой на АЭС

На АЭС воды, в основном, подразделяются по назначению или по источнику получения на следующие виды:

- исходная природная вода, используемая в качестве исходного сырья на водоподготовительной установке;
- добавочная (или подпиточная) вода, направляемая в контур для восполнения утечек после обработки с применением физико-химических методов до определенного уровня;
- турбинный конденсат – получается в конденсаторах ПТУ и является основной частью питательной воды;

- питательная вода – вода, подаваемая в парогенераторы для замещения испаряющейся воды;
- вода парогенераторов и реакторов – вода, находящаяся в элементах указанных агрегатов;
- продувочная вода – вода, выводимая из ПГ или первого контура на очистку или в дренаж для поддержания в воде контуров заданной концентрации примесей;
- вода контуров – вода, находящаяся в контуре;
- охлаждающая или циркуляционная вода, используемая в конденсаторах для конденсации отработавшего пара и в других охладителях;
- вода опорожнения основных и вспомогательных контуров;
- вода бассейнов выдержки отработанных ТВС и перегрузки активной зоны;
- дезактивационные и обмывочные воды;
- воды спецпрачечных и душевых;
- регенерационные и промывочные воды;
- фильтрат и декантат из хранилищ жидких отходов. Фильтрат получается в результате отделения воды от направляемого на захоронение отработавшего фильтрующего материала установок очистки радиоактивных вод. Декантат получается при отсосе из емкостей хранилищ жидких отходов отстоявшейся жидкости для ее отделения от захораниваемого материала.

1.3. Основные технологические показатели качества воды

Общее солесодержание – содержание в воде всех растворенных веществ, способных проводить электрический ток, т. е. диссоциирующих на ионы (соли, уголекислоты и др. кислоты и щелочи). Выражается в мг/л.

Удельная электрическая проводимость (удельная электропроводность) – используется для характеристики и контроля вод и конденсатов с малым солесодержанием. Это величина, обратная электрическому сопротивлению воды, находящейся между двумя электродами с площадью поверхности 1 см^2 , при расстоянии между ними в 1 см. Выражается в микро-сименсах на сантиметр (мкСм/см).

Содержание грубодисперсных (взвешенных) веществ, присутствующих в природных водах в виде суспензий песка, глины, частиц почвы; в контурных водах – в виде шлама, состоящего из труднорастворимых соединений и частиц продуктов коррозии конструкционных материалов. Выражается в мг/л.

Сухой остаток или плотный остаток – условный показатель, характеризующий содержание в воде всех растворенных и нерастворенных ве-

ществ (кроме газов), нелетучих при температуре 105...110 °С. Выражается в мг/л.

Водородный показатель рН – характеризует кислотный или щелочной характер среды. Выражается в условных единицах рН. Вычисляется как отрицательный десятичный логарифм активности ионов водорода (в очень разбавленных растворах она эквивалентна концентрации)

$$pH = -\lg[H^+]. \quad (1.1)$$

Если $pH < 7$, то считается, что среда является кислой, если $pH > 7$ – щелочной. При $pH = 7$ среда нейтральная. Число 7 получено, исходя из концентрации ионов водорода в чистой воде при 25 °С, которая составляет 10^{-7} моль/л.

Окислительно-восстановительный потенциал среды еН, характеризующий окислительно-восстановительное равновесие в водном теплоносителе. Значение еН существенно влияет на ряд процессов, например, на режим образования и растворения оксидной пленки при постоянном значении рН.

Объемная активность – характеризует содержание в воде радиоактивных изотопов. Выражается в Ки/кг или в Бк/кг.

Содержание ионов хлора (СI⁻) – характеризует содержание в воде коррозионно-активного вещества. Является критерием очистки воды. Выражается в мг/дм³.

Содержание растворенного кислорода (O₂) – показатель коррозионной активности среды. Является критерием очистки воды. Выражается в мг/дм³.

Окисляемость – показатель, характеризующий содержание в воде органических примесей, окисляющихся сильным окислителем (как правило, перманганатом калия) в определенных условиях. Выражается условно через количество окислителя (в пересчете на O₂), затраченного на их окисление, в мг O₂ на 1 кг воды (мг/кг).

Жесткость – обуславливается содержанием в воде растворимых солей кальция и магния. Характеризует наличие в воде веществ, способных образовывать накипь на теплопередающих поверхностях. Выражается в мг-экв солей жесткости, содержащихся в 1 дм³ воды (мг-экв/дм³).

Щелочность воды – сумма миллинормальных концентраций всех анионов слабых кислот и гидроксильных ионов за вычетом концентраций ионов водорода. Выражается в мг-экв/дм³.

Прозрачность воды – характеризует наличие в ней различных нерастворимых примесей. Выражается, как правило, в %.

Массовая концентрация различных примесей, таких как фторид-ионы, аммиак, водород, железо, медь, нитрат-ионы, натрий, сульфат-ионы, общий органический углерод и др. Выражается, как правило, в мг/дм³.

2. ПОДГОТОВКА ВОДЫ ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ И ПОДПИТКИ КОНТУРОВ

2.1. Предварительная очистка воды методами коагуляции, осаждения и фильтрования

Воду для заполнения и подпитки контуров АЭС готовят из природных вод, забираемых из рек и водохранилищ, расположенных вблизи АЭС. Примеси в этих природных водах зависят от времени года, почвы, с которой поступают стоки и на которой находится сам водоем, от загрязнения вод промышленными и сельскохозяйственными стоками и т.д.

По степени дисперсности примеси природных вод разделяются на грубодисперсные, коллоидно-дисперсные и истинно растворенные.

Грубодисперсные примеси (размер частиц более 100 нм) образуют с водой гетерогенную систему. Обычно они состоят из глинистых веществ, песка и органических веществ.

Коллоидно-дисперсные примеси (размер 1...100 нм) также образуют с водой гетерогенную систему. В коллоидном состоянии обычно находятся различные формы кремниевой кислоты, соединения алюминия и железа, а также различные органические вещества.

Истинно растворенные примеси представлены в воде в виде отдельных ионов молекул или комплексов, состоящих из нескольких молекул (частицы таких примесей имеют размер менее 1 нм). Эти примеси не имеют поверхности раздела и с водой составляют гомогенную систему.

По химическому характеру примеси разделяются на газовые, минеральные и органические. Газовые примеси в природных водах составляют газы, растворенные в воде при ее контакте с атмосферой (O_2 , CO_2 , N_2), и газы, образующиеся в результате биохимических процессов (H_2S , SO_2 , NH_3). Минеральные примеси представляют собой растворенные минеральные соли. Органические вещества в природных водах представлены в основном гумусовыми веществами. В зависимости от pH и концентрации солей степень дисперсности (ассоциации) гумусовых веществ может меняться от молекулярной до коллоидной. При увеличении pH и уменьшении ионной силы дисперсность частиц возрастает.

Информация о химическом составе примесей в поступающей воде необходима для обоснованного выбора технологического режима водочистных установок.

Непосредственное использование природных вод для промышленных и бытовых нужд является в большинстве случаев неприемлемым. Особенно высокие требования к потребляемой воде предъявляет теплоэнергетическое производство. На АЭС вода используется и как рабочее тело, и как теплоноситель. Эффективность передачи тепловой энергии и последую-

щего ее превращения в механическую энергию определяется чистотой контактирующих с водой и паром поверхностей металла. Образование отложений различных веществ на теплопередающих поверхностях приводит к ухудшению теплопередачи. Для повышения эффективности работы основного оборудования необходимо максимально снижать концентрации в питательной и добавочной воде растворенных и взвешенных веществ, а также агрессивных агентов, вызывающих коррозию металла.

При выборе методов очистки природных вод необходимо учитывать фазово-дисперсное состояние и солесодержание очищаемых вод. Как правило, при очистке вод применяется последовательное использование методов очистки: сначала удаляются грубодисперсные примеси, затем коллоидно-дисперсные примеси и на последней стадии – истинно растворенные вещества.

Природные воды кроме растворенных веществ часто содержат примеси в виде более или менее размельченных частиц, различных минералов и органических остатков. Грубодисперсные частицы не могут находиться в воде в устойчивом состоянии – они или всплывают при их плотности, меньше плотности воды, или осаждаются. Например, песчинки, имеющие степень дисперсности 10 (размером 0,1 мм), оседают в спокойной воде со скоростью 100 мм/с.

Как крупные, так и мелкие частицы, находящиеся в воде, обычно приобретают электрический заряд. Обусловлено это различными причинами. Например, поверхность твердого вещества может избирательно адсорбировать те или другие ионы, присутствующие в воде. Концентрируя эти ионы, поверхность приобретает определенный заряд или вещество отдает в раствор ионы и при этом заряжается. Заряд частицы определяется ее поверхностью.

Взвешенные вещества создают ряд осложнений как при умягчении и обессоливании воды, так и при дальнейшем ее использовании:

- при попадании на ионообменную шихту снижают ее обменную емкость;
- при попадании на теплопередающие поверхности снижают эффективность их работы.

Вследствие этого освобождение от грубодисперсных и коллоидных примесей является первоначальной стадией для почти всех водоподготовительных установок. Эту стадию очистки принято называть *осветлением*. Осветление можно условно разделить на два метода: осаждение и умягчение.

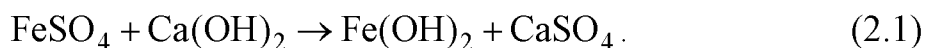
Осаждение – способ удаления механических примесей за счет снижения скорости движения воды по большой площади, в результате чего частицы оседают на дно под действием силы тяжести.

Умягчением называется захват примесей осадком макрокомпонентов. Существует два способа умягчения:

- объемная коагуляция, основанная на укрупнении коллоидных и грубодисперсных частиц в результате их слияния под действием молекулярных сил сцепления;
- известкование, направленное на снижение общей щелочности и жесткости воды.

Коагуляция – процесс, при котором происходит понижение степени дисперсности коллоидно-растворенных примесей в результате агломерации их частиц с образованием макрофазы. Иными словами, коагуляция – физико-химический процесс укрупнения коллоидных частиц за счет их слипания под действием молекулярных сил притяжения.

Если частицы грубых суспензий могут быть осаждены под действием силы тяжести, то коллоидные и тонкодисперсные частицы самопроизвольно осаждаться не будут. Этому препятствует электрический заряд, которым обладают такие частицы. Снятие или уменьшение заряда дисперсных частиц осуществляется созданием в обрабатываемой воде также дисперсных частиц, но с противоположным по знаку зарядом. Обычно для этого используют соединения железа или алюминия. Такой процесс носит название коагуляции, а сернокислое железо FeSO_4 – коагулянта. При дозировании сернокислого железа в щелочной среде, обусловленной наличием в воде гидроксида кальция, происходит следующая реакция



Образующийся гидрат закиси железа в дальнейшем, при наличии в воде кислорода, окисляется в менее растворимый гидрат его окиси



$\text{Fe}(\text{OH})_3$ первоначально образует коллоидную систему, частицы которой коагулируют коллоидные примеси исходной воды. Именно на этом этапе коагуляции исходная вода, в основном, очищается от коллоидных примесей. На втором этапе процесса коагуляции образуются крупные хлопья (флоккулы) размером 1...3 мм. Обладая высокой сорбционной способностью, флоккулы дополнительно очищают воду от примесей различной степени дисперсности и различной природы.

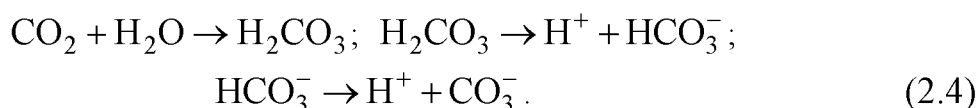
При низких температурах и слабом перемешивании среды происходит вялая коагуляция, причинами которой являются замедленное тепловое движение молекул и повышенная вязкость среды, уменьшение числа взаимных столкновений, адгезионных сил и прочности хлопьев. Оптимальной температурой при использовании сульфата железа является температура равная 30...35 °С.

Известкование. Добавление к природной воде извести сопровождается протеканием ряда реакций. В результате диссоциации молекул извести

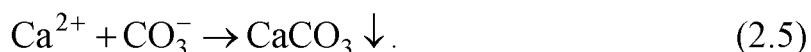
по уравнению (2.3) в растворе повышается концентрация ионов гидроксила.



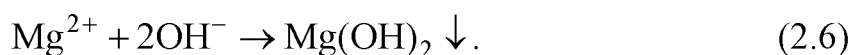
Существовавшее в природной воде углекислотное равновесие смещается вправо, поскольку увеличение концентрации ионов гидроксила приводит к связыванию ионов H^+ в мало диссоциированные молекулы воды



Введение ионов гидроксила в стехиометрическом количестве приводит к тому, что вся свободная углекислота и бикарбонат-ионы переводятся в карбонат-ионы. Увеличение в растворе концентрации карбонат-ионов вызывает реакцию образования труднорастворимого карбоната кальция



Добавление к воде извести в количестве, большем, чем это необходимо для превращения CO_2 и ионов HCO_3^- в карбонат-ионы, вызывает дальнейшее повышение в растворе концентрации гидроксила. Присутствующие в природной воде ионы Mg^{2+} образуют с ионами OH^- малорастворимое соединение – гидроксид магния Mg(OH)_2 :



В результате известкования происходит снижение щелочности и жесткости. В свою очередь, это приводит к снижению общего солесодержания воды.

На АЭС применяется совмещение стадий известкования и коагуляции. Это совмещение приводит к снижению общей жесткости и щелочности природной воды, а также к снижению степени дисперсности примесей в обрабатываемой воде.

Основным аппаратом для умягчения воды и осаждения является осветлитель. Обработка воды методом коагуляции и известкования является достаточно эффективным методом удаления грубодисперсных примесей. К недостаткам метода можно отнести большой расход реагентов, сложность процесса, связанную с точной дозировкой реагентов и необходимостью поддержания в узком диапазоне температуры обрабатываемой воды и величины pH, а также образование большого количества шлама и сложности с его захоронением.

Осветление воды фильтрованием. Завершающим этапом осветления воды от взвешенных веществ природного происхождения и образующихся при ее очистке является фильтрование. Фильтровальные сооружения применяются в качестве второй ступени осветления по схеме с отстойниками или осветлителями и как самостоятельные сооружения. Процесс фильтрования осуществляется путем пропускания воды через слой мелкозернистого фильтрующего материала определенной высоты в специальных сооружениях-фильтрах.

Очистка воды фильтрацией обусловлена, с одной стороны, адгезией взвешенных частиц на поверхности материала зернистого слоя, а с другой – механическим задержанием взвеси в порах, образованных зернами фильтрующего материала.

Адгезия характеризует взаимное притяжение частиц различных тел в области их соприкосновения (на поверхности раздела), обусловленное силами межмолекулярного взаимодействия между этими телами. Адгезией объясняется слипание различных тел, а также смачивание.

Чтобы произошла адгезия, необходимо сближение частиц. В сближении частиц взвеси с зернами фильтрующего материала участвуют гравитационные силы и силы инерции. При малой скорости фильтрации наибольшую роль играют силы тяжести. При увеличении скорости движения жидкости по каналам между зернами частицы взвеси, двигаясь по инерции, отклоняются от направления движения жидкости и подходят к зернам фильтрующего материала. Если взвешенные частицы и фильтрующий материал имеют заряды разных знаков, то в процессе сближения участвуют и электростатические силы.

Разделяют два режима фильтрации: быстрый и медленный. На АЭС принят метод быстрой фильтрации, который заключается в пропуске воды под напором, создаваемым внешним источником (насосом), через слой крупнозернистого фильтрующего материала. Быстрая фильтрация используется чаще всего совместно с коагуляцией в качестве предварительной очистки.

Для более эффективной очистки воды фильтрующий материал должен иметь максимально высокое сходство с продуктами коррозии и высокую пористость. Так как частицы продуктов коррозии имеют, как правило, отрицательный заряд, в качестве фильтрующего материала должны использоваться катиониты, причем предпочтение должно отдаваться материалам с развитой поверхностью, например, сульфоуглю или дробленому антрациту.

Фильтрация осуществляется на механических фильтрах. В процессе улавливания взвешенных частиц фильтрующий материал загрязняется, в результате чего возрастает его гидравлическое сопротивление или наблюдается проскок взвешенных частиц в фильтрат.

Для удаления загрязнений фильтрующий материал промывают током воды снизу вверх с расходом, обеспечивающим расширение загрузки примерно в 1,5 раза, что позволяет зернам фильтрующего материала свободно перемещаться в потоке воды. Отмывающиеся с поверхности зерен частицы загрязнений и измельченные частицы фильтрующего материала удаляются вместе с водой. Для повышения эффективности промывки и снижения расхода промывочной воды производится взрыхление фильтрующего материала сжатым воздухом. На водоподготовительных установках АЭС предварительную очистку осуществляют при совмещении процессов осаждения, коагуляции и известкования, как правило, в одном аппарате – осветлителе, а окончательное очищение от осадка осуществляется при помощи процесса фильтрования. Функциональная схема установки для предварительной очистки воды представлена на рис. 2.1.

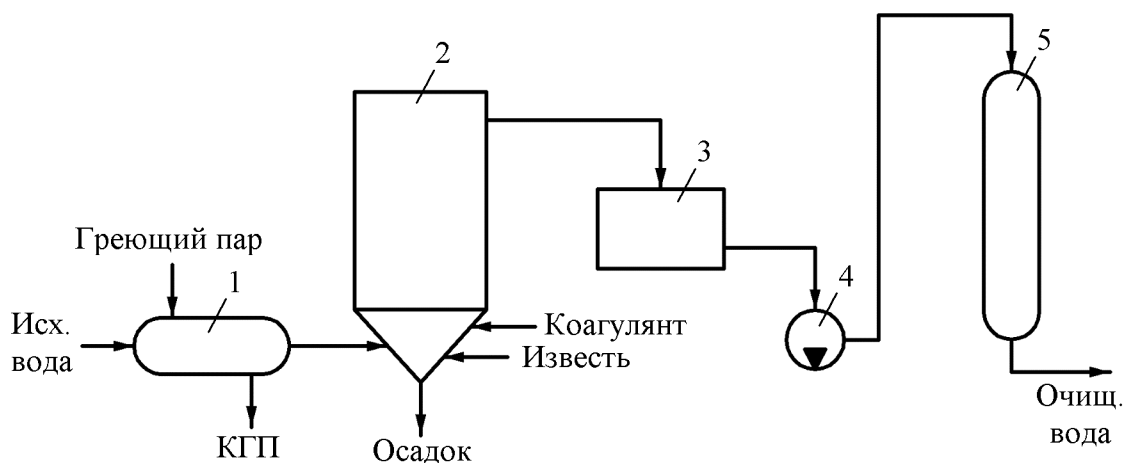


Рис. 2.1. Функциональная схема установки для предварительной очистки воды:

1 – теплообменный подогреватель; 2 – осветлитель; 3 – бак осветленной воды; 4 – перекачивающий насос; 5 – осветлительный фильтр

В подогретую до температуры около 30 °С обрабатываемую воду дозируют в виде суспензии (молока) гашеную известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и 5-процентный раствор FeSO_4 , а образующийся осадок сбрасывают. Осветленная вода из осветлителя сливается в бак осветленной воды, откуда перекачивающим насосом подается на фильтр для второй ступени осветления. После фильтра вода подается на установки окончательной очистки воды.

2.2. Методы опреснения и обессоливания воды

Методы опреснения и обессоливания воды подразделяются на две основные группы: с изменением и без изменения агрегатного состояния. К первой группе относятся дистилляция, вымораживание и др. методы, ко

второй – ионный обмен, электродиализ, обратный осмос (гиперфльтрация).

Выбор метода обуславливается качеством исходной воды, требованиями к качеству очищенной воды, производительностью установки и технико-экономическими соображениями.

Дистилляция – процесс подогрева водного раствора до кипения, отбора образующегося водяного пара и его конденсации. Полученный конденсат водяного пара называют дистиллятом (дистиллированной водой). Если процесс дистилляции повторить, то получим бидистиллят. Дистилляция – традиционный и самый распространенный способ опреснения, этим методом получают 96 % всей опресняемой в мире воды.

Дистилляция используется для очистки воды от любых загрязнений (взвешенных и растворенных), кроме летучих и газообразных. Этот метод используется для опреснения воды с большой степенью минерализации (морская вода) и для воды, загрязненной вредными веществами, которую нельзя сбрасывать в естественные источники.

На АЭС испарительные установки в основном применяют в установках спецводоочистки.

Для производства воды заполнения контуров ЯЭУ и их подпитки из природной воды на отечественных АЭС испарительные установки не применяют, исходя из технико-экономических соображений.

Вымораживание – метод опреснения воды, заключающийся в охлаждении соленой воды ниже температуры замерзания, отделении образовавшегося льда и последующем его плавлении. Концентрация растворенных веществ в воде при этом значительно снижается, однако существующие методы нагрева и разработанные на их основе конструкции дистилляторов значительно экономичнее рефрижераторных установок и опреснителей на их основе. Поэтому метод вымораживания не нашел широкого применения и используется, в основном, там, где есть естественные источники холода. Этим методом получают всего 0,1 % опресненной воды в мире.

Электродиализ – процесс удаления из растворов (проводников второго рода) ионизированных веществ путем переноса их через мембраны в поле постоянного электрического тока. В такой системе возникает направленное движение ионов H^+ и OH^- , причем катионы движутся к катоду, а анионы – к аноду, при этом электродиализатор разделяют на отсеки с помощью специальных катионопроницаемых и анионопроницаемых мембран. При этом катионопроницаемые мембраны пропускают катионы и не пропускают анионы, а анионопроницаемые мембраны наоборот, пропускают анионы и не пропускают катионы. Ионитные мембраны для процессов электродиализа должны обладать высокой селективностью, малой проницаемостью, химической стойкостью, хорошей электрической проводимостью, высокой механической прочностью, определяющей продолжи-

тельный срок службы в промышленных условиях. Схема электродиализатора показана на рис. 2.2.

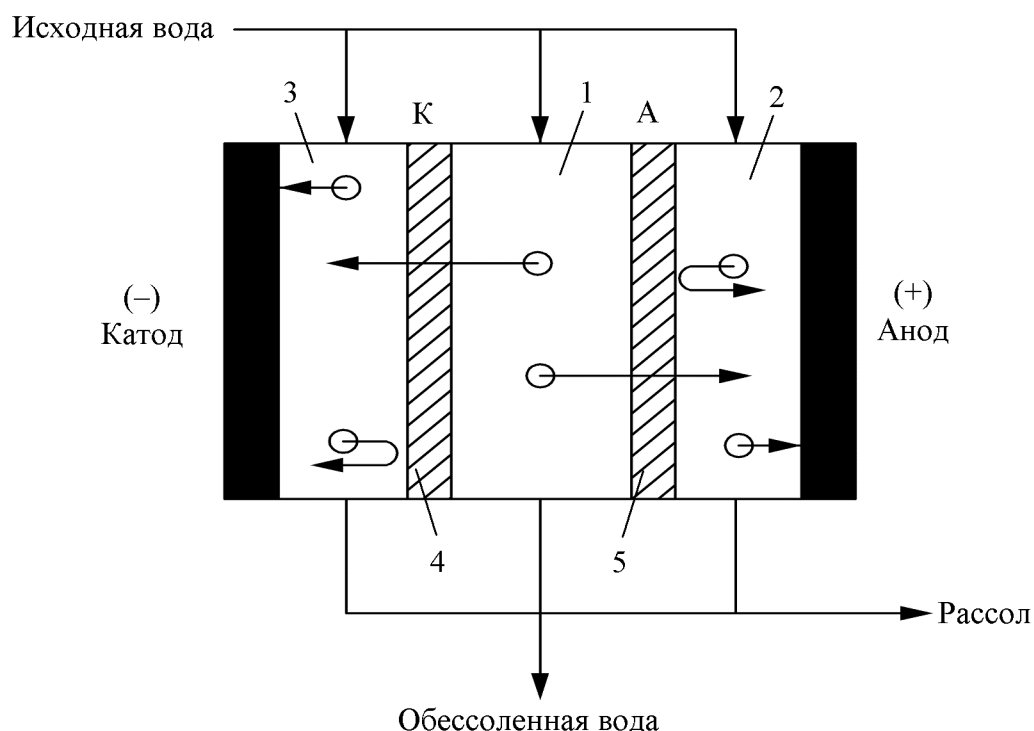


Рис. 2.2. Функциональная схема электродиализатора:
1, 2, 3 – отсеки электродиализатора; 4 – катионопроницаемая мембрана;
5 – анионопроницаемая мембрана

Внедрение электродиализа началось довольно давно, но широкое использование его тормозится необходимостью предварительной очистки воды от взвешенных и коллоидных частиц, которые могут осаждаться на мембранах и ухудшать их проницаемость. Возможно, «отравление» мембран органическими примесями, что ухудшает их работу и приводит к образованию кальциевых и магниевых отложений. Сдерживают применение электродиализа также сложность аппаратуры и высокие эксплуатационные расходы по замене мембран.

Электродиализ выгодно использовать для опреснения соленых вод, так как удельные затраты на удаление солей снижаются с ростом минерализации исходной воды. В настоящее время этим методом получается около 3 % всей опресняемой воды.

Метод обратного осмоса. Осмос (от греч. толчок, давление) – процесс односторонней диффузии через полупроницаемую мембрану молекул растворителя в сторону большей концентрации растворенного вещества.

Метод деминерализации воды обратным осмосом (гиперфльтрация) основан на прохождении чистого растворителя через полупроницаемую мембрану при давлении, превышающем осмотическое. Осмотическое давление – повышенное гидростатическое давление на раствор, отделенный от

чистого растворителя полупроницаемой мембраной, при котором прекращается диффузия растворителя через мембрану. Это давление стремится уравнять концентрации обоих растворов вследствие встречной диффузии молекул растворенного вещества и растворителя.

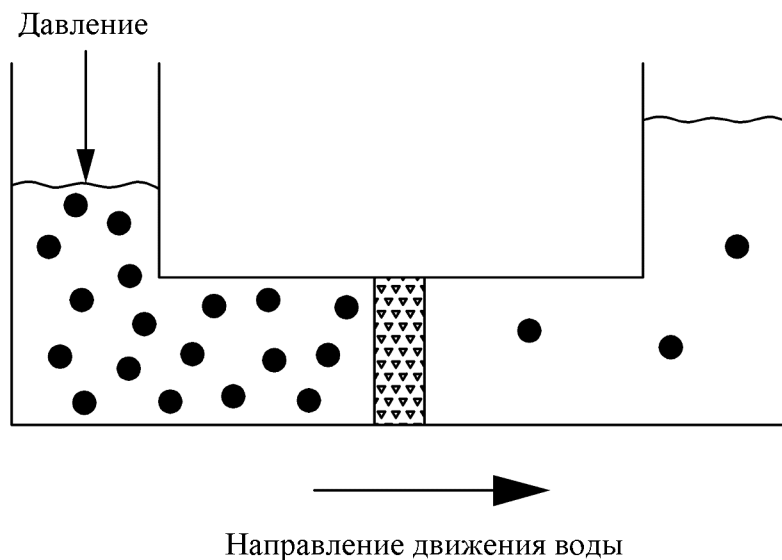


Рис. 2.3. Схема обратного осмоса:

- 1 – вода с большей концентрацией растворенного вещества;
2 – полупроницаемая мембрана; 3 – вода
с меньшей концентрацией растворенного вещества

Движущей силой этого процесса является разность между приложенным и осмотическим давлениями

$$\Delta P = P - (\pi_1 - \pi_2), \quad (2.7)$$

где P – избыточное давление над исходным раствором;

π – осмотическое давление соответственно исходного раствора и раствора, прошедшего через мембрану.

Эффективность процессов обратного осмоса в значительной степени определяется свойствами применяемых мембран, которые должны обладать высокой разделяющей способностью (селективностью), высокой удельной проницаемостью, устойчивостью к воздействию среды, неизменностью характеристик в процессе эксплуатации, достаточной механической прочностью, низкой стоимостью.

Обратным осмосом сейчас получают незначительную часть всей опресняемой воды в мире, хотя считается, что это один из наиболее перспективных и экономичных способов опреснения. Сдерживает широкое применение этого метода отсутствие долговечных мембран.

В отечественной атомной энергетике первые испытания систем очистки воды с применением мембранных технологий были проведены на Курской и Смоленской АЭС в 2012 году.

Метод ионного обмена. Метод основан на явлении обмена ионами при контакте некоторых твердых веществ с растворами. В настоящее время на практике используется большое число как природных ионообменных веществ, так и искусственных ионитов различного состава.

Иониты – это нерастворимые в воде органические или неорганические вещества, содержащие активные группы с подвижными ионами и способные обменивать эти ионы на ионы растворов при контакте с ними.

Активные группы в ионитах – это функциональные группы кислотного или основного характера, которые присоединены к высокомолекулярному каркасу или матрице, причем иониты с однотипными функциональными группами называют монофункциональными, а с обменными группами различной природы – полифункциональными.

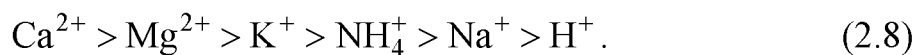
Для ионного обмена используют органические (крахмал, мелатин, целлюлозу, торф, древесину, синтетические ионообменные смолы и сульфированные угли) и неорганические иониты (гидроксиды алюминия, железа, бария, цеолиты, пермутиты).

На АЭС наиболее широко используют синтетические ионообменные смолы. Например, довольно широко распространен катионит марки КУ-2-8 (катионит универсальный). Если после цифры 8 стоит буква «ч» – чистый, если «чс» – химически чистый (1 и 2 сорт). Катионит марки КУ-2-8 стоек к разбавленным кислотам и щелочам, обладает высокой механической прочностью, термостойкостью (до 120 °С в H⁺-форме). Его селективность очень высока к ионам Ca²⁺, Fe³⁺, Ni²⁺, Zn²⁺. Выпускается в виде сферических зерен размером 0,315...1,25 мм цветом от желтого до темно-коричневого в H⁺-форме. Из отечественных анионитов наиболее широко применяется анионит АВ-17-8 (анионит высокоосновной). Выпускается в виде сферических зерен размером 0,315...1,25 мм цветом от желтого до темно-коричневого в OH⁻-форме. Термически устойчив до 60 °С. В последнее время все чаще используются зарубежные аналоги, например, иониты типа «Амберлит».

Обработка воды методом ионного обмена экономически выгодна при солесодержании воды, не превышающем 1 г/кг. В противном случае, ионообменные смолы быстро истощаются. Замена фильтрующего материала ввиду большой стоимости ионитов обходится дорого, а регенерация приводит к появлению большого количества вод, требующих нейтрализации.

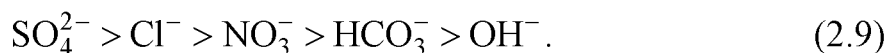
Обработки воды с помощью катионитов называют катионированием, с помощью анионитов – анионированием.

Для изучения механизма ионного обмена необходимо понятие интенсивности поглощения ионов, которая зависит от их природы и определяется рядом интенсивности. Для катионов ряд интенсивности выглядит следующим образом:



Каждый предыдущий ион в этом ряду будет вытеснять последующий, если они присутствуют в воде в сопоставимых концентрациях.

Ряд интенсивности анионов:



Непосредственно процесс ионного обмена условно можно представить в виде следующей схемы (рис. 2.4)

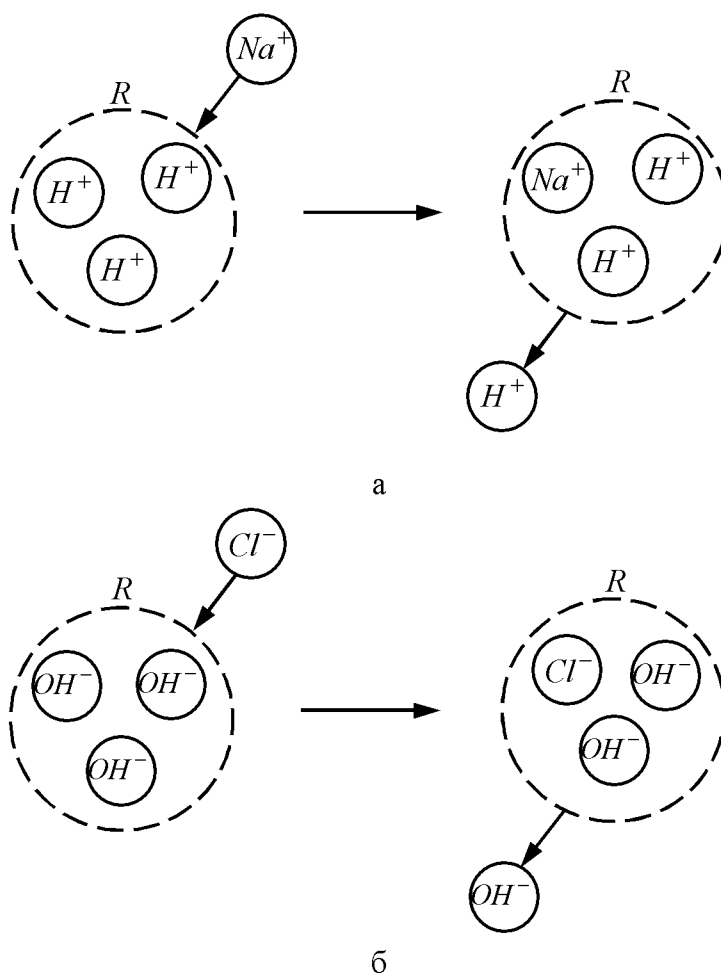


Рис. 2.4. Схема ионного обмена:
а – катионирование; б – анионирование

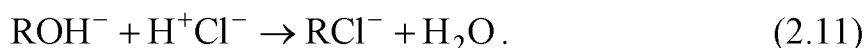
При написании химических реакций иониты обозначаются в виде RH^+ и ROH^- , где R – сложный органический радикал катионита или анионита.

При отдельной загрузке ионитов первым этапом очистки является катионирование. При этом реакции ионного обмена протекают по следующим реакциям:

- катионирование



- анионирование



Таким образом, при последовательном катионировании и анионировании получается вода с очень малым содержанием солей.

Если процесс обессоливания воды на ионитных фильтрах длится достаточно долго, то иониты насыщаются и перестают поглощать ионы из растворов, и в фильтрате появляются посторонние ионы. Этот момент называется *проскоком ионов* через фильтр, причем в первую очередь будут проскакивать ионы, стоящие в конце ряда интенсивности поглощений ионов.

В системах обессоливания природных вод Н-катионитовые фильтры выводятся на регенерацию после появления проскока ионов натрия и регенерируются обычно 1...5-процентным раствором азотной кислоты. Процесс регенерации завершается отмывкой фильтра, необходимой для удаления из межзернового пространства слоя остатков регенерационного раствора и продуктов регенерации.

Анионитовые фильтры, как правило, выводятся на регенерацию по проскоку хлоридов и регенерируются щелочью NaOH.

Кроме того, при длительной работе фильтров также увеличивается гидравлическое сопротивление их загрузки. Поэтому при увеличении перепада давления на фильтре до предельных значений фильтр также должен быть выведен на регенерацию.

В некоторых очистительных установках ЯЭУ (БОУ) используют смешанную загрузку фильтров при соотношении катионита и анионита от 1 : 1 до 3 : 1. Смешанная загрузка ионитных фильтров обладает рядом преимуществ перед отдельной загрузкой:

- процессы поглощения ионов протекают практически одновременно, что приводит к ускорению обмена;

- при смешивании иониты занимают объем, значительно превосходящий суммарный объем ингредиентов смеси, и образуют более проницаемый слой, что позволяет вести процесс с большей эффективностью при

скоростях в 2...3 раза больших, чем скорость при раздельном ионировании.

К основным показателям качества ионитов относят следующие величины:

- *полная обменная емкость* – это общее число всех ионообменных групп в единице объема ионита, выражающееся в мг-экв/л. Полная обменная емкость постоянна для данного ионита и зависит только от термического, химического и ионизирующего воздействия. Из-за необходимости многократной регенерации ионитов их обменная емкость используется лишь частично. В таком случае вводится понятие рабочей обменной емкости ионитов, которая зависит от условий сорбции и регенерации ионитов. Для катионитов обменные емкости определяют по катионам, для анионитов – по анионам;

- *сорбционная способность* – это способность к избирательной сорбции ионов. Для оценки избирательной сорбционной способности ионитов определяют обменный коэффициент распределения K . При очистке раствора от ионов во время достижения равновесия эти ионы распределяются между ионитом и раствором. Отношение концентрации сорбируемого вещества в ионите к концентрации его в растворе при достижении равновесия и называется обменным коэффициентом распределения K . При $K < 1$ ионит обеднен по сравнению с раствором, а при $K > 1$ – обогащен ионами;

- *динамическая обменная емкость ДОЕ* – количество ионов, которое может поглотить ионит до момента проскока поглощаемого компонента в динамических условиях. ДОЕ выражается в мг-экв поглощенного иона на 1 л ионита (мг-экв/л) и определяется следующим образом

$$\text{ДОЕ} = \frac{C \cdot V}{V_1}, \quad (2.12)$$

где C – концентрация ионов (катионов для катионита или анионов для анионита) в воде, мг-экв/л;

V – количество воды, пропущенной через фильтр до проскока поглощаемого иона, л;

V_1 – объем ионита, л.

ДОЕ является величиной переменной, зависящей от ряда факторов:

1) природы поглощаемого иона (например, емкость катионита по иону Na^+ меньше, чем по ионам Ca^{2+} и Mg^{2+});

2) концентрации поглощаемого иона и pH раствора (с уменьшением концентрации ДОЕ снижается);

3) скорости фильтрации (с увеличением скорости ДОЕ уменьшается);

4) температуры фильтруемой воды;

- *химическая стойкость* – нерастворимость и способность ионита сохранять обменную емкость в воде и растворах кислот, щелочей и солей;

- *термическая стойкость* – нерастворимость и способность ионита при заданных температурах сохранять обменную емкость.

При повышении температуры фильтруемой воды некоторые иониты частично разлагаются и ДОЕ уменьшается. Продукты разложения анионита, содержащие аминогруппы и обладающие слабощелочными свойствами, могут поглощаться катионитом. В результате этого ДОЕ смеси катионита и анионита с повышением температуры воды понижается. При повышении температуры выше допустимых значений может происходить разрушение ионитов с полной потерей ДОЕ и загрязнением воды продуктами разложения;

- *радиационная стойкость* – способность сохранять ДОЕ под воздействием радиации. С увеличением радиационного фона ДОЕ уменьшается за счет образования дополнительных сшивок. Кроме того, может происходить и разрушение (деструкция) полимерной основы ионитов. Аниониты менее радиационно стойкие, чем катиониты;

- *механическая прочность* – способность сохранять свой гранулометрический состав при эксплуатации (не истираться, не растрескиваться, не образовывать измельченной смеси в процессе работы);

- *набухаемость* – способность ионита увеличивать свой объем при контакте с водой.

2.3. Очистка воды от растворенных газов

Для предотвращения коррозии оборудования, работающего в контакте с водой или паром, из воды удаляют растворенные в ней агрессивные газы. При этом достигается также некоторое повышение КПД энергоблока вследствие снижения в паре содержания неконденсирующихся газов, ухудшающих теплопередачу, а также за счет некоторого увеличения вакуума в главных конденсаторах.

В контурах ЯЭУ АЭС могут быть растворены различные газы: кислород, углекислота, азот, аммиак и др. В воду контуров эти газы попадают, в основном, из-за контакта с атмосферным воздухом, с подпиточной водой, из-за радиолиза воды, а также при введении в контуры различных реагентов. Коррозионно-агрессивными являются кислород и углекислота. Азот практически нейтрален, а аммиак в определенных условиях даже может быть полезен. Коррозионная активность аммиака проявляется, в основном, в отношении медных сплавов и только при наличии в воде определенного количества кислорода.

Методы удаления из воды агрессивных газов подразделяются на физические и химические.

К *физическим методам* удаления из воды агрессивных газов (O_2 и CO_2) относят дегазацию с помощью аэрации, деаэрации и десорбционного обескислороживания.

Химическое обескислороживание воды осуществляется путем связывания растворенного в воде кислорода различными реагентами и применяется преимущественно для устранения «проскоков» кислорода, возникающих в результате отклонений от нормального режима работы термических деаэраторов или попадания кислорода через неплотности тракта.

Дегазации подвергаются питательная вода, подпиточная вода, конденсат пара, охлаждающая вода конденсаторов турбин и др. В зависимости от степени насыщения воды растворенными газами, ее температуры и давления в системе концентрация кислорода и диоксида углерода в воде может изменяться от сотых долей до десятков миллиграммов в одном литре. При низких концентрациях этих газов (100...200 мкг/л) используют химические методы: кислород удаляется с помощью восстановителей (гидразин, сульфитом и др.), диоксид – с помощью нейтрализаторов (аммиак, морфолин и др.).

Из физических методов на АЭС используют, в основном, *термическую деаэрацию*, которая сочетает процессы подогрева воды до температуры насыщения и удаления диоксида углерода и кислорода из воды в паровую среду. Дегазация происходит за счет двух факторов: образования и удаления пузырьков газа и его диффузии через поверхность контакта фаз. С пузырьками удаляется до 90...95 % растворенного в воде газа. Термические деаэраторы, удаляя из очищаемой воды любые растворенные газы, не вносят дополнительных примесей в воды контуров. Основной тепловой процесс в деаэраторах сводится к созданию условий, при которых из воды практически полностью удаляются растворенные в ней газы.

Согласно закону Генри - Дальтона, концентрация любого газа в жидкости пропорциональна его парциальному давлению над жидкостью. Применение этого закона дает возможность определить концентрацию газа при условии, что в паровом пространстве над водой находится лишь рассматриваемый газ и отсутствуют другие газы. Концентрация растворенного в воде газа определяется следующим выражением

$$C_r = kP_r, \quad (2.13)$$

где C_r – концентрация газа в воде;

P_r – парциальное давление газа над водой;

k – коэффициент пропорциональности (коэффициент абсорбции).

Так как над водой находятся не только газы воздуха, но и пары воды, то парциальное давление газов

$$P_r = P - P_{H_2O}, \quad (2.14)$$

где P – суммарное давление над уровнем воды;
 P_{H_2O} – парциальное давление водяных паров.

Тогда

$$C_r = k(P - P_{H_2O}). \quad (2.15)$$

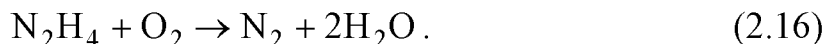
Из этого следует, что для удаления из воды растворенных газов ($C_r = 0$) необходимо, чтобы $P - P_{H_2O} = 0$, т.е. чтобы парциальное давление водяных паров было равно суммарному давлению над уровнем воды. Это достигается при кипении воды. На эффект дегазации существенно влияет повышение температуры воды. Это обусловлено тем, что с повышением температуры уменьшается коэффициент абсорбции газа водой.

Аэрация. Удаление из воды углекислоты может осуществляется методом аэрации. Сущность метода аэрации заключается в продувании через воду свободного от углекислоты воздуха. Так же, как и при термической деаэрации воды, над поверхностью обрабатываемой воды создается атмосфера, в которой парциальное давление углекислоты ничтожно мало по сравнению с парциальным давлением углекислоты в воде. Данный метод на АЭС не применяется.

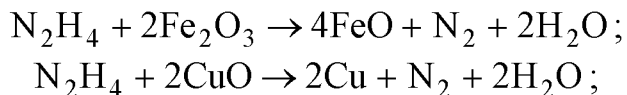
Химическое обескислороживание воды. В основе химических методов лежат окислительно-восстановительные процессы, в результате которых свободный кислород восстанавливается и переходит в состав устойчивых соединений за счет окисления специальных материалов. Этими материалами могут быть растворимые реагенты, добавляемые в воду (например, гидразин, газообразный водород и специальные твердые вещества, называемые электроноинообменниками.)

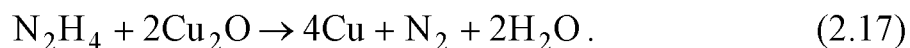
В настоящее время для химического обескислороживания воды на АЭС, в основном, применяют гидразин. Товарный гидразин выпускают в виде жидкого гидразин-гидрата $N_2H_4 \cdot H_2O$ или твердого гидразин-сульфата в виде $N_2H_4 \cdot H_2SO_4$. Растворы гидразина токсичны, поэтому при работе с ними требуется соблюдение правил техники безопасности. Водный раствор гидразина с концентрацией 64 % и выше может воспламениться. Ввиду токсичности гидразина его применение запрещено при снабжении паром предприятий пищевой промышленности.

Гидразин взаимодействует с кислородом следующим образом:



При наличии на поверхности оборудования и трубопроводов рыхлых продуктов коррозии с наибольшей вероятностью происходят следующие реакции:





При низких температурах скорость реакции между гидразином и кислородом в водной среде незначительна. Необходимый эффект связывания достигается при 100 °С и выше. Для удаления кислорода из питательной воды при 103...105 °С, рН = 9,0...9,5 и избытке гидразина (20 мкг/кг) требуется 2...3 с. Однако анализ эксплуатационных данных свидетельствует о невозможности снижения концентрации кислорода в питательной воде ниже 10 мкг/кг даже при увеличении содержания гидразина до 500 мкг/кг. Максимальная скорость окисления гидразина обеспечивается при значениях рН = 8,7...11,0.

С учетом того, что восстановители, вводимые в конденсатно-питательный тракт, взаимодействуют не только с кислородом, но и с оксидами металлов, расход гидразин-гидрата $G_{\text{ГГ}}$ в мкг/кг рассчитывают по формуле

$$G_{\text{ГГ}} = 3C_1 + 0,3C_2 + 0,15C_3, \quad (2.18)$$

где C_1 , C_2 , C_3 – концентрация в питательной воде соответственно кислорода, оксидов железа и меди, мг/кг.

Для совместного обескислороживания и обессоливания применяют электроноинообменники на основе Н-катионитов, содержащие металлы в нулевой степени окисления. На ионит на стадии синтеза наносится тонкодиспергированный металл, способный легко окисляться растворенным кислородом. Чаще всего используются медьсодержащие электроноинообменники. Нужно отметить, что данный метод на АЭС не применяется.

3. ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПЕРВОГО КОНТУРА ЯЭУ С ВВЭР

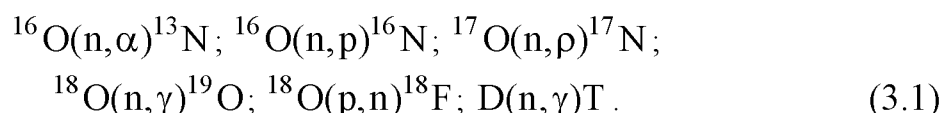
3.1. Физико-химические процессы, протекающие в воде первого контура

Ядерный реактор является мощным источником ионизирующего излучения, а теплоноситель оказывает сильное коррозионное воздействие на конструкционные материалы ЯЭУ. С этими явлениями связаны физико-химические процессы, протекающие в контурах ЯЭУ. К основным из них относятся:

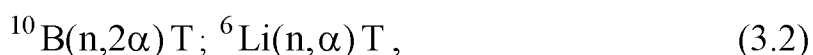
- радиационные процессы (образование новых нуклидов, активация примесей, газовая и осколочная активность теплоносителя, радиолиз водного теплоносителя;
- химические процессы (коррозия конструкционных материалов, отложения на теплопередающих поверхностях).

При взаимодействии ионизирующего излучения с теплоносителем и находящимися в нем примесями образуются радиоактивные нуклиды, служащие дополнительным источником активности, что приводит к повышению радиоактивности самого теплоносителя. Условно различают газовую, осколочную активность теплоносителя, а также активность примесей в теплоносителе.

Газовая активность водного теплоносителя вызывается образованием радиоактивных нуклидов по следующим реакциям



Наибольшую опасность из образовавшихся нуклидов представляет изотоп азота ^{16}N . Накопление трития (Т) может происходить также в результате реакций

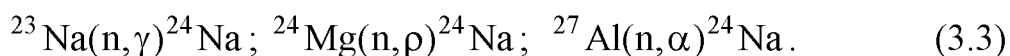


первая из которых имеет место при регулировании реактивности ЯР с помощью борной кислоты, а вторая – при использовании гидроксида лития для поддержания щелочной реакции теплоносителя и нейтрализации борной кислоты.

Осколочная активность теплоносителя является результатом попадания в него продуктов деления ядерного топлива при работе ЯР с поврежденными твэлами. Обычно различают две стадии повреждения твэлов:

- газовые неплотности, когда в теплоноситель попадают нуклиды инертных газов (криптона и ксенона) и осколки деления, летучие при рабочей температуре твэлов (йод, бром, цезий);
- повреждения, сопровождающиеся контактом топлива с теплоносителем, которые могут привести к попаданию в контур нелетучих нуклидов (молибдена, церия), не говоря уже о возможном выносе в контур частиц топлива. Последние, как и примеси в теплоносителе, загрязняют первый контур ЯЭУ.

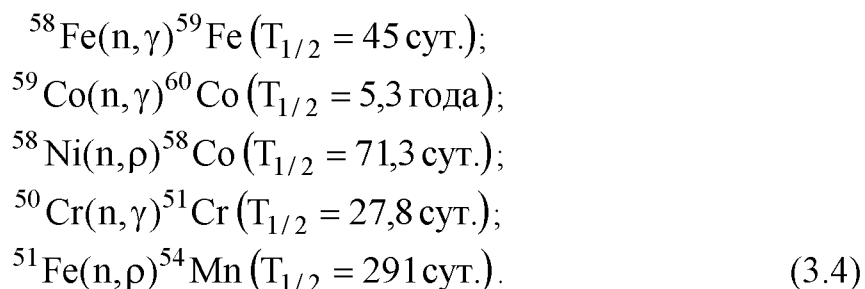
Активация примесей вносит существенный вклад в радиоактивность теплоносителя. Это, прежде всего, естественные примеси, растворенные в теплоносителе, соли натрия, калия, магния и др. Наиболее существенный вклад в радиоактивность примесей вносит ^{24}Na с периодом полураспада 15 ч, который излучает высокоэнергетические γ -кванты. ^{24}Na образуется в результате следующих реакций



В связи с такого рода активацией примесей водный теплоноситель первого заполнения, так же, как и подпиточная вода, должен быть не только умягчен, но и деионизирован.

Введенные для различных целей в первый контур вещества также могут активироваться. Так, в отечественных ЯР получило распространение добавление в теплоноситель гидроксида калия при регулировании реактивности. При этом образуется радиоактивный ^{42}K с периодом полураспада 12,4 ч по реакции $^{41}\text{K}(n, \gamma)^{42}\text{K}$. Однако содержание ^{41}K в природной смеси не превышает 6,9 %, поэтому вклад активности ^{42}K в общую активность теплоносителя достаточно мал.

Активность теплоносителя повышается также из-за коррозии активированных материалов активной зоны ЯР и активации продуктов коррозии конструкционных материалов контура в процессе их миграции через активную зону. Основные реакции, по которым происходит активация продуктов коррозии, следующие:



Накопление продуктов коррозии с образованием радионуклидов в процессе эксплуатации первого контура идет непрерывно со следующим распределением по контуру:

- 40...50 % в виде прочной пленки, прилегающей к поверхности металла вне активной зоны;
- 40 % выпадает в виде осадка в застойных зонах и в виде накипи на теплопередающих поверхностях;
- 10...15 % удаляется системой очистки продувочной воды;
- 0,1 % циркулирует вместе с теплоносителем.

Состав отложений на 70...90 % по массе сформирован из окислов железа, но основным источником активности является ^{60}Co .

Источником радиоактивного загрязнения контура, кроме дефектных твэлов и продуктов коррозии, также могут быть продукты износа движущихся частей оборудования ЯЭУ. Радиоактивные примеси осаждаются в различных местах контура ЯЭУ и, тем самым, сильно затрудняют обслуживание оборудования ЭБ АЭС.

Радиолиз водного теплоносителя – это процесс разложения воды под действием ионизирующего излучения. Вследствие специфических ус-

ловий, характерных для РУ (высоких температур и дополнительных химических добавок в теплоноситель первого контура), процесс радиолиза воды может изменяться. Так, если для радиолиза чистой воды при низкой температуре реакция имеет вид



то для первого контура ВВЭР радиолиз идет по реакции



Кроме водорода H_2 , кислорода O_2 и перекиси водорода H_2O_2 при радиолизе воды могут образовываться H , OH , HO_2 и др. Обычно радиолиз водного теплоносителя не вызывает изменений его физико-химических свойств. Однако следует иметь в виду возможность вторичных неблагоприятных явлений радиолиза:

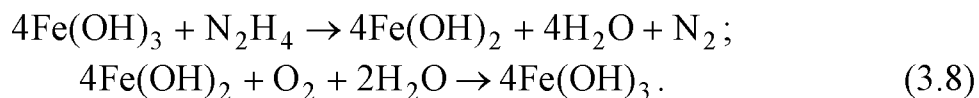
- отрицательное влияние некоторых продуктов разложения воды на коррозионную стойкость конструкционных материалов ЯЭУ;
- возможность образования взрывоопасной смеси кислорода и водорода;
- отрицательное влияние газообразных продуктов разложения на условия теплопередачи и реактивность ЯР.

Средствами борьбы с этими неблагоприятными факторами являются ввод в теплоноситель водорода, аммиака и гидразина. Введение в теплоноситель водорода при концентрации больше 30 мл/дм^3 практически полностью подавляет процессы радиолиза воды. Для поддержания необходимой концентрации водорода, обеспечивающей подавление радиолиза, в контур, как правило, вводят аммиак, в результате разложения которого по реакции

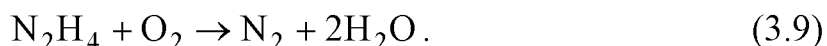


и создается необходимая концентрация водорода в водном теплоносителе.

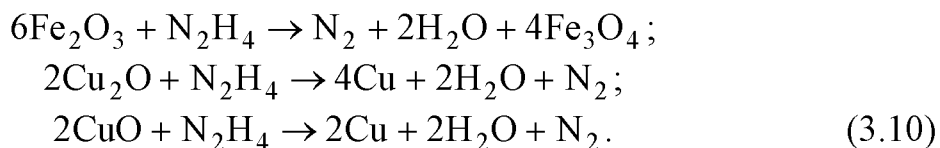
Подавить радиолиз можно и гидразином. Если его ввести в контур, то гидразин в первую очередь будет реагировать с гидроксидами железа:



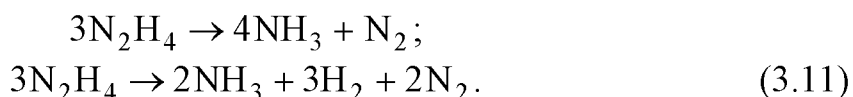
Скорость этих реакций (фактически, косвенного поглощения кислорода гидразином) весьма высока даже при низкой температуре. Возможно и прямое взаимодействие кислорода с гидразином



Гидразин взаимодействует и с другими продуктами коррозии конструкционных материалов контура



Избыток гидразина разлагается следующим образом



Коррозия в контурах ЯЭУ. Коррозией металла называют его разрушение в результате химического или электрохимического воздействия контактирующей с ним среды.

Первопричиной коррозии металлов является их термодинамическая неустойчивость в различных, в том числе, водных средах. В процессе коррозии металлы переходят в оксиды, являющиеся термодинамически более устойчивыми по сравнению с чистыми металлами.

Коррозионные процессы классифицируются по следующим признакам:

- механизму протекающих процессов;
- виду коррозионной среды;
- характеру дополнительных воздействий.

По механизму процессов различают:

- *химическую коррозию* – взаимодействие металла с коррозионной средой, при котором окисление металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды протекают в одном акте;

- *электрохимическую коррозию* – взаимодействие металла с коррозионной средой, при котором ионизация атомов металла и восстановление окислительного компонента коррозионной среды протекают не в одном акте и их скорости зависят от электродного потенциала.

Аналогично, **по виду коррозионной среды** коррозия бывает:

- *химическая* – коррозия в сухих газах, жидких неэлектролитах (нефтепродуктах) и расплавленных металлах;

- *электрохимическая* – коррозия в электролитах (в кислотах, щелочах, нейтральных электролитах, морской воде, воде высокой чистоты), влажных газах (атмосферная коррозия); подземная коррозия (в почве и грунте); контактная коррозия, вызванная контактом металлов, имеющих разные стационарные потенциалы в данном электролите и щелевая коррозия – усиление коррозии в щелях между двумя металлами.

По характеру дополнительных воздействий различают следующие виды коррозии металлов.

Коррозия под напряжением – коррозия металла при одновременном воздействии коррозионной среды и постоянных или переменных механических напряжений. При этом различают:

- *коррозионное растрескивание* – коррозия металлов при одновременном воздействии коррозионной среды и внешних или внутренних механических растягивающих напряжений с образованием транскристаллитных и межкристаллитных трещин;

- *коррозионная усталость* – понижение предела усталости металла, возникающее при одновременном воздействии циклических растягивающих напряжений и коррозионной среды.

Коррозия-эрозия – при одновременном механическом и коррозионном воздействии среды.

Радикационная коррозия – коррозия, вызываемая одновременным воздействием коррозионной среды и ионизирующего излучения.

Биокоррозия – коррозия металла под влиянием жизнедеятельности микро- и макроорганизмов.

Также в технической литературе получила распространение классификация коррозионных процессов **в зависимости от локализации коррозионных разрушений**. Она подразумевает следующие виды коррозии:

- *общую (сплошную) коррозию*, охватывающую всю поверхность металла. Бывает равномерной и неравномерной;

- *местную коррозию*, охватывающую отдельные участки поверхности металла. В свою очередь, местная коррозия подразделяется на:

- *коррозию пятнами* – в виде отдельных пятен;

- *язвенную (питтинговую) коррозию* – в виде точечных поражений. Характеризуется повреждением металла на глубину, соизмеримую с диаметром локального участка. При язвенной коррозии теплоноситель обогащается продуктами коррозии незначительно, но при этом существует значительная опасность разгерметизации оборудования, т.к. язвы могут развиваться до сквозных поражений. Кроме того, язвы могут быть концентраторами напряжений, превышающих предел текучести;

- *избирательную (селективную) коррозию*, при которой разрушается преимущественно один компонент сплава;

- *межкристаллитную коррозию*, распространяющуюся по границам кристаллов (зерен) металла. Это особо опасный вид коррозии, т.к., не изменяя часто внешнего вида металлической конструкции, он ведет к быстрой потере металлом прочности и пластичности;

- *интеркристаллитную коррозию* – трещины пересекают тело зерен металла.

В настоящем пособии рассматриваются виды коррозии, наиболее характерные для водяных и пароводяных трактов ЯЭУ.

Для улучшения понимания механизмов коррозионных процессов необходимо вспомнить основные виды конструкционных материалов, используемых для изготовления металлоконструкций в атомной энергетике. Эти материалы должны обладать высокой прочностью, пластичностью, свариваемостью, а также быть устойчивыми к воздействию коррозионных процессов, ионизирующих излучений, и высоких температур.

Наиболее высоким требованиям должны отвечать конструкционные материалы активной зоны реактора. Кроме указанных требований они должны иметь малое сечение захвата тепловых нейтронов. Такое требование резко сужает круг материалов, которые могут применяться для изготовления оболочек твэл и других деталей активной зоны. Наименьшее сечение захвата тепловых нейтронов имеют алюминий, цирконий, бериллий и магний, но они не всегда отвечают требованиям, предъявляемым к механическим и коррозионным свойствам применительно к высокотемпературным энергетическим реакторам.

Например, использование алюминия и магния ограничивается их низкой стабильностью и недостаточной коррозионной стойкостью при высоких температурах. Поэтому сплавы алюминия применяются в низкотемпературных реакторах (опытных и исследовательских).

В то же время, бериллий практически не используется из-за высокой стоимости и трудностей при производстве изделий.

Применение нержавеющей сталей, имеющих большее сечение поглощения нейтронов, обуславливает использования ядерного топлива более высокого обогащения.

Для ВВЭР в качестве материалов активной зоны наиболее широко используются сплавы циркония с добавлением олова (циркалой) или ниобия. Присадка олова значительно повышает прочностные и антикоррозионные свойства сплава и резко снижает степень отрицательного влияния примесей азота и алюминия. Недостатками сплавов с оловом является увеличение сечения поглощения нейтронов и снижение коэффициента теплопроводности.

При изготовлении корпусов реакторов, корпусов и трубчатки теплообменных аппаратов, насосов, трубопроводов, арматуры и вспомогательного оборудования ЯЭУ основными конструкционными материалами являются углеродистые и специальные стали с особыми физико-химическими свойствами (жаропрочные, эрозионно- и коррозионно-стойкие).

Углеродистые стали обладают механическими свойствами, удовлетворяющими требованиям атомного энергетического машиностроения, а также хорошими экономическими показателями. В то же время, их практическое применение связано с повышенными требованиями ВХР. Эти стали обладают значительным преимуществом перед сталями аустенитно-

го класса, т.к. не подвергаются коррозионному растрескиванию под напряжением.

Аустенитные нержавеющие стали. Высокая коррозионная стойкость сплавов железа достигается придачей им однородной структуры и введением в них легирующих элементов, основными из которых являются хром, никель, марганец, титан

Хромоникелевые стали. Введение в систему «железо-углерод» одновременно хрома и никеля резко изменяет строение и характеристики сплава, значительно улучшая его коррозионные свойства. Также никель и хром (в меньшей степени) существенно расширяет температурную область существования аустенита.

Структура аустенита упрочняется молибденом, вольфрамом. Однако при массовой доле этих элементов более 3 % стойкость сталей к растрескиванию в средах, содержащих хлориды, снижается. Присутствие молибдена снижает интенсивность язвенной коррозии. Существенное распространение в атомном машиностроении получила высоконикелевая сталь аустенитного класса X18H10T, но для ее производства требуются дефицитные элементы – никель и молибден. Недостатком этой стали также является подверженность специфичным коррозионным поражениям: коррозии под напряжением и межкристаллитной коррозии.

Хромистые стали. В ряде систем вместо универсальной хромоникелевой стали могут использоваться малоникелевые и безникелевые стали. Основой этих сталей является система «железо-хром». Повышенное содержание хрома придает сплаву повышенную коррозионную стойкость при температурах до 100 °С, а добавление умеренного количества никеля обеспечивает хорошую коррозионную стойкость в водных растворах умеренной агрессивности как при низкой, так и при высокой температуре. Однако, хромистые стали обладают склонностью к хлоридному коррозионному растрескиванию, хрупкому разрушению в горячих растворах в зонах растягивающих напряжений (не достигающих предела текучести).

Применение безникелевых сталей не только экономит никель, но и улучшает радиационную обстановку на АЭС за счет уменьшения содержания в рабочих средах и в отложениях продуктов коррозии радиоактивного кобальта (сопутствующего никелю).

Электрохимическая коррозия. В условиях теплосилового оборудования коррозия, в основном, имеет электрохимическую природу. Рассмотрение механизма электрохимической коррозии следует начать с изучения природы электродного потенциала при коррозии металлов.

При погружении металла в раствор собственной соли на металле устанавливается обратимый потенциал. Через некоторое время после погружения на металле устанавливается равновесие между процессами окисления металла и восстановления его ионов. При равновесии скорость окис-

ления металла (анодный процесс) равна скорости восстановления ионов металла (катодный процесс). Т.к. в процессе обмена ионами между металлом и раствором участвуют ионы одного и того же металла, то потери массы металла отсутствуют.

При погружении металла в коррозионную среду, где концентрация ионов этого металла незначительная, наряду с процессами окисления металла и восстановления его ионов, на металле могут протекать и другие процессы окисления и восстановления, в которых принимают участие компоненты коррозионной среды, называемые деполяризаторами. В этом случае скорость окисления металла не равна скорости восстановления его ионов и часть металла будет необратимо окисляться. Поэтому будет иметь место потеря массы металла.

Механизм электрохимической коррозии можно представить состоящим из трех сопряженных процессов:

- анодного процесса – окисления металла на анодных участках с учетом гидратации ионов;
- катодного процесса – восстановления окислительного компонента среды (деполяризатора) на катодных участках;
- процесса движения электронов в металле от анодных участков к катодным и соответствующее перемещение катионов и анионов в растворе.

Таким образом, при электрохимической коррозии на поверхности корродирующего металла возникает большое количество короткозамкнутых гальванических элементов, которые получили название *коррозионных элементов*. Участки поверхности металла с более отрицательными потенциалами становятся анодами, а участки с более положительными потенциалами – катодами коррозионных элементов.

Причины возникновения коррозионных элементов делятся на внутренние и внешние.

Внутренние причины определяются свойствами и состоянием корродирующего металла:

1. Неоднородность металлической фазы:
 - макро- и микровключения, неоднородность распределения компонентов сплавов. Включения с более положительным электродным потенциалом являются катодами;
 - наличие границ блоков и зерен кристаллов. Границы блоков и зерен могут быть и катодами, и анодами.
2. Неоднородность поверхности металла – наличие пор в защитных пленках. Металл в порах является анодом;
3. Неоднородность внутренних напряжений в металле: неравномерная деформация и неравномерность внешних нагрузок. Наиболее напряженные участки металла являются анодами.

Внешние причины, определяемые коррозионной средой:

1. Химическая неоднородность коррозионной среды; различие в величине рН и концентрации окислителей, солей, ионов данного металла. Участки металла, соприкасающиеся с раствором с большей концентрацией кислорода, являются катодами.

2. Физическая неоднородность среды – различие температуры, скорости потока среды, тепловой нагрузки, облучения. Более нагретые участки металла являются анодами.

Коррозия под напряжением аустенитных нержавеющей сталей. Такие стали наиболее широко используются в реакторостроении. Их основным преимуществом является существенно меньшее охрупчивание под действием нейтронного потока по сравнению с перлитными сталями. Существенным недостатком аустенитных сталей является их склонность к особому виду разрушения – коррозии под напряжением (коррозионному растрескиванию), проявляющейся при наличии наклепа, неизбежного в процессе изготовления изделий из стали. Разрушение металла при этом носит, как правило, транскристаллитный характер. Трещины располагаются преимущественно перпендикулярно растягивающим усилиям. Скорость развития трещин велика и может достигать нескольких сантиметров в час. Характерно, что скорость общей коррозии металла, происходящей наряду с коррозионным растрескиванием, весьма невелика.

Коррозионное растрескивание имеет электрохимическую природу. Можно полагать, что его причиной является распад аустенита под влиянием локальных деформаций с образованием α -фазы и интенсивное ее растворение в среде, содержащей хлориды. Растрескивание ускоряется в присутствии растворенного кислорода, хлоридов и при повышенной щелочности воды. В отсутствие кислорода, но при высокой щелочности воды может развиваться и щелочная хрупкость напряженного металла, особенно при наличии наклепа.

В воде первого контура двухконтурных ЯЭУ добиться полного отсутствия кислорода практически невозможно из-за процессов радиолиза. Во втором контуре, т.е. в воде парогенераторов, в связи с работой деаэраторов и при подаче питательной воды в область интенсивного парообразования в парогенераторе возможно практически полное отсутствие растворенного в воде кислорода.

Аустенитные нержавеющей стали имеют еще один недостаток. Входящий в их состав никель является источником образования в реакторе радиоактивного кобальта. Большой период полураспада этого изотопа (около 5 лет) осложняет проведение регламентных работ при наличии его в отложениях и создает большие трудности при необходимости демонтажа элементов реакторного контура после завершения срока работы.

По механизму протекающих процессов коррозия в контурах ВВЭР относится к электрохимической коррозии.

Одновременное воздействие коррозионной среды и ионизирующего излучения приводит к радиационной коррозии. Коррозионный процесс протекает в условиях повышенного давления, т.е. при одновременном воздействии растягивающих напряжений, следовательно, имеет место коррозионное растрескивание.

В отдельных местах может возникать щелевая, контактная и кавитационная коррозия.

Перечисленные коррозионные процессы приводят к следующим видам коррозионного разрушения: общему, частному и коррозионному растрескиванию.

Коррозионная стойкость аустенитных хромоникелевых сталей обусловлена их пассивацией и образованием на поверхности стали защитных пленок, содержащих оксиды хрома и железа. Поэтому скорость общей коррозии этих сталей незначительна. Тем не менее, поверхностные оксиды под действием механических (движение воды и т.д.) или химических (например, реакции с образованием в результате радиолиза азотной кислоты) факторов смываются, вследствие чего повышается содержание растворенных веществ и взвешенных частиц в контуре. В результате их осаждения на теплопередающих поверхностях ухудшается теплопередача, а также увеличивается радиоактивность теплоносителя. При этом усиливается процесс радиолиза и может ускориться коррозия.

Местная коррозия проявляется в виде коррозионных разрушений вблизи контактов разнородных металлов, в щелях, в местах кавитационных воздействий, а также в виде межкристаллитной коррозии.

Следует иметь в виду, что стали, не склонные к межкристаллитной коррозии в начале эксплуатации ЯЭУ, становятся склонными к ней после длительной эксплуатации при высоких температурах. Однако, чтобы коррозионные разрушения реализовались именно в виде межкристаллитной коррозии, необходимо сочетание определенных условий высокой температуры, наличия кислорода и хлоридов. Снижение концентрации кислорода и хлоридов в воде может предотвратить межкристаллитную коррозию нержавеющей сталей.

Опыт эксплуатации ЯЭУ с ВВЭР показывает, что наиболее опасным видом коррозии оборудования является коррозионное растрескивание нержавеющей сталей. После сравнительно небольшого времени эксплуатации в стали, практически не имеющей общих коррозионных поражений, появляются сквозные трещины, что приводит к разгерметизации систем, образованию течей воды или пара. Особенно опасно коррозионное растрескивание в первом контуре ЯЭУ, т.к. после нарушения герметичности твэл, корпуса реактора, трубопроводов резко ухудшается радиационная обстановка, вследствие чего эксплуатация невозможна, а ремонт связан с большими трудностями.

При коррозионном растрескивании трещина может распространяться перпендикулярно растягивающим напряжениям от границы раздела с коррозионной средой вглубь металла, преимущественно по телу зерна (транскристаллитное растрескивание) либо по границам зерен стали (межкристаллитное коррозионное растрескивание).

Коррозионное растрескивание реализуется при следующих условиях:

- наличии растягивающих напряжений, превышающих критические значения;

- наличии в коррозионной среде активатора (аниона, способного вызвать возникновение трещин) и окислителя. При этом активатор должен обладать высокой подвижностью, чтобы быстро проникать в узкую щель, и адсорбционно-химическими свойствами, позволяющими вытеснять ионы OH^- или кислород из малорастворимого поверхностного комплекса с образованием растворимого комплекса. Этими свойствами обладает ион хлора. Хотя он и уступает по подвижности ионам OH^- , но концентрация OH^- в воде невелика, а втягиваемые внутрь трещины, они осаждаются уже в верхней ее части ионами металлов. Поэтому хлориды являются активаторами коррозионного растрескивания.

Для появления коррозионного растрескивания в нейтральных водных средах должны присутствовать одновременно хлориды и кислород. При этом опасные концентрации хлоридов и кислорода взаимосвязаны: чем меньше в воде ионов хлора, тем большие концентрации кислорода безопасны.

Повышение рН среды до 10 увеличивает стойкость нержавеющей стали против коррозионного растрескивания. Дальнейшее повышение рН нежелательно, т.к. при этом усиливается межкристаллитная коррозия и наблюдается щелочное коррозионное растрескивание. Повышение температуры, как правило, ускоряет коррозионное растрескивание, хотя в диапазоне 300...350 °С и наблюдается его некоторое замедление в нейтральных водных средах, содержащих NaCl.

Основные способы борьбы с коррозионным растрескиванием:

- повышение стабильности аустенита (наиболее успешно это достигается увеличением содержания в стали никеля);

- возможно более полное удаление из воды кислорода и хлорид-ионов;

- совершенствование конструкции и технологии, исключаящее пластические деформации и концентраторы напряжений на поверхности металла.

Общей коррозии подвержены как углеродистые, так и аустенитные стали. Ее механизм носит электрохимический характер. Факторы, влияющие на скорость общей коррозии, следующие:

- структура металла и физико-химическое состояние его поверхности;

- значение и характер напряжений и деформаций;
- агрессивность, температура и скорость теплоносителя;
- ионизирующие излучения и режим эксплуатации ЯЭУ.

Чем однороднее металл, тем меньше скорость коррозии – меньше возникает коррозионных пар, меньше разность потенциалов катодных и анодных участков. Как правило, с увеличением шероховатости поверхности металла растет скорость коррозии. Это происходит из-за того, что окисная пленка на вершинах и во впадинах разрушается быстрее вследствие концентрации напряжений и возникновения коррозионных пар.

Коррозионная агрессивность теплоносителя определяется, главным образом, составом и концентрацией примесей. Для воды таким примесями являются кислород, водородные ионы, углекислый газ и растворенные в ней соли. Кислород оказывает двойное действие: 1) как катодный, очень активный деполяризатор, он сначала усиливает коррозию; 2) при большой концентрации оказывает пассивирующее действие. Однако в условиях работы ЯЭУ большая концентрация кислорода в теплоносителе нереальна. Поэтому кислород все же следует рассматривать как активный катодный деполяризатор, интенсифицирующий общую коррозию стали.

Ион водорода также является катодным деполяризатором. С повышением его концентрации (уменьшение значения pH) увеличивается разность потенциалов коррозионной пары, и скорость коррозии растет. Прямого влияния числа pH на анодные процессы не наблюдается. Вместе с тем косвенное влияние может оказаться основным – с изменением числа pH изменяется растворимость продуктов коррозии, а с ним связано образование защитных пленок. Для углеродистых сталей оптимальные значения $\text{pH} = 9,5 \dots 11,5$. А для аустенитных сталей скорость коррозии в воде высокой чистоты мало зависит от pH в интервале $\text{pH} = 3 \dots 11$.

Коррозионная агрессивность воды зависит от состава и концентрации солей. Увеличение концентрации кислых или основных солей изменяет pH, и их влияние на коррозию определяется этим изменением. Наибольший интерес представляют нейтральные соли. В растворах соли диссоциируют с образованием катионов металлов, хлорид-ионов и сульфат-ионов. Хлорид-ион вытесняет из оксида железа кислород, получается хорошо растворимое хлорное железо, что приводит к разрушению окисных защитных пленок (т.е. окисная пленка пассивирует поверхность металла, а хлорид-ион ее депассивирует).

Практика эксплуатации ЭБ АЭС свидетельствует о том, что глубокое удаление хлорид-ионов из воды – необходимое условие как для углеродистых, так и для аустенитных сталей. Концентрация хлорид-ионов в питательной и подпиточной воде не должна превышать $0,015 \dots 0,02 \text{ мг/дм}^3$. Сульфат-ионы в широком интервале температур не влияют на скорость общей коррозии.

Характер зависимости скорости общей коррозии от скорости теплоносителя различен и определяется его составом. Если в воде имеется кислород, но мало депассиваторов (хлорид-ионов), то с увеличением скорости воды общая коррозия сначала растет (так как интенсифицируется подвод кислорода к катодным участкам), затем падает (образуются защитные оксидные пленки) и далее опять возрастает из-за механического разрушения защитных пленок (коррозионная эрозия). Если депассиваторов много, то, очевидно, общая коррозия растет с увеличением скорости теплоносителя.

Ионизирующие излучения изменяют коррозионную активность воды и коррозионную стойкость металлов. Под действием излучений в результате радиолиза и радиоактивного синтеза в воде первого контура может измениться содержание кислорода и водорода и, следовательно, изменится коррозионная агрессивность воды по отношению к конструкционным материалам. Облучение металла приводит к увеличению его физико-химической неоднородности, связанной с разрывом химических связей и деформацией кристаллической решетки, а также к изменению защитных свойств оксидных пленок.

Скорость общей коррозии в первом контуре тем меньше, чем меньше мощность ЯР и больше длительность его работы. Увеличение мощности ЯР приводит к интенсификации радиолиза и радиационного синтеза. Наибольшая скорость коррозии наблюдается в первый период работы ЯР. Затем она уменьшается и через 20 - 30 суток становится постоянной. Для уменьшения скорости коррозии в первый период работы необходимо контур заполнять обескислороженной водой.

На скорость общей коррозии всех элементов ЯЭУ влияют частота и скорость изменения режимов работы, так как изменение температуры теплоносителя вызывает нарушение защитных пленок и, следовательно, усиливает коррозию.

Большое значение в борьбе с коррозией всех элементов ЯЭУ имеют остановочные режимы (**стояночная коррозия**). Это особенно важно для ПГ, так как стояночная коррозия может быть одной из основных причин их повреждения. Необходимо иметь в виду, что стояночная коррозия усиливает коррозию при последующей работе ЯЭУ, т.к. многие оксиды – продукты коррозии, накапливаясь при стоянке, превращаются в «аккумуляторы» кислорода, который затем при работе ЯЭУ усиливает коррозию. Методы предотвращения стояночной коррозии разнообразны и заключаются в различных способах «консервации» неработающего оборудования.

Межкристаллитной коррозии подвержены только аустенитные стали. Она происходит по границам зерен металла, находящегося в агрессивной среде. Внешний вид стали при этом не изменяется, поэтому обнаружить межкристаллитную коррозию очень трудно. В результате межкри-

сталлитной коррозии сталь становится хрупкой, что особенно опасно в условиях ЯЭУ. Аустенитные стали подвергаются межкристаллитной коррозии только при определенных сочетаниях внутренних (химический и фазовый составы металла) и внешних (характер коррозионной среды, температура) факторов.

Основная причина межкристаллитной коррозии состоит в возникновении гетерогенной электрохимической коррозии поверхности металла: граница зерен – анод, остальная поверхность – катод. Наибольшее распространение получила гипотеза обеднения хромом прилегающего к границам зерен твердого раствора.

Чем больше содержание углерода в стали, тем больше образуется карбидов хрома, т.е. склонность к межкристаллитной коррозии увеличивается. Межкристаллитная коррозия не возникает при содержании углерода менее 0,009 % (на практике же его содержание не менее 0,005 %). Титан, ниобий, ванадий и тантал являются более энергичными карбидообразователями, чем хром. Они образуют карбиды при температурах 1475...1575 К, поэтому за время снижения температуры до 1075 К большая часть углерода выводится из твердого раствора. Обеднения границ хромом не происходит, и сталь будет стойка к межкристаллитной коррозии. Чем коррозионно-активнее среда (меньше pH, больше хлорид-ионов и кислорода), тем быстрее возникает межкристаллитная коррозия.

Главными методами предотвращения межкристаллитной коррозии являются уменьшение содержания углерода, продолжительный отпуск стали при температуре 1025...1175 К, легирование стали титаном, ниобием и танталом, а также уменьшение коррозионной активности воды.

Коррозия стали в перегретом паре. Система «железо-водяной пар» термодинамически неустойчива. Взаимодействие этих веществ может протекать с образованием магнетита Fe_3O_4 или вьюстита FeO . При наличии в перегретом паре кислорода возможно образование гематита Fe_2O_3 за счет доокисления магнетита. Коррозия в паре начинается при довольно высоких температурах (более 545 °С) и, как правило, возникает в пароперегревательных установках.

В результате воздействия пара на сталь на ее поверхности постепенно образуется так называемый топотактический слой, плотно сцепленный с самим металлом и потому защищающий его от коррозии. С течением времени на этом слое нарастает второй (эпитактический) слой. Оба эти слоя для уровня температур пара до 545 °С представляют собой магнетит, но структура их не одинакова – эпитактический слой крупнозернист и не защищает от коррозии.

Влиять на коррозию пароперегревательных поверхностей методами водного режима не удастся. Поэтому основная задача ВХР заключается в систематическом наблюдении за состоянием металла пароперегревателей в

целях недопущения разрушения топотактического слоя. Это может происходить за счет попадания и осаждения в пароперегревателях отдельных примесей, особенно солей. Связанные с этим отложения солей в пароперегревателе могут привести как к повышению температуры стенки, так и к разрушению защитной оксидной топотактической пленки.

Коррозия латуней. Латунь (сплав меди и цинка) применяются, в основном, в конденсаторах турбин, а также подогревателях системы регенерации некоторых ядерных установок.

Это обусловлено высокой коррозионной стойкостью латуней и их большой теплопроводностью. В то же время, использование медьсодержащих сплавов обуславливает ряд существенных трудностей в поддержании норм ВХР второго контура, которые будут описаны в последующих главах настоящего пособия.

Коррозионные повреждения проявляются в конденсаторных трубках в виде общего пробочного обесцинкования, коррозионного растрескивания, ударной коррозии и коррозионной усталости. Обесцинкование является электрохимическим процессом, в котором цинк выполняет роль анода, а медь – катода.

При эксплуатации конденсаторов турбин в процессе контакта с конденсирующимся паром латуни склонны к специфическому разрушению – коррозионному растрескиванию, которое, при наличии растягивающих напряжений, может протекать как межкристаллитно, так и транскристаллитно. Растрескивание наблюдается преимущественно при одновременном наличии в паре кислорода, неизбежного в вакуумных системах, и аммиака. Увеличение содержания в латуни цинка сильно повышает ее склонность к коррозионному растрескиванию.

В процессе контакта с охлаждающей водой латунь может подвергаться также ударной коррозии, связанной с возникновением кавитации, т.е. разрыва потока охлаждающей воды при завихрении последней в местах пониженных давлений. Возникающие при этом воздушные полости устраняются, по мере переноса в районы более повышенного давления. Разрушение полостей сопровождается внезапными значительными сжимающими усилиями. Если это происходит вблизи стенок конденсаторных трубок, то они подвергаются большому числу ударов, и оксидные пленки на них разрушаются. На поверхности металла, лишенной защитных пленок, возникает анодный участок, а катодом служит значительная поверхность металла с неразрушенной пленкой, которая окружает анодные участки. При этом создаются условия для протекания локальной коррозии, интенсивность которой определяется не только концентрацией коррозионных агентов, но и соотношением площадей действующей микропары.

Коррозия циркониевых сплавов. Для реакторов с водным теплоносителем циркониевые сплавы являются наиболее распространенным мате-

риалом для изготовления оболочек твэл и технологических каналов. Основными преимуществами этих сплавов являются:

- малое сечение поглощения нейтронов, что позволяет использовать меньшее обогащение урана, чем при применении аустенитных нержавеющих сталей;

- повышенная коррозионная стойкость. Контакт циркония с аустенитными нержавеющими сталями (при сварке) не вызывает контактной коррозии. Также циркониевые сплавы практически не подвергаются таким видам коррозии, как щелевая, межкристаллитная и под напряжением;

- существенная эрозионная стойкость – значительные скорости водного потока (до 9 м/с) не приводят к интенсификации коррозионных процессов.

Основным недостатком циркониевых сплавов являются относительно небольшие значения температур, допустимых по условиям сохранения высокой коррозионной стойкости. При этом следует помнить, что скорость коррозии циркониевых сплавов зависит от температуры, а не от циклических нагревов и охлаждений. На скорость коррозии также влияет давление пара – при постоянной температуре скорость коррозии пропорциональна давлению. Состав водной среды в пределах, относительно мало отличающихся от обычных реакторных норм, на скорость коррозии циркониевых сплавов не влияет, за исключением хлоридов и фторидов. Значение pH во всем возможном диапазоне изменения его в реакторах на коррозию сплавов не влияет.

К негативным последствиям приводит взаимодействие циркониевых сплавов с водородом. Образующиеся при этом соединения циркония (гидриды) в определенных условиях, зависящих от технологии изготовления циркониевых труб, могут вызвать значительное охрупчивание сплава, недопустимого по условиям эксплуатации.

Коррозия циркониевых сплавов имеет электрохимический характер, но протекает не с потерей массы, как у сталей, а с возрастанием ее за счет оксидной пленки, которая представляет собой модификацию диоксида циркония. Сначала пленка растет на поверхности раздела металл-пленка, а кислород диффундирует сквозь пленку в металл, образуя твердый раствор кислорода в цирконии. Далее, в определенных условиях, термодинамически более устойчивым становится не твердый раствор кислорода в цирконии, а его оксид. В связи с этим происходит перестройка кристаллической решетки твердого раствора в решетку диоксида циркония, избыток атомов циркония растворяется в оксиде и образуется твердый раствор циркония в его диоксиде.

Контактная коррозия. Контактная коррозия – электрохимическая коррозия, вызванная контактом металлов, имеющих разные потенциалы в данном электролите. При этом возникает микрокоррозионный гальваниче-

ский элемент. Металл с отрицательным потенциалом является анодом и подвергается интенсивным коррозионным процессам. Металл с положительным потенциалом становится катодом, и на нем будет протекать кислородная или водородная деполяризация.

Контактная коррозия является наиболее опасным видом коррозии, т.к. современные устройства содержат несколько видов металлов, что повышает вероятность возникновения данного вида коррозии.

Скорость разрушения анода зависит от следующих показателей:

- разности потенциалов корродирующих металлов. Если разность стационарных потенциалов корродирующих металлов больше 0,25 В, их контакт недопустим. Если эта разность меньше, то вопрос о допустимости контакта может быть решен с использованием специальных таблиц допустимых контактов металлов. При этом учитывается целый ряд факторов: поляризуемость контактирующих металлов, соотношение их площадей, защитные свойства образующихся на металлах продуктов коррозии;

- соотношения площадей катода и анода. Чем больше это соотношение, тем больше скорость разрушения анода;

- расстояния от места контакта. По мере удаления от места контакта интенсивность коррозионного разрушения анода уменьшается;

- электропроводности коррозионной среды. Чем выше электропроводность среды, тем интенсивней контактная коррозия и тем дальше от места контакта распространяются коррозионные поражения анода;

- природы коррозионной среды. Стационарные потенциалы металлов при коррозии в различных средах различны, следовательно, и различна интенсивность их контактной коррозии. Поэтому контакт металлов, допустимый в одних средах, может быть недопустим в других.

Щелевая коррозия – усиление коррозии в щелях и зазорах между двумя металлами, а также в местах неплотного контакта металла с неметаллическими коррозионно-инертными материалами. Этому виду коррозии подвержены резьбовые соединения, втулки и т.п. Также щелевая коррозия может возникать в дренажных системах ионитных фильтров.

Наибольшую склонность к щелевой коррозии обнаруживают пассивирующие металлы – нержавеющие стали, алюминиевые и магнитные сплавы, пассивное состояние которых связано с наличием в электролите растворенного кислорода. Нержавеющие стали в условиях дефицита кислорода в зазоре переходят в активное состояние и подвергаются интенсивной щелевой коррозии. Этому способствует и понижение pH в зазоре.

Развитие щелевой коррозии в воде связано с затруднением доступа кислорода из объема электролита в зазор, в результате чего в зазоре облегчается анодный и затрудняется катодный процесс. Возникает макрокоррозионный элемент щель- открытая поверхность. Металл в зазоре является анодом, который интенсивно разрушается. Затруднение доступа раствора

электролита может вызвать также снижение pH в зазоре из-за гидролиза металла, которое также усиливает коррозию многих металлов.

Радиационная коррозия – это коррозия, вызываемая одновременным воздействием коррозионной среды и ионизирующих излучений. Ионизирующие излучения, в основном, ускоряют коррозионные процессы, но иногда могут оказывать и замедляющее действие. Это объясняется тем, что под действием излучения изменяются как внутренние, так и внешние факторы коррозии.

К внутренним факторам относятся понижение пластичности и повышение электрического сопротивления металлов, ускорение диффузионных процессов и фазовых превращений в металлических системах. Изменение внешних факторов коррозии состоит в том, что происходит радиолиз коррозионной среды, повышается ее температура, происходят изменения в образующихся на поверхности металлов защитных пленках.

Радиолиз (химические изменения, происходящие в системе под воздействием ионизирующих излучений) усиливает коррозию металлов в воде, т.к. возрастает концентрация кислорода, а также появляются новые катодные деполяризаторы (OH , HO_2 , H_2O_2 , H^+). Кроме того, в результате радиационно-химических реакций в воде, содержащей растворенный кислород и азот, образуется азотная кислота, большая часть которой расходуется на растворение твердых продуктов коррозии, в результате чего скорость коррозии также повышается. В то же время, при определенных условиях наличие в воде окислителей OH , HO_2 , H_2O_2 может привести к пассивации металла и тем самым – к снижению скорости коррозионных процессов.

Также излучения приводят к изменению структуры образующихся на металле оксидных слоев (пленок), в результате чего увеличивается их толщина и снижается защитная способность из-за создания в них микродефектов и повышения ионной проводимости.

Как показала эксплуатация ЯЭУ, излучения реакторного спектра практически не влияют на скорость общей коррозии аустенитных хромоникелевых нержавеющей сталей. Нержавеющая сталь является одним из наиболее устойчивых материалов к коррозионному воздействию излучений. Это связано со своеобразным строением пассивной пленки на поверхности стали.

Особо следует подчеркнуть, что в ряде случаев излучение резко усиливает скорость контактной коррозии. Основной причиной этого является смещение стационарного потенциала металлов под действием излучений, причем для одних металлов (железо, медь) смещение происходит в положительную, а для других (алюминий) – в отрицательную сторону. Поэтому алюминий особо чувствителен к контактной коррозии под действием излучения.

Основными способами борьбы с коррозией конструкционных материалов ЯЭУ являются:

- выбор химического состава материала, стойкого в условиях его применения;
- выбор рационального способа механической и термической обработки;
- создание на поверхности защитных металлических и неметаллических покрытий и пленок;
- выбор рациональной конструкции: минимум местных концентраций напряжений, свобода термических расширений, устойчивая гидродинамика для избегания колебаний температуры стенок, исключение неблагоприятных контактов разнородных металлов, застойных зон, мест глубокого упаривания, что может привести к высокой концентрации агрессивных элементов, скорости теплоносителя должны быть такими, чтобы не было коррозионной эрозии;
- применение анодной защиты;
- обработка коррозионной среды для уменьшения ее агрессивности;
- применение рациональных методов эксплуатации.

3.2. Требования к водному режиму реакторов типа ВВЭР

С начала эксплуатации первых блоков АЭС и до начала 70-х годов прошлого столетия ВХР АЭС регламентировался лишь проектной и конструкторской документацией. На начальном этапе разработки проектно-конструкторской документации и показателей качества ВХР были проведены фундаментальные исследования по выбору конструкционных материалов, оболочек твэл, корпусов реакторов, внутрикорпусных устройств, и другого основного оборудования, а также установлены требуемые нормы качества теплоносителей. На основе анализа опыта эксплуатации отечественных АЭС и норм ВХР энергоблоков ряда зарубежных стран было разработано руководство по безопасности, определяющее основные требования к установлению, организации и поддержанию ВХР, направленные на сохранение целостности защитных барьеров и обеспечение радиационной безопасности АЭС. Руководство по безопасности устанавливает ряд основных требований к ВХР АЭС, в том числе:

- ВХР должен быть организован таким образом, чтобы обеспечивалась целостность защитных барьеров (оболочек тепловыделяющих элементов, границы контура теплоносителя, герметичных ограждений локализирующих систем безопасности);
- коррозионное и коррозионно-эрозионное воздействие теплоносителя и других рабочих сред на конструкционные материалы оборудования и трубопроводов систем АЭС не должно приводить к нарушению пределов и

условий безопасной эксплуатации станции;

- ВХР должен обеспечивать минимальное количество отложений на теплопередающих поверхностях оборудования и трубопроводов. Накопление отложений на оболочках ТВЭЛов может привести к ухудшению теплообмена и недопустимому перегреву их оболочек и самого ядерного топлива. Кроме того, при наличии отложений на ТВЭЛАх снижается коэффициент размножения и выгорания ядерного топлива;

- ВХР должен быть направлен на снижение радиационных полей, возникающих в результате ионизирующего излучения активированных продуктов коррозии, образующих отложения на поверхностях оборудования и трубопроводов систем АЭС, с учетом массопереноса активированных продуктов коррозии в оборудовании и трубопроводах.

Оптимальный водный режим реакторов ВВЭР должен обеспечивать предотвращение заметной коррозии всех конструкционных материалов активной зоны реактора, т.е. прежде всего циркониевых сплавов, используемых для оболочек ТВЭЛов, а также аустенитных нержавеющей сталей, используемых для всего остального контура.

Одно из главных условий уменьшения коррозии конструкционных материалов – ограничение содержания свободного кислорода в теплоносителе первого контура, а для этого надо подавлять радиолиз воды. Интенсивно протекающий сначала, после пуска реактора, радиолиз в дальнейшем замедляется, так как нет отвода газовой фазы. При этом он устанавливается на уровне, при котором реально интенсивное протекание процессов коррозии. Поэтому задачей водного режима является подавление радиолиза для снижения концентрации радиолитического кислорода.

Кроме кислорода, негативное воздействие на конструкционные материалы РУ оказывают хлориды и фториды, источником поступления которых является вода первичного заполнения, подпиточная вода и реагенты коррекции водного режима. Как было рассмотрено выше, хлориды и фториды влияют на общую коррозию циркониевых сплавов и способны вызывать коррозию под напряжением аустенитных нержавеющей сталей. Поэтому водный режим реакторов ВВЭР должен обеспечивать минимальное содержание хлоридов и фторидов в теплоносителе.

Важным фактором, во многом определяющим организацию водного режима реакторов ВВЭР, является борное регулирование. Жидкий поглотитель уменьшает неравномерность тепловыделения в активной зоне, что позволяет при тех же габаритных размерах повысить ее мощность. При этом медленные эффекты реактивности компенсируются за счет равномерно распределенного в воде бора, и только быстрые эффекты – за счет стержней системы управления и защиты реактора. Для регулирования используется борная кислота, которая в реакторных условиях имеет ряд преимуществ. Она химически устойчива в реакторных условиях, хорошо рас-

творима в воде, дает хорошо растворимые соединения с катионами воды реакторов. Но ей присущи и недостатки, заключающиеся, прежде всего, в понижении значения рН и затруднении очистки воды реакторов от хлоридов. Введение борной кислоты повышает удельную электрическую проводимость воды и исключает возможности использования кислорода для пассивации конструкционных материалов.

3.3. Основы водного режима первого контура ЯЭУ с ВВЭР

Исходя из вышеперечисленного, можно сформулировать условия нормирования водного режима реакторов ВВЭР с борным регулированием:

1. Поддержание рН в коррозионно-безопасных пределах.
2. Ограничение концентрации радиолитического кислорода.
3. Ограничение в воде реактора концентраций хлоридов и фторидов.
4. Обеспечение эффективного удаления продуктов коррозии конструкционных материалов.

Для выполнения этих условий в составе реакторной установки предусмотрены очистительные и подпиточные установки.

Поддержание необходимого значения рН в условиях борного регулирования требует дозирования щелочей в воду реактора. По своей агрессивности щелочи располагаются следующим образом



Поэтому наиболее безопасным по отношению к циркониевым сплавам был бы ввод аммиака. Однако с ростом температуры и особенно при 300 °С, т.е. при температурных условиях первого контура, основные свойства аммиака ослабевают. Поэтому для поддержания требуемого значения рН пришлось бы использовать очень высокие, практически недостижимые концентрации аммиака (1 г/дм³ и даже выше).

Кроме того, в условиях таких значительных концентраций аммиака вследствие его радиолитического распада в реакторной воде увеличивалась бы концентрация водорода, повышающая опасность водородного охрупчивания сталей. В связи с этим предпочтительнее использование КОН. На зарубежных АЭС используют LiOH, однако это приводит к большим материальным затратам, т. к. требует очистки лития от изотопа ⁶Li, из которого образуется тритий:



Более дешевый NaOH не используется в связи со стопроцентной активацией натрия и увеличением активности теплоносителя за счет распада сравнительно короткоживущего изотопа ²⁴Na.

Калий тоже активируется в активной зоне, но это относится только к изотопу ^{41}K , которого в природном калии всего 6,4 %.

Стабилизация значений pH на необходимом уровне достигается добавлением в воду реактора не только KOH, но и NH_3 , т.е. организуется так называемый калий-аммиачный водный режим, нейтрализующий химическое воздействие борной кислоты. При работе реактора на мощности при высоких температурах, когда степень диссоциации борной кислоты незначительна, и диссоциация гидроксида аммиака и его основные свойства выражены слабо. Главным нейтрализующим реагентом является при этом KOH. При снижении температуры усиливаются основные свойства NH_3 , что позволяет поддерживать необходимое значение pH без увеличения количества вводимого KOH.

В условиях калий-аммиачного водного режима катионитовые фильтры очистки работают в смешанной ($\text{K}^+ - \text{NH}_4^+$)-форме. В некоторой литературе эту форму называют аммонийно-калиевой. Аммоний – это катион, получаемый при растворении аммиака в растворах кислот



Концентрация калия при калий-аммиачном водном режиме стабильно поддерживается ионообменным равновесием

$$\frac{[\text{K}^+]_{\text{в}}}{[\text{NH}_4^+]_{\text{в}}} \cdot \frac{[\text{NH}_4^+]_{\text{кат}}}{[\text{K}^+]_{\text{кат}}} = K, \quad (3.15)$$

где K – коэффициент равновесия, или коэффициент избирательности, зависящий от температуры, свойств катионита и раствора, концентраций и количественного соотношения взаимодействующих катионов; индексы «в» и «кат» означают соответственно концентрации в воде реактора и в катионите.

На практике оптимальное соотношение катионита в K^+ и NH_4^+ -формах создается в процессе работы фильтра. Перед пуском реактора катионит переводят из H^+ -формы в NH_4^+ -форму введением в теплоноситель аммиака в количестве 100...200 мг/дм³. После выхода на мощность в теплоноситель начинают дозировать KOH. Равновесие устанавливается примерно через сутки после начала ввода KOH. После достижения устойчивой концентрации калия в теплоносителе ввод KOH прекращается и в воду реактора дозируется только NH_3 . Для расчета концентраций калия, необходимых для поддержания нужного значения pH при рабочей температуре, может быть использована графическая зависимость концентрации калия от концентрации борной кислоты при различных значениях pH, представленная на рис. 3.1.

При необходимости увеличения концентрации калия в воде его вытесняют из фильтра дополнительным введением аммиака.

Для ограничения концентрации кислорода в воде реактора требуется заполнение его хорошо деаэрированной водой. Кроме того, для удаления остаточного кислорода, содержащегося в воде, в нее вводят гидразин с таким расчетом, чтобы создать в воде реактора избыточную концентрацию гидразина не менее 20 мкг/дм^3 . Что же касается ограничения концентрации радиолитического кислорода в процессе работы реактора, то оно может быть достигнуто за счет введения в воду реактора газообразного водорода или какого-либо реагента, разлагающегося в радиационных условиях с выделением газообразного водорода. Первое решение используется на зарубежных АЭС, второе реализуется на отечественных РУ – в воду реактора вводят аммиак, в результате радиационного разложения которого выделяется водород, соединяющийся с радиолитическим кислородом. Количество вводимого аммиака должно обеспечивать подавление радиоллиза, но не должно превышать значений, при которых создается опасность охрупчивания циркониевых сплавов.

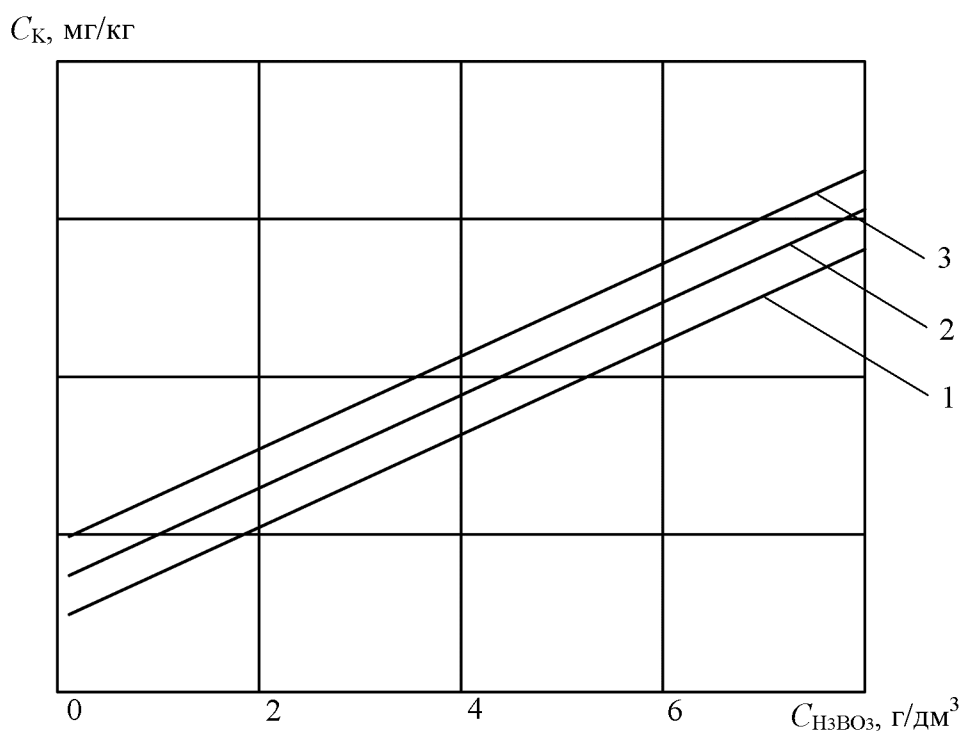


Рис. 3.1. Зависимость концентрации калия от концентрации борной кислоты при температуре теплоносителя 260°C :
1 – при $\text{pH} = 7,1$; 2 – при $\text{pH} = 7,2$; 3 – при $\text{pH} = 7,3$

Для ограничения концентраций хлоридов в воде реактора требуется, прежде всего, высокая чистота борной кислоты; для получения нормируемых концентраций хлоридов и фторидов – высокая чистота подпиточной воды и обеспечение эффективной работы очистных установок реакторного

цеха, которые предназначена также для возможно более полного вывода из контура продуктов коррозии конструкционных материалов.

Конкретное нормирование водного режима реакторов ВВЭР опирается на изложенные выше положения и регламентируется как для эксплуатационных условий, так и для горячей обкатки, предшествующей эксплуатации.

3.4. Средства обеспечения ВХР первого контура ЯЭУ с ВВЭР-1000

К средствам обеспечения ВХР первого контура ЯЭУ с ВВЭР-1000 относятся:

- система байпасной очистки теплоносителя первого контура СВО-1;
- система очистки продувочной воды первого контура и организованных протечек СВО-2;
- система очистки вод бассейнов выдержки и перегрузки СВО-4;
- система реагентного хозяйства.

3.4.1. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы СВО-1

Система байпасной очистки теплоносителя первого контура (ТС) (рис. 3.2) предназначена для очистки неохлажденного теплоносителя первого контура от продуктов коррозии конструкционных материалов оборудования в виде коллоидных и взвешенных частиц, радионуклидов, находящихся в дисперсном состоянии с целью снижения удельной активности поверхности оборудования первого контура и других вспомогательных систем.

Эффективность удаления из воды продуктов коррозии и радионуклидов коррозионного происхождения при помощи фильтрации на слое высокотемпературного сорбента, согласно экспериментальным данным, составляет: ^{51}Cr – 80...85 %, ^{60}Co – 50...70 %, ^{95}Zr – 95 %, ^{59}Fe – 90 %.

В связи с этим в проекте унифицированной реакторной установки ВВЭР-1000 (В-320) была разработана высокотемпературная система байпасной очистки теплоносителя СВО-1, очищающая воду без снижения температуры при рабочих параметрах первого контура.

В бывшем СССР высокотемпературные фильтры (ВТФ) впервые были серийно установлены на головном блоке Запорожской АЭС с унифицированным реактором ВВЭР-1000, введенном в эксплуатацию в декабре 1984 года. Анализ экспериментальных данных, полученных в ходе двух топливных циклов первого блока Запорожской АЭС, показал, что применение в системе СВО-1 высокотемпературного фильтра снизило содержание активных продуктов коррозии в теплоносителе первого контура и изменило соотношение между уровнями активности растворимой (< 0,45 мкм) и нерастворимой (> 0,45 мкм) фракций этих продуктов. Ак-

тивность первой фракции более чем в 10 раз выше активности второй фракции. Низкое содержание крупнодисперсных продуктов коррозии положительно повлияло на структуру формирующихся отложений. Визуальный осмотр внутренних поверхностей первого контура, проводимый в ходе отбора проб, показал отсутствие шлама и рыхлых отложений на внутренних поверхностях оборудования.

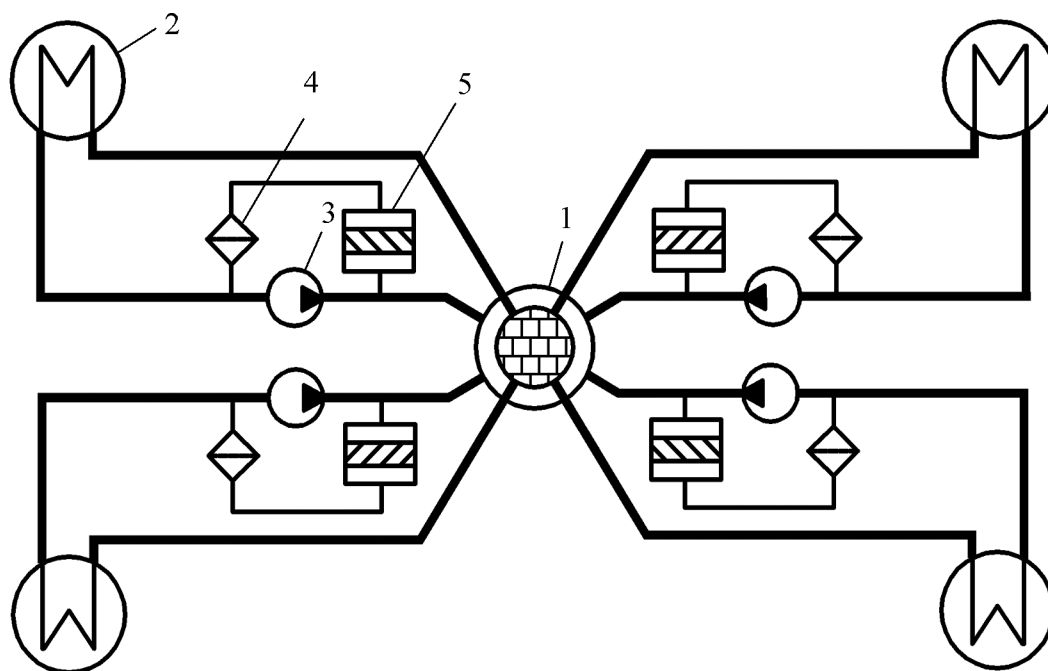


Рис. 3.2. Функциональная схема системы СВО-1:
1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – ГЦН; 4 – фильтр-ловушка; 5 – ВТФ

Система СВО-1 состоит из четырех одинаковых цепочек, расположенных на байпасах ГЦН, т.е. расход теплоносителя через цепочку обеспечивается соответствующим ГЦН. Каждая из цепочек имеет в своем составе один ВТФ (ТС10...40N01) и фильтр-ловушку (ТС10...40B01).

Производительность каждого фильтра $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, что составляет примерно 0,5 % от расхода теплоносителя, циркулирующего по петле. Эффективность удаления радионуклидов коррозионного происхождения на сорбенте – 70...90 %.

При работе реакторной установки теплоноситель первого контура с напора каждого ГЦН поступает в ВТФ сверху, проходит через верхнее распределительное устройство, фильтрующий материал, нижнее распределительное устройство фильтра и, очищенный от продуктов коррозии, проходит фильтрующие системы фильтров-ловушек, после чего возвращается в первый контур на всас ГЦН.

Входная задвижка каждой цепочки ТС10...40S01 имеет байпасную линию с задвижкой ТС10...40S02 и дроссельной шайбой, рассчитанной на

расход $20 \text{ м}^3/\text{ч}$, которая используется для работы системы СВО-1 с пониженным расходом при разогреве или расхолаживании первого контура.

Циркуляция через каждую цепочку системы ТС обеспечивается за счет напора, создаваемого работой главного циркуляционного насоса. Для подключения системы СВО-1 в холодной нитке каждой петли ГЦТ имеется два штуцера Ду 133х12. В местах врезки трубопроводов СВО-1 в ГЦТ установлены ограничители расхода, предназначенные для ограничения течи из первого контура при разрыве трубопроводов СВО-1.

Трубопроводы продувки первого контура вварены в трубопроводы подачи теплоносителя на фильтры СВО-1. В трубопроводы возврата теплоносителя после фильтров байпасной очистки вварены трубопроводы подпитки первого контура. Все патрубки системы СВО-1 в ГЦТ расположены выше осей «холодных» ниток, что дает возможность проводить ремонт трубопроводов и оборудования системы без выгрузки топлива из реактора.

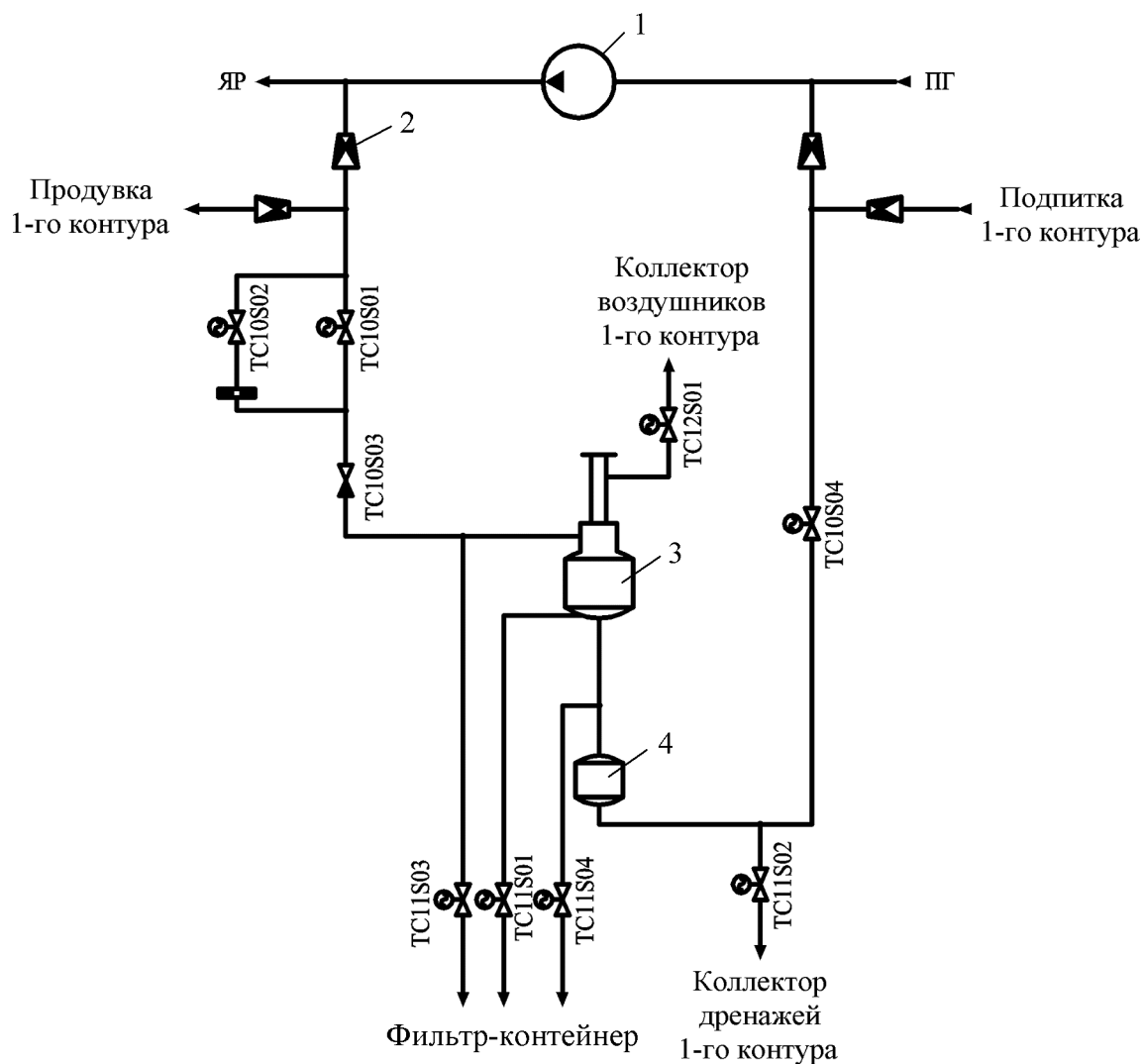


Рис. 3.3. Функциональная схема одной цепочки системы СВО-1:
1 – ГЦН; 2 – сужающее устройство; 3 – ВТФ; 4 – фильтр-ловушка

В качестве фильтрующего материала для заполнения ВТФ используется титановая крошка типа ТП-ВС-1 на основе губчатого титана с размером фракции $2 \pm 0,03$ мм. Высокотемпературные сорбенты такого типа обладают высокой механической прочностью и сохраняют свои физико-механические свойства (удельную поверхность, механическую прочность, обменную емкость и т.д.) при температуре обрабатываемой воды до $330\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение длительной работы (до 10 тысяч часов). Под действием ионизирующего излучения свойства сорбента практически не изменяются. Также сорбент обладает высокой химической устойчивостью – при температуре обрабатываемой воды до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ его растворимость составляет менее 1 мг/дм^3 .

Гидравлическое сопротивление гранулированных высокотемпературных сорбентов невелико: при высоте фильтрующего слоя 1 метр и скорости фильтрования $2,8\text{ см/с}$ (100 м/ч) оно составляет $0,07\text{ кгс/см}^2$. Теоретически в процессе работы из-за накопления различных примесей гидравлическое сопротивление сорбента может возрасти до $0,4\text{ кгс/см}^2$.

Высокотемпературные неорганические сорбенты могут применяться для очистки воды, в том числе радиоактивной, при температурах от 20 до $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ при величине $\text{pH} = 5 \dots 9,5$. При этом коэффициент очистки от наиболее часто встречающихся в воде загрязнений составляет: от железа – $2,0$; меди – $1,5$; солей жесткости – $1,6$; кремниевой кислоты – $1,4$. Очистка воды происходит от веществ, находящихся в любом агрегатном состоянии: грубодисперсных, коллоидных и истинно растворенных. При насыщении сорбента загрязнениями он может подвергаться взрывающей отмывке водой или водой с воздухом, а если этого недостаточно – химической регенерации. В качестве регенерирующих веществ могут использоваться щавелевая, азотная и оксиэтилендифосфорная кислоты.

Для осуществления операций по взрыхлению и отмывке сорбента непосредственно в корпусе ВТФ, а также для проведения дезактивации поверхностей оборудования системы СВО-1 и сорбента предусмотрен подвод воды собственных нужд, сжатого воздуха и дезактивирующих растворов. Для проведения операций дренирования система СВО-1 имеет дренажи со сбросом воды в теплообменник системы организованных протечек. Для осуществления операций по регенерации сорбента, а также для выгрузки сорбента при проведении ремонтных работ, предусмотрен фильтр-контейнер ТСО0N01. В соответствии с проектом, трубопроводы отвода сорбента в фильтр-контейнер смонтированы лишь частично, а само устройство для проведения гидровыгрузки сорбента (УГВС) при необходимости монтируется на фильтре и соединяется с существующим участком схемы при помощи гибких резиновых шлангов.

Конструкция оборудования системы СВО-1.

Высокотемпературный механический фильтр АФМВТ-1,0-16,0 предназначен для очистки неохлажденного теплоносителя первого контура от

радиоактивных взвешенных продуктов коррозии. Конструкция ВТФ представлена на рис. 3.4.

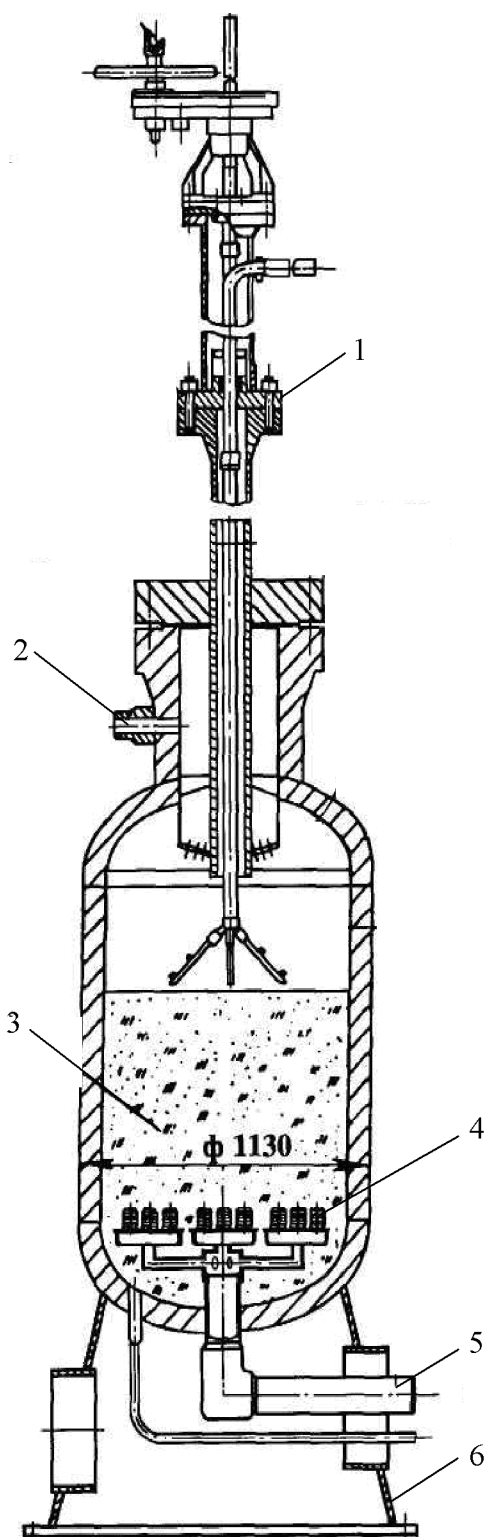


Рис. 3.4. Высокотемпературный фильтр СВО-1:
1 – УГВС; 2 – вход очищаемой воды; 3 – сорбент;
4 – колпачок; 5 – выход очищенной воды; 6 – опора

ВТФ представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд высокого давления с приваренными эллиптическими днищами. На верхнем днище приварена входная камера, предназначенная для подвода очищаемой воды и для ее равномерного распределения по сечению фильтра, а также для верхней выгрузки и загрузки сорбента. Верхняя камера сверху закрыта крышкой, которая уплотняется двумя медно-никелевыми прокладками с контролем протечек между ними. Через крышку входной камеры сверху проходит защитная труба УГВС, при эксплуатации закрытая заглушкой. Вход очищаемой воды осуществляется через штуцер, расположенный на боковой поверхности входной камеры, далее она проходит по кольцевому зазору между защитной трубой УГВС и обечайкой входной камеры, на нижнем конце которой закреплен конический отбойник с перфорированными отверстиями. Отбойник предназначен для распределения потока очищаемой воды по сечению фильтра.

Отвод очищенной воды осуществляется через нижнее распределительное устройство щелевого типа, предотвращающее выход фильтрующего материала за пределы фильтра, и состоящее из 49 щелевых колпачков, закрепленных на резьбе на тарелках коллектора.

Щелевой колпачок представляет собой набор профилированных дисков, закрепленных на основании. Между дисками образуется зазор в виде кольцевой щели шириной 0,3 мм. Внутри фильтра располагается слой высокотемпературного сорбента из титановой пористой крошки типа ТП-ВС-1 высотой 800 мм и объемом 0,7 м³. Для осуществления гидровыгрузки сорбента в фильтр вводится специальное устройство УГВС, позволяющее дистанционно производить гидровыгрузку сорбента в фильтр-контейнер.

Труба, проходящая через входную камеру ВТФ, является опорой для установки устройства гидровыгрузки сорбента и его привода. На четыре высокотемпературных механических фильтра, входящих в состав СВО-1, предусматривается одно устройство УГВС. Оно может быть установлено на любом из четырех фильтров. Корпус и все детали фильтра, соприкасающиеся с водой, выполнены из нержавеющей стали. Опоры фильтра изготовлены из углеродистой стали.

Фильтр-ловушка АФЛВТ-0,3-16,0 предназначен для улавливания высокотемпературного сорбента после высокотемпературных фильтров в случае аварийного разрушения их дренажных систем.

Фильтр представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд высокого давления с эллиптическими днищами и верхним и нижним патрубками. Во внутренней полости фильтра-ловушки размещено фильтрующее устройство, состоящее из 33 щелевых колпачков, закрепленных на резьбе на двух соединенных между собой тарелках, образующих коллектор. Щелевой колпачок представляет собой набор профилированных дисков, за-

крепленных на основании. Между дисками образуется зазор в виде кольцевой щели шириной 0,3 мм. Корпус и все детали фильтра-ловушки, соприкасающиеся с водой, выполнены из нержавеющей стали.

Обрабатываемая вода поступает через верхний патрубок, проходит через фильтрующее устройство и очищенная вода выходит через нижний патрубок. В случае выноса сорбента из ВТФ улавливание его производится щелевыми колпачками.

Конструкция фильтра-ловушки представлена на рис. 3.5.

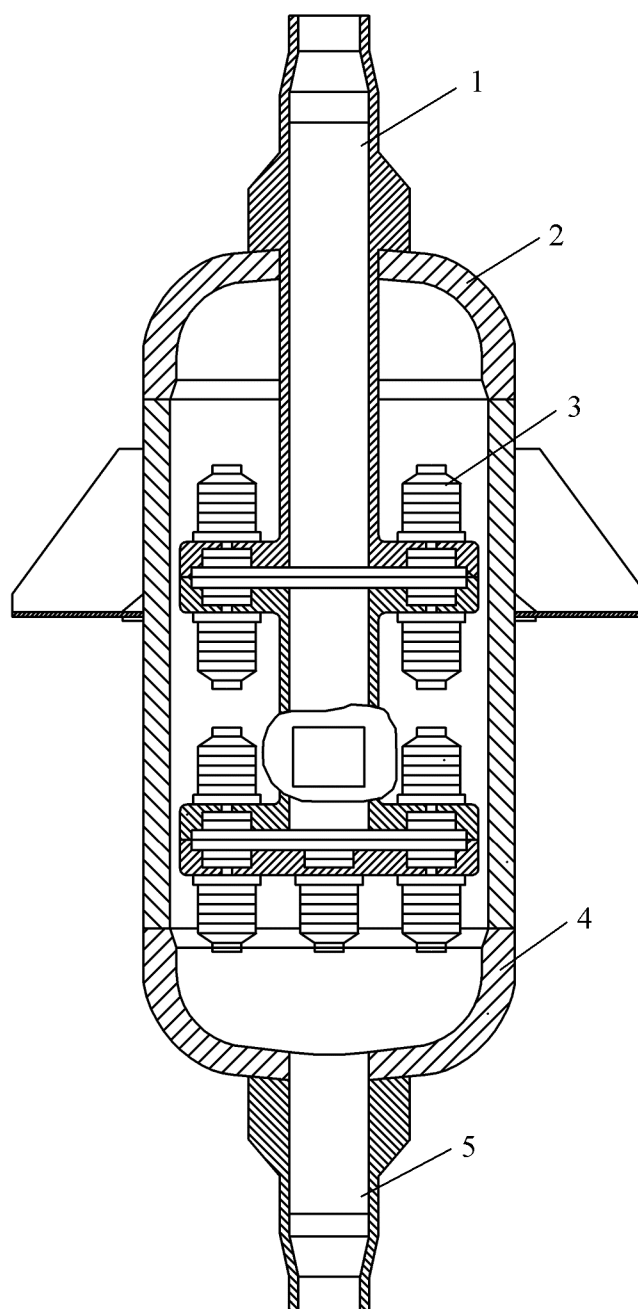


Рис. 3.5. Фильтр-ловушка СВО-1:
1 – подводящий патрубок; 2, 4 – днище;
3 – колпачок; 5 – отводящий патрубок

Фильтр-контейнер предназначен для приема сорбента из высокотемпературного фильтра при его гидровыгрузке для проведения его ремонта, дезактивации или регенерации сорбента. В отличие от остальных сосудов системы СВО-1, он рассчитан на низкое рабочее давление 10 кгс/см². При проведении гидровыгрузки сорбента УГВС соединяется с фильтром-контейнером при помощи временных гибких трубопроводов.

Устройство для гидровыгрузки сорбента УГВС состоит из цилиндрической приводной головки, крепящейся 4-мя болтами к плите, приваренной к вертикальной трубе, имеющей продольные прорези. Нижний конец вертикальной трубы с помощью 4-х болтов крепится к ответному фланцу защитной трубы УГВС, являющейся элементом высокотемпературного фильтра. В центре фланца вертикальной трубы установлено сальниковое уплотнение, через которое проходит труба Ду35, состоящая из трех частей, соединенных между собой с помощью фланцев и муфты.

На наружной поверхности верхней части трубы нанесена трапециевидальная резьба. Длина резьбовой части 1050 мм. Для предотвращения проворачивания подвижной трубы и придания ей поступательного движения вдоль образующей верхней части трубы выполнен паз, в который входит зуб фиксирующей фигурной шайбы. Верхняя часть трубы соединена со средней частью фланцевым соединением. Наружная поверхность средней части трубы, проходящей через сальниковое уплотнение фланца вертикальной трубы, выполнена гладкой. Средняя часть трубы соединена с нижней частью муфтовым соединением. Наружная часть трубы, имеющая также гладкую наружную поверхность, имеет на конце заборную головку. Заборная головка состоит из конического наконечника, к которому крепится одна центральная и четыре периферические трубки, причем центральная труба приварена к наконечнику, а периферические трубки соединены с ним под углом 45° при помощи гибких резиновых манжет. Эти манжеты позволяют притянуть периферические трубки к центральной для того, чтобы провести заборную головку через защитную трубу УГВС, после чего периферийные трубки занимают свое рабочее положение под углом к центральной трубе за счет упругости резиновых манжет.

Основы эксплуатации системы СВО-1.

Подключение системы СВО-1 к реакторной установке производится на стадии дозаполнения первого контура при подготовке реакторной установки к работе после перегрузки топлива. Ввод в работу цепочек СВО-1 в работу производится при пуске соответствующего ГЦН. При вводе в работу системы после перегрузки разогрев системы и подъем давления в ней производится одновременно с разогревом первого контура.

Как уже было сказано выше, к системе СВО-1 подключены вспомогательные трубопроводы дренажей, воздушников, подачи промывочной воды, дезактивации, сжатого воздуха, выгрузки сорбента. Все эти трубопро-

воды рассчитаны на низкое давление, поэтому перед подъемом давления в первом контуре должна выполняться проверка отсекающей арматуры на этих трубопроводах.

В процессе работы системы СВО-1 из-за накопления различных примесей гидравлическое сопротивление сорбента может повышаться. Согласно ИЭ при нормальной эксплуатации СВО-1 перепад давления при работе ВТФ должен находиться в пределах $2,7 \dots 4,8 \text{ кгс/см}^2$. Превышение перепада на ВТФ выше 5 кгс/см^2 может привести к разрушению нижних водосборных устройств фильтров и, в конечном итоге, к выносу высокотемпературного сорбента из ВТФ. Для предотвращения попадания сорбента в первый контур в каждой цепочке имеется по фильтру-ловушке, рассчитанному на предельный перепад давления 1 кгс/см^2 , образующийся при аварийном выносе сорбента из ВТФ.

Допустимая скорость разогрева корпуса ВТФ – $20 \text{ }^\circ\text{C/ч}$, скорость расхолаживания – $30 \text{ }^\circ\text{C/ч}$. В аварийных режимах допускается скорость расхолаживания – $60 \text{ }^\circ\text{C/ч}$. В режимах нормальной эксплуатации при перепадах давления на фильтре-ловушке не более 1 кгс/см^2 и ВТФ – не более 5 кгс/см^2 запрещается выводить из работы систему СВО-1; при превышении указанных перепадов давления необходимо вывести из работы соответствующую нитку СВО-1 и отключить ГЦН этой петли.

Патрубки подпитки первого контура от системы ТК врезаны в трубопроводы СВО-1 Ду 100 возврата очищенной воды в первый контур после арматур ТС10...40S04. Это помогает снизить температурные напряжения на патрубках подпитки при работе системы СВО-1 за счет перемешивания «холодной» подпиточной воды с более «горячим» теплоносителем первого контура. При выводе из работы отдельных цепочек СВО-1 температурный перепад на патрубках увеличивается. Для уменьшения разницы температур между подпиточной водой и теплоносителем первого контура при выводе из работы отдельных петель СВО-1 на некоторых энергоблоках выполнены байпасы СВО-1 (иногда их называют термовставками).

Система байпасной очистки теплоносителя первого контура находится в оперативном управлении НСРЦ и оперативном ведении НСБ. При работе системы СВО-1 оперативный персонал производит контроль технологических параметров системы, который ведется по приборам и сигнализации БЩУ, а также по информации из УВС. Каждый высокотемпературный фильтр имеет индивидуальные пробоотборные линии на входе и выходе, которые снабжены дроссельными шайбами и теплообменниками для снижения параметров пробы. Анализ качества работы фильтра производится персоналом ХЦ путем отбора теплоносителя на входе и выходе фильтра каждой нитки с установленной периодичностью.

Техническое обслуживание оборудования системы СВО-1 заключается в его осмотрах с целью проверки и поддержания работоспособности

оборудования, выявления возможных дефектов. Оборудование системы располагается внутри защитной оболочки, доступ в которую осуществляется в установленном порядке. Техническое обслуживание проводится при обеспечении доступа в помещения системы на остановленном и расхоложенном реакторе, выявленные дефекты заносятся в «Журнал дефектов оборудования реакторного цеха».

Проблемы использования высокотемпературных сорбентов в системе СВО-1.

В отчете по экспериментальному исследованию влияния установки СВО-1 на радиационную обстановку в первом контуре ВВЭР-1000 на головном энергоблоке Запорожской АЭС был сделан вывод, что эффективность работы ВТФ в процессе эксплуатации падает и их влияние на радиационную обстановку заметно сказывается только в начальный период эксплуатации энергоблоков. Объясняется это тем, что необходимо периодически восстанавливать фильтрующие свойства термостойкого сорбента.

На первом энергоблоке Запорожской АЭС производились экспериментальные водные промывки сорбента, эффективность которых по количеству удаленных из фильтрующего слоя радионуклидов коррозионного происхождения оказалась невысокой. Так, например, после второго периода работы фильтров СВО-1 с промывочной водой было удалено 1,6 из почти 7,5 Ки, т.е. только около 20 % содержащейся на сорбенте активности.

Химическая регенерация сорбента не проводилась ни разу ни на одном из энергоблоков. В то же время о необходимости регенерации или замены сорбента после определенного периода его работы в связи с потерей им сорбционных свойств и снижением эффективности очистки говорит весь опыт фильтрации, в том числе и высокотемпературной.

Процесс фильтрации характеризуется не только чисто механическим задержанием частиц примесей в межзерновом пространстве фильтрующей загрузки. Существенную роль в нем играют процессы сорбции поверхностью зерен фильтрующего материала, особенно для коллоидных частиц. Фильтрация водного теплоносителя на термостойких сорбентах при высоких температурах и низких концентрациях продуктов коррозии, которые при этом часто находятся в коллоидном или растворенном состоянии, характеризуется также процессом сорбции с образованием малорастворимых соединений сорбента с сорбируемым ионом металла. В этом случае водная промывка малоэффективна и для восстановления первоначальных свойств сорбента необходимо проведение химической регенерации или замены на свежий материал.

Основными причинами, по которым химические регенерации сорбента на АЭС с ВВЭР-1000 не проводятся, являются два обстоятельства: неправильный выбор критерия окончания фильтроцикла и неудачная, с точки зрения обеспечения гидравлической загрузки сорбента, конструкция фильтра. В

применяемом ВТФ предусмотрена верхняя гидровыгрузка с помощью специального устройства УГВС, опускаемого внутрь фильтра и перемещаемого вслед за уровнем слоя сорбента в процессе выгрузки (вода для транспортировки сорбента подается снизу). Из-за сложности подобный процесс не был даже опробован ни на одной АЭС, кроме Ровенской.

Что касается фильтроцикла, то первоначально за него был принят рост перепада давления на фильтре на $0,2 \text{ кгс/см}^2$. В то же время процесс высокотемпературной фильтрации характеризуется отсутствием заметного роста гидравлического сопротивления слоя сорбента в силу турбулентного режима течения через него. Критерием окончания фильтроцикла должно служить уменьшение эффективности очистки по радионуклидам коррозионного происхождения, и полное восстановление свойств сорбента должно производиться ежегодно во время останова блока на ремонт.

Так же актуальным остается и вопрос выбора оптимального ВХР теплоносителя первого контура. В ходе экспериментов по использованию высокотемпературных сорбентов на Белоярской АЭС было установлено, что на работу ВТФ отрицательно влияет содержащийся в очищаемой воде гидразин, концентрация которого в очищаемой воде в ходе эксперимента достигала 2 мг/кг . Как сильный восстановитель, гидразин способствует растворению накопленного слоем осадка и смыву его в фильтрат (происходит так называемая «химическая регенерация на ходу»), о чем свидетельствовали результаты анализа слоя сорбентов.

Расчеты показывают, что использование водно-химического режима с постоянным значением рН в ходе кампании на уровне $7,1 \dots 7,2$ может существенно повысить эффективность работы ВТФ и снизить процесс переноса активированных продуктов коррозии.

3.4.2. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы СВО-2

Система очистки продувочной воды первого контура и организованных протечек (ТЕ) предназначена для:

- очистки продувочной воды и организованных протечек первого контура от продуктов коррозии конструкционных материалов, от примесей в ионной форме и радионуклидов;
- вывода из первого контура избыточной щелочности;
- плавного регулирования концентрации аммиака и калия в теплоносителе первого контура;
- вывода из теплоносителя первого контура борной кислоты в конце кампании для ее продления (при низких концентрациях борной кислоты понижение ее концентрации путем водообмена неэффективно).

Функциональная схема системы СВО-2 представлена на рис. 3.6.

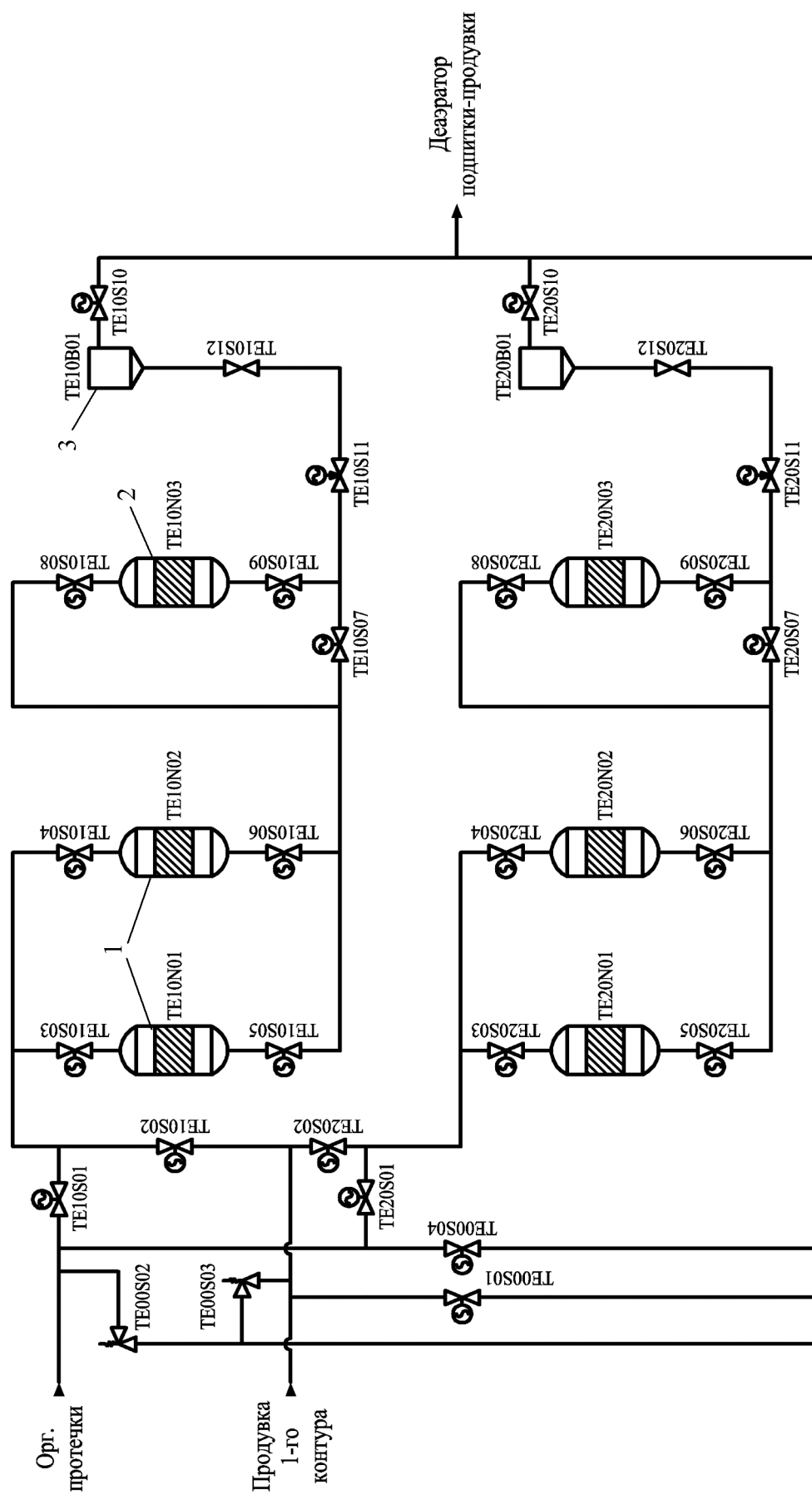


Рис. 3.6. Функциональная схема системы СВО-2:
 1 – катионитовые фильтры; 2 – анионитовый фильтр;
 3 – фильтр-ловушка ионов;

Конструктивно система СВО-2 представляет собой две абсолютно одинаковые цепочки (нити), состоящие из двух параллельно включенных катионитовых фильтров, последовательно включенного анионитового фильтра и фильтра-ловушки ионитов.

Нитки СВО-2 функционально не связаны друг с другом. При номинальном режиме работы энергоблока включается одна нитка системы. В переходных режимах в работу могут быть включены обе нитки параллельно.

Каждая цепочка системы СВО-2 имеет в своем составе два катионитовых фильтра, один анионитовый фильтр и ловушку фильтрующих материалов. Одна цепочка рассчитана на производительность до $30 \text{ м}^3/\text{ч}$. Помещения, где расположено указанное оборудование, относятся к помещениям первой степени по радиационной опасности, вход в них без согласования со службой РБ и предварительной разведки радиационной обстановки запрещен.

Катионит, которым загружены фильтры ТЕ10(20)N01,02, может находиться в H^+ -форме или $\text{NH}_3^+ - \text{K}^+$ -форме. Катионит в H^+ -форме используется для вывода ионов щелочных металлов из теплоносителя первого контура.

Катионит в смешанной аммиачно-калиевой форме используется для поддержания аммиачно-калиевого водного режима теплоносителя первого контура, а также для вывода из теплоносителя примесей в виде катионов и продуктов коррозии.

Анионит, которым загружены анионитовые фильтры, может находиться в BO_3^- -форме или OH^- -форме. Анионит в борной форме применяется для вывода из теплоносителя первого контура примесей в виде анионов (в основном, хлорид-ионов). Анионит в OH^- -форме используется для вывода борной кислоты из теплоносителя первого контура (как правило, в конце топливной кампании при малых значениях концентрации борной кислоты в теплоносителе меньше $0,2 \text{ г/дм}^3$, когда эффективность водообмена очень низка).

Конструкция фильтров системы ТЕ рассчитана на работу при давлении пропускаемой среды 16 кгс/см^2 , что позволяет снизить до минимума выделение водорода из обрабатываемой воды вследствие дегазации теплоносителя и его накопление в корпусе фильтра.

По проекту давление в каждой нитке фильтров поддерживается установленным на выходе из каждой нитки автоматическими регуляторами на уровне 16 кгс/см^2 с точностью $+ 0,4 \text{ кгс/см}^2$. Для предотвращения недопустимого повышения давления перед каждой ниткой до входной арматуры ТЕ10(20)S01,02 установлены предохранительные клапаны ТЕ00S02,03, рассчитанные на давление срабатывания $21,2 \dots 22 \text{ кгс/см}^2$.

Конструкция оборудования системы СВО-2.

Все ионообменные фильтры системы СВО-2 насыпного типа, имеют одинаковую конструкцию и представляют собой вертикальные цилиндрические сосуды наружным диаметром 1000 мм с эллиптическими днищами, опирающимися на цилиндрические опоры. Для проведения проверки и ремонта внутреннего пространства в средней части цилиндрической обечайки фильтров предусмотрен люк-лаз Ду 450. Фильтры имеют два присоединительных патрубка под приварку к трубопроводам. Изготовлены фильтры из нержавеющей стали типа 12Х18Н10Т. Ионообменные фильтры СВО-2 расположены в помещениях обстройки РО. Крышка люка-лаза крепится к горловине люка с помощью шарниров, предназначенных для облегчения открытия крышки. Уплотнение крышки к фланцу люка-лаза производится через щелочнокислотостойкую прокладку шестнадцатью шпильками.

Внутри фильтров имеются верхнее водораспределительное (ВРУ) и нижнее водосборное (НРУ) устройства, служащие для равномерного распределения потока воды по сечению фильтра.

ВРУ – лучевого типа, состоит из шести отглушенных с одного конца перфорированных труб Ду 50 (диаметр перфорации 8 мм), присоединенных сваркой к центральному коллектору Ду 150 и через кронштейны – к стенке корпуса фильтра.

НРУ – дренажного типа, состоит из центрального коллектора Ду 250 и из двух полуколлекторов Ду 80. На полуколлекторах размещены перфорированные трубы, отверстия в которых перекрыты полукожухами с щелями размером 0,25 мм. НРУ служит для отвода очищенной воды и предотвращения выхода загрузочного материала в фильтрат. НРУ выдерживает нагрузку, возникающую за счет уплотнения фильтрующего материала при перепадах давления на фильтре до 0,8...1 кгс/см².

Все фильтры имеют штуцера Ду 32х3,2 под воздушники, которые заведены в камеру сдувок. Камера сдувок представляет собой герметичный бокс со стеклянной передней стенкой. Газовые сдувки выходят в помещение через аэрозольные фильтры из ткани Петрянова, установленные на камере. Вода, поступающая через воздушники в камеру сдувок, стекает по трубопроводу в бак оргпротечек.

Для загрузки фильтрующего материала в конструкции фильтра предусмотрен загрузочный люк Ду100, который представляет собой трубу Ду108х5 с фланцем под плоскую крышку, которая уплотняется через щелочнокислотостойкую прокладку шестью шпильками М20х2. Загрузочные люки фильтров ТЕ10(20)N01,02,03 выведены на отметку 6,6 м в помещение А-326 и закрыты защитными плитами. Срок службы корпуса фильтра не менее 30 лет.

Конструкция ионообменного фильтра системы СВО-2 представлена на рис. 3.7.

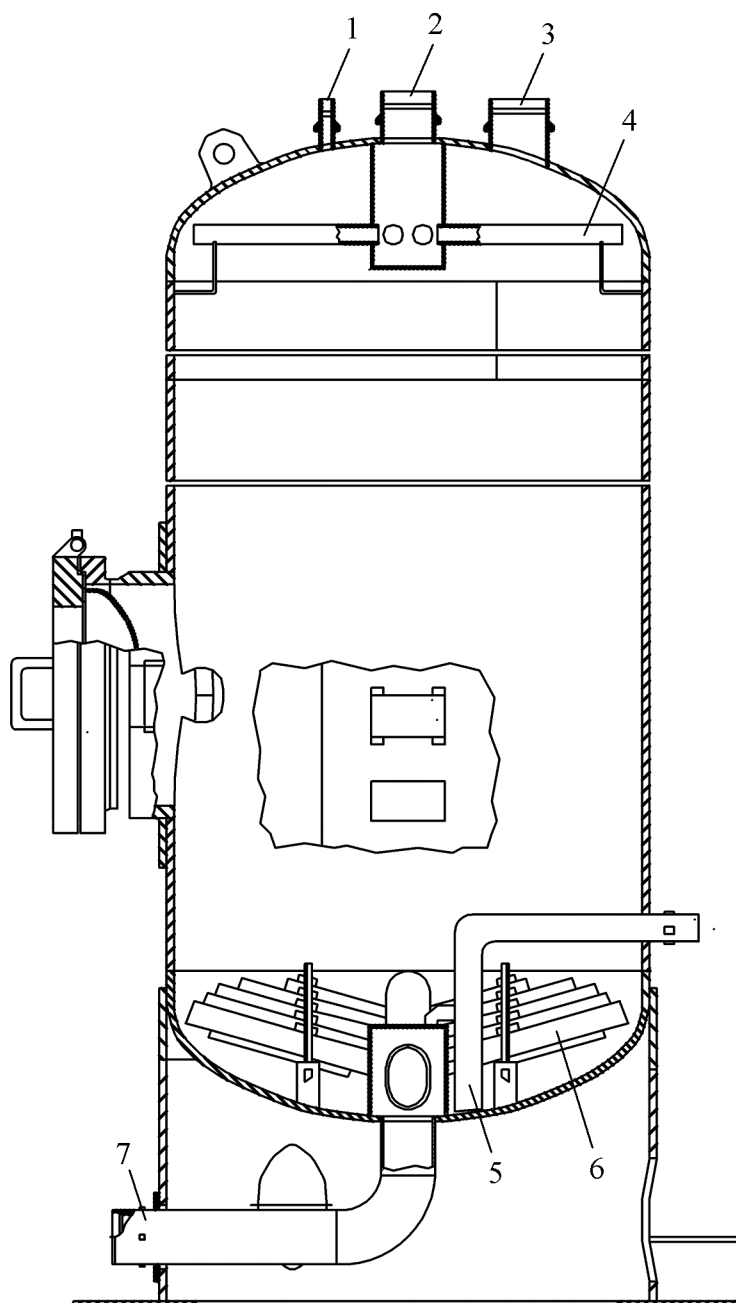


Рис. 3.7. Ионообменный фильтр системы СВО-2:
1 – воздушник; 2 – вход очищаемой воды; 3 – гидрозагрузка; 4 – ВРУ;
5 – гидровыгрузка; 6 – НРУ; 7 – выход очищенной воды

Ловушка ионитов предназначена для улавливания ионообменных материалов фильтров СВО-2 в случае повреждения НРУ фильтров и представляет собой цилиндрический вертикальный сосуд, опирающийся на юбочную опору.

Сосуд состоит из двух частей раздельного исполнения с вынимаемой группой фильтрующих элементов. Нижняя часть включает цилиндрический кожух, эллиптическое днище и фланец, верхняя часть – эллиптическое днище

и фланец. Верхняя и нижняя части соединены с помощью шпилек. Трубная доска с 12-ю фильтрующими элементами закреплена между фланцевыми соединениями с помощью специальных пружин.

Фильтрующим элементом служит заглушенная с одного торца ребристая труба диаметром 54 мм длиной 1023 мм, по 24 образующим которой расположены отверстия диаметром 4 мм и шагом 50 мм. Количество отверстий в каждом фильтрующем элементе 492 шт. На ребристой трубе по всей ее длине по винтовой линии шагом 0,9 мм нарезана спиральная канавка глубиной 0,4 мм; по этой канавке намотана проволока диаметром 0,8 мм. Проволока обеспечивает ширину щели 0,1 мм и закрепляется точечной сваркой.

Фильтрующие элементы закреплены в трубной доске с помощью гаек. В случае неисправности фильтрующего элемента предусмотрена его замена. Штуцера сосуда имеют необходимую для приварки присоединительных трубопроводов разделку кромок. Герметичность фланцевых соединений обеспечивается щелочекислотостойким уплотнением.

Основы эксплуатации системы СВО-2.

Ввод в работу.

1. Воздухоудаление из фильтров. Открываются клапаны подачи воды на фильтры, вручную устанавливается давление в нитке 10...12 кгс/см² и открываются воздушники.

2. Перевод АФ в BO_3^- -форму осуществляется по согласованию с контролирующим персоналом ОЯБ перед выходом реактора на МКУ. Это связано с тем, что при насыщении фильтра борной кислотой снижается ее концентрация в теплоносителе, и насыщение фильтра после достижения критической концентрации борной кислоты привело бы к высвобождению положительной реактивности. Как правило, при концентрации борной кислоты выше пускового интервала (т.е. менее $C_{\text{критич.}} + 1 \text{ г/дм}^3$) приступают к насыщению АФ одной нитки СВО-2 борной кислотой. Для этого:

- устанавливается расход продувочной воды 20...30 м³/ч;
- подключаются в работу КФ и АФ СВО-2;
- производится водообмен в фильтрах с целью замены ХОВ на раствор борной кислоты;
- контролируется концентрация борной кислоты до и после АФ. После достижения разницы между концентрациями борной кислоты в теплоносителе первого контура и на выходе АФ менее 0,1 г/дм³ считается, что АФ переведен в борную форму и фильтр остается в работе.

3. Перевод КФ в $\text{NH}_3^+ - \text{K}^+$ -форму.

После выхода реактора на МКУ по согласованию с контролирующим персоналом ОЯБ приступают к переводу одного КФ одной из ниток СВО-2 в аммонийно-калиевую форму. Для этого:

- проверяются на соответствие требованиям концентрации рабочих растворов аммиака и гидроксида калия, а также их уровни в расходных баках системы ТВ-20;

- проводится химический контроль рабочих растворов реагентов на содержание в них ионов натрия и хлоридов;

- включаются насосы-дозаторы аммиака и гидроксида калия и растворы подаются во всасывающий коллектор подпиточных агрегатов с периодичностью дозирования два раза в смену;

- не допускается повышение концентрации калия в теплоносителе первого контура более $19,5 \text{ мг/дм}^3$ и аммиака более 30 мг/дм^3 , общее количество поглощенной гидроксида калия не должно превышать 35 кг на 1 м^3 катионита в пересчете на стопроцентный продукт;

- при вводе реагентов контролируется величина рН в подпиточной воде, измеренная при температуре пробы 25°C , концентрация аммиака, калия, борной кислоты до и после КФ с периодичностью не реже одного раза в смену;

- при достижении суммарной молярной концентрации ионов щелочных металлов после КФ, соответствующей значению, зависящему от текущей концентрации борной кислоты в теплоносителе, дозировка гидроксида калия прекращается;

- после выравнивания концентрации аммиака и калия до и после КФ, процесс перевода фильтра в аммонийно-калиевую форму считается законченным, разница концентрации аммиака до и после фильтра не должна превышать 5 мг/дм^3 .

Общее время перевода КФ в $\text{NH}_3^+ - \text{K}^+$ -форму должно составлять не более 7 суток после начала работы реактора, т.к. через 7 суток реактор может быть выведен на номинальный уровень мощности при стационарном отравлении реактора ксеноном.

АФ и КФ одной нитки СВО-2, переведенные в борную и аммонийно-калиевую формы, остаются в работе, фильтры второй нитки в OH^- и H^+ -формах находятся в резерве.

Контроль за работой СВО-2.

При нормальной работе энергоблока постоянно производится продувка первого контура с расходом $10 \dots 30 \text{ м}^3/\text{ч}$. Продувочная вода охлаждается в регенеративном охладителе продувки за счет регенеративного теплообмена с подпиточной водой и доохладителе продувки водой промконтура до температуры $40 \dots 50^\circ\text{C}$. Затем продувочная вода направляется на СВО-2 через регулирующие клапаны продувки. После СВО-2 очищенная вода подается в деаэратор подпитки ТК10В01 и далее – на всас подпиточных насосов.

Организованные протечки поступают в бак оргпротечек, откуда насосами оргпротечек они могут направляться через фильтры СВО-2 (или по байпасу СВО-2) в деаэратор подпитки. По проекту была предусмотрена постоянная работа насоса оргпротечек с автоматическим поддержанием уровня в баке оргпротечек. Однако после замены щелевых уплотнений подпиточных насосов на торцевые из-за уменьшения расхода оргпротечек (с 16 до примерно 1 м³/ч) постоянная работа насосов оргпротечек стала невозможна, и теперь они автоматически включаются при заполнении бака оргпротечек и отключаются после его откачки.

В связи с этим стала проблематичной постоянная очистка воды оргпротечек, так как система СВО-2 не может работать в импульсном режиме возобновления и прекращения подачи воды оргпротечек на очистку. Организованные протечки из бака оргпротечек стали направлять по байпасу фильтров СВО-2 (через арматуру ТЕ00S04) в деаэратор подпитки. В настоящее время на блоках АЭС реализуется техническое решение по замене высоконапорных насосов системы организованных протечек типа Х45/240-К-2Г на низконапорные типа Х80/50-250К-55-2У.

Расход подаваемой на очистку в СВО-2 воды регулируется клапанами продувки первого контура, а давление в системе СВО-2 поддерживается на уровне 16 кгс/см² работой регуляторов путем дросселирования. Вследствие этого определенную опасность представляет режим резкого прекращения расхода через СВО-2 и неоткрытия байпаса ТЕ00S01 при работающей продувке первого контура. В этом случае может произойти подъем давления в СВО-2 до уставки срабатывания предохранительных клапанов. При несрабатывании этих клапанов произойдет дальнейший рост давления и опрессовка СВО-2 давлением первого контура 160 кгс/см².

Из двух параллельных ниток системы ТЕ10, 20 в работе постоянно находится одна нитка фильтров. Вторая нитка должна находиться в резерве, готовая к включению в работу. Включение второй нитки в работу совместно с первой производится в режиме увеличения расхода продувки первого контура до величины более 30 м³/ч. Также резервная нитка включается в работу в случае вывода рабочей нитки на регенерацию или ремонт.

При посадке пневмоотсечной арматуры продувки происходит прекращение расхода продувки и уменьшение давления в системе ТЕ перед регулирующим клапаном ТЕ10(20)S11. Клапан начинает прикрываться, стараясь удерживать номинальное давление в системе. При последующем открытии пневмоотсечной арматуры происходит резкое увеличение давления в системе ТЕ, вплоть до срабатывания предохранительных клапанов ТЕ00S02(03).

Для исключения срабатывания предохранительных клапанов ТЕ00S02(03) при посадке пневмоотсечной арматуры необходимо вывести

из автоматического режима регулятор расхода продувочной воды и закрыть регулирующие клапаны продувки, вывести из автоматического режима регулятор давления ТЕС10(20) и открыть регулирующий клапан ТЕ10(20)S11. После этого нужно открыть пневмоотсечную арматуру продувки и, открывая регулирующий клапан продувки, установить необходимый расход продувки. Регулятор расхода продувочной воды поставить в автоматический режим. Далее, прикрывая регулирующий клапан ТЕ10(20)S11, следует установить номинальное давление в системе и регулятор ТЕС10(20) поставить в автоматический режим.

При эксплуатации системы СВО-2 контролируются перепады на фильтрах работающей цепочки. Они не должны превышать:

- для катионитового фильтра $1,0 \text{ кгс/см}^2$;
- для анионитового фильтра $0,8 \text{ кгс/см}^2$;
- для фильтра-ловушки $0,5 \text{ кгс/см}^2$.

Превышение указанных перепадов может привести к разрушению нижних водосборных устройств фильтров и, в конечном итоге, к выносу ионообменной смолы в первой контур. Повышение перепадов давления происходит из-за слеживания засыпки и разрушения ионитов до нерабочих фракций смолы с диаметром менее $0,3 \text{ мм}$.

При введении в работу какой-либо нитки системы СВО-2 после ремонта, регенерации или резерва запрещается сброс воды в деаэратор подпитки без проведения предварительного химического анализа ее на содержание продуктов коррозии, ионов натрия и хлора. До получения результатов химических анализов сброс очищенной воды ведется в систему спецканализации с расходом не более $5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Также нельзя допускать передозировку аммиака в подпиточную воду. В этом случае превышение концентрации аммиака приводит к вымыванию калия из КФ, находящегося в аммиачно-калиевой форме. Это, в свою очередь, ведет к резкому повышению концентрации щелочных металлов в теплоносителе первого контура. Для оперативного устранения нарушения необходимо ввести в работу КФ, находящийся в H^+ -форме. Это позволит поглотить избыток калия из теплоносителя и одновременно снизить величину рН теплоносителя, т.к. катионит будет эквивалентно отдавать в очищаемый теплоноситель ионы водорода, в результате чего нейтрализуется избыточная щелочность.

Особенности взрыхления и регенерации фильтров СВО-2.

С целью снижения перепадов на фильтрах СВО-2 (или перед регенерацией, для увеличения ее эффективности) производится взрыхляющая отмывка фильтрующей загрузки обратным током. Для этого производят подачу промывочной воды с расходом для КФ не более $8 \text{ м}^3/\text{ч}$, для АФ – не более $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ с отводом через линию верхней гидровыгрузки.

При этом ключевым моментом является необходимость визуального контроля отсутствия выноса рабочих функций ионита (диаметром более 0,3 мм) путем отбора проб из воздушника, иначе вместо взрыхляющей отмывки может быть произведена гидровыгрузка. Критерием окончания отмывки обратным током является достижение прозрачности отмывочной воды более 85 % и отсутствии выноса нерабочих фракций ионита.

Отключение на регенерацию рабочей нитки фильтров (для восстановления обменных свойств катионита и анионита в случае их насыщения) производится при достижении любого из следующих показателей:

- увеличении величины рН свыше 6,5 единиц на выходе КФ при совместной работе катионитового и анионитового фильтров;
- содержании ионов натрия после КФ более 1 мг/дм³;
- содержании продуктов коррозии после КФ более 0,2 мг/дм³;
- содержании хлорид-ионов после АФ более 0,1 мг/дм³.

Регенерация КФ также производится в том случае, когда требуется вывод из контура избытка щелочных металлов, а катионит находится в аммиачно-калиевой форме, и когда необходимо перевести катионит в Н⁺-форму.

Регенерация анионитовых фильтров также проводится в случае необходимости перевода АФ из борной формы в гидроксильную для эффективного вывода борной кислоты из контура в конце кампании.

Регенерация фильтров СВО-2 является очень ответственной операцией, так как она проводится непосредственно в корпусах фильтров, при этом может произойти ошибочное поступление регенерационных растворов в подпиточную воду и резкое ухудшение ВХР первого контура.

Перед проведением регенерации инструкция по эксплуатации СВО-2 однозначно требует вывода этой цепочки из работы и разборки электрических схем арматуры TE10(20)S01...10,13,14 в закрытом положении с проверкой по месту.

Для КФ регенерация производится подачей 5-процентного раствора азотной кислоты, соли которой хорошо растворимы и не образуют накипи. Регенерация АФ осуществляется подачей пятипроцентного раствора КОН. Регенерационные растворы подаются с расходом 5 м³/ч в течение одного часа для всех фильтров. Регенерация анионита в СВО-2 в силу жестких требований по содержанию хлорид-иона в воде первого контура должна производиться гидроксидом калия высшего качества, содержание хлоридов в котором не превышает 1%.

Процесс регенерации завершается отмывкой фильтра, необходимой для удаления из межзеренного пространства слоя остатков регенерационного раствора и продуктов регенерации. Для этого после одного часа с начала регенерации производится отключение насосов-дозаторов КОН (HNO₃) и расход промывочной воды увеличивается до 10 м³/ч. Отмывка

фильтров водой собственных нужд проводится до достижения следующих показателей:

- КФ: рН более 4,5 ед., жесткость менее 1 мкг-экв/кг;
- АФ: рН менее 9,0; концентрация хлорид-ионов менее 0,05 мг/кг.

Продолжительность отмывки после регенерации не должна превышать трех часов, в противном случае необходимо повторить регенерацию.

Основанием отмывки фильтра-ловушки является перепад давления на нем более 1,5 кгс/см². Отмывка производится обратным током промывочной воды в течение 5...10 мин. По окончании регенерации ионитовых фильтров и отмывки фильтра-ловушки нитка СВО-2 переводится в резерв.

Расчет расхода реагентов на регенерацию фильтров СВО-2.

1. Количество 100-процентной азотной кислоты, требуемой для одной регенерации Н⁺-катионитового фильтра, определяется следующим образом:

$$C_{100\%}^{\text{к}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h \cdot E \cdot y}{4 \cdot 1000}, \quad (3.16)$$

где $C_{100\%}^{\text{к}}$ – количество 100-процентной азотной кислоты, кг;

d – диаметр фильтра, м;

h – высота слоя катионита в фильтре, м;

E – обменная работа емкости катионита при Н⁺-катионировании; для катионита КУ-2-8 час $E = 1300$ г-экв/м³;

y – удельный расход 100-процентной азотной кислоты на регенерацию, равный 150 г/г-экв;

1000 – переводной коэффициент рассчитываемой величины в кг.

2. Объем 100-процентной азотной кислоты для регенерации

$$V_{100\%}^{\text{к}} = \frac{C_{100\%}^{\text{к}}}{\rho_{100\%}}, \quad (3.17)$$

где $V_{100\%}^{\text{к}}$ – объем 100-процентной азотной кислоты, л;

$\rho_{100\%}$ – плотность 100-процентной азотной кислоты, $\rho = 1,522$ г/см³.

3. При любой концентрации азотной кислоты ее необходимый объем рассчитывается по формуле

$$V_1 = \frac{\rho_{100\%} \cdot 100}{\rho_1 \cdot C_1} \cdot V_{100\%}^{\text{к}} \text{ (л)}, \quad (3.18)$$

где ρ_1 – текущее значение плотности азотной кислоты, г/см³;

C_1 – текущее процентное содержание азотной кислоты при данной плотности.

4. Необходимый объем дистиллята для приготовления 5-процентного раствора азотной кислоты

$$V_{\text{дист}} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2 - 1} \cdot V_1 = \frac{\rho_1 - 1,027}{1,027 - 1} \cdot V_1 = \frac{\rho_1 - 1,027}{0,027} \cdot V_1 \text{ (л)}, \quad (3.19)$$

где ρ_1 – текущее значение плотности азотной кислоты, г/см³;

ρ_2 – плотность 5-процентного раствора азотной кислоты, равная 1,027 г/см³.

1 – плотность дистиллята, г/см³.

Пример 1. Расчет необходимого количества азотной кислоты на регенерацию Н⁺-катионитового фильтра СВО-2. Диаметр фильтра 1 м, высота слоя катионита 1,5 м.

Необходимое количество 100-процентной азотной кислоты составит

$$C_{100\%}^{\text{к}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h \cdot E \cdot y}{4 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 1,0^2 \cdot 1,5 \cdot 300 \cdot 150}{4 \cdot 1000} = 229,6 \text{ кг.}$$

Объем 100-процентной кислоты

$$V_{100\%}^{\text{к}} = \frac{229,6}{1,522} = 150 \text{ л.}$$

Как правило, на АЭС поставляется 40-процентная азотная кислота. Ее плотность составляет 1,251 г/см³. Следовательно, объем 40-процентного раствора азотной кислоты, необходимого для регенерации, составит

$$V_{40\%}^{\text{к}} = \frac{1,522 \cdot 100}{1,251 \cdot 40} \cdot 150 = 456 \text{ л.}$$

Для приготовления 5-процентного раствора азотной кислоты необходимо заполнить расходный бак 456 л 40-процентной азотной кислотой с помощью насоса-дозатора. После этого нужно добавить в бак требуемое количество дистиллята

$$V_{\text{дист}} = \frac{1,251 - 1,027}{0,027} \cdot 456 = 3783 \text{ л.}$$

Пример 2. Расчет необходимого количества гидроксида калия на регенерацию ОН⁻-анионитового фильтра СВО-2. Диаметр фильтра 1 м, высота слоя анионита 1,5 м.

Необходимое количество 100-процентного гидроксида калия составит

$$C_{100\%}^{\text{ш}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h \cdot E \cdot y}{4 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 1,0^2 \cdot 1,5 \cdot 900 \cdot 200}{4 \cdot 1000} = 211,95 \text{ кг},$$

где 900 – обменная работа емкости анионита, г-экв/м³;

200 – удельный расход 100-процентного КОН на регенерацию, г/г-экв.

Как правило, на АЭС поставляется 24-процентный гидроксид калия. Его плотность составляет 1,217 г/см³. Следовательно, объем 24-процентного раствора гидроксида калия, необходимого для регенерации, составит

$$V_{24\%}^{\text{ш}} = \frac{1,616 \cdot 100}{24 \cdot 1,217} \cdot \frac{211,95}{1,616} = 725,65 \text{ л.}$$

Для приготовления 5-процентного раствора КОН необходимо заполнить расходный бак 725,65 л 24-процентным гидроксидом калия с помощью насоса-дозатора. После этого нужно добавить в бак требуемое количество дистиллята

$$V_{\text{дист}} = \frac{1,217 - 1,040}{1,040 - 1} \cdot 725,65 = 3211 \text{ л.}$$

3.4.3. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы СВО-4

Система очистки вод бассейнов выдержки и перегрузки топлива и баков аварийного запаса борной кислоты (ТМ) предназначена для осветления и химической очистки вод бассейна выдержки и перегрузки топлива, бака аварийного запаса борной кислоты, дренажных вод с пола боксов, сливающихся в баки системы аварийного охлаждения активной зоны реактора.

Основные показатели среды после очистки в системе СВО-4:

1. Для бака аварийного запаса борной кислоты:

- концентрация борной кислоты 16...20 г/дм³;
- значение рН не менее 4,3 ед.;
- концентрация хлоридов не более 0,15 мг/дм³.

2. Для бассейнов выдержки и перегрузки:

- концентрация борной кислоты 16...20 г/дм³;
- значение рН не менее 4,2 ед.;
- концентрация хлоридов не более 0,1 мг/дм³;
- концентрация фторидов не более 0,1 мг/дм³;
- концентрация железа не более 0,1 мг/дм³;
- концентрация общего органического углерода не более 0,1 мг/дм³;
- прозрачность не менее 95%.

Система СВО-4 состоит из двух ниток фильтров, в каждую из которых

входят механический, катионитовый, анионитовый фильтры и фильтр-ловушка зернистых материалов. Кроме того, в состав системы входят четыре бака слива вод бассейна перегрузки и выдержки и три насоса.

Функциональная схема системы ТМ представлена на рис. 3.8.

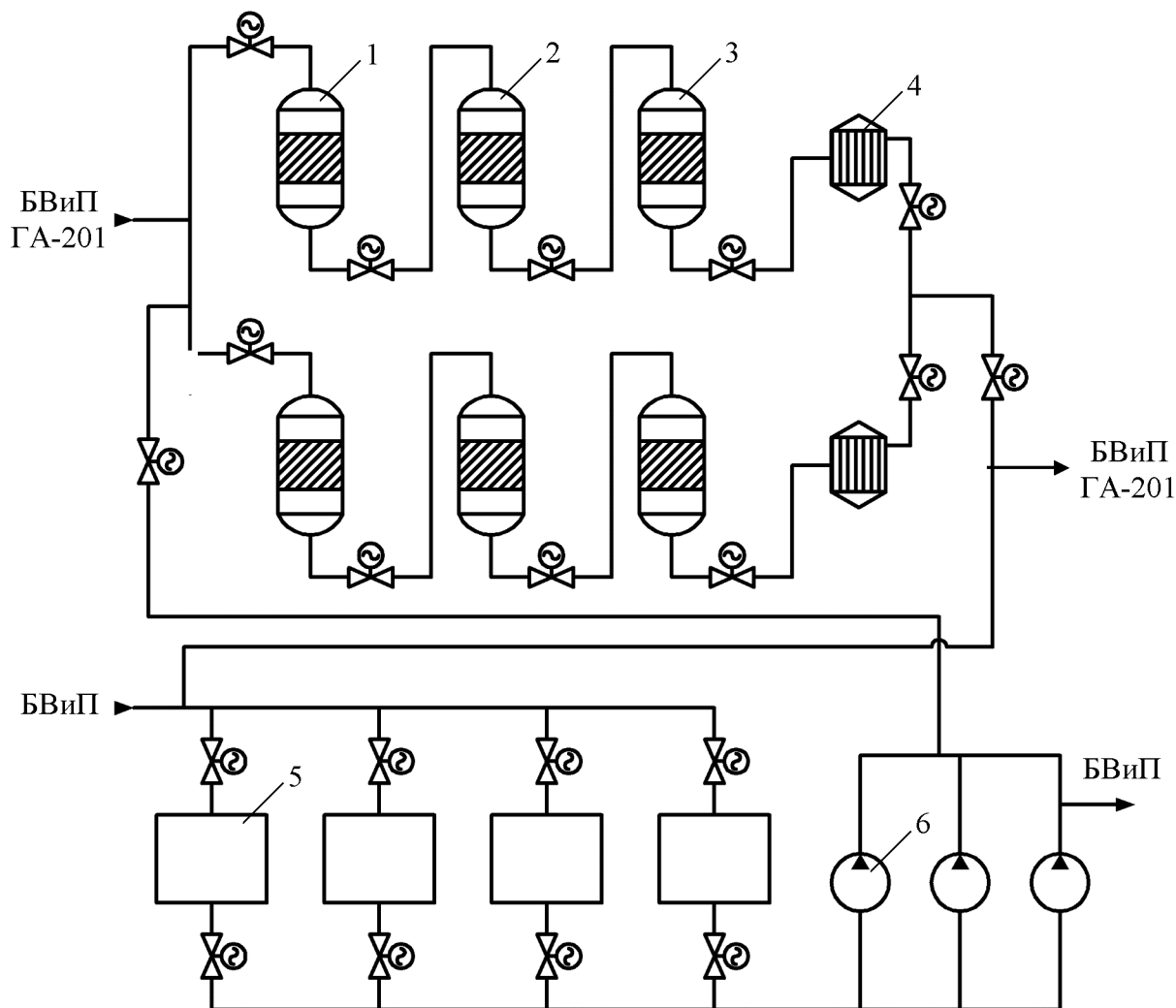


Рис. 3.8. Функциональная схема системы СВО-4:

- 1 – механический фильтр; 2 – катионитовый фильтр; 3 – анионитовый фильтр;
4 – фильтр-ловушка зернистых материалов; 5 – бак слива вод бассейна перегрузки; 6 – насос бака слива вод бассейна перегрузки

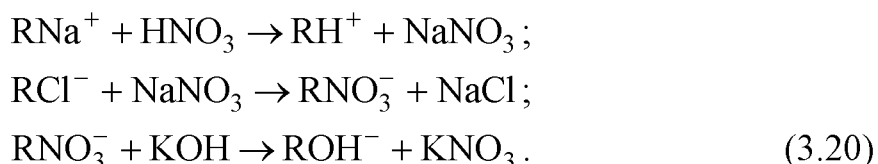
Механический фильтр предназначен для очистки воды от мелко- и крупнодисперсных механических примесей. Регенерация катионита осуществляется 5-процентным раствором азотной кислоты.

Катионитовый фильтр предназначен для очистки вод от ионов кальция, магния и натрия. Регенерация также осуществляется 5-процентным раствором азотной кислоты.

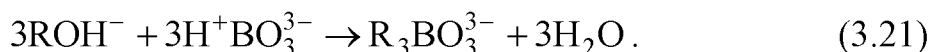
Анионитовый фильтр предназначен для очистки воды, в основном, от ионов хлора. При истощении ионообменной емкости фильтрующего мате-

риала производится его регенерация 5-процентным раствором гидроксида калия. В целях проведения более глубокой регенерации на практике применяется трехступенчатая регенерация АФ. В этом случае через анионит сначала пропускается послерегенерационный раствор КФ, после чего – непосредственно раствор гидроксида калия.

Процесс регенерации можно представить следующим образом



После включения в работу АФ для очистки борсодержащей воды анионит автоматически переходит в борную форму



Но так как поглощение ионов зависит от их электрохимической подвижности и происходит согласно ряду активности анионов $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{H}_2\text{SiO}_3^{2-} > \text{BO}_3^{3-}$, то при примерно равной концентрации ионов в растворе каждый предыдущий ион поглощается более активно, чем последующий, и вытесняет его с матрицы радикала. Очистка ведется до проскока ионов хлора после анионитового фильтра.

Фильтр-ловушка зернистых материалов предназначен для предотвращения попадания ионообменной смолы в технологический цикл при разрушении нижней дренажной системы АФ.

Порядок работы системы СВО-4.

Система СВО-4 предусматривает следующие режимы работы:

- слив воды бассейнов перегрузки в баки;
- очистка вод бассейнов выдержки топлива;
- очистка вод бака аварийного запаса раствора борной кислоты РО;
- очистка вод баков слива вод бассейна перегрузки;
- заполнение водой из баков бассейнов перегрузки и выдержки реакторного отделения.

Каждый из вышеперечисленных режимов работы системы предусматривает сборку конкретной схемы работы, то есть переключение соответствующей арматуры.

В период нормальной эксплуатации оперативный персонал СВО-4 осуществляет:

- контроль технологических параметров работы оборудования системы;
- контроль состояния работающего оборудования путем проведения периодических осмотров, но не реже, чем через каждые два часа;

- заполнение суточных ведомостей с подсчетом количества очищенной воды за смену и за сутки;
- переход на резервную нитку СВО-4 в случаях необходимого ремонта или проведения ППР.

При работе системы контролируются следующие параметры:

- давление нагнетания насоса 5 кгс/см^2 ;
- расход очищаемой воды $40 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- температура воды перед фильтрами до $50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- перепад давления на МФ $0,1 \dots 1,0 \text{ кгс/см}^2$;
- перепад давления на КФ $0,1 \dots 0,8 \text{ кгс/см}^2$;
- перепад давления на АФ $0,1 \dots 0,6 \text{ кгс/см}^2$;
- перепад давления на ФЛ $0,1 \dots 0,3 \text{ кгс/см}^2$;
- прозрачность воды после МФ не менее 95 %;
- рН после КФ не более 7,0;
- рН после АФ не менее 5,0;
- концентрация ионов хлора не более $0,05 \text{ мг/дм}^3$;
- концентрация борной кислоты $16 \dots 20 \text{ г/дм}^3$.

Техническое обслуживание системы СВО-4.

Останов и техническое обслуживание оборудования СВО-4 производится после окончания операций по заполнению (опорожнению) бассейнов перегрузки и выдержки РО, очистки вод баков аварийного запаса борной кислоты РО, бассейнов выдержки топлива или баков слива вод бассейна перегрузки, а также при обнаружении дефектов на оборудовании системы и необходимости его вывода в ремонт.

В период ППР на оборудовании системы проводятся следующие основные операции:

- взрыхляющая отмывка фильтрующего материала;
- регенерация и отмывка фильтров;
- промывка ФЛ;
- замена фильтрующего материала.

Взрыхление МФ производится при наличии одного из следующих условий:

- в фильтр загружен новый фильтрующий материал;
- перепад давления на МФ более $0,8 \text{ кгс/см}^2$;
- прозрачность воды после МФ менее 95 %.

Основанием для взрыхления КФ и АФ является наличие одного из следующих условий:

- в фильтр загружен новый фильтрующий материал;
- перепад давления на КФ более $1,5 \text{ кгс/см}^2$ (на АФ более $1,2 \text{ кгс/см}^2$).

Взрыхляющая отмывка фильтрующих материалов производится обратным током водой до достижения прозрачности после фильтров 95 %.

Отмывка МФ проводится в течение не более 1,5 ч (КФ и АФ – не более 1 ч каждый).

Особенности регенерации и отмывки МФ (КФ).

Регенерация и отмывка МФ производится при наличии одного из следующих условий:

- в фильтр загружен новый фильтрующий материал, находящийся в солевой форме;
- необходима регенерация КФ.

Регенерация КФ производится при наличии одного из следующих условий:

- рН после КФ более 6;
- концентрация ионов натрия после КФ более 1,0 мг/кг.

Регенерация МФ (КФ) производится пропуском 5-процентного раствора азотной кислоты в течение 1 ч. После этого начинается отмывка фильтров. Отмывка производится по цепочке МФ-КФ-АФ. Через каждый час отмывки осуществляется анализ проб МФ (КФ) на рН, концентрацию ионов натрия и кислотность. При необходимости проведения регенерации АФ после достижения кислотности после КФ 500 мкг-экв/кг послерегенерационная отмывка прекращается. При отсутствии необходимости проведения регенерации АФ отмывка МФ (КФ) производится до достижения после каждого фильтра следующих показателей:

- рН более 4,5;
- концентрация ионов натрия менее 1,0 мг/кг;
- кислотность 100 мкг-экв/кг.

Особенности регенерации и отмывки АФ.

Регенерация АФ производится при наличии одного из следующих условий:

- рН после АФ менее 3,8;
- концентрация ионов хлора после АФ более 0,1 мг/кг.

Регенерация производится в следующей последовательности:

1. Проводится взрыхляющая промывка фильтра.
2. Осуществляется пропуск 5-процентного раствора азотной кислоты последовательно через КФ, затем – через АФ.
3. АФ промывается водой.
4. Осуществляется пропуск 5-процентного раствора КОН в течение одного часа.
5. Осуществляется пропуск промывочной воды через АФ с расходом 10 м³/ч.

После каждого часа отмывки осуществляется отбор проб на анализ после АФ на рН, концентрацию ионов натрия, хлора и щелочность. Отмывка прекращается при достижении следующих показателей:

- рН = 8,2;
- концентрация ионов натрия менее 1,0 мг/дм³;
- концентрация ионов хлора менее 0,1 мг/дм³;
- щелочность менее 100 мкг-экв/дм³.

После окончания отмывки фильтров нитка СВО-4 вводится и работу или выводится в резерв.

3.4.4. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы реагентного хозяйства

Система реагентного хозяйства (ТВ-20) предназначена для хранения и дозировки в теплоноситель первого контура необходимых реагентов (аммиака, гидразин-гидрата и гидроксида калия) с целью поддержания водно-химического режима при нормальной эксплуатации и его изменения в зависимости от режима работы РУ.

Подгруппа аммиака NH₃ предназначена для хранения и дозировки в первый контур аммиака с целью получения в результате его радиолиза водорода и поддержания концентрации этого водорода в заданных пределах в зависимости от тепловой мощности реактора. Этот избыток водорода позволит связать кислород в теплоносителе первого контура до нормируемых пределов.

Подгруппа гидразин-гидрата N₂H₄ предназначена для хранения и дозировки в первый контур раствора гидразин-гидрата с целью связывания избыточного кислорода.

Подгруппа гидроксида калия КОН предназначена для хранения и дозировки в первый контур раствора указанной щелочи с целью поддержания рН теплоносителя первого контура в заданных пределах в зависимости от текущей концентрации борной кислоты в первом контуре.

Функциональная схема системы ТВ-20 представлена на рис. 3.9.

Состав системы ТВ-20.

1. Баки ТВ21,22,23В01 – цилиндрические емкости, изготовленные из нержавеющей стали:

- ТВ21В01 – бак 3%-го раствора аммиака, рабочий объем 3,8 м³;
- ТВ22В01 – бак 3%-го раствора гидразина, рабочий объем 1,3 м³;
- ТВ23В01 – бак 3%-го раствора гидроксида калия, рабочий объем 3,8 м³.

2. Насосы ТВ20D01...04 типа НД 0,5Э 100/10 К13А – поршневые с регулируемой (дистанционно, автоматически, вручную) подачей. Производительность 100 дм³/ч, напор 10 кгс/см².

3. Насос ТВ20D05 типа НД 25/250 ДА. Подача 25 дм³/ч, напор 250 кгс/см², поршневой с регулируемой (при остановленном насосе) подачей.

4. Арматура и трубопроводы.

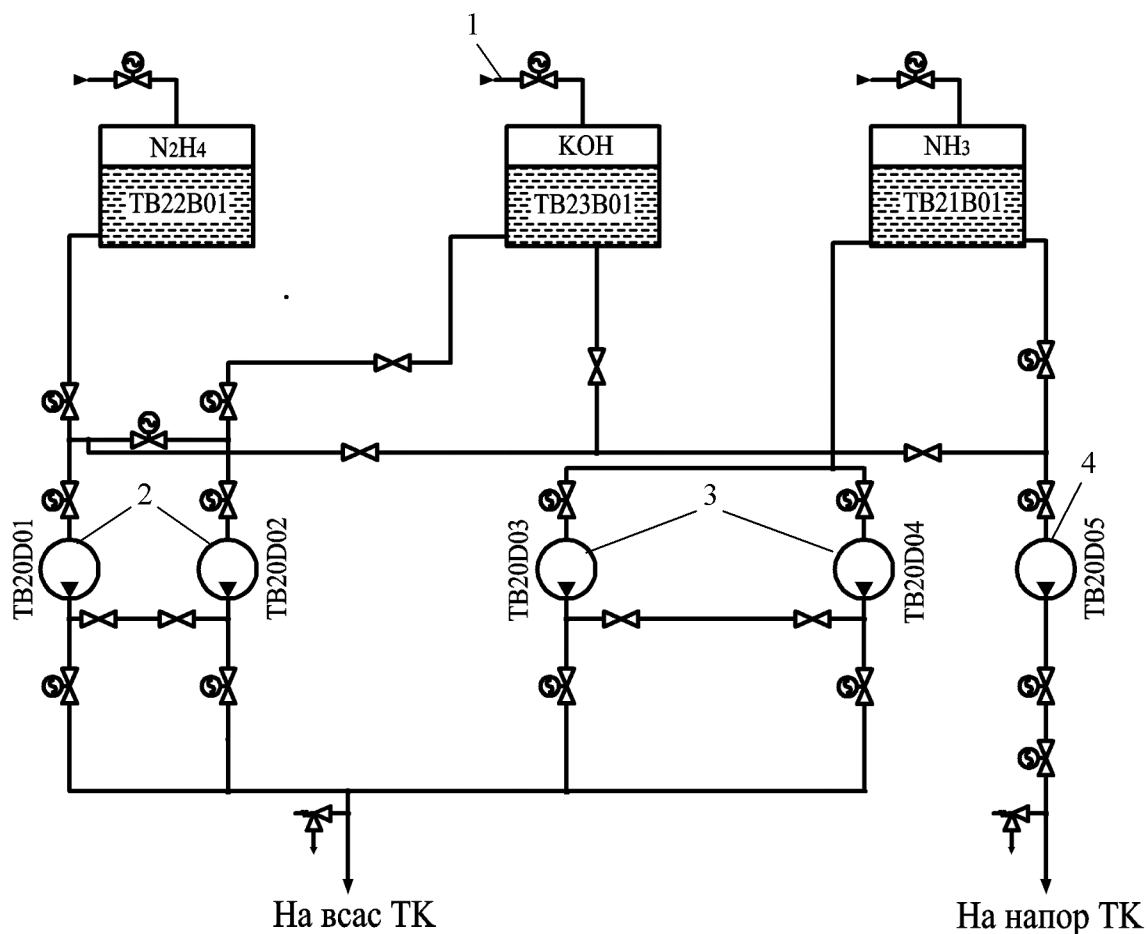


Рис. 3.9. Функциональная схема системы ТВ-20:
1 – заполнение баков; 2 – насосы-дозаторы гидразин-гидрата
и гидроксида калия; 3,4 – насосы-дозаторы аммиака

Нужно отметить, что насосы химических реагентов TB20D01...04 осуществляют подачу среды на всас подпиточных насосов, а насос TB20D05 согласно проекту предназначен для подачи смеси аммиака и гидразин-гидрата на напор насосов. Это связано с тем, что первоначально на основных подпиточных насосах были установлены щелевые уплотнения, имеющие значительные протечки, которые сливались в бак организованных протечек. Это приводило к «размазыванию» реагентов по другому оборудованию и увеличению времени доставки реагентов в первый контур. После того, как щелевые уплотнения были заменены на торцевые, величина протечек значительно уменьшилась и необходимость подавать реагенты на напор подпиточного насоса исчезла. В настоящее время насос TB20D05 находится в резерве и практически не используется.

Основы эксплуатации системы ТВ-20.

Рабочие растворы реагентов готовятся в химическом цехе. После проверки концентрации реагентов и содержания хлорид-ионов растворы по-

ступают на заполнение соответствующих расходных баков системы. В расходных баках после приема реагентов также должна производиться проверка концентрации реагентов и содержание в них хлорид-ионов. При удовлетворительных результатах анализов в баках (концентрация реагентов 2...3 %, хлорид-ионов менее 0,15 мг/дм³) разрешается подача их в теплоноситель для поддержания норм качества воды в соответствии с требованиями.

При концентрации аммиака в баке ТВ21В01 на уровне 3 % необходимый расход его дозировки в подпиточную воду (и, следовательно, ход плунжера насоса-дозатора) является относительно небольшим, что затрудняет регулирование подачи и затрудняет контроль насоса-дозатора по месту. Поэтому инструкция допускает использование раствора аммиака с пониженной концентрацией для обеспечения плавного регулирования концентрации NH₃ в теплоносителе первого контура и работы насосов-дозаторов с оптимальным ходом плунжера.

Дозирование гидразина в подпиточную воду на всас подпиточных агрегатов насосами ТВ20D01,02 рекомендуется производить во время операций пуска и останова ЭБ, а также при работе ЭБ без деаэрации продувочной воды для активного связывания избыточного свободного кислорода.

При нормальной эксплуатации ЭБ в подпиточную воду должен непрерывно дозироваться аммиак. Это связано с значительными потерями аммиака в цикле, обусловленными его летучестью. Подача аммиака должна вестись с таким расчетом, чтобы его концентрация в подпиточной воде была более 3 мг/дм³, и концентрация водорода в теплоносителе первого контура находилась в пределах 2,2...4,5 мг/дм³.

В тоже время превышать концентрацию аммиака в подпиточной воде более 50 мг/дм³ не следует – подобные случаи являются довольно частым нарушением ВХР первого контура. Это связано с тем, что при превышении концентрации аммиака происходит вымывание калия из катионитового фильтра, находящегося в аммиачно-калиевой форме, т.е. фактически происходит регенерация фильтра. Это, в свою очередь, приводит к резкому повышению концентрации щелочных металлов в теплоносителе первого контура.

Для оперативного устранения такого нарушения необходимо ввести в работу катионитовый фильтр СВО-2, находящийся в Н⁺-форме. Это позволит вывести избыток калия из теплоносителя и одновременно снизить величину рН, т.к. катионит будет эквивалентно отдавать в очищаемый теплоноситель ионы водорода, в результате чего нейтрализуется избыточная щелочность. Эпизодически по рекомендации водно-химической лаборатории для поддержания в теплоносителе первого контура нормируемой величины концентрации щелочных металлов производится дозировка в подпиточную воду определенного объема КОН.

Насосы-дозаторы реагентов РО относятся к насосам объемного действия, в которых подача жидкости осуществляется за счет вытеснения ее движущимся поршнем. Поршневые насосы такого типа можно пускать в ход только при открытой задвижке на напорном трубопроводе (или рециркуляции), так как пуск насоса при закрытой задвижке может привести к поломке или разрыву напорного трубопровода. Этим поршневые насосы принципиально отличаются от центробежных.

Автоматическое или дистанционное регулирование производительности этих насосов осуществляется изменением хода плунжера с помощью электрического исполнительного механизма, выходной вал которого соединен с регулирующим устройством насоса-дозатора. Ход плунжера ограничивается выдвиганием регулирующего устройства в переднее положение.

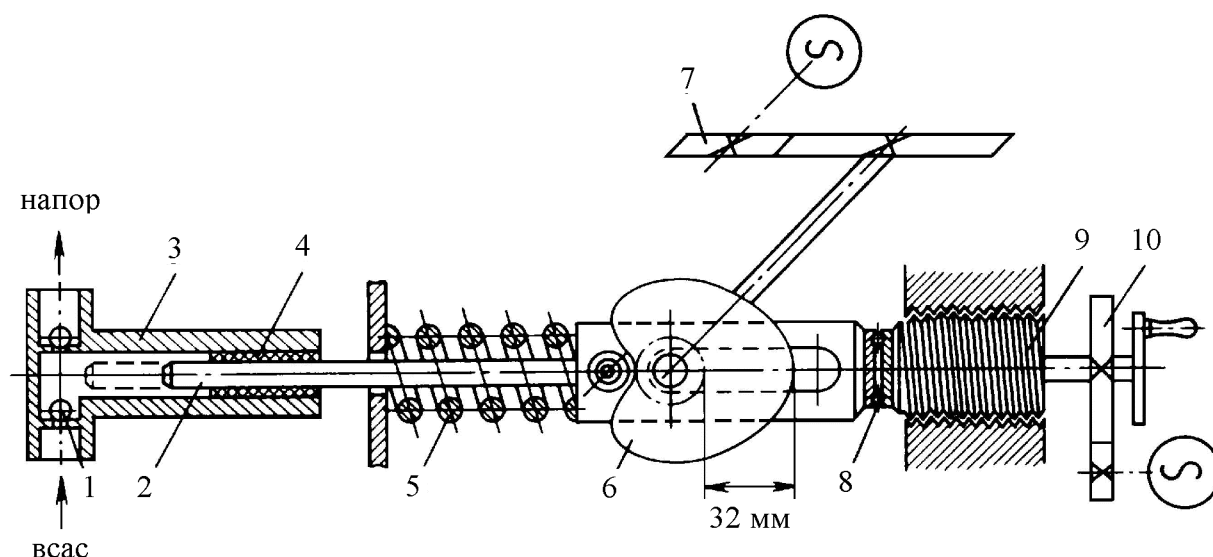


Рис 3.10. Функциональная схема регулирования производительности насосов-дозаторов: 1 – клапан; 2 – плунжер; 3 – корпус насоса; 4 – уплотнение; 5 – возвратная пружина; 6 – кулачок; 7 – электродвигатель; 8 – упорный подшипник; 9 – регулирующее устройство; 10 – исполнительный механизм

При эксплуатации системы ТВ-20 следует помнить, что используемые в системе реагенты способны оказывать неблагоприятное воздействие на организм человека.

Гидразин-гидрат – сильный восстановитель, легко разлагается под действием катализаторов нагревания. В смеси с кислородом взрывоопасен. При контакте с окислами некоторых металлов, асбестом или активированным углем возможно его самовозгорание. Токсичен при поступлении в организм.

Аммиак водный технический – обладает сильными щелочными свойствами. При вдыхании аммиака высокой концентрации может вызывать

ожоги слизистой оболочки глаз, удушье, приступы кашля, головокружение.

Гидроксид калия – сильное основание. Как твердое вещество, так и его концентрированные его растворы вызывают очень сильные ожоги кожи. Попадание щелочи в глаза может привести к их тяжелым заболеваниям и даже потере зрения.

3.5. Средства обеспечения ВХР первого контура ЯЭУ с ВВЭР-1200

Для поддержания ВХР первого контура в ЯЭУ с ВВЭР-1200 (В-392М) предусмотрены следующие системы:

- система низкотемпературной очистки теплоносителя;
- система хранения теплоносителя эксплуатационного качества;
- система борного концентрата;
- система подачи реагентов в теплоноситель первого контура;
- система очистки вод бассейна выдержки и перегрузки;
- система переработки теплоносителя;
- система приготовления и подачи реагентов.

Следует отметить, что в ЯЭУ с ВВЭР-1200 не предусмотрена очистка теплоносителя с помощью высокотемпературных фильтров (СВО-1). Такое решение было принято по результатам оценки эффективности работы ВТФ по снижению загрязненности контура активированными продуктами коррозии, а также анализа существующих схем ионообменной очистки теплоносителя по экспериментальным данным АЭС и результатам расчетного моделирования.

Результаты анализа показали, что работа ВТФ не оказывает значительного влияния на загрязненность контура. В частности, согласно экспериментальным данным, снижение активности теплоносителя за счет работы ВТФ после трех лет эксплуатации составляет всего около 10 %, а по результатам расчетного моделирования – около 18 % после 15 лет эксплуатации. Низкая эффективность ВТФ объясняется тем, что транспорт коррозионной активности в циркулирующем теплоносителе осуществляется в основном в растворимой форме.

Ресурс работы фильтрующей загрузки ВТФ по очистке теплоносителя от дисперсных продуктов коррозии составляет не более пяти лет работы. За это время титановый сорбент насыщается продуктами коррозии, и дальнейшая эксплуатация фильтра приводит к выносу продуктов коррозии из объема фильтрующей загрузки. Кроме того, существующая система гидровыгрузки сорбента из ВТФ неэффективна и не обеспечивает полного удаления сорбента из фильтра и отводящих трубопроводов.

Система низкотемпературной очистки теплоносителя (КВЕ50-60) предназначена для очистки теплоносителя от продуктов коррозии

конструкционных материалов, радионуклидов и химических примесей, находящихся в ионном виде, а также плавного регулирования ВХР первого контура. Система является аналогом системы СВО-2 РУ ВВЭР-1000 и выполняет следующие функции:

- прием теплоносителя из системы продувки-подпитки;
- удаление из теплоносителя химических примесей и радионуклидов, находящихся в ионном виде,
- удаление из теплоносителя радиоактивных продуктов коррозии, находящихся в дисперсной фазе;
- удаление из теплоносителя избыточной щелочности;
- вывод из теплоносителя борной кислоты в конце кампании;
- возврат теплоносителя в систему продувки-подпитки.

Основными элементами системы КВЕ50-60 являются:

- два фильтра смешанного действия КВЕ50АТ001, 002;
- два катионитовых фильтра в H^+ -форме КВЕ51АТ001, 002;
- два анионитовых фильтра в $ОН^-$ -форме КВЕ52АТ001, 002;
- два фильтра-ловушки ионитов КВЕ53АТ001, 002;
- бокс воздушников КВЕ60АТ001.

В каждой паре один фильтр является рабочим, второй – резервным.

Функциональная схема системы низкотемпературной очистки теплоносителя представлена на рис. 3.11.

Фильтр смешанного действия обеспечивает удаление химических примесей и радионуклидов, а также примесей, находящихся в дисперсной форме. Катионит находится в аммиачно-калиевой форме, а анионит – в борной форме. Катионитовый фильтр обеспечивает выведение из теплоносителя первого контура избытка щелочных металлов и аммиака. Анионитовый фильтр обеспечивает выведение из теплоносителя борной кислоты в конце кампании. Фильтр-ловушка предназначен для исключения попадания ионообменной смолы в теплоноситель. Бокс воздушников обеспечивает санитарные условия в помещении при заполнении оборудования и трубопроводов системы КВЕ50-60. Бокс имеет систему приточно-вытяжной вентиляции, с помощью которой в рабочей зоне создается разрежение, препятствующее утечке из бокса радиоактивных веществ.

Теплоноситель первого контура с температурой не более 55 °С и давлением не более 2,0 МПа поступает на ионитовые фильтры системы КВЕ50-60 из системы КВА. Очищенный на ионитовых фильтрах теплоноситель возвращается через систему КВА в первый контур. При превышении температуры обрабатываемой среды более 55 °С (из условий обеспечения работоспособности ионообменных смол) среда поступает в обход установки по байпасной линии. Для осуществления операции взрыхления и гидроперегрузки ионитов предусмотрен подвод промывочной воды и сжатого воздуха.

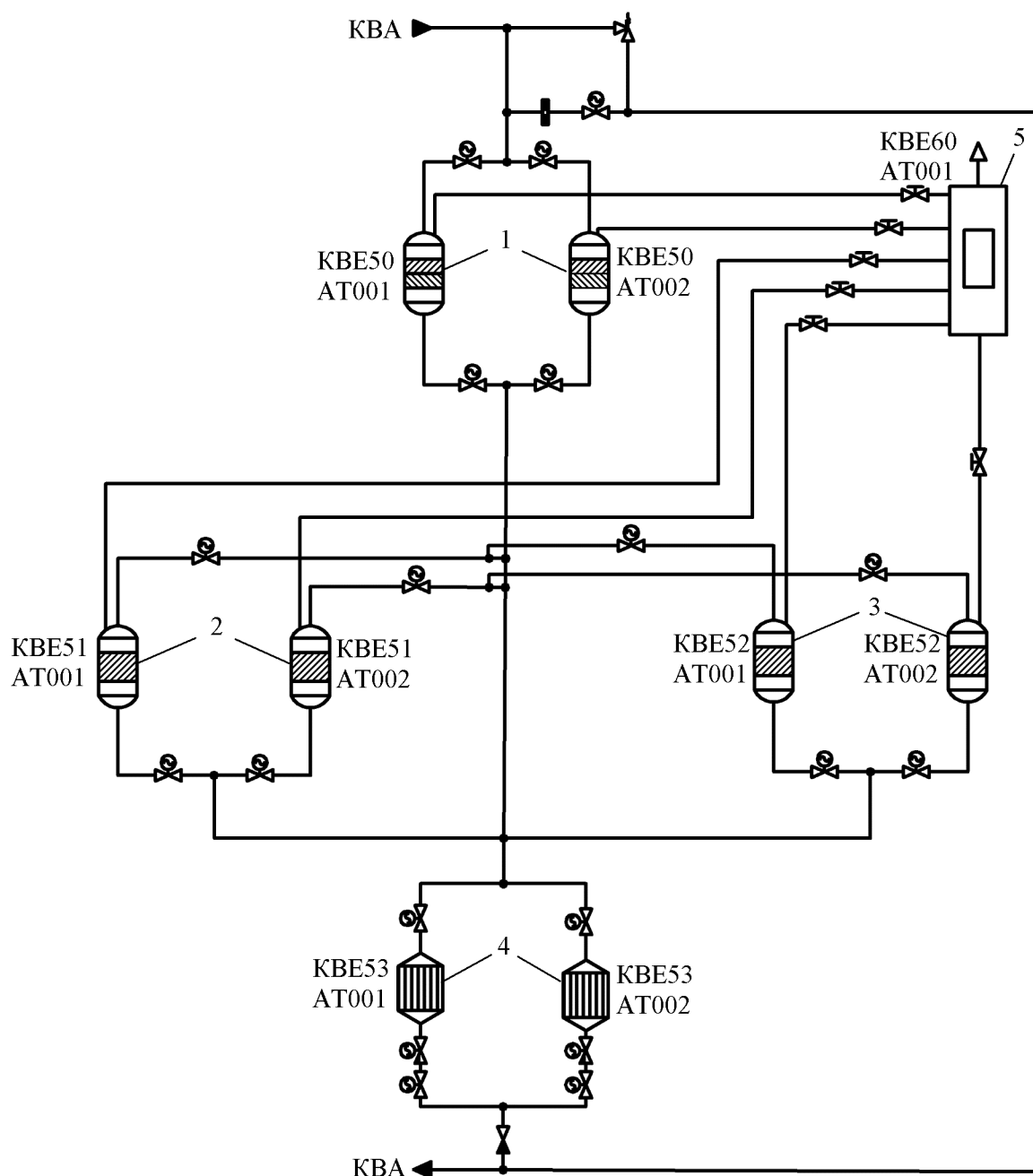


Рис. 3.11. Функциональная схема системы КВЕ:

1 – фильтр смешанного действия; 2 – катионитовый фильтр; 3 – анионитовый фильтр; 4 – фильтр-ловушка ионитов; 5 – бокс воздушников

Регенерация ионитовых фильтров не предусматривается в целях сокращения объема активных технологических отходов и упрощения технологической схемы. Производительность системы составляет 20...60 м³/ч.

Система хранения теплоносителя эксплуатационного качества (КВВ) предназначена для приема, хранения и подачи теплоносителя на переработку в различных режимах эксплуатации энергоблока с целью получения «чистого» конденсата и борного концентрата для повторного использования в цикле АЭС для подпитки первого контура.

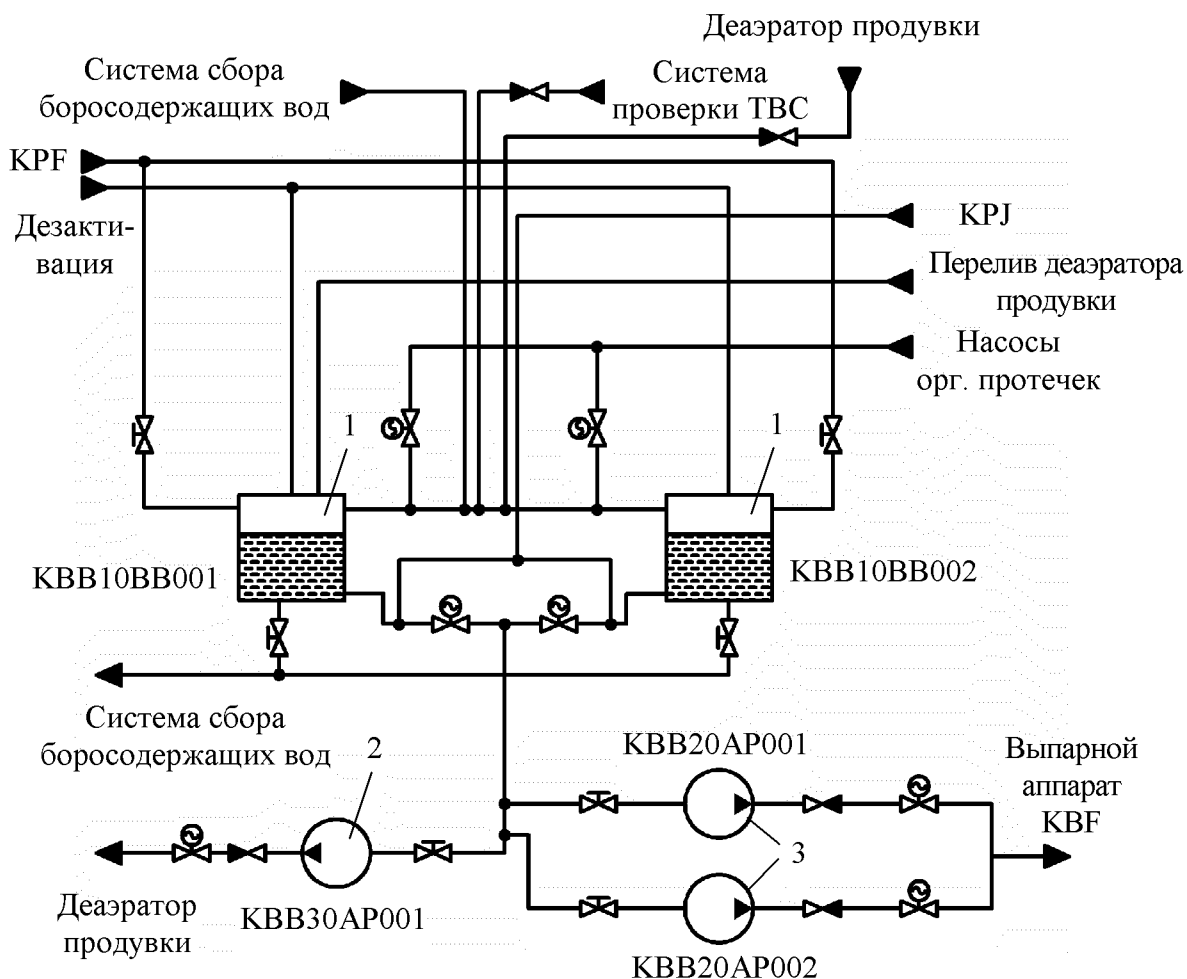


Рис. 3.12. Функциональная схема системы KBB:

- 1 – бак хранения теплоносителя эксплуатационного качества;
2 – насос заполнения первого контура; 3 – насос боросодержащей воды

Система KBB выполняет следующие функции:

- первоначальное заполнение первого контура (через систему КВА) раствором борной кислоты концентрацией 16...20 г/дм³;
- прием и хранение теплоносителя при борном регулировании в режиме водообмена;
- прием и хранение теплоносителя при дренировании контура в конце кампании;
- прием переливов из деаэратора продувки;
- прием прочих боросодержащих дренажей;
- подача боросодержащей воды на переработку в систему переработки теплоносителя (KBF).

Система KBB включает в себя следующие основные элементы:

- два бака хранения теплоносителя эксплуатационного качества KBB10BB001, 002 полезным объемом по 400 м³. Баки предназначены для приема и хранения теплоносителя первого контура;

- насос заполнения первого контура KBB30AP001 – центробежный, химический, подача $30 \dots 70 \text{ м}^3/\text{ч}$, напор $44 \dots 54 \text{ м вод. ст.}$. Предназначен для первоначального заполнения первого контура и гидроемкостей САОЗ первой ступени раствором борной кислоты с концентрацией $16 \dots 20 \text{ г/дм}^3$;

- два насоса борсодержащей воды KBB20AP001, 002 – центробежных химических с подачей $3,6 \dots 7,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $19 \dots 22 \text{ м вод. ст.}$. Предназначены для подачи теплоносителя на переработку в систему переработки теплоносителя.

Система хранения теплоносителя эксплуатационного качества готовится к работе к моменту пуска энергоблока. Перед заполнением первого контура и гидроемкостей первой ступени баки системы заполнены, насос KBB30AP001 готов к работе. Заполнение первого контура производится поочередно из каждого бака: один бак срабатывается, другой заполняется. Заполнение осуществляется путем подачи теплоносителя с концентрацией борной кислоты $16 \dots 20 \text{ г/дм}^3$ в деаэратор продувки системы КВА. После заполнения первого контура и гидроемкостей первой ступени баки системы стоят незаполненные. В них осуществляется вывод теплоносителя с текущей концентрацией борной кислоты при снижении или увеличении концентрации в первом контуре путем ввода чистого дистиллята или борного концентрата. Выведенный теплоноситель с текущей концентрацией борной кислоты и дренированные борсодержащие среды из баков насосами борсодержащей воды подаются на переработку в систему KBF (на выпарной аппарат).

Для предотвращения взрывоопасных концентраций водорода в баки KBB предусмотрен подвод азота.

Система борного концентрата (KBC40-60) предназначена для регулирования реактивности активной зоны реактора в течение топливной кампании за счет борного концентрата.

Система выполняет следующие функции:

- прием и хранение раствора борной кислоты с концентрацией $39,5 \dots 44,5 \text{ г/дм}^3$ из системы приготовления и подачи реагентов;

- прием и хранение очищенного борного концентрата с концентрацией $39,5 \dots 44,5 \text{ г/дм}^3$ из системы переработки теплоносителя;

- подача борной кислоты с концентрацией $39,5 \dots 44,5 \text{ г/дм}^3$ в первый контур (через систему продувки-подпитки) для изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе и компенсации потерь борной кислоты с неорганизованными протечками;

- подача борного концентрата на очистку в систему переработки теплоносителя при неудовлетворительном качестве раствора.

Система состоит из следующих основных элементов:

- баков очищенного борного концентрата KBC40BB001, 002 объемом 160 м^3 каждый, предназначенных для приема и хранения борного концентрата;
- насосов борного концентрата KBC50AP001...003 подачей $30...70 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $27...36 \text{ м вод. ст.}$ для подачи борного раствора в первый контур;
- насоса борного концентрата KBC60AP001 производительностью $7,3...17,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $72...82 \text{ м вод. ст.}$, осуществляющего подачу борного концентрата на очистку при его неудовлетворительном качестве.

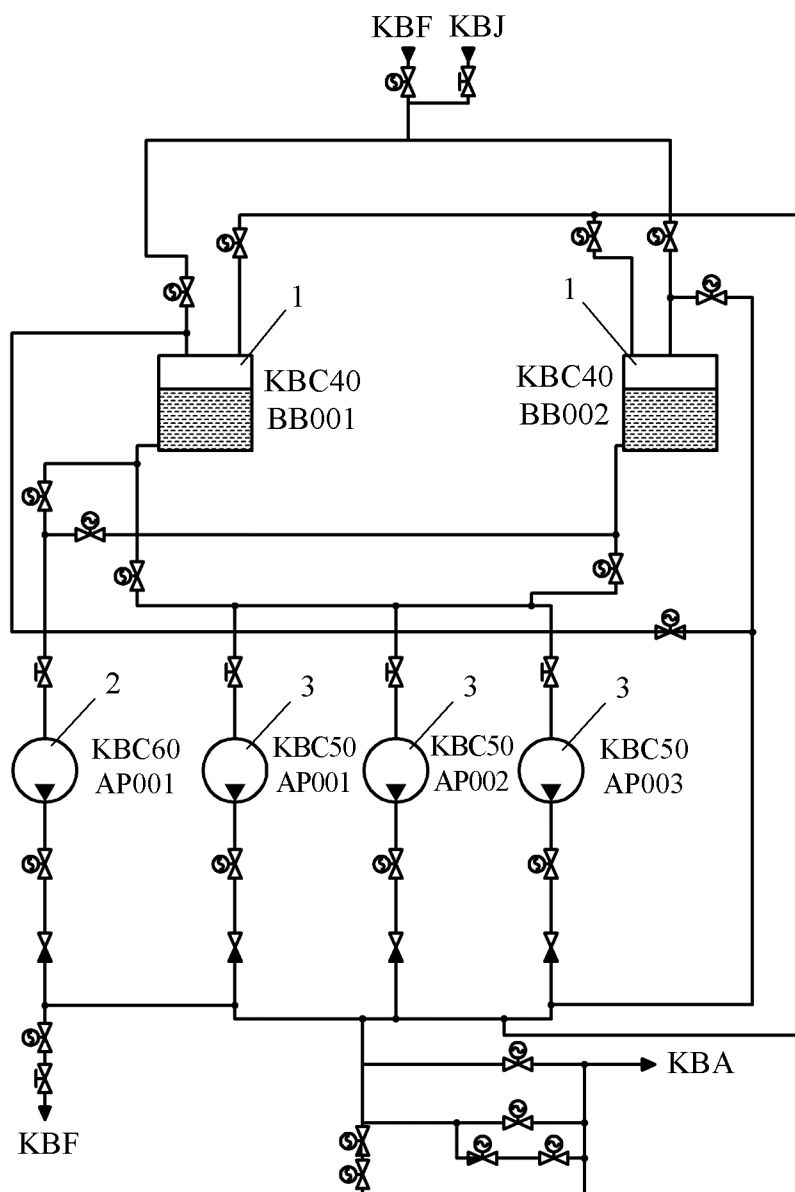


Рис. 3.13. Функциональная схема системы KBC40-60:
 1 – баки борного концентрата; 2 – насос подачи борного концентрата на очистку; 3 – насос подачи борного концентрата в первый контур

Первоначальное заполнение баков борного концентрата осуществляется подачей из системы приготовления и подачи реагентов, последующее (при работе энергоблока) – из системы переработки теплоносителя.

Как правило, подача борного концентрата на всас подпиточных насосов осуществляется насосами KBC50AP001...003., однако при необходимости подачи малого количества концентрата возможно использование насоса KBC60AP001. Из трех насосов борного концентрата один является рабочим, один – ремонтным и один – резервным.

Система подачи реагентов в теплоноситель первого контура (KBD) предназначена для поддержания качества теплоносителя первого контура путем дозирования в систему продувки-подпитки корректирующих реагентов с целью обеспечения минимального радиоактивного загрязнения и минимальной скорости коррозии конструкционных материалов оборудования реакторной установки.

Функциями системы KBD являются:

- прием химических реагентов рабочей концентрации из системы приготовления и подачи реагентов КРЈ;
- хранение химических реагентов рабочей концентрации;
- подача химических реагентов в систему продувки-подпитки первого контура для обеспечения нормируемых показателей качества водно-химического режима первого контура.

Система обеспечивает прием, хранение и подачу в систему продувки-подпитки первого контура следующих химических реагентов:

- раствора аммиака (5 %) для создания и поддержания нормируемой концентрации водорода в теплоносителе первого контура;
- раствора гидразина (3 %) для связывания молекулярного кислорода, поступающего с подпиточной водой первого контура;
- раствора гидроксида калия (3 % концентрации) для создания нормируемого значения рН в теплоносителе первого контура.

Система включает в себя следующие основные элементы:

- баки: раствора гидроксида калия KBD10BB001 и аммиака KBD30BB001 объемом 4 м³, а также раствора гидразина KBD20BB001 объемом 1,6 м³, предназначенные для приема и хранения соответствующих реагентов;
- насос-дозатор гидроксида калия KBD10AP001 подачей 0,025...0,1 м³/ч и напором 0,24...1 МПа
- насосы-дозаторы гидразина: KBD20AP001 (подача 0,025...0,1 м³/ч, напор 0,24...1 МПа), используемый при пуске энергоблока и KBD20AP002 (подача 0,001...0,025 м³/ч, напор не более 1 МПа), используемый при работе энергоблока на мощности;
- насосы-дозаторы аммиака KBD30AP001, 002, 003 аналогичные по характеристикам и режимам использования насосам-дозаторам гидразина.

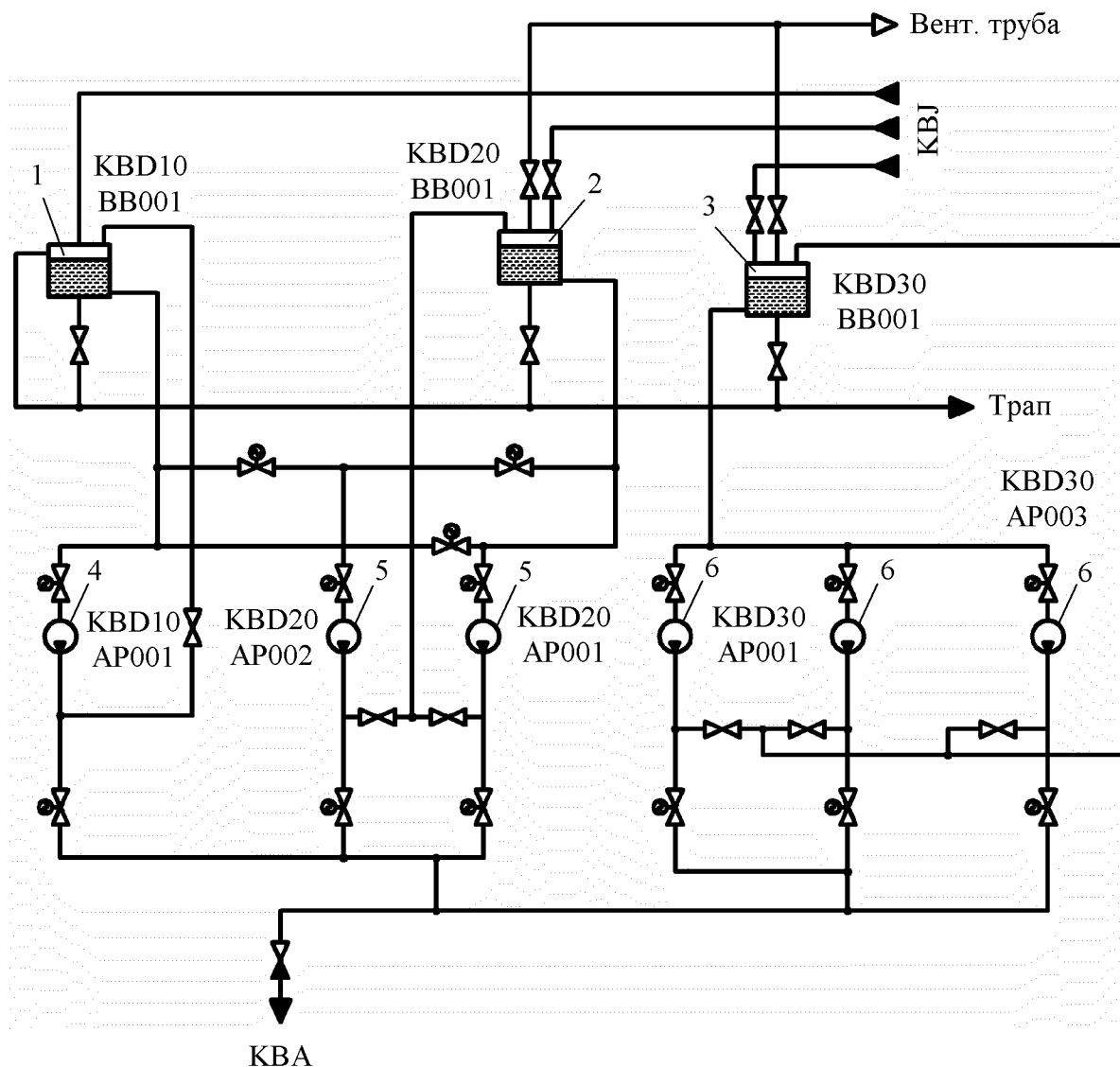


Рис. 3.14. Функциональная схема системы KBD:

1 – бак гидроксида калия; 2 – бак гидразина; 3 – бак аммиака;
4 – насос гидроксида калия; 5 – насосы гидразина; 6 – насосы аммиака

Растворы реагентов рабочих концентраций для поддержания водно-химического режима первого контура поступают из системы КРЈ в баки реагентов и с помощью насосов-дозаторов подаются на всас подпиточных насосов.

Дозирование раствора гидразина в режиме пуска реактора производится после начала принудительной циркуляции теплоносителя и его разогрева теплоносителя до 80 °С и в процессе водообмена для химического связывания растворенного в теплоносителе и подпиточной воде кислорода. В режиме работы блока на мощности дозирование раствора гидразина

производится периодически небольшими порциями для связывания кислорода, поступающего с подпиточной водой.

Дозирование в теплоноситель первого контура растворов аммиака и гидроксида калия производится в режиме пуска реактора:

- перед выходом реактора на МКУ (в процессе разогрева) для создания и поддержания в теплоносителе их концентраций в соответствии с требованиями к водно-химическому режиму первого контура.

- после выхода реактора на МКУ с целью насыщения катионитной загрузки рабочего фильтра до равновесных концентраций.

В режиме работы блока на мощности раствор аммиака дозируется непрерывно. Корректировка скорости дозирования проводится один раз в смену на основании текущих результатов. Концентрация аммиака в теплоносителе поддерживается на уровне, обеспечивающем требуемую концентрацию водорода и необходимое значение pH.

При работе на мощности дозирование корректирующих реагентов осуществляется оператором или автоматически по значениям основных нормируемых и диагностических показателей водно-химического режима первого контура (концентрации растворенного кислорода, суммарной молярной концентрации щелочных металлов, концентрации аммиака).

В режиме останова дозирование реагентов не производится.

Система очистки вод бассейна выдержки и перегрузки (КВН) предназначена для очистки вод бассейна выдержки и перегрузки, а также баков хранения борного раствора системы подачи вод бассейна выдержки на очистку (FAL) во всех режимах нормальной эксплуатации блока. Кроме того, система используется для очистки воды бака-приямка внутри гермооболочки после прохождения аварии с течью первого контура.

Система из следующих основных элементов:

- двух механических фильтров (рабочего и резервного) КВН11АТ001,002;
- двух ионообменных фильтров – катионитового в H^+ -форме КВН12АТ001 и анионитового в BO_3^- -форме КВН13АТ001;
- фильтра-ловушки ионитов КВН14АТ001;
- бокса воздушников КВН16АТ001.

Механические фильтры предназначены для механической очистки воды бассейна выдержки и перегрузки от продуктов коррозии конструкционных материалов.

Катионитовый фильтр осуществляет удаление катионных химических примесей и радионуклидов, находящихся в ионном состоянии. Анионитовый фильтр предназначен для удаления анионных химических примесей и радионуклидов, находящихся в ионном состоянии. Фильтр-ловушка ионитов исключает попадание фильтрующих материалов в воду бассейна выдержки и перегрузки и в баки хранения борного раствора системы подачи вод бассейна выдержки на очистку FAL.

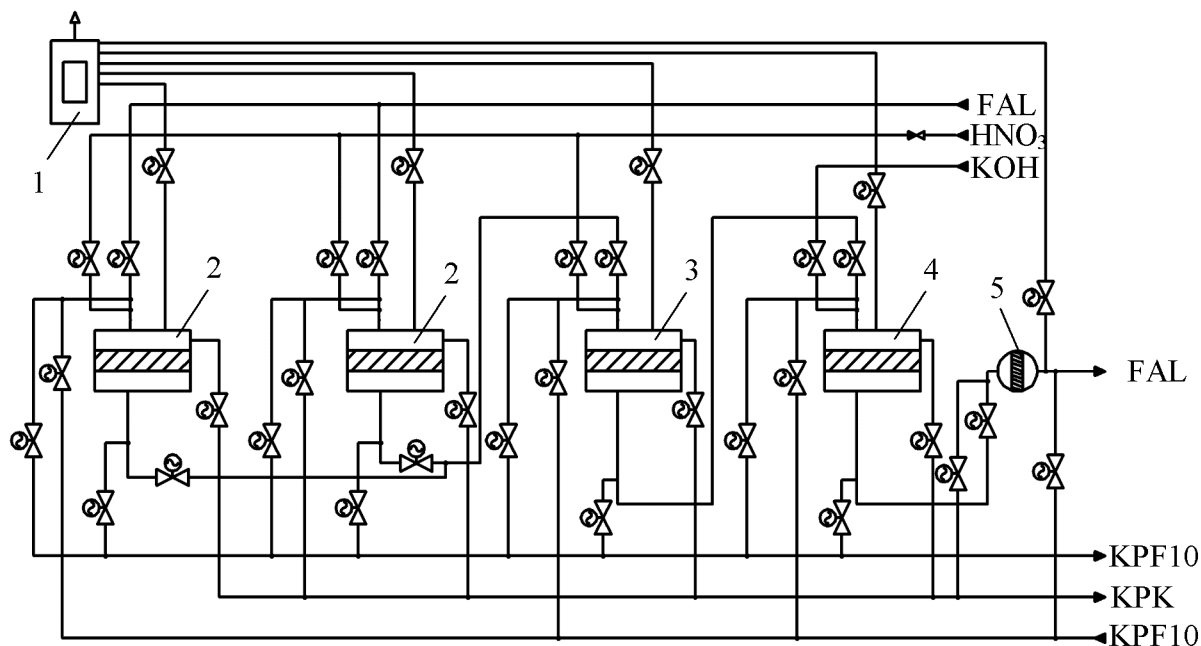


Рис. 3.15. Функциональная схема системы KBH:
 1 – бокс воздушников; 2 – механические фильтры; 3 – катионитовый фильтр;
 4 – анионитовый фильтр; 5 – фильтр-ловушка

Бокс воздушников предназначен для обеспечения санитарных условий в помещении при сборе и дренировании вод бассейна выдержки и перегрузки из трубопроводов сдувок оборудования системы. Бокс имеет систему приточно-вытяжной вентиляции, с помощью которой в рабочей зоне создается разрежение, препятствующее утечке из бокса в помещение радиоактивных веществ.

Система работает периодически. По результатам анализа при ухудшении качества воды в бассейнах выдержки и перегрузки и баках хранения борного раствора системы FAL, вода направляется на механический фильтр, а затем – на ионитные фильтры. Фильтры работают последовательно и обеспечивают удаление механических загрязнений, а также растворенных химических и коллоидных примесей. Система обеспечивает прозрачность воды в бассейне не менее 95 %. Очистка на фильтрах основных дозообразующих радионуклидов составляет 75...95 %. После очистки на фильтрах вода через фильтр-ловушку ионитов возвращается в систему FAL. При превышении температуры воды на входе в систему более 55 °C установка отключается.

При истощении обменной емкости ионитов фильтры выводят на регенерацию. Механические фильтры и катионитовый фильтр регенерируются 5 %-м раствором азотной кислоты, анионитовый фильтр – 5 %-м раствором гидроксида калия. Подача растворов для регенерации производится из

системы приготовления и подачи реагентов КРЈ, слив регенерационных растворов производится в систему переработки трапных вод КРФ10. Подвод раствора азотной кислоты к механическим фильтрам осуществляется для улучшения процесса отмывки катионита от продуктов коррозии конструкционных материалов и органики. Обработка азотной кислотой – операция эпизодическая, используемая при неудовлетворительном качестве фильтра после взрыхляющей промывки. Гидровыгрузка фильтрующих материалов, после истечения их срока службы (ориентировочно 3 года) производится в баки сорбентов системы промежуточного хранения жидких радиоактивных отходов КРК.

Система переработки теплоносителя (КВФ) предназначена для переработки боросодержащих вод и дренажей, поступающих из системы хранения теплоносителя эксплуатационного качества (КВВ) с целью получения чистого конденсата и раствора борной кислоты концентрацией 39,5...44,5 г/дм³ для повторного использования в технологическом цикле атомной электростанции.

В состав системы входят следующие основные элементы:

1. Выпарная установка;
2. Узел доочистки борного концентрата;
3. Узел доочистки дистиллята;

Выпарная установка включает в себя:

- выпарной аппарат КВФ20АТ001, состоящий из двух частей: греющей камеры и сепаратора. Греющая камера предназначена для испарения боросодержащей воды, а сепаратор – для очистки пара от капелек концентрата борной кислоты;

- конденсатор КВФ30АТ001, предназначенный для конденсации вторичного пара;

- охладитель сдувок КВФ30АС001, в котором происходит конденсация пара и выделение радиоактивных газов из парогазовой смеси, поступающей из конденсатора;

- бак конденсата КВФ30ВВ001 объемом 1,5 м³.

Узел доочистки борного концентрата состоит из:

- охладителя борного концентрата КВФ50АС001;
- бака «грязного» борного концентрата КВФ50ВВ001 объемом 10 м³;
- насосов борного концентрата КВФ50АР001, 002 – центробежных, подачей 7,5...17,5 м³/ч и напором 73...81 м вод. ст.;

- механического фильтра КВФ50АТ001;

- катионитового фильтра в Н⁺-форме КВФ50АТ002;

- анионитового фильтра в ВО₃⁻-форме КВФ50АТ003;

- фильтра-ловушки КВФ50АТ004.

Узел доочистки дистиллята включает в себя:

- насосы дегазированной воды KBF30AP001, 002 – центробежные, подачи 4,5...12 м³/ч и напором 46...50 м вод. ст.;
- охладитель дистиллята KBF30AC002;
- катионитовый фильтр в Н⁺-форме KBF30AT002;
- анионитовый фильтр в ОН⁻-форме KBF30AT003;
- фильтр-ловушку 10KBF30AT004;
- контрольные баки KBF40BB001, 002 объемом по 25 м³;
- насосы контрольных баков KBF40AP001, 002 – центробежные, подачи 17...33 м³/ч и напором 41...54 м вод. ст.

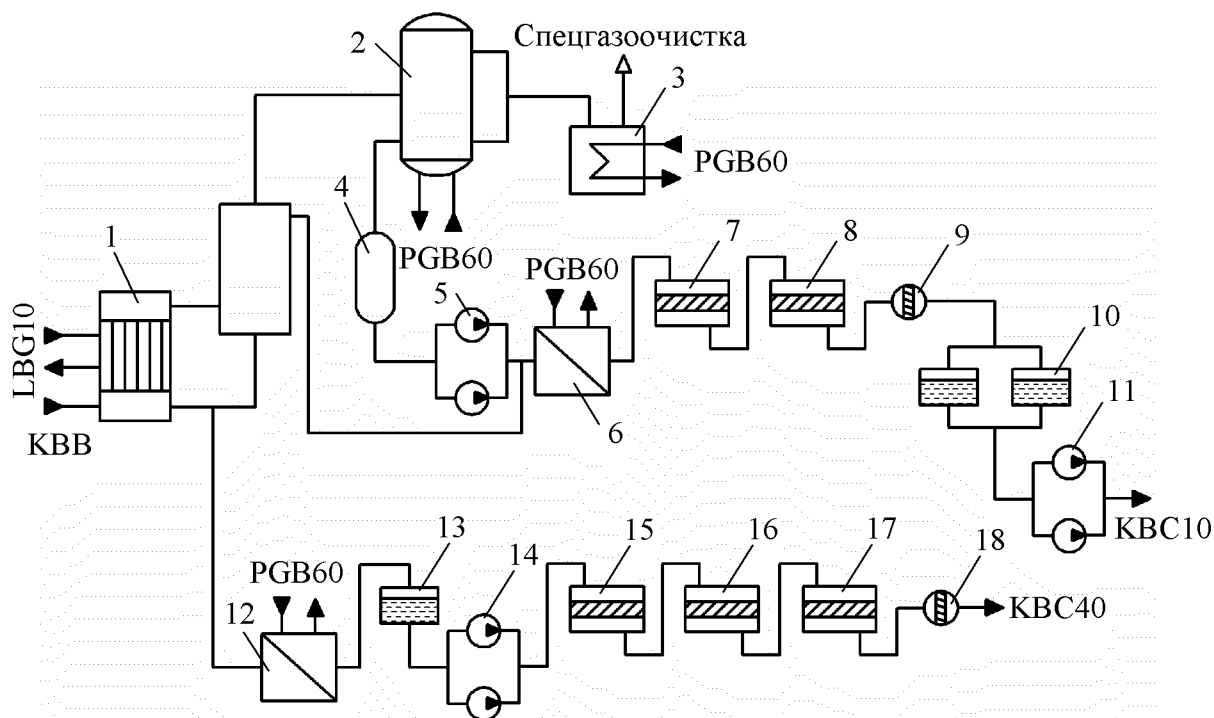


Рис. 3.16. Функциональная схема системы KBF:

- 1 – выпарной аппарат; 2 – конденсатор; 3 – охладитель сдувок; 4 – бак конденсата;
 5 – насос дегазированной воды; 6 – охладитель дистиллята; 7 – КФ; 8 – АФ;
 9 – фильтр-ловушка; 10 – контрольный бак; 11 – насос контрольных баков;
 12 – охладитель борного концентрата; 13 – бак «грязного» концентрата;
 14 – насос борного концентрата; 15 – механический фильтр; 16 – КФ; 17 – АФ;
 18 – фильтр-ловушка

Боросодержащие воды из системы КВВ подаются в выпарной аппарат, в котором происходит концентрирование борной кислоты до концентрации 39,5...44,5 г/дм³. Вторичный пар конденсируется в конденсаторе 10KBF30AT001. Часть конденсата вторичного пара насосами дегазированной воды возвращается в выпарной аппарат для орошения сепарационных устройств.

При снижении производительности выпарного аппарата по исходной воде менее 5 м³/ч с внутренних поверхностей труб аппарата удаляется на-

кипь. Первоначально очистка от накипи производится промывкой выпарного аппарата конденсатом вторичного пара. Если производительность восстановить не удалось, производится повторная промывка раствором 5 % азотной кислоты, которая подается из системы КРЈ.

Конденсат вторичного пара стекает в бак конденсата, откуда насосами дегазированной воды подается через охладитель дистиллята на очистку на группу ионитных фильтров. Фильтр-ловушка предотвращает вынос сорбента в дистиллят.

Несконденсировавшийся пар и газовые примеси из конденсатора отводятся в охладитель сдувок. Газы из охладителя сдувок отводятся на спецгазоочистку.

Упаренный борный концентрат через охладитель поступает в бак «грязного» концентрата, откуда насосами подается на очистку на фильтры: механический, катионитовый и анионитовый 10КВF50АТ003. Пройдя очистку на фильтрах, борный концентрат поступает в баки борного концентрата системы КВС40. Производительность выпарной установки по исходной боросодержащей воде составляет 6 м³/ч.

При исчерпании обменной емкости фильтрующих материалов ионитные фильтры выводятся на регенерацию. Регенерация фильтров доочистки борного концентрата производится 5 % раствором азотной кислоты и 4 % раствором гидроксида калия; ионообменных фильтров доочистки дистиллята – 5 % раствором азотной кислоты и 4 % раствором гидроксида натрия, механический фильтр взрыхляется.

Система приготовления и подачи реагентов (КРЈ) предназначена для приема, приготовления и подачи потребителям следующих химических реагентов:

- раствора борной кислоты концентрацией 16...44,5 г/дм³, подаваемого в системы FAL (подачи вод бассейна выдержки на очистку), КВВ, КВС40-60, КВС (гидроиспытаний и продувки датчиков КИП боросодержащей водой), JND (аварийного ввода бора), FBA (проверки тепловыделяющих сборок и других элементов активной зоны), FKT (приготовления и подачи дезактивирующих растворов);

- раствора гидроксида калия концентрацией 3...5 %, подаваемого в системы КВЕ50-60, КВН, КВF, КВД и в спринклерную систему (JMN);

- раствора азотной кислоты концентрацией 5 %, подаваемого в системы КВF, КВН, LCQ50-80 (очистки продувочной воды парогенераторов), KPF10-60 (систему переработки трапных вод) и концентрацией 65 % – в систему FKT;

- раствора гидроксида натрия концентрацией 4 %, подаваемого в системы KPF10-60, LCQ50-80, КВF, КРС и концентрацией 42 % – в систему FKT;

- раствора гидразина концентрацией 3 %, подаваемого в системы KBD и JMN;

- раствора аммиака концентрацией 5 %, подаваемого в систему KBD;
- щелочного раствора концентрацией 4 %, подаваемого в систему KPF10-60.

В составе системы предусмотрено несколько групп оборудования.

1. Группа приготовления и подачи раствора борной кислоты:

- бак приготовления раствора борной кислоты KPJ10BV001 объемом 10 м³ и расходный бак борной кислоты KPJ10BV002 объемом 25 м³;
- насосы подачи борной кислоты KPJ10AP001, 002 – центробежные, подачей 17...33 м³/ч и напором 41...54 м. вод. ст., KPJ10AP003 – центробежный, подачей 6,5...18 м³/ч и напором 16...23 м. вод. ст.

2. Группа приготовления и подачи раствора гидроксида калия:

- бак приготовления гидроксида калия KPJ20BV001 объемом 5 м³ и бак раствора гидроксида калия KPJ20BV002 объемом 4 м³;
- насос подачи гидроксида калия KPJ20AP001 – центробежный, подачей 7,5...17,5 м³/ч и напором 30...33 м. вод. ст.;
- насосы-дозаторы гидроксида калия KPJ20AP002, 003 – дозирочные, плунжерные, подачей 1,6 м³/ч и напором 1,6 МПа;
- смеситель KPJ20AM002.

3. Группа приготовления и подачи раствора азотной кислоты:

- бак раствора азотной кислоты KPJ30BV001 объемом 4 м³;
- насосы-дозаторы азотной кислоты KPJ30AP001, 002 – дозирочные плунжерные, подачей 1,6 м³/ч и напором 1,6 МПа;
- смеситель KPJ30AM001.

4. Группа приготовления и подачи щелочного раствора:

- бак приготовления щелочного раствора KPJ40BV001 объемом 1 м³;
- насосы-дозаторы щелочного раствора KPJ40AP001, 002 – дозирочные плунжерные, подачей 1,6 м³/ч и напором 1,6 МПа.

5. Группа приготовления и подачи раствора гидроксида натрия:

- бак раствора гидроксида натрия KPJ40BV002 объемом 4 м³;
- насосы-дозаторы гидроксида натрия KPJ40AP003, 004 – дозирочные плунжерные, подачей 1,6 м³/ч и напором 1,6 МПа
- смеситель KPJ40AM002.

6. Группа приготовления и подачи раствора гидразин-гидрата:

- бак раствора гидразин-гидрата KPJ50BV001 объемом 1,6 м³;
- насосы-дозаторы раствора гидразин-гидрата KPJ50AP001, 002 – дозирочные плунжерные, подачей 2,5 м³/ч и напором 1 МПа.

7. Группа приготовления и подачи раствора аммиака:

- бак раствора аммиака KPJ60BV001 объемом 4 м³;
- насосы-дозаторы раствора аммиака KPJ60AP001, 002 – дозирочные плунжерные, подачей 2,5 м³/ч и напором 1 МПа.

Раствор борной кислоты получается путем растворения сухой борной кислоты в баке приготовления KPJ10BB001, откуда насосом KPJ10AP003 раствор направляется в расходный бак KPJ10BB002. Из расходного бака насосами KPJ10AP001 (KPJ10AP002) раствор концентрацией 16...44,5 г/дм³ подается потребителям.

Раствор гидроксида калия получается путем растворения сухого КОН в баке KPJ20BB001 до концентрации 45 %, откуда насосом KPJ20AP001 раствор подается в расходный бак KPJ20BB002. Подача концентрированного раствора гидроксида калия осуществляется насосом-дозатором KPJ20AP002 (KPJ20AP003) через смеситель KPJ20AM002, в котором происходит разбавление раствора до рабочей концентрации 3...5 % дистиллятом от насосов системы переработки трапных вод KPF.

Азотная кислота концентрацией 65 % поступает из системы приема и приготовления кислоты в бак хранения KPJ30BB001, из которого насосом-дозатором KPJ30AP001 (KPJ30AP002) через смеситель KPJ30AM001 подается потребителям. В смесителе происходит разбавление кислоты до рабочей концентрации 5 % дистиллятом от насосов системы. Также из трубопровода подачи азотной кислоты концентрацией 65 % кислота поступает в систему FKT (в бак приготовления дезактивирующего раствора кислоты).

Щелочной раствор получается путем разбавления гидроксида натрия концентрацией 42 %, поступающего из системы приема и приготовления NaOH, или растворения сухого карбоната натрия в баке KPJ40BB001. Раствор рабочей концентрацией 4 % насосом-дозатором KPJ40AP001 (KPJ40AP002) подается потребителям.

Гидроксид натрия концентрацией 42 % из системы приема и приготовления NaOH поступает в бак хранения KPJ40BB002, из которого насосом-дозатором 1KPJ40AP003 (KPJ40AP004) через смеситель KPJ40AM002 подается потребителям. В смесителе происходит разбавление до рабочей концентрации 4% дистиллятом. Также из трубопровода подачи гидроксида натрия концентрацией 42 % NaOH поступает в систему FKT (в бак приготовления дезактивирующего раствора щелочи).

Концентрированный раствор гидразин-гидрата концентрацией 19 % подается из системы приема и приготовления гидразине в бак KPJ50BB001, в котором происходит разбавление раствора до рабочей концентрации 3 %. Насосом-дозатором KPJ50AP001 (KPJ50AP002) рабочий раствор подается в систему KBD и JMN.

Концентрированный раствор аммиака концентрацией 25 % подается из системы приема и приготовления аммиака в бак KPJ60BB001, в котором происходит разбавление раствора до рабочей концентрации 5 %. Насосом-дозатором KPJ60AP001 (KPJ60AP002) рабочий раствор подается в систему KBD.

3.6. Организация ВХР первого контура при различных состояниях энергоблока

Для изучения организации ВХР первого контура при различных состояниях энергоблока следует понимать отличия между этими состояниями, а также знать основные параметры энергоблока при его нахождении в том или ином состоянии.

Различают следующие проектные состояния нормальной эксплуатации энергоблока АЭС:

- работа на энергетических уровнях мощности;
- реактор на минимально-контролируемом уровне мощности;
- «горячее» состояние;
- «холодное» состояние;
- останов для ремонта;
- перегрузка топлива.

1. *Работа на энергетических уровнях мощности:*

- нейтронная мощность реактора – от МКУ до номинальной;
- давление, температура и уровень теплоносителя первого контура соответствуют номинальным значениям.

2. *Реактор на минимально-контролируемом уровне мощности:*

- нейтронная мощность реактора 0,1 % от номинальной;
- концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура текущая, соответствующая критическому состоянию;
- температура теплоносителя в первом контуре более 260 °С;
- давление теплоносителя первого контура 160 ± 2 кгс/см²;
- в работе не менее двух ГЦН.

3. *«Горячее» состояние:*

- реактор подкритичен;
- концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура, не ниже минимально-допустимой для текущей температуры теплоносителя в зависимости от момента кампании;

- органы регулирования СУЗ находятся на нижних концевых выключателях;

- температура теплоносителя первого контура более 260 °С;
- давление теплоносителя первого контура 160 ± 2 кгс/см².

4. *«Холодное» состояние:*

- реактор подкритичен;
- органы регулирования СУЗ находятся на нижних концевых выключателях;
- концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура не менее стояночной;
- температура теплоносителя на выходе из реактора не более 70 °С;

- давление теплоносителя первого контура менее 35 кгс/см^2 .

5. Останов для ремонта:

- реактор подкритичен;
- органы регулирования СУЗ находятся на нижних концевых выключателях;
- концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура $16 \dots 20 \text{ г/дм}^3$;
- температура теплоносителя первого контура на выходе из активной зоны реактора менее $70 \text{ }^\circ\text{C}$;
- давление теплоносителя первого контура равно атмосферному;
- уровень теплоносителя в реакторе снижен для выполнения ремонтных работ, но не ниже оси «холодных» патрубков реактора.

6. Перегрузка топлива:

- реактор подкритичен;
- концентрация борной кислоты в теплоносителе 1-го контура, в бассейне перегрузки и бассейне выдержки $16 \dots 20 \text{ г/дм}^3$;
- температура теплоносителя 1-го контура не более $70 \text{ }^\circ\text{C}$, а в бассейне выдержки при проведении работ по перегрузке топлива – не более $50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- бассейн выдержки и перегрузки заполнены до верхнего уровня;
- первый контур разуплотнен верхний блок и блок защитных труб сняты.

3.6.1. Организация ВХР первого контура при работе энергоблока на мощности более 50 % от номинальной

Для создания оптимальных условий эксплуатации реакторной установки АЭС с водо-водяным энергетическим реактором ВХР первого контура должен обеспечивать:

- подавление образования окислительных продуктов радиолитического теплоносителя при работе энергоблока на мощности;
- коррозионную стойкость конструкционных материалов оборудования и трубопроводов в течение всего срока эксплуатации энергоблока;
- минимизацию отложений на поверхностях ТВЭЛов и теплообменной поверхности парогенераторов;
- минимизацию накопления активированных продуктов коррозии;
- минимальное количество радиоактивных отходов.

При этом, в первом контуре при работе энергоблока на мощности в 12-месячном, 15-месячном и 18-месячном топливных циклах должен применяться **слабощелочной восстановительный координированный водно-химический режим с борной кислотой.**

При работе ЭБ на мощности необходимо контролировать качество теплоносителя первого контура методом химического анализа отобранных

проб и, при необходимости, производить корректировку содержания в теплоносителе калия, аммиака, водорода, кислорода и др. показателей. Требования к качеству теплоносителя первого контура предусматривают разделение показателей качества на нормируемые и диагностические.

Нормируемые показатели – показатели качества теплоносителя, поддержание которых в диапазонах допустимых значений обеспечивает целостность элементов активной зоны реактора, назначенный срок эксплуатации оборудования первого контура и удовлетворительную радиационную обстановку при ремонте оборудования.

Диагностические показатели – показатели качества теплоносителя, обеспечивающие получение дополнительной информации о причинах изменения нормируемых показателей или ухудшения водно-химического режима. К диагностическим показателям, за исключением концентрации борной кислоты, также относятся показатели качества подпиточной воды, воды бассейна выдержки и перегрузки топлива, борированных растворов систем безопасности РУ, а также показатели качества воды вспомогательных систем.

Для каждого из нормируемых показателей устанавливаются диапазоны допустимых значений и допустимые отклонения от этих значений. Для диагностических показателей устанавливаются контрольные уровни. Массовая концентрация борной кислоты не является ни нормируемым, ни диагностическим показателем качества, т.к. она определяется физикой активной зоны и требованиями безопасности.

Отклонения нормируемых показателей качества теплоносителя подразделяются на уровни. Для каждого уровня установлены максимальные отклонения показателей качества теплоносителя и максимально допустимое время работы энергоблока при таком отклонении.

Нарушением водно-химического режима является отклонение нормируемых показателей качества теплоносителя от диапазонов допустимых значений, не устраненное в течение времени, установленного для каждого уровня отклонений.

Задачи ВХР в период эксплуатации РУ на мощности:

- ограничение скорости коррозии конструкционных материалов первого контура и активной зоны;
- уменьшение интенсивности процесса массопереноса продуктов коррозии, предотвращение значительных отложений продуктов коррозии на внутрикорпусных устройствах и трубопроводах первого контура;
- обеспечение эффективного вывода примесей теплоносителя.

Нормы качества теплоносителя первого контура ЯЭУ с реактором ВВЭР-1000 работе энергоблока на уровне мощности более 50 % от номинальной должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

**Нормы качества теплоносителя при работе энергоблока на мощности
более 50 % от номинальной**

Нормируемые показатели				
Наименование показателей	Диапазон допустимых значений	Отклонения от допустимых значений		
		Первый уровень	Второй уровень	Третий уровень
Концентрация хлорид-иона	не более 0,1 мг/дм ³	–	более 0,1 мг/дм ³ до 0,2 мг/дм ³	более 0,2 мг/дм ³
Концентрация растворенного кислорода	не более 0,005 мг/дм ³	более 0,005 мг/дм ³ до 0,02 мг/дм ³	более 0,02 мг/дм ³ до 0,1 мг/дм ³	более 0,1 мг/дм ³
Концентрация растворенного водорода	2,2...4,5 мг/дм ³	более 4,5 мг/дм ³ до 7,2 мг/дм ³ или менее 2,2 мг/дм ³ до 1,3 мг/дм ³	более 7,2 мг/дм ³ до 9,0 мг/дм ³ или менее 1,3 мг/дм ³ до 0,5 мг/дм ³	более 9,0 мг/дм ³ или менее 0,5 мг/дм ³
Суммарная молярная концентрация ионов щелочных металлов (K, Li, Na) в зависимости от текущей концентрации борной кислоты согласно рис. 3.17, ммоль/дм ³	Зона А	Зона Б	Зоны В и Г	Зона Д
Диагностические показатели				
Наименование показателей			Контрольные уровни	
Удельная электропроводность			20...200 мкСм/см	
Концентрация аммиака			не менее 5,0 мг/дм ³	
Концентрация железа			не более 0,05 мг/дм ³	
Концентрация нитрат-иона			не более 0,2 мг/дм ³	
Концентрация фторид-иона, мг/дм ³			не более 0,05 мг/дм ³	
Концентрация сульфат-иона			не более 0,1 мг/дм ³	
Концентрация общего органического углерода			не более 0,5 мг/дм ³	

Зависимость суммарной молярной концентрации ионов щелочных металлов (K, Li, Na) в теплоносителе первого контура от текущей концентрации борной кислоты представлена на рис. 3.17.

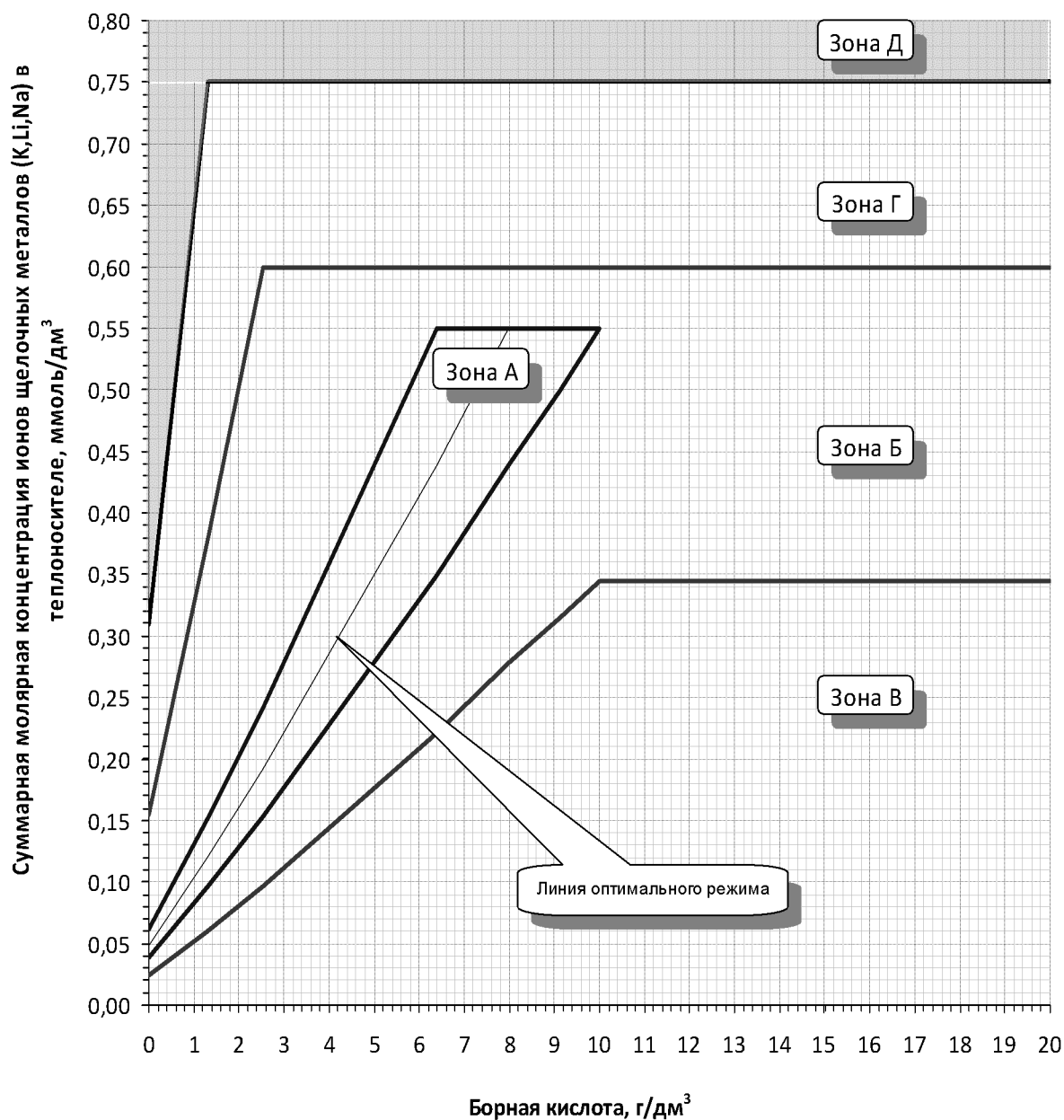


Рис. 3.17. Зависимость суммарной молярной концентрации ионов щелочных металлов в теплоносителе первого контура от текущей концентрации борной кислоты

Характеристика показателей качества теплоносителя и мероприятий по их поддержанию согласно действующим нормам.

Хлориды и фториды снижают защитные свойства оксидных пленок поверхностей оборудования и трубопроводов, что приводит к коррозионному растрескиванию под напряжением сталей аустенитного класса. Хлорид-ионы способны адсорбироваться окисными пленками, вытесняя из них кислород, в результате чего в точках адсорбции образуется растворимое хлористое железо, оголяя при этом металл. Действие фторид-ионов аналогично. Основным источником поступления хлоридов в теплоноситель первого контура являются подпиточная вода и химические реагенты,

вводимые в контурную воду для корректировки ВХР. Источником появления фторид-ионов могут служить свежезагруженные ТВС, технология изготовления которых предусматривает обработку их поверхности смесью HNO_3 и HF с последующей отмывкой ХОВ. Учитывая, что поступление фторид-ионов в теплоноситель может происходить только в начальный период после загрузки активной зоны, то контроль их содержания ограничен во времени и осуществляется первые 1000 часов работы.

Снижение содержания хлоридов и фторидов достигается использованием высокой степени чистоты химреагентов, подпиточной воды, а также очисткой теплоносителя первого контура на ионообменных фильтрах установки СВО-2.

Кислород. Негативное воздействие кислорода заключается в деполяризации катодных участков металла и, таким образом, интенсификации развития коррозии конструкционных материалов первого контура. Накопление кислорода происходит в процессе радиолиза теплоносителя, а также при подпитке первого контура недеаэрированными растворами борной кислоты, химреагентами и «чистым» конденсатом. Снижение концентрации кислорода достигается путем термической деаэрации подпиточной воды и вводом раствора гидразина, который взаимодействует с кислородом, образуя азот и воду. Также используется подавление процесса радиолиза теплоносителя первого контура за счет поддержания массовой концентрации водорода в теплоносителе в пределах $2,2 \dots 4,5 \text{ мг/дм}^3$.

Во все растворы, вводимые при работе РУ в первый контур без предварительной деаэрации и имеющие концентрацию кислорода более $0,02 \text{ мг/дм}^3$ должен вводиться гидразин-гидрат.

Концентрация гидразин-гидрата в подпиточной воде должна поддерживаться из расчета

$$C_{\text{N}_2\text{H}_4} = K \cdot C_{\text{O}_2} (\text{мг/дм}^3), \quad (3.22)$$

где C_{O_2} – концентрация кислорода в подпиточной воде, мг/дм^3 ;

K – коэффициент избытка гидразин-гидрата по отношению к концентрации кислорода, равный $2 \dots 3$.

Количество гидразин-гидрата, необходимого для связывания кислорода в подпиточной воде первого контура

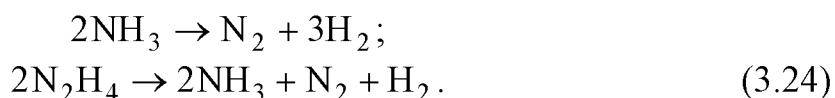
$$Q_{\text{N}_2\text{H}_4} = V_{\text{подп. воды}} \cdot C_{\text{N}_2\text{H}_4} \cdot 10^{-3} (\text{кг}), \quad (3.23)$$

где $C_{\text{N}_2\text{H}_4}$ – концентрация гидразина в подпиточной воде (теплоносителя) первого контура, мг/дм^3 ;

$V_{\text{подп. воды}}$ – объем подпиточной воды, м^3 ;

10^{-3} – коэффициент перевода вычисляемой величины в кг.

Водород. Избыток водорода, необходимый для подавления процесса радиолитического разложения дозируемых в первый контур растворов аммиака и гидразина



Концентрация водорода в теплоносителе зависит от уровня мощности реакторной установки, содержания аммиака и расхода продувки первого контура.

Концентрация водорода в теплоносителе 2,2 мг/дм³ и более практически полностью обеспечивает связывание кислорода, верхний предел концентрации водорода составляет 4,5 мг/дм³ ввиду водородного охрупчивания циркониевых сплавов. На отечественных АЭС концентрацию водорода в теплоносителе поддерживают за счет периодического или постоянного дозирования в первый контур раствора аммиака.

Периодическое дозирование в первый контур раствора аммиака.

При концентрации водорода в теплоносителе менее 2,2 мг/дм³ необходимо произвести дополнительный ввод раствора аммиака в первый контур. Необходимое количество 100-процентного аммиака в этом случае

$$Q_{\text{NH}_3} = V_{\text{1-го контура}} \cdot (C_2 - C_1) \cdot 10^{-3} \text{ (кг)}, \quad (3.25)$$

где C_2 – ожидаемая концентрация аммиака в теплоносителе первого контура, мг/дм³;

C_1 – фактическая концентрация аммиака в теплоносителе первого контура, мг/дм³;

10^{-3} – коэффициент перевода вычисляемой величины в кг.

При превышении концентрации водорода верхнего предельного уровня требуется прекратить ввод в первый контур аммиака до снижения содержания водорода в теплоносителе до 4,5 мг/дм³ с проведением лабораторного контроля.

Постоянное дозирование в первый контур раствора аммиака.

Расход аммиака зависит от расхода продувки первого контура, т.к. в этом случае происходит выделение водорода из теплоносителя в деаэраторе подпитки. Расход продувки первого контура при нормальной эксплуатации РУ находится в пределах 15...30 м³/ч. При этом в результате дегазации в деаэраторе подпитки выводится 450...900 л/ч газообразного водорода.

При разложении аммиака по реакции 3.24 из двух молей аммиака образуется три моля водорода. Согласно следствию из закона Авогадро, один моль газа при нормальных условиях занимает объем 22,4 л. Следовательно-

но, из двух молей аммиака образуется 67,2 л водорода. Молярная масса аммиака составляет 34 г/моль. Поэтому для восполнения потерь водорода необходимо вводить в контур 100-процентного аммиака

$$\frac{450}{67,2} \cdot 34 = 226 \text{ (г/ч)} \quad \text{или} \quad \frac{900}{67,2} \cdot 34 = 452 \text{ (г/ч)}. \quad (3.26)$$

При необходимости ввода, например, 1-процентного раствора аммиака, его расход будет следующим

$$\frac{226 \cdot 100}{1000} = 22,6 \text{ (л/ч)} \quad \text{или} \quad \frac{452 \cdot 100}{1000} = 45,2 \text{ (л/ч)}. \quad (3.27)$$

Суммарная концентрация ионов щелочных металлов. Щелочные металлы (K, Na, Li) попадают в теплоноситель следующим образом:

- для нейтрализации действия борной кислоты и поддержания значения pH в необходимых пределах при рабочей температуре, в теплоноситель дозируется раствор гидроксида калия;
- ионы натрия вводятся в контур с подпиточной водой;
- ионы лития образуются в контурной воде при облучении бора нейтронами



Суммарная концентрация щелочных металлов в теплоносителе поддерживается в зависимости от концентрации борной кислоты (рис. 3.17). При необходимости снижения суммарной концентрации щелочных металлов в теплоносителе подключается КФ СВО-2 в H^+ -форме, продолжительность работы которого определяется по результатам анализов.

Аммиак. Аммиак используется с целью образования водорода, необходимого для подавления процесса радиолиза теплоносителя. Равновесная концентрация аммиака в теплоносителе определяется верхним и нижним пределами концентрации водорода в контурной воде. Кроме того, при низкой температуре во время останова реактора основные свойства аммиака позволяют поддерживать необходимое значение pH без дополнительно увеличения концентрации гидроксида калия.

Продукты коррозии. Продукты коррозии (железо, хром, никель) характеризуют интенсивность протекания процессов коррозии конструкционных материалов. При циркуляции теплоносителя продукты коррозии активируются и отлагаются на внутренних поверхностях оборудования по всему контуру, осложняя в дальнейшем проведение ремонтных работ.

Поддержание качества теплоносителя в соответствии с установленным контрольным уровнем массовой концентрации железа снижает скорость коррозии, повышает безопасность эксплуатации оборудования,

уменьшает количество радиоактивных отходов, улучшая в целом радиационную обстановку на АЭС. Очистка теплоносителя первого контура от продуктов коррозии осуществляется на установках СВО-1 и СВО-2.

Борная кислота. Растворы борной кислоты используются в качестве жидкого поглотителя нейтронов с целью плавного регулирования мощности реактора. Концентрация борной кислоты в теплоносителе определяется физикой активной зоны и зависит от режима работы реактора.

Медь. Наличие ионов меди в теплоносителе способствует протеканию локальной электрохимической коррозии стальных и циркониевых материалов и косвенно характеризует состояние медьсодержащих элементов первого контура (бронзовые втулки подшипников приводов СУЗ, лабиринтовое уплотнение ГЦН и т.д.).

Водородный показатель. Значение рН характеризует состав среды и определяется соотношением констант диссоциации воды, борной кислоты, гидроксида калия, лития, натрия и аммиака, находящихся в теплоносителе первого контура. Поддержание рН в заданных пределах позволяет снизить интенсивность коррозионных процессов и регулируется путем дозирования раствора КОН при высоких температурах теплоносителя в зависимости от концентрации борной кислоты в теплоносителе.

В настоящее время как на АЭС с PWR, так и на АЭС с ВВЭР водородный теплоносителя определяется только в охлажденных пробах воды из пробоотборных точек, расположенных достаточно далеко от реактора. Данный показатель введен как диагностический для оперативного контроля отклонения от норм и нарушений в технологии ведения водно-химического режима.

Действия при отклонении нормируемых показателей качества теплоносителя от контрольных уровней.

Первый уровень. Если продолжительность работы энергоблока на мощности более 50 % $N_{ном}$ с отклонением одного или нескольких нормируемых показателей, указанных в табл. 3.1, в пределах первого уровня, превышает семь суток с момента обнаружения отклонений, то фиксируется нарушение водно-химического режима с обязательным анализом причин нарушения и принимаются меры по устранению нарушения. Дальнейшая работа энергоблока должна быть продолжена на уровне мощности не выше текущего.

Второй уровень. Продолжительность работы энергоблока на мощности более 50 % $N_{ном}$ при отклонении одного или нескольких нормируемых показателей, указанных в табл. 3.1, 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 переведен в состояние «реактор на МКУ мощности», а также должны быть приняты меры по устранению нарушения водно-

химического режима. Последующий подъем мощности энергоблока допускается после устранения отклонений показателей.

Третий уровень. При достижении одним или несколькими нормируемыми показателями значений третьего уровня, указанного в табл. 3.1, энергоблок должен быть в нормальной технологической последовательности переведен в «холодное» состояние, а также должны быть приняты меры по устранению нарушения водно-химического режима.

3.6.2. Организация ВХР первого контура при работе энергоблока на мощности 30... 50 % от номинальной

Нормы качества теплоносителя первого контура ЯЭУ с реактором ВВЭР-1000 работе энергоблока на уровне мощности 30...50 % от номинальной приведены в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2

Нормы качества теплоносителя при работе энергоблока на мощности 30...50 % от номинальной

Нормируемые показатели				
Наименование показателей	Диапазон допустимых значений	Отклонения от допустимых значений		
		Первый уровень	Второй уровень	Третий уровень
Концентрация хлорид-иона	не более 0,1 мг/дм ³	–	более 0,1 мг/дм ³ до 0,2 мг/дм ³	более 0,2 мг/дм ³
Концентрация растворенного кислорода	не более 0,005 мг/дм ³	более 0,005 мг/дм ³ до 0,02 мг/дм ³	более 0,02 мг/дм ³ до 0,1 мг/дм ³	более 0,1 мг/дм ³
Концентрация растворенного водорода	1,3...4,5 мг/дм ³	более 4,5 мг/дм ³ до 7,2 мг/дм ³	более 7,2 мг/дм ³ до 9,0 мг/дм ³ или менее 1,3 мг/дм ³ до 0,5 мг/дм ³	более 9,0 мг/дм ³ или менее 0,5 мг/дм ³
Суммарная молярная концентрация ионов щелочных металлов (K, Li, Na) в зависимости от текущей концентрации борной кислоты согласно рис. 3.17, ммоль/дм ³	Зона А	Зона Б	Зоны В и Г	Зона Д
Диагностические показатели				
Наименование показателей			Контрольные уровни	
Удельная электропроводность			20...200 мкСм/см	
Концентрация аммиака			не менее 15,0 мг/дм ³	
Концентрация железа			не более 0,05 мг/дм ³	

Концентрация нитрат-иона	не более 0,2 мг/дм ³
Концентрация фторид-иона, мг/дм ³	не более 0,05 мг/дм ³
Концентрация сульфат-иона	не более 0,1 мг/дм ³
Концентрация общего органического углерода	не более 0,5 мг/дм ³

Действия персонала при отклонении нормируемых показателей качества теплоносителя от контрольных уровней на данных уровнях мощности аналогичны действиям на уровне мощности более 50 % от номинальной.

3.6.3. Организация ВХР первого контура при работе энергоблока в «горячем» состоянии, состоянии «реактор на МКУ мощности» и на мощности менее или равной 30 % от номинальной

При нахождении ЭБ в «горячем» состоянии температура теплоносителя составляет более 260 °С, давление в первом контуре – не менее 160 кгс/см². В это состояние энергоблок может быть переведен как с энергетических уровней мощности, так и период пуска реактора после разогрева первого контура перед выводом реактора на минимально-контролируемый уровень мощности.

Важным показателем является концентрация растворенного в теплоносителе кислорода, при повышении которой более 0,02 мг/дм³ необходимо дозировать в подпиточную воду гидразин-гидрат в количестве, обеспечивающем не менее чем двукратный его избыток по отношению к фактическому содержанию кислорода в теплоносителе.

Т а б л и ц а 3.4

Нормы качества теплоносителя при работе энергоблока в «горячем» состоянии, состоянии «реактор на МКУ мощности» и на мощности менее или равной 30 % от номинальной

Нормируемые показатели			
Наименование показателей	Диапазон допустимых значений	Отклонения от допустимых значений	
		Первый уровень	Второй уровень
Концентрация хлорид-иона	не более 0,1 мг/дм ³	более 0,1 мг/дм ³ до 0,2 мг/дм ³	более 0,2 мг/дм ³
Концентрация растворенного кислорода	не более 0,02 мг/дм ³	более 0,02 мг/дм ³ до 0,1 мг/дм ³	более 0,1 мг/дм ³
Суммарная молярная концентрация ионов К, Li, Na в зависимости от текущей концентрации борной кислоты, ммоль/дм ³	Зоны А, Б, В, Г	–	Зона Д

Окончание табл. 3.4.

Диагностические показатели	
Наименование показателей	Контрольные уровни
Удельная электропроводность	20...200 мкСм/см
Концентрация аммиака	не менее 15,0* мг/дм ³
Концентрация железа	не более 0,1 мг/дм ³
Концентрация нитрат-иона	не более 0,2 мг/дм ³
Концентрация фторид-иона	не более 0,1 мг/дм ³
Концентрация сульфат-иона	не более 0,1 мг/дм ³
Концентрация общего органического углерода	не более 0,5 мг/дм ³
*) При пуске энергоблока после планово-предупредительного ремонта концентрация аммиака в теплоносителе должна поддерживаться в диапазоне 20...30 мг/дм ³ . При нахождении энергоблока в «горячем» состоянии с последующим расхолаживанием энергоблока контрольные уровни концентрации аммиака в теплоносителе не устанавливаются	

Установки очистки теплоносителя, оснащенные высокотемпературными и/или ионитными фильтрами должны работать непрерывно при обеспечении необходимого расхода через фильтры. Во время работы энергоблока на мощности менее или равной 30 % от номинальной допускается вывод ионитных фильтров системы СВО-1 из работы на период проведения регенераций и промывок загрузок фильтров.

Действия при отклонении нормируемых показателей качества теплоносителя от контрольных уровней.

Первый уровень. Допустимая продолжительность работы энергоблока в «горячем» состоянии, состоянии «реактор на МКУ мощности» и на мощности менее или равной 30 % от номинальной при отклонении одного или нескольких нормируемых показателей, указанных в табл. 3.4, в пределах первого уровня не должна превышать 24 часов с момента обнаружения отклонения. Если в течение 24 часов не устранены отклонения нормируемых показателей, то энергоблок должен быть в нормальной технологической последовательности переведен в «холодное» состояние, а также должны быть приняты меры по устранению нарушения водно-химического режима.

Второй уровень. При достижении одним или несколькими нормируемыми показателями значений второго уровня, указанного в табл. 3.4, энергоблок должен быть в нормальной технологической последовательности переведен в «холодное» состояние, а также должны быть приняты меры по устранению нарушения водно-химического режима.

3.6.4. Организация ВХР первого контура при расхолаживании энергоблока, при его нахождении в «холодном» состоянии, состояниях «останов для ремонта» и «перегрузка топлива»

Первоначально, за сутки перед началом расхолаживания ЭБ прекращается ввод в подпиточную воду первого контура аммиака и гидразин-гидрата. В процессе расхолаживания теплоноситель очищается фильтрами систем очистки до прекращения принудительной циркуляции. При останове ЭБ с последующим разуплотнением первого контура в период расхолаживания производится дегазация теплоносителя за счет работы деаэратора подпитки, водообмена и газовых сдувок.

При проведении расхолаживания контролируются концентрации растворенного водорода и кислорода в теплоносителе первого контура и подпиточной воде с периодичностью не реже одного раза в смену до достижения концентрации растворенного водорода $0,5 \text{ мг/дм}^3$ или менее. Контрольные уровни для концентрации растворенного кислорода не устанавливаются. После достижения указанной концентрации растворенного водорода в теплоносителе, а также при нахождении ЭБ в «холодном» состоянии необходим дополнительный контроль концентрации водорода в паровой фазе из верхней части компенсатора давления с периодичностью не менее одного раза в смену. Контрольный уровень концентрации водорода – 2 % (объемных).

Т а б л и ц а 3.5

Нормы качества теплоносителя первого контура в «холодном» состоянии энергоблока и состояниях «останов для ремонта» и «перегрузка топлива», воды бассейнов выдержки и перегрузки топлива при нахождении энергоблока в состоянии «перегрузка топлива», а также воды бассейна выдержки во всех остальных состояниях энергоблока

Диагностические показатели	
Наименование показателей	Контрольные уровни
Водородный показатель pH	не менее 4,2 ед. pH
Концентрация хлорид-ионов	не более $0,1 \text{ мг/дм}^3$
Концентрация фторид-ионов	не более $0,1 \text{ мг/дм}^3$
Концентрация сульфат-ионов	не более $0,1 \text{ мг/дм}^3$
Концентрация железа	не более $0,1 \text{ мг/дм}^3$
Концентрация общего органического углерода	не более $1,0 \text{ мг/дм}^3$
Прозрачность	не менее 95 %

При невозможности отбора пробы теплоносителя первого контура из корпуса реактора, отбор пробы осуществляется с напора насосов системы аварийного и планового расхолаживания.

Следует помнить, что разуплотнение первого контура допускается только после снижения концентрации растворенного водорода в теплоносителе до $0,5 \text{ мг/дм}^3$ и менее. При этом контроль должен быть выполнен не более чем за четыре часа до разуплотнения.

Концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура, в бассейнах выдержки топлива при нахождении ЭБ в «холодном» состоянии определяется требованиями технологического регламента безопасной эксплуатации энергоблока.

3.6.5. Организация ВХР первого контура при разогреве энергоблока

Качество раствора борной кислоты, используемого для заполнения первого контура перед загрузкой активной зоны реактора после проведения технологических операций, связанных с полной выгрузкой активной зоны или ремонтом, в том числе, после проведения дезактивации оборудования первого контура, должно удовлетворять следующим требованиям:

- концентрация борной кислоты – $16...20 \text{ г/дм}^3$;
- величина pH – не менее 4,2 ед. pH;
- концентрация хлорид-иона – не более $0,1 \text{ мг/дм}^3$;
- прозрачность – не менее 95 %.

После уплотнения первого контура диагностические показатели качества теплоносителя должны соответствовать табл. 3.4. При этом в теплоноситель вводится аммиак в количестве, необходимом для насыщения фильтров установки СВО-2 и создания в теплоносителе концентрации аммиака, достаточной для нормирования концентрации водорода.

После начала принудительной циркуляции (т.е. после запуска главных циркуляционных насосов) и разогрева теплоносителя до температуры $60...80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в теплоноситель дозируется гидроксид калия до достижения концентрации калия $15...20 \text{ мг/дм}^3$. После разогрева теплоносителя до температуры от $80...90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ проводится снижение концентрации кислорода за счет ввода в первый контур из раствора гидразин-гидрата, в количестве, обеспечивающем двух-трехкратный его избыток по отношению к концентрации кислорода. Указанный переизбыток гидразин-гидрата должен быть достигнут до повышения температуры теплоносителя более $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При достижении температуры первого контура $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ концентрация растворенного кислорода в теплоносителе не должна превышать $0,02 \text{ мг/дм}^3$. В противном случае разогрев контура прекращается до достижения требуемой концентрации кислорода.

В процессе разогрева ЭБ контролируются концентрации растворенного водорода и кислорода в теплоносителе первого контура и подпиточной воде с периодичностью не реже одного раза в смену. Контрольные уровни концентрации растворенного водорода не устанавливаются. Кроме того, выполняется контроль концентрации водорода в паровой фазе из верхней части компенсатора давления с периодичностью не менее одного раза в смену. Контрольный уровень концентрации водорода – 2 % (объемных).

Важной операцией является перевод ионитных фильтров СВО-2 в соответствующую форму (аммиачно-калиевую и борную). Это достигается за счет подключения фильтров к потоку теплоносителя и поглощения свежими ионитами, загруженными в фильтры, борной кислоты (для АФ) или ионов калия и аммиака (для КФ). При этом фильтры СВО-2 должны быть переведены в соответствующую форму до начала снижения концентрации борной кислоты при выводе реактора на МКУ мощности.

3.6.6. Требования к качеству подпиточной воды, «чистого» конденсата, воды вспомогательных систем и растворов систем безопасности

Т а б л и ц а 3.6

Требования к качеству подпиточной воды и воды, подаваемой в систему уплотнения вала главных циркуляционных насосов

Диагностические показатели	Контрольные уровни
Удельная электропроводность	20...200 ¹⁾ мкСм/см
Концентрация аммиака	не менее 5,0 ²⁾ мг/дм ³
Концентрация хлорид-иона	не более 0,1 мг/дм ³
Концентрация растворенного кислорода	не более 0,02 ³⁾ мг/дм ³
Концентрация сульфат-иона	не более 0,1 мг/дм ³
Концентрация борной кислоты	Не менее текущей ⁴⁾
Концентрация общего органического углерода	не более 0,5 мг/дм ³
¹⁾ При введении в первый контур растворов борной кислоты, гидроксида калия и аммиака для показателя «Удельная электропроводность» контрольные уровни не устанавливаются. ²⁾ При проведении водообмена контрольные уровни показателя «Концентрация аммиака» не устанавливаются. ³⁾ При вводе в первый контур «чистого» конденсата или растворов борной кислоты, гидроксида калия концентрация кислорода не контролируется. При вводе в первый контур гидразин-гидрата контрольные уровни концентрации кислорода не устанавливаются. ⁴⁾ При проведении водообмена и вводе в первый контур борной кислоты контрольный уровень показателя «концентрация борной кислоты» не устанавливается.	

Т а б л и ц а 3.7

**Требования к качеству «чистого» конденсата, используемого
для подпитки первого контура**

Диагностические показатели	Контрольные уровни
Величина pH	5,6... 10,0 ед. pH
Концентрация хлорид-иона, мг/дм ³ , не более	не более 0,05 мг/дм ³
Концентрация кремниевой кислоты (в пересчете на SiO ₃ ²⁻)	не более 0,2 мг/дм ³
Концентрация общего органического углерода	не более 0,5 мг/дм ³

Т а б л и ц а 3.8

Требования к качеству обессоленной воды

Диагностические показатели	Контрольные уровни
Величина pH	5,5... 8,0 ед. pH
Удельная электропроводность, мкСм/см, не более	не более 1,2 мкСм/см
Концентрация хлорид-иона, мг/дм ³ , не более	не более 0,005 мг/дм ³
Концентрация кремниевой кислоты (в пересчете на SiO ₃ ²⁻)	не более 0,02 мг/дм ³
Концентрация общего органического углерода	не более 0,3 мг/дм ³

Т а б л и ц а 3.9

**Качество щелочного раствора борной кислоты
в баках спринклерной системы**

Наименование показателей	Уровни значений
Концентрация борной кислоты	39,5... 160 г/дм ³
Концентрация гидразина	не менее 10 г/дм ³
Концентрация калия	100... 150 г/дм ³

Т а б л и ц а 3.10

Качество раствора в гидроемкостях САОЗ

Наименование показателей	Уровни значений
Величина pH	не менее 6,5 ед. pH
Концентрация борной кислоты	16... 20 г/дм ³
Концентрация калия	100... 200 мг/дм ³
Концентрация хлорид-иона	не более 0,15 мг/дм ³

Т а б л и ц а 3.11

Качество раствора в баке аварийного запаса борной кислоты

Наименование показателей	Контрольные уровни
Величина pH	не менее 4,2 ед. pH
Концентрация борной кислоты	16...20 г/дм ³
Концентрация хлорид-ионов	не более 0,1 мг/дм ³

Т а б л и ц а 3.12

**Качество раствора в баках запаса
концентрированного раствора борной кислоты**

Наименование показателей	Уровни значений
Величина pH	не менее 3,8
Концентрация борной кислоты	39,5...44,5 г/дм ³
Концентрация хлорид-иона	не более 0,15 мг/дм ³

4. ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВТОРОГО КОНТУРА ЯЭУ С ВВЭР**4.1. Особенности водного режима второго контура ЯЭУ
с ВВЭР и основные задачи при его организации**

Водно-химический режим второго контура ЯЭУ должен обеспечивать работу основного и вспомогательного теплоэнергетического оборудования без повреждений и снижения экономичности, вызванных следующими причинами:

- образованием накипи и отложений на теплопередающих поверхностях оборудования;
- образованием шлама в оборудовании и трубопроводах АЭС и в тепловых сетях;
- коррозионными процессами внутренних поверхностей теплоэнергетического оборудования и тепловых сетей;
- образованием отложений в проточной части турбин.

Известно, что долговечность и экономичность работы любой ЯЭУ с водо-водяными реакторами значительно зависят от качества пара, которое при заданных параметрах определяется, главным образом, влажностью, содержанием солей и нерастворимых примесей. Например, высаживание солей и других примесей на поверхностях пароперегревателя и лопатках турбин может привести к выходу из строя всей турбинной установки. От-

ложения увеличивают термическое сопротивление теплообменных поверхностей пароперегревателя, поэтому количество передаваемого тепла в нем уменьшается. Высаждение солей в трубопроводах и других элементах ЯЭУ приводит к увеличению гидравлического сопротивления, ускорению коррозии поверхностей пароперегревателей, трубопроводов, проточной части турбин и конденсаторов. Наличие влаги в паре перед турбиной приводит к снижению ее КПД и увеличению эрозионного износа проточной части.

Нерастворимые продукты (например, продукты коррозии в ПГ) могут попасть в пар только с капельной влагой, поэтому вопрос ограничения их количества связан с ограничением количества общей капельной влаги в паре. Попадание же солей в пар происходит двумя путями: при выносе капельной влагой растворенных в ней солей и непосредственным растворением солей в паре.

Главной особенностью второго контура ЯЭУ с ВВЭР является наличие фазового перехода рабочего тела из воды в пар в парогенераторе, и обратно из пара в воду в конденсаторе турбины. При переходе рабочего тела из воды в пар в парогенераторе за счет разности растворимости различных веществ в воде и паре происходит накопление твердых веществ в котловой воде ПГ, что требует наличие специальных систем для их вывода.

Конденсация пара в конденсаторе происходит в условиях глубокого вакуума, что может приводить, при наличии неплотностей, к присосам охлаждающей воды и атмосферного воздуха в вакуумную часть конденсатора и конденсатного тракта. В охлаждающей воде всегда присутствует значительное количество вредных примесей, которые могут существенно ухудшать качество конденсата, что требует наличие систем очистки турбинного конденсата. В атмосферном воздухе также содержится достаточно большое количество агрессивных газов, которые необходимо удалять из рабочего тела второго контура.

Второй важной особенностью второго контура ЯЭУ является наличие разнородных конструкционных материалов. Одним из основных элементов второго контура является ПГ. В настоящее время наиболее распространенным материалом для трубной системы ПГ ЯЭУ с ВВЭР является аустенитная нержавеющая сталь. Ее применение обусловлено высокой общей коррозионной стойкостью, что важно по условиям работы первого контура, так как ПГ принадлежит в равной мере как к первому (радиоактивному), так и ко второму (условно нерадиоактивному) контурам, и теплоноситель может попасть во второй контур через неплотности и коррозионные повреждения именно в этой части ЯЭУ АЭС. Однако аустенитная нержавеющая сталь склонна к коррозии под напряжением в присутствии хлоридов и кислорода, следовательно, вода второго контура и добавочная вода должны иметь минимально-возможную концентрацию этих элементов.

Основными конструкционными материалами для остального оборудования, трубопроводов и арматуры второго контура ЯЭУ ВВЭР являются углеродистая сталь и медьсодержащие сплавы.

При эксплуатации оборудование, выполненное из углеродистых сталей (СПП, корпуса ПНД, корпус и теплообменная поверхность ПВД, камеры и трубные доски конденсаторов турбины и ТПН, трубопроводы питательной воды и пара, деаэрационные баки и т.д.) и медьсодержащих сплавов (теплообменные трубки конденсатора турбины и в некоторых случаях ПНД), подвергается коррозионно-эрозионному износу, степень которого увеличивается при снижении pH рабочей среды, накоплении углекислоты и появлении кислорода в технологическом тракте.

При выводе блока из работы необходимо проводить консервацию оборудования. При отсутствии консервации или некачественном ее проведении на внутренней поверхности металла оборудования остановленного ЭБ протекает стояночная кислородная коррозия, что приводит к образованию язв и накоплению продуктов коррозии.

Существенно усиливает коррозию металла ПГ (коллекторов, корпуса, трубопроводов раздачи питательной воды и продувки ПГ) снижение pH рабочей среды за счет накопления углекислоты, а также концентрирования органических кислот, источником которых может быть добавочная вода, вода, очищенная на СВО-5 и ионообменные смолы фильтров БОУ при их деградации.

Таким образом, **основные задачи в организации ВХР второго контура следующие:**

- поддержание качества рабочей среды второго контура в соответствии с требованиями нормативных документов;
- минимизация отложений на теплопередающих поверхностях парогенераторов, в проточной части турбин, в подогревателях высокого давления;
- предотвращение коррозионно-эрозионных повреждений парогенераторов, оборудования и трубопроводов парового, конденсатного и питательного трактов;
- эффективный вывод примесей из водяного объема ПГ, очистка продувочной воды ПГ и турбинного конденсата;
- организация химического контроля за качеством питательной и продувочной воды ПГ, основного и очищенного конденсата турбины, подпиточной воды;
- своевременное выявление и устранение причин, вызывающих отклонение качества рабочей среды от установленных нормируемых пределов;
- снижение попадания коррозионно-активных примесей с присосами охлаждающей воды через неплотности трубной системы основного конденсатора турбины.

- качественное проведение пассивации и консервации поверхностей оборудования второго контура в период останова ЭБ;
- качественное проведение предпусковой промывки оборудования;
- минимальный объем сбросов, содержащих вредные для окружающей среды химические примеси.

4.2. Средства обеспечения ВХР второго контура ЯЭУ с ВВЭР-1000

Системы обеспечения ВХР должны обеспечивать качество рабочей среды второго контура согласно установленным нормам.

К системам обеспечения ВХР второго контура относятся:

- система химводоочистки (водоподготовки);
- система конденсации и дегазации;
- система очистки турбинного конденсата (БОУ);
- система продувки и очистки продувочной воды ПГ;
- система ввода корректирующих добавок во второй контур.

4.2.1. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы химводоочистки

При работе ЯЭУ неизбежны потери воды и пара за счет протечек (организованных и неорганизованных), отбора пара на собственные нужды, промывок оборудования, дренирования оборудования перед выводом в ремонт и т.д. Эти потери необходимо восполнять. Потери второго контура восполняются системой ХВО (установкой водоподготовки), а потери первого контура – за счет воды, переработанной на СВО. Это связано с тем, что первый контур выполнен по замкнутой схеме, максимально исключающей попадание радиоактивной воды в окружающую среду.

Кроме того, запас ХОВ должен полностью обеспечивать потребность послемонтажных и предпусковых промывок КПП пускаемого ЭБ и заполнение второго контура ЯЭУ водой перед пуском.

Качество ХОВ, вырабатываемой системой, должно соответствовать следующим требованиям:

- удельная электрическая проводимость пробы не более 1,2 мкСм/см;
- величина рН 5,5...8,0 ед. рН;
- концентрация хлорид-ионов не более 5 мкг/дм³;
- концентрация кремниевой кислоты не более 20 мкг/дм³.

Таким образом, система ХВО предназначена для получения обессоленной воды, которая в дальнейшем направляется:

- на заполнение и отмывку первого и второго контуров перед пуском энергоблоков;

Добавочная вода собирается в баки запаса конденсата, откуда насосами обессоленной воды подается для восполнения потерь воды в первый и второй контур ЯЭУ, а также на собственные нужды ХВО, СВО или БОУ.

В процессе работы установки ионообменные фильтры выводятся на регенерацию для восстановления обменной емкости ионообменного материала. Регенерация производится растворами серной кислоты и гидроксида натрия. Регенерационные воды сбрасываются в баки-нейтрализаторы системы, а воды после взрыхления фильтров поступают в систему предочистки.

Арматура для обслуживания компонентов системы расположена в обвязке, в непосредственной близости каждого компонента системы.

Баки, входящие в систему обессоливания, размещены на площадке бакового хозяйства.

4.2.2. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации систем конденсации и дегазации

При работе ЯЭУ неизбежны присосы охлаждающей воды в конденсаторах турбины. Для обеспечения норм качества питательной и продувочной воды ПГ эти присосы должны быть минимальны. Величина предельно допустимого присоса охлаждающей воды в конденсаторах турбины во время эксплуатации должна определяться конкретно для каждой АЭС с учетом качества охлаждающей воды.

При увеличении удельной электрической проводимости Н-катионированной пробы турбинного конденсата на входе в конденсаторочистку более 0,3 мкСм/см и/или массовой концентрации ионов натрия более 1,5 мкг/дм³ принимаются оперативные меры по поиску и устранению причин превышения значений указанных показателей.

Контроль, обнаружение и устранение присосов охлаждающей воды и воздуха должны осуществляться с использованием предусмотренных в проектах АЭС систем и технических средств в соответствии с требованиями проектно-конструкторской и эксплуатационной документации.

Общее значение потерь пара и конденсата не должно превышать 1% от общей производительности ПГ при номинальном расходе питательной воды.

Система конденсации.

Конденсационная установка предназначена:

- для обеспечения оптимальных условий расширения рабочего пара в турбине до давления ниже атмосферного с последующей его конденсацией и одновременной дегазацией конденсата, а также для конденсации пара, поступающего в конденсаторы турбины через БРУ-К в нестационарных режимах работы ЭБ;

- для сбора и подачи основного конденсата через подогреватели низкого давления в деаэраторы.

В состав конденсационной установки входят:

- конденсаторная группа, предназначенная для конденсации отработавшего в турбине или сбрасываемого через БРУ-К пара;
- система циркуляционного водоснабжения, предназначенная для циркуляционного водоснабжения конденсаторов турбины и конденсаторов приводных турбин ТПН и технического – других потребителей машзала;
- система очистки циркуляционной воды;
- система шариковой очистки;
- эжекторная установка, предназначенная для создания и поддержания в конденсаторах турбины оптимального вакуума;
- система уплотнений турбины, предназначенная для предотвращения подсоса воздуха в конденсаторы в местах выхода роторов из ЦНД;
- конденсатная система, предназначенная для перекачки конденсата из конденсаторов турбины через БОУ и регенеративные подогреватели низкого давления в деаэраторы.

Конденсаторы представляют собой теплообменные аппараты поверхностного типа. Охлаждающая вода проходит внутри трубок, расположенных в паровом пространстве конденсаторов и образующих поверхность охлаждения. Отработавший в турбине пар поступает в конденсаторную группу, выполненную из трех или четырех конденсаторов. Пар, соприкасаясь с холодной поверхностью трубок, конденсируется и передает тепло проходящей по ним охлаждающей воде. Сконденсировавшийся пар стекает в конденсатосборник конденсатора, откуда конденсат отводится в коллектор всаса КЭН первой ступени. Этими насосами основной конденсат турбины подается на фильтры БОУ.

В переходные периоды работы ЭБ в конденсатор также могут направляться следующие потоки:

- конденсат греющего пара ПНД;
- пар после ПВД турбины через сбросной клапан при сбросе нагрузки;
- пар и конденсат расширителей дренажей высокого и низкого давления;
- конденсат дренажных баков машзала.

Увеличение значений удельной электрической проводимости и концентрации натрия основного конденсата турбины может быть вызвано ухудшением гидравлической плотности конденсаторов и появлением неплотностей в местах вальцовки трубок, сопровождающихся присосами охлаждающей воды в паровое пространство конденсатора.

Концентрация растворенного кислорода в конденсате турбины не должна превышать 30 мкг/дм³. Увеличение концентрации кислорода мо-

жет возникнуть вследствие присосов воздуха в конденсатном тракте, находящемся под вакуумом.

Во время эксплуатации величина присоса должна определяться с учетом качества охлаждающей воды и не должна превышать 0,001 % от производительности по конденсату (36 л/ч).

Система дегазации.

Деаэрационная установка системы питательной воды предназначена:

- для удаления из питательной воды коррозионно-активных углекислого газа, кислорода, а также связанной двуокиси углерода путем термического разложения бикарбонатов, растворенных в питательной воде;
- создания рабочего запаса питательной воды в баках-аккумуляторах для компенсации дебаланса между расходом питательной воды в ПГ и основного конденсата турбины с учетом добавочной воды;
- подогрева питательной воды.

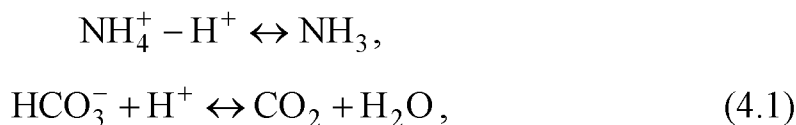
Деаэрационная установка состоит из двух термических деаэраторов ДП-3200/185, каждый из которых включает в себя две деаэрационные колонки ДСП-1600, установленные на аккумуляторном баке емкостью 185 м³.

Принцип организации термической деаэрации заключается в создании контакта воды с паром. В паровой фазе, контактирующей с водой, парциальное давление газа, удаляемого из воды, близко к нулю, что является необходимым условием правильной организации процесса дегазации. При пропускании пара через воду происходит ее нагрев, который организуют таким образом, чтобы температура воды стала равной температуре кипения при том давлении, при котором проводится процесс деаэрации (внешнее давление).

Следует отметить, что нагрев воды вообще и, в частности, нагрев воды до температуры кипения не является обязательным условием процесса деаэрации. Условие дегазации – снижение парциального давления газа до нуля. При подогреве воды до температуры насыщения при данном давлении парциальное давление газа над водой снижается до нуля и растворимость его, согласно уравнению закона Генри - Дальтона, также падает до нуля. Вследствие нарушения равновесия в системе происходит выделение избыточных газов из воды (физическая десорбция). Кроме того, повышение температуры воды способствует увеличению интенсивности диффузии молекул газа, что облегчает их выход в паровую фазу. Одновременно с этим повышение температуры уменьшает коэффициент абсорбции газа, что также положительно влияет на эффект деаэрации.

Так называемые *конденсирующиеся газы*, к числу которых относятся аммиак и угольная кислота, вследствие химического взаимодействия с водой растворимы в ней значительно больше, чем *неконденсирующиеся* – кислород, водород, азот.

Закону Генри - Дальтона подчиняются только химически не связанные с водой молекулы NH_3 и CO_2 . Находящиеся в равновесии с молекулами ионы



т.е. связанные аммиак и угольная кислота – доноры и акцепторы протонов, вследствие чего их десорбция из воды происходит лишь в результате смещения указанного равновесия и является функцией рН среды.

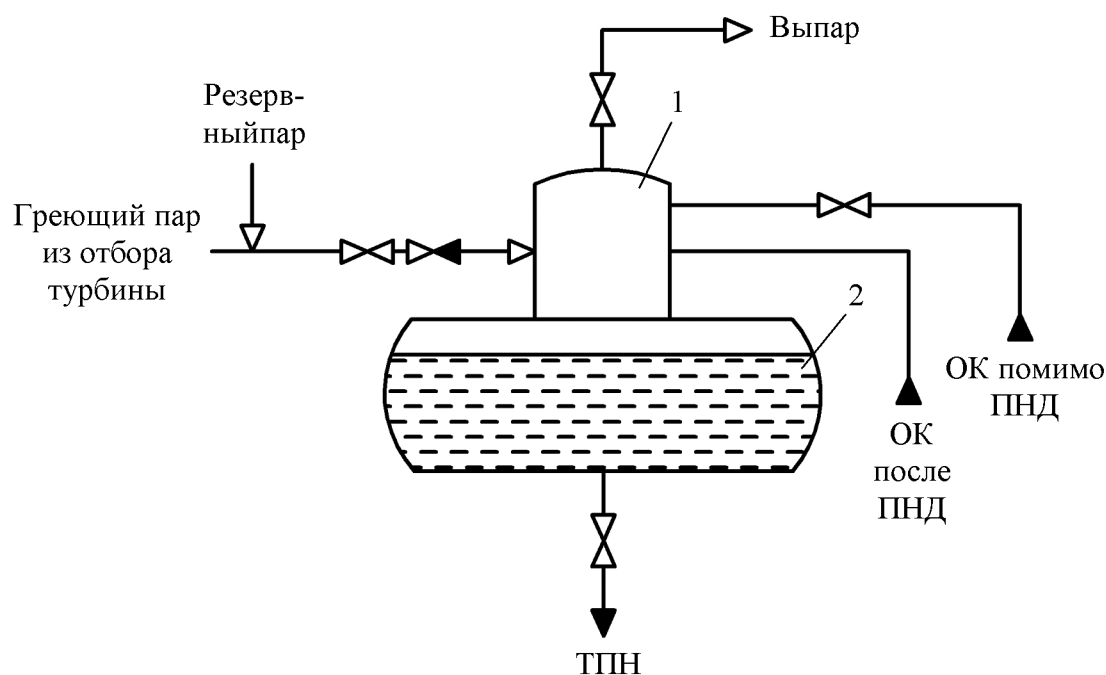


Рис. 4.2. Общая схема деаэрационной установки:
1 – деаэрационная колонка; 2 – деаэрационный бак

Как уже говорилось, снижение парциального давления до нуля и нагрев воды до температуры кипения еще не обеспечивают полного удаления газов из воды. Необходимо организовать процесс термической деаэрации таким образом, чтобы вода непрерывно контактировала с новыми порциями пара, при этом должна быть обеспечена как можно большая площадь соприкосновения водяной и паровой фаз. Для усиления процесса дегазации следует также увеличивать время контакта воды и пара и интенсивно перемешивать воду для устранения застойных зон, содержащих растворенные газы.

Для глубокого обескислороживания воды необходимо, чтобы пар, поступающий в деаэратор, не содержал кислорода. В качестве такого пара использует пар из отборов турбины.

Так как в воде, поступающей в деаэратор, концентрация кислорода выше равновесной, то происходит десорбция кислорода из воды в пар. При этом концентрация растворенного кислорода в воде уменьшается, а парциальное давление кислорода в паре увеличивается. Чтобы с течением времени процесс десорбции кислорода не прекратился, необходимо вентилировать колонку деаэрата, непрерывно подводя в нее пар, не содержащий кислород, и отводя пар, обогащенный кислородом.

Удаляемый пар, т.е. *выпар*, обычно загрязнен не только кислородом, но и другими летучими примесями, которые десорбировались из воды или поступили в деаэратор с греющим паром. Как правило, это азот, водород, аммиак и углекислый газ. За время движения вниз вода прогревается до температуры насыщения за счет конденсации греющего пара. Конденсат греющего пара присоединяется к струям воды, а остальной пар проходит дальше по высоте колонки, обеспечивая ее вентиляцию, унося с собой неконденсирующиеся газы, выделившиеся в процессе деаэрации.

Деаэраторная колонка и расположенный под ней деаэраторный бак выполняют дополнительную функцию – собирают отдельные потоки пара и конденсата: основной конденсат турбин, конденсат греющего пара деаэрата и ПВД, пар из расширителя непрерывной продувки; сепарат из турбинного сепаратора; конденсат греющего пара из установок СВО; очищенную продувочную воду после СВО-5.

Деаэраторы смешивающего типа имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что вследствие конденсации греющего пара в нижней части колонки в верхнюю ее часть проходит все меньшее количество пара. Это затрудняет прогрев конденсата в верхней части колонки и может увеличить расход выпара.

При снижении нагрузки деаэрата уменьшается равномерность распределения воды по сечению деаэраторной колонки и, соответственно, ухудшается контакт воды с паром. Поэтому при мощности энергоблока менее 50 % струйные деаэраторы не обеспечивают необходимой глубины деаэрации воды.

Для обеспечения нормальных условий деаэрации необходимо соблюдать требуемый гидравлический режим работы деаэрата, то есть необходимо поддерживать постоянным расход деаэрируемой воды. Увеличение расхода воды выше расчетного вызывает переполнение тарелок в деаэрационной колонке, вследствие чего вода стекает с них не тонкими струями, а толстыми потоками. При этом вода не успевает прогреться до требуемой температуры и попадает в бак-аккумулятор со значительным содержанием растворенных газов.

4.2.3. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы очистки турбинного конденсата

Система очистки турбинного конденсата РЕ (БОУ) предназначена для очистки всего конденсата (основного конденсата турбины, конденсата турбины ТПН, обессоленной воды из БЗК) от продуктов коррозии, смываемых с поверхности оборудования и трубопроводов второго контура и химических примесей, поступающий в КПТ с добавочной водой, присосами охлаждающей (технической) воды в основной конденсатор турбины.

Блочная обессоливающая установка состоит из электромагнитного фильтра (ЭМФ), пяти параллельно включенных фильтров смешанного действия (ФСД), ловушек зернистых материалов, регенерационной установки, трубопроводов, арматуры и КИП.

Схема БОУ позволяет:

- производить очистку всего или части турбинного конденсата сначала на ЭМФ, затем на ФСД;
- отключить ЭМФ и пропускать весь конденсат помимо ЭМФ на очистку на ФСД;
- очищать весь конденсат только на ЭМФ с пропуском его помимо ФСД;
- пропускать весь конденсат мимо БОУ перед включением системы в работу.

Благодаря конденсатоочистке уменьшается загрязненность питательной воды парогенератора продуктами коррозии конструкционных материалов, а также ионодисперсными примесями. Кроме того, снижается загрязненность внутренней поверхности парообразующих труб и проточной части турбины, что удлиняет рабочую кампанию энергоблока между эксплуатационными промывками парогенератора и проточной части турбины; ускоряется пуск и выход на расчетные параметры энергоблока после капитальных и текущих ремонтов.

Основную массу нерастворенных загрязнений конденсата составляют продукты коррозии конструкционных материалов пароводяного тракта, в первую очередь соединения железа, меди и цинка.

Особенно необходима надежно работающая обезжелезивающая часть в схеме БОУ в переходные периоды работы, т. е. во время пусков, снижения и последующего подъема нагрузки, когда требуется быстрое и глубокое улавливание значительных количеств продуктов коррозии.

Способ глубокого обезжелезивания турбинного конденсата выполняется с помощью ЭМФ с намагниченной шариковой загрузкой, установленного в схеме БОУ перед фильтрами смешанного действия. Данная схема наиболее рациональна, так как через ЭМФ при этом можно пропускать

весь поток очищаемого конденсата. При таком включении на ЭМФ лежит основная нагрузка по выводу железистоокисной взвеси из второго контура.

Таким образом, в схеме БОУ (рис. 4.3) предусмотрены две последовательные стадии очистки конденсата: обезжелезивание и ионирование.

Обезжелезивание конденсата осуществляется на электромагнитном фильтре, ионирование – на фильтрах смешанного действия.

Одна установка БОУ содержит пять однотипных ФСД, причем на некоторых ЭБ – это двухпоточные фильтры, а на других – однопоточные. Все ФСД подключены параллельно. Конструктивно ФСД сравнительно просты, надежны и обладают достаточно большой единичной производительностью ($900 \text{ м}^3/\text{ч}$).

БОУ расположена в главном корпусе (машинном зале) ЭБ. Регенерационная установка БОУ расположена на отметке 0,0 м.

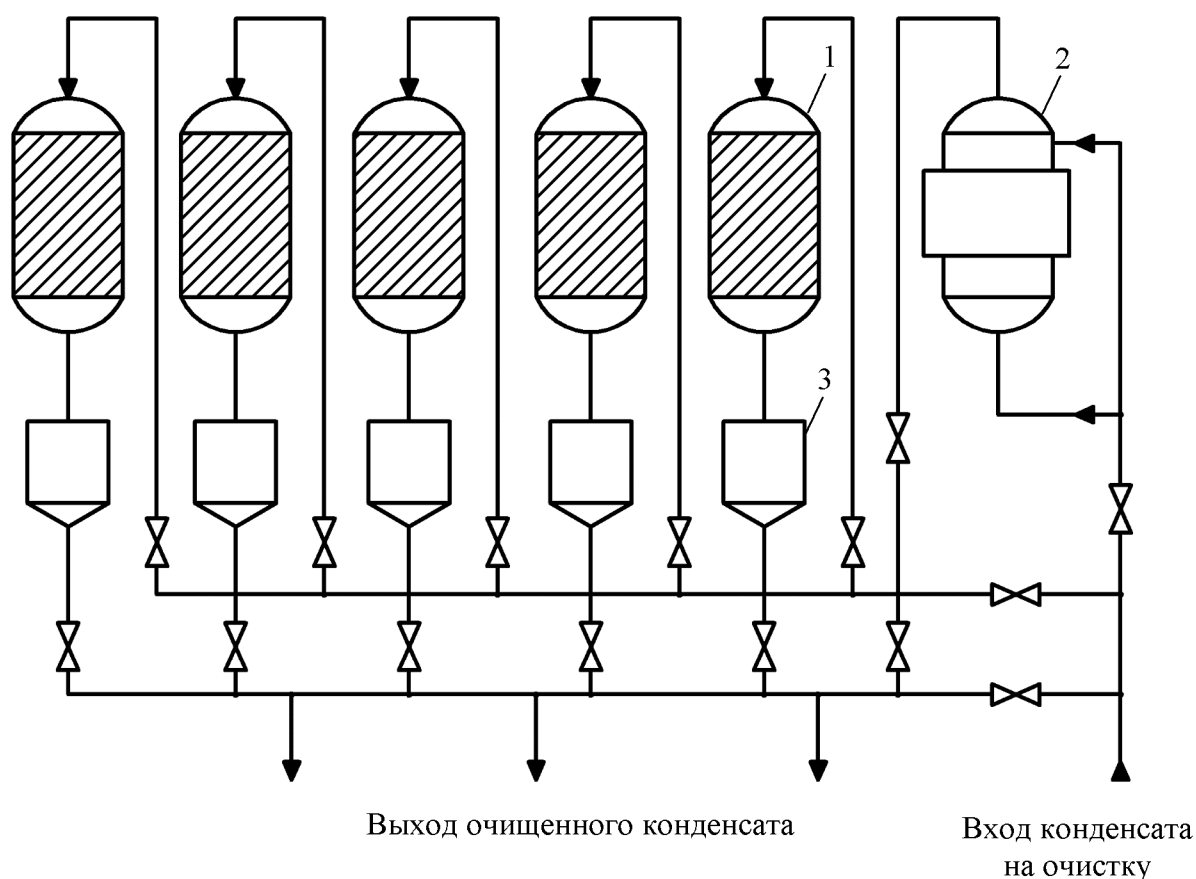


Рис. 4.3. Функциональная схема БОУ:
1 – ФСД; 2 – ЭМФ; 3 – ловушка зернистых материалов

На выходе из каждого ФСД величина удельной электрической проводимости Н-катионированной пробы конденсата не должна превышать $0,2 \text{ мкСм/см}$, концентрация ионов натрия не должна превышать $1,5 \text{ мкг/дм}^3$.

При переходе на первый уровень действий по отклонению нормируемых показателей, кроме величины водородного показателя рН и массовой

концентрации кислорода, необходимо подготовить к работе ФСД, находившиеся в резерве. При работе ЭБ на втором или третьем уровнях действия допускается подключение ФСД, находившихся в резерве, без дополнительной отмывки.

При соблюдении установленного качества питательной и продувочной воды допускается частичное или полное отключение ФСД и ЭМФ блочной обессоливающей установки.

Качество реагентов и фильтрующих материалов для установок БОУ должно соответствовать требованиям нормативных документов.

Конструкция оборудования БОУ.

Электромагнитный фильтр предназначен для очистки потока основного конденсата турбины от магнитных форм продуктов коррозии в виде магнетита или феррита (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) различного состава, которые, проходя через силовое магнитное поле, становятся постоянными магнитами и задерживаются шариковой загрузкой фильтра. Физическую основу работы обезжелезивающего электромагнитного фильтра составляет закономерность, заключающаяся в том, что сила притяжения намагниченных частиц задерживаемой взвеси к сферическим магнитным полюсам (шарикам) должна превышать механическую силу движущегося потока, стремящегося вынести частицы из рабочей зоны фильтра. Соблюдение этого условия позволяет получать высокий эффект задерживания ферромагнитной железистоокисной взвеси в слое намагниченных шариков, составляющих загрузку фильтра, и обеспечить остаточное содержание железа в очищенном конденсате меньше 10 мкг/дм^3 .

Устройство ЭМФ представлено на рис. 4.4.

Электромагнитный фильтр состоит из собственно фильтра, двух электромагнитных катушек, системы электропитания и автоматики.

Корпус фильтра изготовлен из аустенитной (немагнитной) стали 12Х18Н10Т с тремя патрубками $\varnothing 500$ мм для подвода и отвода конденсата. Он имеет лаз $\varnothing 450$ мм для внутреннего осмотра и загрузки шариков. Штуцер $\varnothing 80$ мм в нижнем днище предназначен для выгрузки шариков из фильтра.

Внутри ЭМФ расположены нижняя щелевая решетка для поддержания шариковой загрузки и верхняя, предназначенная для предотвращения выноса шариков из фильтра при промывке. Решетки выполняют роль ВРУ и НРУ, к которым сверху и снизу подводится конденсат на очистку. ЭМФ имеет объем $8,9 \text{ м}^3$ и загружен шариками $\varnothing 6 \dots 7$ мм из черной стали. Высота загрузки $2 \times 1,15 \text{ м}$, объем – $4,68 \text{ м}^3$, вес загрузки – 21 т. На половине высоты шариковой загрузки расположено СРУ, в котором верхний и нижний потоки конденсата сходятся и отводятся из ЭМФ.

СРУ состоит из четырех радиальных патрубков, $\varnothing$ 370 мм, со щелями 4 мм. Патрубки вварены в центральную трубу $\varnothing$ 370 мм, которая отводит очищенный конденсат из ЭМФ.

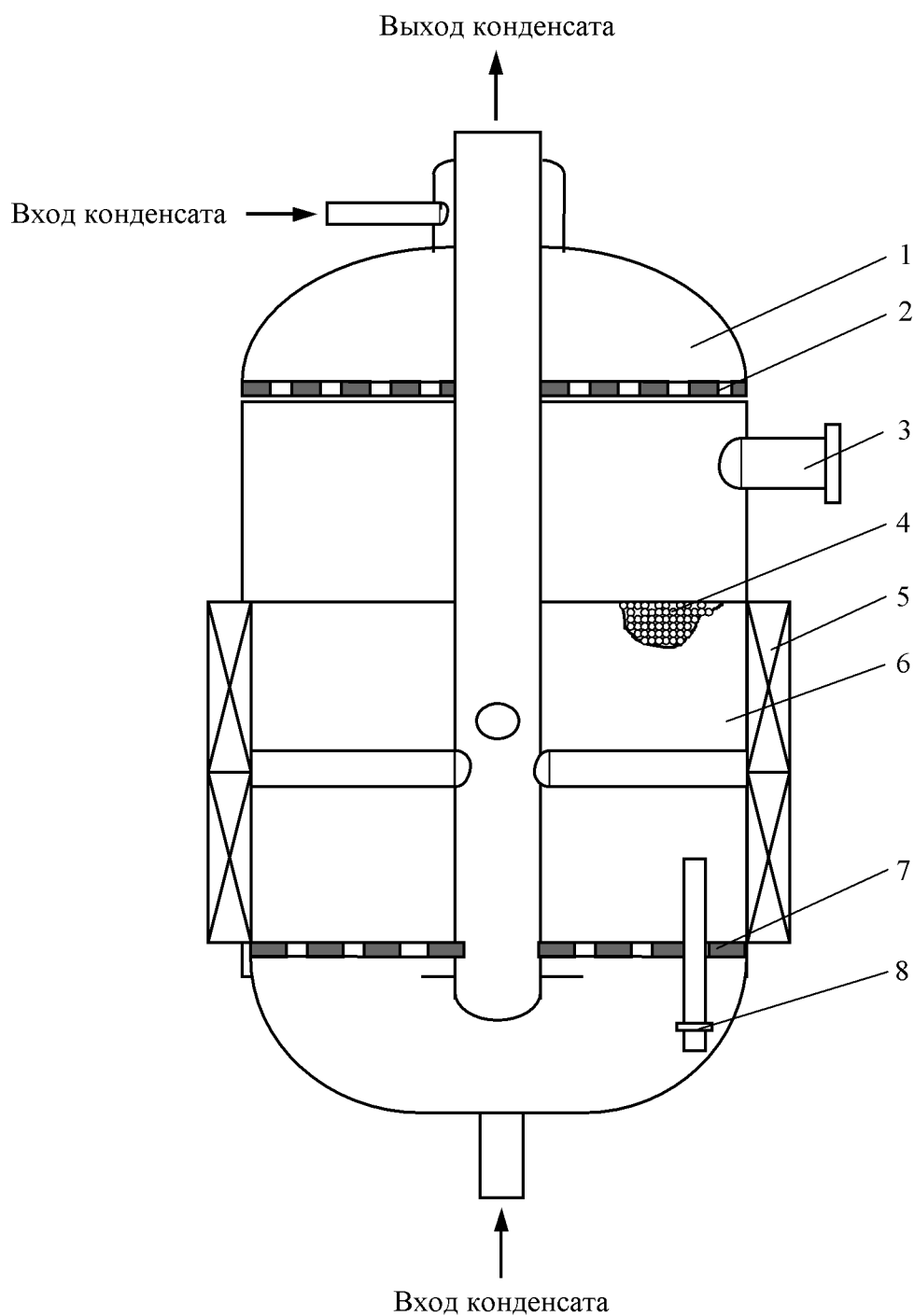


Рис. 4.4. Конструктивное устройство ЭМФ:
 1 – корпус; 2 – ВРУ; 3 – люк-лаз; 4 – шариковая загрузка;
 5 – электромагнитная катушка; 6 – СРУ;
 7 – НРУ; 8 – штуцер для выгрузки шариков

Решетки ЭМФ, также как и СРУ, имеют ширину щелей 4 мм и для предотвращения проскока шариков, закрыты сеткой из нержавеющей стали $3,5 \times 1$ мм.

Снаружи на ЭМФ одеты две электромагнитные катушки. Для охлаждения катушек внизу ЭМФ установлен вентилятор для принудительной подачи воздуха в электромагнитные катушки и металлический кожух. Кожух придает потоку направленность и, кроме того, заземлен. Основная арматура ЭМФ имеет электрический привод и управляется автоматическими устройствами.

ЭМФ оборудован пробоотбором по верхнему подводу, выходу общего потока, по сбросу промывочной воды, дренажем и воздушниками, манометрами и дифманометрами.

Фильтры смешанного действия предназначены для скоростного и глубокого обессоливания турбинного конденсата и частичного задерживания взвешенных частиц (соединений железа и меди), проскочивших через ЭМФ. ФСД загружен высокоосновным анионитом АВ-17-8 в OH^- -форме и сильнокислотным катионитом КУ-2-8 в H^+ -форме. Объем загруженного в ФСД катионита составляет $4,6 \text{ м}^3$, анионита – $10,0 \text{ м}^3$. Общее объемное соотношение загруженного катионита к объему анионита составляет примерно 1:2. ФСД со смешанным слоем катионита и анионита представляет собой систему многочисленных, последовательно расположенных катионитовых и анионитовых фильтров, что дает возможность получения очистки конденсата с очень низкой удельной электропроводимостью.

Корпус фильтра выполнен из нержавеющей стали и состоит из цилиндрической сварной обечайки с двумя сферическими днищами. Внутри корпуса фильтра расположены распределительные устройства: ВРУ, СРУ и НРУ. В верхней части корпуса фильтра расположен штуцер для гидрозагрузки, в нижней части днища для гидровыгрузки.

Очищаемый конденсат подается в двухпоточный ФСД через верхнее и нижнее распределительные устройства, очищенный конденсат выводится через среднее распределительное устройство.

Однопоточный ФСД отличается от двухпоточного тем, что очищаемый конденсат подается в него только через верхнее распределительное устройство, а очищенный конденсат выводится через нижнее распределительное устройство.

ФСД оборудован пробоотборными точками, дифманометрами, манометрами, воздушниками.

Фильтр-ловушка АФЛ-0,6-1,6 предназначен для улавливания рабочих фракций ионитов после ФСД с целью предотвращения возможного их выноса в конденсатно-питательный тракт.

Фильтр-ловушка зернистых материалов состоит из двух основных элементов: цилиндрического корпуса и фильтрующего патрона. Корпус

ловушки представляет собой трубу из углеродистой стали $\varnothing 630$ мм с вваренными под углом 90° входным и выходным штуцерами $\varnothing 350$ мм. На торце корпуса размещена съемная плоская крышка, через которую осуществляется выемка фильтрующего патрона. Внутренняя поверхность корпуса защищена антикоррозионным покрытием.

Фильтрующий патрон представляет собой перфорированную трубу из нержавеющей стали $\varnothing 350$ мм с конусообразным защищенным торцом со стороны входа в ловушку конденсата. К другому концу приварен фланец, который с помощью шпилек крепится к внутреннему фланцу корпуса. Разъем уплотняется резиновой манжетой, которая покрывает торец фильтрующей сетки.

Наружная поверхность цилиндрической части патрона обвита нержавеющей проволокой $\varnothing 3$ мм шагом 10 мм. Поверх навивки одевается три слоя сетки из нержавеющей стали: опорная сетка с размером ячеек 2...5 мм, две фильтрующие сетки с размером ячеек 0,25...0,4 мм. Сетки крепятся к патрону хомутами из нержавеющей стали и с торцов уплотнены резиновыми манжетами.

Корпус ловушки имеет штуцер для подключения манометров и дифманометров, штуцера для дренажных трубопроводов и воздушник. Для промывки ловушки предусмотрен подвод промывочной воды со сбросом по линии гидроперегрузки ионитов в фильтр-регенератор.

Регенерационная установка БОУ (рис. 4.5) предназначена для восстановления обменной емкости фильтрующих материалов, используемых в ФСД.

В состав регенерационной установки входят:

- бак отмывочных вод;
- фильтры-регенераторы катионита и анионита;
- баки-мерники кислоты и щелочи;
- насосы промывочной воды и отмывочных вод;
- насосы-дозаторы кислоты и щелочи;
- дренажный бак;
- дренажный насос.

Разделение фильтров на рабочие и регенерационные исключает возможность контакта регенерационных растворов с обрабатываемым конденсатом.

Бак отмывочных вод предназначен для накопления в нем обессоленной воды, расходуемой на собственные нужды. Заполнение бака производится из системы ХВО.

Фильтр-регенератор катионита (ФРК) предназначен для восстановления катионита, фильтр-регенератор анионита (ФРА) – для восстановления анионита.

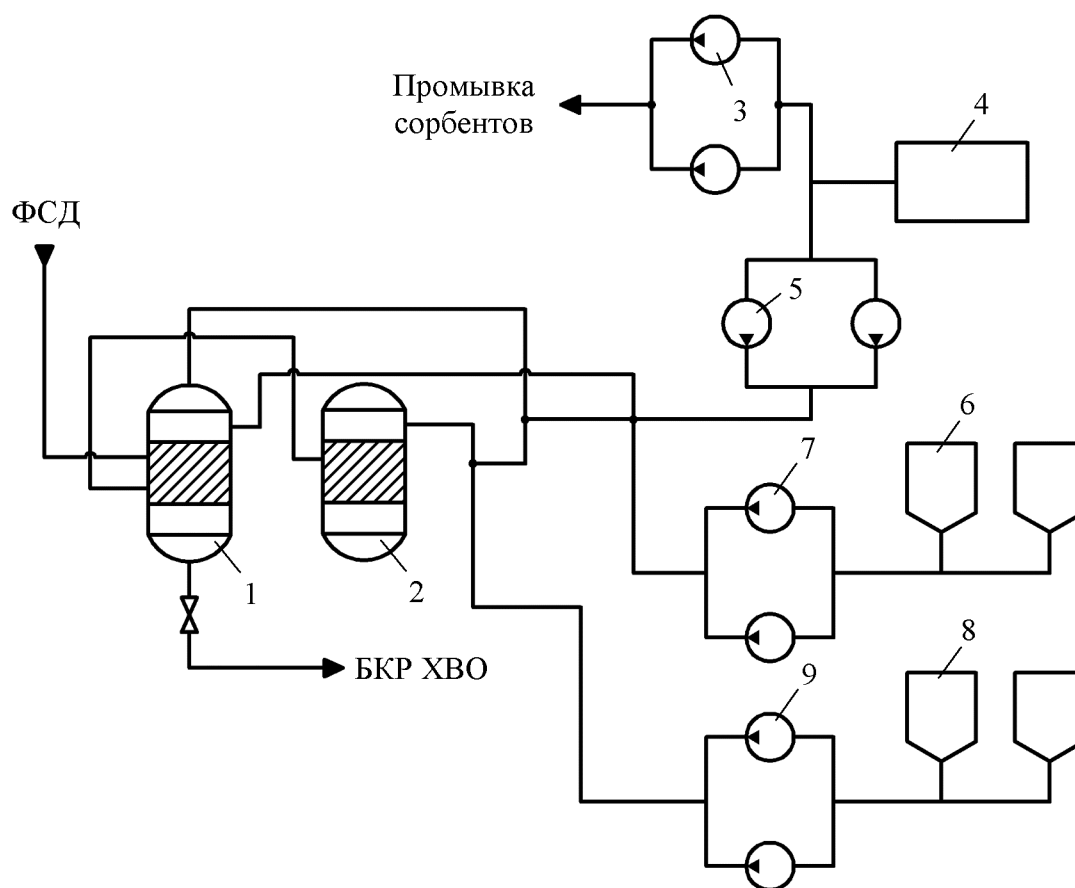


Рис. 4.5. Функциональная схема регенерационной установки БОУ:
 1 – фильтр-регенератор катионита; 2 – фильтр-регенератор анионита;
 3 – насос промывочной воды; 4 – бак отмывочных вод; 5 – насос
 отмывочных вод; 6 – бак-мерник кислоты; 7 – насос-дозатор кислоты;
 8 – бак-мерник щелочи; 9 – насос-дозатор щелочи

Баки-мерники кислоты и щелочи предназначены для подачи в них серной кислоты и едкого натра, а также для определения количества реагентов, израсходованных на регенерацию. Подача концентрированных реагентов в эти баки осуществляется из склада кислоты и щелочи системы ХВО.

Дренажный бак предназначен для сбора дренажных вод регенерационной установки. Собираемые в дренажный бак дренажи откачиваются насосом перекачки дренажных вод в баки радиационного контроля системы ХВО.

Насосы промывочной воды ЭМФ предназначены для подачи воды из бака отмывочных вод на промывку шариковой загрузки ЭМФ. Сброс промывочной воды из ЭМФ осуществляется в бак сброса отмывочных вод механических фильтров системы ХВО. Насосы отмывочных вод предназначены для подачи воды из бака отмывочных вод на выполнение операций по восстановлению шихты ФСД.

Насосы-дозаторы кислоты и щелочи предназначены для подачи концентрированных реагентов на приготовление регенерационных растворов для регенерации шихты в регенераторах ФРК и ФРА.

Основы эксплуатации БОУ.

Техническое обслуживание БОУ включает в себя следующие операции:

- подготовку и пуск ЭМФ, ФСД в работу;
- промывку ЭМФ;
- заполнение бака отмывочных вод обессоленной водой;
- заполнение баков-мерников кислотой и щелочью;
- регенерацию и промывку ФСД;
- промывку фильтра-ловушки.

1. Подготовка и ввод ЭМФ и ФСД в работу.

При нахождении БОУ в резерве ФСД и ЭМФ должны быть загружены отрегенированными и отмытыми фильтрующими материалами и заполнены водой.

Отмывка ФСД производится непосредственно в фильтре по схеме БОВ – НОВ – ФСД – БРК с расходом $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ до достижения удельной электропроводности $0,3 \text{ мкСм/см}$ и концентрации ионов натрия не более 3 мкг/кг . После окончания отмывки необходимо убедиться, что ФСД полностью заполнен обессоленной водой и воздух из него полностью удален. В противном случае после подключения ФСД возможно попадание оставшегося воздуха на всас КЭН второй ступени, срыв давления на насосах и их останов.

Включение в работу ФСД производится в следующей последовательности:

- открывается задвижка на выходе из ФСД;
- открывается задвижка на подаче конденсата сверху;
- медленным открытием регулятора устанавливается расход через ФСД более $300 \text{ м}^3/\text{ч}$.

После включения ФСД в работу необходимо проверить показания всех приборов, установленных на ФСД и ловушке, при этом убедиться, что:

- перепад давления на ловушке не более $1,5 \text{ кгс/см}^2$;
- электропроводность не более $0,3 \text{ мкСм/см}$.

Включение ЭМФ в работу производится после его промывки и составления бланка переключений. ЭМФ включается открытием арматуры на входе и выходе, подачей напряжения на катушки фильтров и закрытием байпаса помимо ЭМФ.

Работа БОУ на рециркуляцию в конденсатор продолжается до окончания отмывки обессоленного конденсата после БОУ до следующих показателей:

- электропроводность $0,3 \text{ мкСм/см}$;
- концентрация ионов натрия не более 5 мкг/кг ;

- концентрация кремниевой кислоты не более 20 мкг/кг;
- концентрация ионов железа не более 100 мкг/кг.

Один ЭМФ обеспечивает при этом очистку всего конденсата с производительностью 3600 м³/ч. Нагрузка каждого ФСД составляет 700 (900) м³/ч. Минимальная нагрузка ФСД допускается 300 м³/ч.

2. Промывка ЭМФ.

На период проведения промывки ЭМФ кратковременно отключается, и весь конденсат пропускается мимо ЭМФ. При этом он очищается только на ФСД. Одновременно может производиться или промывка ЭМФ, или замена истощенной шихты одного ФСД. На период регенерации истощенной шихты ФСД в работе остаются четыре фильтра смешанного действия.

Вывод ЭМФ на промывку осуществляется:

- при увеличении перепада давления на ЭМФ на 10 % по сравнению с первоначальным (2,5 кгс/см²);

- при проскоке ионов железа, равном 90 % от исходного;
- при продолжительности фильтрации более 1000000 м³ конденсата.

Промывка ЭМФ включает в себя следующие операции:

- оформление бланка переключений;
- вывод ЭМФ из работы;
- размагничивание катушки ЭМФ и ее обесточивание;
- включение НПВ, открытие промывочных задвижек и промывка ЭМФ;
- закрытие промывочных задвижек и отключение НПВ;
- подача напряжения на катушку ЭМФ в работу.

Промывка ЭМФ может выполняться *вручную*. В качестве промывочной воды используется вода из БОВ, подаваемая с полным расходом двух НПВ 1400 м³/ч. Сброс отработанной промывочной воды осуществляется в БОМ на ХВО. Продолжительность промывки 100 с. Если промывка выполняется вручную, то вывод ЭМФ из работы производится дистанционным открытием байпаса ЭМФ и закрытием арматуры на входе и выходе. Включение ЭМФ в работу после промывки осуществляется в обратном порядке.

Промывка ЭМФ в *дистанционном режиме* осуществляется после нажатия кнопки «Промывка» в следующем порядке:

- открывается задвижка на байпасе, закрываются рабочие задвижки, и весь поток очищаемого конденсата направляется на ФСД помимо ЭМФ;
- размагничивается катушка ЭМФ в течение 2 мин, после чего она обесточивается;
- открываются промывочные задвижки, и включается НПВ; ЭМФ промывается в течение 100 с с момента полного открытия задвижек;
- закрываются задвижки на выдаче насосов, отключается НПВ, и закрываются промывочные задвижки;

- подается напряжение на катушку ЭМФ, открываются рабочие задвижки, и закрывается байпас ЭМФ.

На мнемосхеме выполнение операций промывки сопровождается свечением соответствующих табло, по которым проверяется правильность выполнения операций.

3. Регенерация и промывка ФСД.

При истощении ионообменного материала в рабочем ФСД включается в работу резервный фильтр, а отработавший ФСД отключается на регенерацию. Одновременно может производиться регенерация материала только на одном ФСД.

Вывод ФСД на регенерацию производится после достижения в обессоленном конденсате хотя бы одного из следующих показателей:

- электропроводность 0,3 мкСм/см;
- концентрация хлорид-ионов 3 мкг/кг;
- концентрация ионов натрия 4 мкг/кг.

Вывод ФСД из работы выполняется постепенным закрытием арматуры на подаче конденсата так, чтобы расход через другие ФСД возрастал со скоростью не более 200 м³/ч в течение 1 мин. После снижения расхода до нуля закрывается арматура на входе и выходе выводимого ФСД.

После отключения ФСД на регенерацию катионит и анионит перегружаются в ФРК, в котором с помощью взрыхляющей промывки происходит разделение шихты на слой катионита и анионита. При взрыхлении анионит, имеющий меньшую плотность, поднимается вверх, а катионит, имеющий большую плотность, опускается.

Гидровыгрузка истощенной шихты из ФСД и ФРК осуществляется по схеме: БОВ – НОВ – ФСД – ФРК – БРК (с расходом 45 м³/ч) Регулирование расхода осуществляется арматурой перед ФРК. Взрыхление и разделение ионитов в ФРК производится водой из БОВ с включением одного НОВ. Вода подается в НРУ ФРК, а сбрасывается через ВРУ в БРК на ХВО.

После разделения анионит перегружают в ФРА и проводят раздельную регенерацию катионита и анионита. В процессе регенерации необходимо обеспечить более полное разделение слоев катионита и анионита. В противном случае при регенерации анионита раствором NaOH зерна катионита, попавшие в ФРА, перейдут в натриевую форму, что приведет к уменьшению фильтроцикла ФСД.

Гидроперегрузка анионита из ФРК в ФРА осуществляется по замкнутой схеме: БОУ – НОВ – СРУ – ФРА – БРК (с расходом 35 м³/ч). Одновременно через ВРУ ФРК устанавливается дополнительный расход 10 м³/ч. Опорожнение ФРК не допускается. Давление в нем должно составлять 1,5...2,0 кгс/см². Продолжительность операции примерно 20 мин (точно она устанавливается по смотровому окну ФРК).

После этого через ФРК и ФРА для регенерации пропускаются растворы кислоты и щелочи. Эти операции могут производиться как одновременно, так и отдельно по времени со сбросом в один или разные БРК. Расход кислоты и щелочи выбирается из условий нормального восстановления ионитов и обеспечения взаимной нейтрализации кислых и щелочных стоков. Сначала устанавливаются потоки воды на разбавление кислоты и щелочи по линиям регенерации через ФРК и ФРА с расходом по 20 м³/ч при работе одного НОВ. Затем включаются по одному НДК и НДЩ. Концентрация растворов должна составлять 4 %. Продолжительность операции контролируется по снижению уровня реагентов в БМЩ и БМК.

После пропуска заданного количества реагентов насосы реагентов отключаются и производится отмывка катионита и анионита по линиям регенерации. Расход воды по линиям регенерации со сбросом в БРК сохраняется по 20 м³/ч. Отмывка заканчивается примерно после достижения следующих показателей:

- кислотность после ФРК – 250 мкг-экв/кг;
- щелочность после ФРА - 250 мкг-экв/кг.

Последующая гидроперегрузка катионита из ФРК в ФРА выполняется по схеме: БОВ – НОВ – НРУ – ФРК – ФРА – БРК (с расходом 30 м³/ч). Одновременно через ВРУ ФРК устанавливается дополнительный расход 10 м³/ч. По окончании гидроперегрузки катионита в ФРА необходимо сдренировать ФРА до сигнальной трубки и перемешать шихту воздухом в течение 5 мин.

Домывка катионита и анионита в ФРА выполняется по следующей схеме: БОВ – НОВ – ВРУ – ФРА – БРА (с расходом 50 м³/ч). Давление в ФРА должно составлять 2,0...2,5 атм (опорожнение его не допускается).

Критерии окончания домывки:

- электропроводность – 0,5 мкСм/см;
- щелочность – 10 мкг-экв/кг.

После регенерации шихта перегружается в ФСД или хранится в ФРА как резервная.

4. *Промывка фильтра-ловушки* осуществляется в случае повышения на ней перепада давления до 1,5 кгс/см². При промывке ФЛ выводится из работы ФСД, с которым эта ловушка работает.

Промывка ФЛ выполняется двумя насосами НОВ обратным током воды в течение 5 мин с расходом 180 м³/ч по схеме БОВ – НОВ – ФЛ – линия гидроперегрузки – ФРК – БРК.

Иониты, вымытые из ФЛ, поступают в ФРК и остаются в нем. Расход устанавливается задвижкой перед фильтром-ловушкой.

Если после промывки и включения в работу перепад давления на ФЛ не снизился, то она промывается дополнительно. Если дополнительные промывки также не дали положительных результатов, то ФЛ вместе с ФСД

выводится из работы на чистку сетки. Если промывка связана с большим выносом ионитов из ФСД в ловушку, то после промывки ФЛ вся шихта из ФСД перегружается в ФРК и после ремонта дренажная система ФСД загружается отрегенированной шихтой.

4.2.4. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации систем продувки парогенераторов и СВО-5

Особенности ВХР второго контура отечественных ЯЭУ (фазовый переход среды, наличие разных конструкционных материалов во втором контуре и т.д.) обуславливают значительное количество вредных примесей в рабочей среде второго контура и, соответственно, в парогенераторах. Поэтому для поддержания водно-химического режима теплоносителя второго контура в парогенераторах необходима их продувка, т.е. вывод из корпуса парогенератора некоторого количества котловой воды и замена ее добавочной, специально подготовленной. Средствами для очистки котловой воды ПГ являются система продувки ПГ и система очистки продувочной воды ПГ (СВО-5).

Система продувки ПГ.

Система продувки ПГ предназначена для поддержания норм ВХР котловой воды ПГ путем отбора части воды из мест наиболее вероятного скопления продуктов коррозии, солей и шлама, а также, для дренирования парогенераторов при температуре котловой воды в них не более 100 °С.

Продувка ПГ необходима для выведения из рабочей среды второго контура растворимых и нерастворимых примесей. Различают непрерывную (или постоянную) и периодическую продувки.

Непрерывная продувка ПГ осуществляется из «солевого» отсека холодного торца с расходом не менее 7,5 т/ч и из патрубков нижней образующей корпуса парогенератора и штуцеров «карманов» коллекторов с расходом 0,5...2 т/ч из каждого парогенератора для поддержания трубопроводов продувки в горячем состоянии.

Периодическая продувка ПГ осуществляется из линий продувки с нижней образующей корпуса ПГ и «карманов» коллекторов как совместно, так и отдельно. Подключение периодической продувки, расход и длительность ее работы определяются регламентом работы системы продувки, при этом пропускная способность из линий продувки с нижней образующей корпуса ПГ и «карманов» коллекторов каждого ПГ до расширителей продувки должна быть не менее 20 т/ч.

Система обеспечивает возможность дренирования каждого ПГ с расходом не менее 50 т/ч при температуре котловой воды менее 100 °С и атмосферном давлении в ПГ.

При переходных и пусковых режимах эксплуатации энергоблока продувка парогенераторов должна поддерживаться на максимально возможном уровне до достижения нормируемых показателей качества рабочей среды.

При отклонении нормируемых показателей качества продувочной воды из «солевых» отсеков от допустимых значений в пределах первого уровня расход продувки из «солевых» отсеков парогенераторов должен быть увеличен до максимально возможного. При этом допускается временное прекращение периодической продувки с нижней образующей корпуса ПГ и «карманов» коллекторов до восстановления нормируемых показателей качества продувочной воды «солевых» отсеков до допустимых значений.

Следует отметить, что использование периодической продувки для ликвидации отклонений от норм по активности продувочной воды не допускается.

Для очистки продувочной воды ПГ используется установка СВО-5, производительность которой (с учетом величины выпара расширителя продувки) должна быть обеспечена на уровне не менее 1 % от номинальной общей паропроизводительности ПГ.

Критерием выполнения системой требуемых функций является поддержание качества котловой воды и обеспечение дренирования парогенераторов. Трубопроводы и арматура части системы, расположенной в герметичной оболочке, рассчитаны на аварийные параметры, возникающие в гермооболочке при авариях, связанных с разуплотнением первого и второго контуров и сохраняют при этом свою работоспособность. Система продувки парогенераторов является системой нормальной эксплуатации, важной для безопасности АЭС.

Как уже отмечалось, продувка ПГ осуществляется двумя линиями:

- постоянная продувка из «солевых» отсеков;
- периодическая продувка через четыре трубы диаметром 32×3,5 мм из «карманов» коллекторов (по две трубы из каждого коллектора – бывшая периодическая продувка) и две трубы диаметром 89×6 мм (бывшая постоянная продувка) из мест приварки днищ к корпусу ПГ.

И постоянная, и периодическая продувки могут осуществляться по обеим линиям в двух режимах: нормальном режиме и режиме увеличенной продувки при нарушении ВХР.

Дренирование парогенераторов осуществляется через штуцер диаметром 100 мм, расположенный в средней нижней части корпуса каждого парогенератора.

Функциональная схема системы продувки парогенераторов представлена на рис. 4.6.

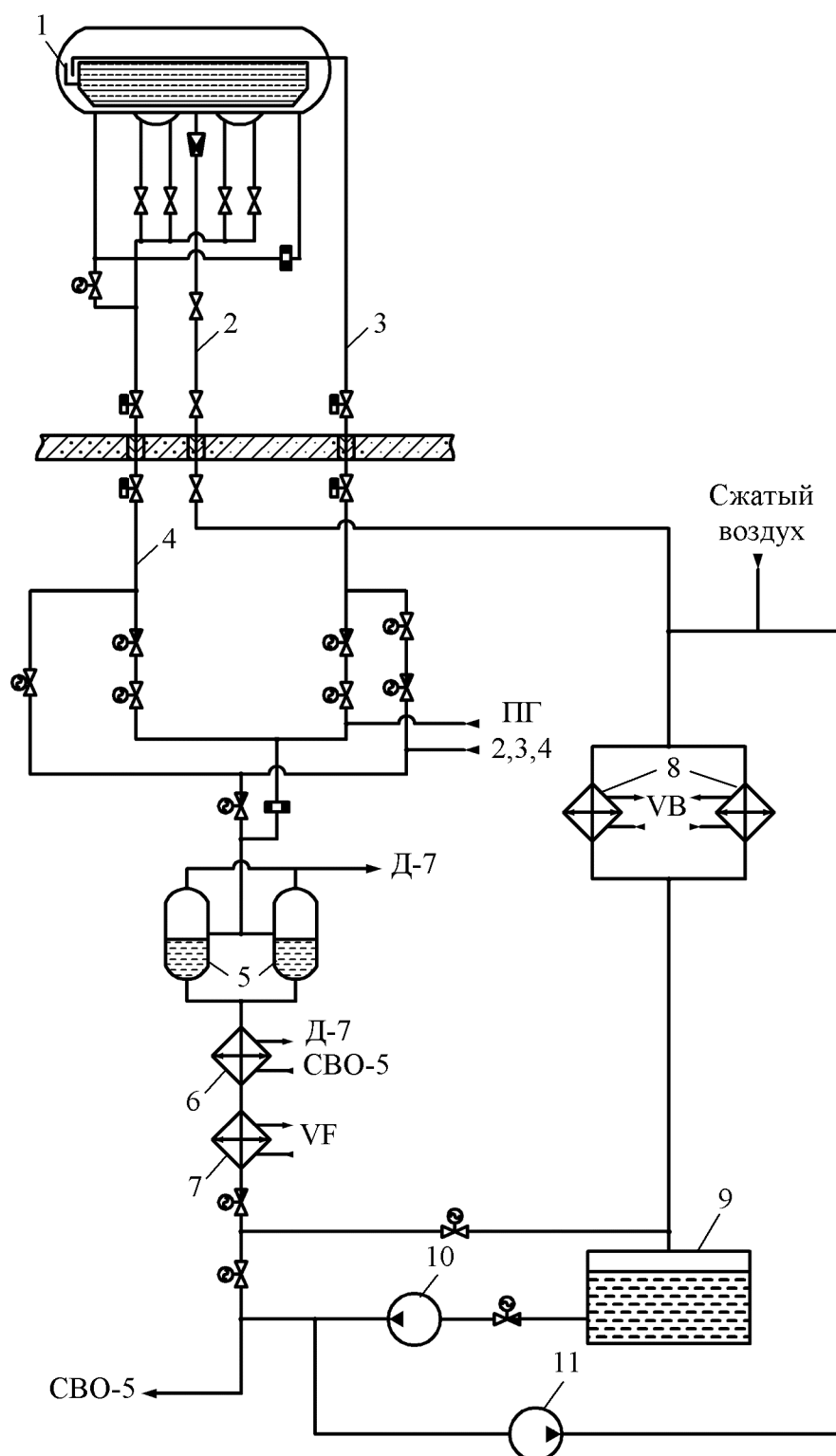


Рис. 4.6. Функциональная схема системы продувки ПГ:
 1 – солевой отсек; 2 – трубопровод дренажа ПГ; 3 – трубопровод постоянной продувки; 4 – трубопровод периодической продувки; 5 – расширители продувки;
 6 – регенеративный теплообменник продувки; 7 – доохладитель продувки;
 8 – охладители дренажа; 9 – бак слива дренажа; 10 – насос слива дренажа;
 11 – насос гидроиспытаний второго контура

Расширители продувки предназначены для разделения продувочной воды на пар и воду за счет расширения (давление в расширителях поддерживается 8 кгс/см^2), а также центробежного эффекта. Кроме того, в расширителях продувки осуществляется первый этап очистки продувочной воды. Отсепарированный пар по трубопроводу направляется в деаэратор машзала. Отсепарированная продувочная вода из расширителей продувки поступает в регенеративный теплообменник.

Регенеративный теплообменник продувки представляет собой горизонтальный, кожухотрубный, однокходовой по обеим средам теплообменный аппарата. Продувочная вода, охлаждаясь, проходит трубное пространство и далее направляется в доохладитель продувки. Межтрубное пространство заполняется отчищенной продувочной водой после СВО-5, которая после подогрева подается в турбинное отделение (деаэратор или дренажные баки).

Дохладитель продувки (горизонтальный, кожухотрубный, двухходовой) предназначен для охлаждения продувочной воды до температуры менее 55°C по условиям работы ионнообменных фильтров СВО-5. Охлаждающая вода – техническая вода группы «В» (неответственных потребителей).

Бак слива дренажа используется:

- для слива котловой воды при дренировании ПГ;
- для сброса продувочной воды при разогреве системы продувки;
- для сбора протечек из пробоотборных линий продувки ПГ;
- для создания запаса воды при гидроиспытаниях ПГ.

Насос слива дренажа предназначен для подачи воды из бака слива дренажа на спецводоочистку в СВО-5.

Принцип работы системы.

Система вводится в работу при достижении температуры в парогенераторах $170...180^\circ\text{C}$. Система функционирует во всех режимах нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и в аварийных режимах, за исключением аварийных режимов, связанных с посадкой локализующей арматуры системы и обесточиванием.

Продувочная вода по трубопроводам периодической или постоянной продувки сливается в общий коллектор продувки ПГ и затем поступает в расширители продувки. Необходимый расход продувки обеспечивается за счет установки на линиях периодической и непрерывной продувки дроссельных шайб и запорно-регулирующей арматуры.

В расширителях продувки пароводяная смесь продувочной воды разделяется на пар и воду. Пар подается в деаэрационную установку турбинного отделения, а вода, охлаждаясь в регенеративном теплообменнике и доохладителе продувки, поступает в систему СВО-5. Пройдя ее, очищенная вода возвращается в регенеративный теплообменник и, подогреваясь, по-

ступает в машзал – либо в деаэраторы, либо в дренажные баки в зависимости от результатов химических анализов. Давление в расширителях продувки ПГ поддерживается регулирующим клапаном, установленном на трубопроводе отвода пара в деаэраторы турбинного отделения. От превышения давления каждый расширитель продувки защищен двумя предохранительными клапанами, настроенными на срабатывание при давлении 9,2 кгс/см².

В случае использования системы для дренирования ПГ котловая вода через охладители дренажа ПГ поступает в бак слива дренажа. Затем насос слива дренажа подает воду на СВО-5. Очищенная котловая вода через регенеративный теплообменник продувки поступает либо в деаэратор машзала либо дренажные баки.

Иногда, при ухудшении анализов по ВХР в ПГ, бак слива дренажа используется для перевода безнасосной схемы продувки ПГ в насосную, т.е., при необходимости, продувку переводят на бак с последующей откачкой насосом слива дренажа на СВО-5.

Следует отметить, что в большинстве случаев периодичность и объемы продувки устанавливаются согласно указаниям старшего оперативного персонала, исходя из текущего состояния ВХР.

Реконструкция системы продувки ПГ.

В процессе эксплуатации парогенератора ПГВ-1000(М) на выходных (холодных) коллекторах в перемычках между отверстиями перфорированной зоны появлялись повреждения в виде трещин коррозионно-механического происхождения, приводящие к протечкам теплоносителя во второй контур. В процессе исследований было установлено, что причины повреждения коллекторов многофакторные, а их механизм обусловлен, в основном, наличием вблизи коллекторов неконтролируемой зоны, в которой содержание растворимых солей в 1,5...2 раза превышает их концентрацию в воде непрерывной продувки. Также негативное влияние оказывает изменение пластичности стали ГН2МФА при рабочей температуре холодного коллектора и напряжения (остаточные технологические и рабочие), приближающиеся к пределу текучести в условиях воздействия коррозионно-активной рабочей среды.

Начиная с 1987 года АЭС с ВВЭР-1000 внедрены мероприятия, повышающие эксплуатационную надежность ПГ, а именно контроль целостности перемычек коллекторов в условиях изготовления и эксплуатации, переход на сталь 10ГН2МФА электрошламового переплава вместо открытой выплавки, низкотемпературную термообработку перфорированной зоны коллекторов, отказ от взрывной вальцовки, улучшение качества ВХР, ужесточение отдельных показателей его норм, особенно pH.

Частью мероприятий по повышению эксплуатационной надежности ПГ явилась реконструкция систем водопитания и продувки ПГ, которая проводилась на АЭС в период 1991-1993 гг.

Если оценить время работы ПГ до повреждения, то бросается в глаза тот факт, что время службы изготовленных по единой технологии теплопередающих трубок и коллекторов ПГ имеет значительный разброс от 7 до 59 тыс. часов, что скорее всего определяется химическим фактором. Эксплуатация оборудования в условиях ухудшения водного режима, при наличии коррозионно-активных примесей значительно снижает рабочий ресурс оборудования.

Таким образом, при повышении надежности ПГ очень важным моментом является снижение «солевой нагрузки» на конструкционные элементы ПГ. Исследования, проведенные на Нововоронежской и Хмельницкой АЭС, подтвердили ранее высказываемые предположения об образовании зон повышенного солесодержания в объеме парогенератора по сравнению с величиной солесодержания усредненной продувки. Характер распределения зон, как показали испытания, не зависел от величины продувки и имел ярко выраженный «горб» в районе горячего коллектора. Причем, при номинальной нагрузке концентрация примесей у «горячего» коллектора в шесть раз превышала их концентрацию в «холодном» торце ПГ. Эти испытания показали, что штатный режим продувки ПГ позволяет поддерживать величину нормируемого содержания солей в продувочной воде при соответствующих нормах показателей питательной воды, но при этом концентрации примесей в отдельных зонах водяного объема могут превосходить допустимые величины, что с учетом процессов упаривания в щелях и зазорах создает благоприятные условия для активизации коррозионных процессов.

В связи с этим проектной организацией (ОКБ «Гидропресс») были выданы рекомендации по модернизации внутрикорпусных устройств ПГ и изменению схемы продувки. Указанная модернизация заключалась в изменении схем водопитания, продувки и перераспределения циркуляции в объеме ПГ. Главной целью модернизации являлось удаление зон повышенного солесодержания от коллекторов теплоносителя путем перераспределения питательной воды по длине ПГ и образования в «холодном» торце ПГ (вблизи днища) так называемого «солевого отсека», из которого организована непрерывная продувка котловой воды с наибольшей концентрацией растворенных примесей. Согласно проекту модернизации внутрикорпусных устройств ПГ необходимое перераспределение питательной воды было получено путем установки в «горячем» торце ПГ на погруженном дырчатом листе четырех дополнительных раздающих коллекторов питательной воды с отверстиями, направленными вертикально вниз. Коллектор №10 переведен на «холодную» сторону ПГ для увеличения подачи пита-

тельной воды в зону «холодного» коллектора. В «холодном» торце ПГ отглушены пять крайних раздающих коллекторов питательной воды и установлена поперечная перегородка между первым и вторым отключенными коллекторами над погружным дырчатым листом и под ним. Цель установки перегородки – уменьшение продольной циркуляции от «горячего» коллектора в торцы для предотвращения солевых зон по длине ПГ.

Система СВО-5.

Система СВО-5 предназначена для очистки продувочной воды парогенераторов с целью повторного использования в технологическом цикле АЭС.

В процессе очистки продувочной воды удаляются взвешенные примеси, представляющие собой, в основном, продукты коррозии КПТ второго контура, а также концентрирующиеся катионы (кальция, магния, натрия, аммиака) и анионы (хлора, сульфатов, кремниевых кислот, карбонатов йода).

Радиоактивные вещества могут поступать в теплоноситель второго контура вследствие негерметичности парогенераторов и значительного перепада давления между первым и вторым контурами. Активность теплоносителя второго контура обусловлена в основном радионуклидами кобальта, цезия, церия, циркония, ниобия, йода, натрия.

Система СВО-5 (рис. 4.7) состоит из двух основных и одной резервной ниток для двух блоков АЭС (но могут быть и другие варианты). Производительность одной нитки составляет примерно 40...50 м³/ч.

Каждая основная нитка состоит из механического, катионитового, анионитового фильтров, ловушки зернистых материалов, бака очищенной воды и насосов бака очищенной воды. Резервная нитка включает в себя механический, катионитовый, анионитовый фильтры и ловушку зернистых материалов.

Механический фильтр предназначен для очистки продувочной воды от мелко- и крупнозернистых механических примесей и от ионов железа. В качестве сорбента в МФ используется КУ-2-8. Фильтр представляет собой сосуд вертикального исполнения, ограничивающийся цилиндрическим кожухом и двумя выпуклыми днищами, опирающийся на три опоры. Внутри сосуда имеются две сборно-распределительные системы. Верхняя распределительная система состоит из перфорированных трубок и предназначена для распределения воды, подаваемой на очистку. Нижняя распределительная система предназначена для сбора очищенной воды. Диаметр фильтра 2500 мм, высота загрузки 1500 мм, производительность 50 м³/ч, рассчитан на рабочее давление 10 кгс/см².

Катионитовый фильтр предназначен для очистки от ионов кальция, магния, натрия, железа, кобальта, меди цезия. Фильтр представляет собой сосуд вертикального исполнения, ограничивающийся цилиндрическим кожухом и двумя выпуклыми днищами, опирающийся на три опоры.

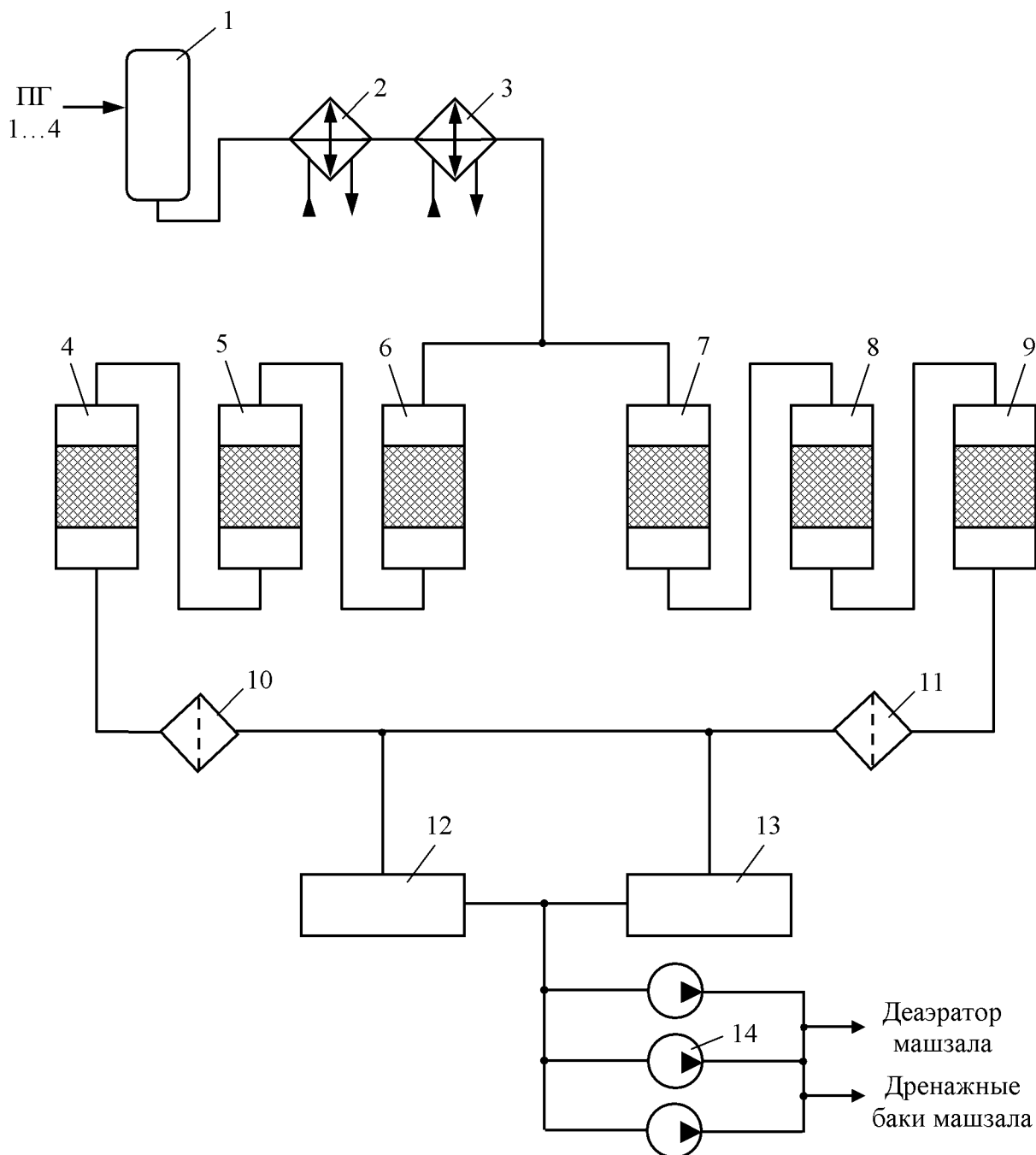


Рис. 4.7. Функциональная схема системы СВО-5:

- 1 – расширитель продувки; 2 – регенеративный теплообменник продувки;
 3 – доохладитель продувки; 6, 7 – механический фильтр; 5, 8 – катионитовый
 фильтр; 4, 9 – анионитовый фильтр. 10, 11 – фильтр-ловушка;
 12, 13 – бак очищенной воды; 14 – насосы очищенной воды

Внутри сосуда имеются две сборно-распределительные системы. Конструкция сборно-распределительных устройств аналогична по конструкции, как у МФ. В качестве сорбента в КФ используется катионит ядерного класса КУ-2-8 чс.

Анионитовый фильтр предназначен для очистки продувочной воды ПГ в основном от хлорид-ионов и сульфат-ионов. В качестве сорбента в фильтре используется анионит ядерного класса АВ-17-8 чс. Конструкция АФ аналогична КФ.

Ловушка зернистых материалов предназначена для предотвращения попадания ионообменной смолы в очищенную воду при нарушении целостности нижнего распределительного устройства на выходе АФ. Ловушка представляет собой сосуд вертикального расположения, ограничивающийся цилиндрическим кожухом, выпуклыми крышкой и дном, и опирающийся на две опоры. В корпусе установлена съемная трубная доска, в которой закреплены 13 фильтрующих патронов. Патроны состоят из фильтрующих желобков, имеющих щели 0,25 мм. С целью промывки от задержанных фильтрующих материалов, предусмотрен подвод промывочной воды.

Бак очищенной воды представляют собой цилиндрический сосуд, предназначенный для сбора очищенной воды после фильтров, и служит буферной емкостью для работы насосов очищенной воды. Рабочий объем бак 8 м³, полный – 10 м³.

Насос очищенной воды предназначен для перекачивания очищенной продувочной воды ПГ в деаэратор или в дренажный бак турбинного отделения. Насос центробежный марки КС-50-100/4 производительностью 50 м³/ч и напором 110 м вод. ст.

Принцип работы системы.

Продувочная вода при выходе из парогенераторов поступает в расширитель продувки, где происходит расширение пароводяной смеси и разделение ее на составляющие фазы: пар и воду. Затем вода, проходя через регенеративный теплообменник (в качестве охлаждающей воды в котором используется очищенная продувочная вода парогенераторов), а также через доохладитель, к которому подводится техническая вода, охлаждается и подается на вход системы СВО-5. Очищенная на фильтрах установки вода поступает в бак очищенной воды, откуда насосами подается через регенеративный теплообменник в деаэратор или дренажный бак турбинного отделения.

В результате образования дефектов в теплообменных трубках, сварных швах, неплотностей во фланцевых соединениях коллекторов первого контура парогенераторов возможно увеличение радиоактивности в продувочной воде, поступающей на очистку в систему СВО-5. В этом случае действия персонала должны быть направлены на предотвращение загрязнения воды второго контура. Поэтому при суммарной активности воды после нитки более $3 \cdot 10^{-10}$ Ки/л рабочая нитка из работы выводится на регенерацию, а резервная вводится в работу.

Допускается производить очистку продувочной воды парогенераторов при суммарной ее активности не более $3,7 \cdot 10^{-10}$ Ки/л, при этом расход не должен превышать 30 м³/ч. Причем при суммарной активности $2 \cdot 10^{-10}$ Ки/л должен производиться останов ЭБ.

Основы эксплуатации системы.

Техническое обслуживание системы СВО-5 включает следующие основные операции:

- гидрозагрузку и гидровыгрузку сорбента в фильтры;
- регенерацию фильтров;
- промывку фильтра-ловушки;
- проверку неплотностей в сварных, фланцевых соединениях с устранением неплотностей, подтяжкой крепежа;
- проверку состояния теплоизоляции;
- контроль наличия маркировки, подписей, условных обозначений, восстановление маркировки, подписей.

Регенерация фильтров.

Регенерация фильтров СВО-5 производится после вывода рабочей нитки в резерв. Регенерация каждой нитки осуществляется по блочному принципу, то есть при отклонении нормируемого показателя по одному фильтру производится регенерация всей нитки.

Вывод нитки на регенерацию производится при достижении следующих показателей:

- рН после КФ более 6 ед.;
- жесткость после КФ более 3 мкг-экв/дм³;
- концентрация хлоридов после АФ более 50 мкг/дм³;
- рН после АФ менее 6,5 ед.;
- активность после АФ более $3 \cdot 10^{-10}$ Ки/л.

Регенерация осуществляется в следующей последовательности:

- взрыхление фильтров;
- пропуск через фильтры регенерационных растворов;
- отмывка фильтров;
- постановка фильтров в резерв.

Взрыхление фильтров производится сжатым воздухом противотоком в течение 3...5 мин. Затем фильтры промываются чистым конденсатом противотоком в течение 25...30 мин до окончания выноса мелких фракций сорбента через воздушники.

Регенерация МФ и КФ производится пропуском 5-процентного раствора азотной кислоты в течение 1,5 ч, затем осуществляется отмывка до получения следующих показателей: кислотность не более 100 мкг-экв/кг, рН = 4...4,5.

Регенерация АФ производится пропуском 5-процентного раствора гидроксида калия в течение часа, затем осуществляется отмывка до полу-

чения следующих показателей: щелочность не более 100 мкг-экв/кг, концентрация хлоридов после АФ не более 50 мкг/дм³.

При небольших отклонениях в концентрации и расходе регенерационного раствора время его пропускания определяется следующим образом

$$T = \frac{6 \cdot \beta}{C \cdot \alpha} \text{ (мин)}, \quad (4.2)$$

где T – время пропускания растворов, мин.;

6 – коэффициент;

β – расход 100-процентной кислоты или щелочи на одну регенерацию, кг;

α – расход регенерационного раствора по расходомеру разбавляющей воды, м³/ч;

C – концентрация регенерационного раствора кислоты или щелочи, %.

По окончании регенерации фильтров нитка СВО-5 вводится в работу или выводится в резерв.

Фильтр-ловушка промывается при достижении перепада давления на нем, равном 1 кгс/см² при работе нитки. ФЛ промывается с расходом воды 30 м³/ч в течение 10 мин. После промывки проверяется перепад давления на фильтре, который не должен превышать 0,5 кгс/см².

4.2.5. Назначение, состав, принцип действия и основы эксплуатации системы ввода корректирующих добавок во второй контур

Характерной особенностью проектного ведения ВХР второго контура является поддержание нормируемых показателей за счет дозирования гидразина и подщелачивания котловой воды ПГ гидроксидом лития. Недостаток такого ВХР в том, что поддержание рН питательной и продувочной воды осуществляется аммиаком, полученным в результате разложения гидразина. Высокая летучесть аммиака не обеспечивает необходимую величину рН в объеме ПГ. Ограниченность использования аммиака связана также с резким сокращением фильтроцикла конденсатоочистки при увеличении его концентрации в трубном конденсате. Кроме того, высокое содержание аммиака в основном конденсате турбины способствует выносу продуктов коррозии медьсодержащих сплавов с поверхности теплообмена конденсаторов в ПГ. Поэтому на отечественных АЭС используются и другие корректирующие добавки: морфолин и этаноламин.

В свою очередь, замена морфолина на этаноламин обусловлена следующими недостатками морфолинового ВХР второго контура:

- образование органических кислот в средах второго контура в результате окисления морфолина при взаимодействии с кислородом;

- снижение фильтроцикла фильтров конденсатоочистки в морфолиновой форме, которое ограничивают использование данного режима и не от-

вечает полностью требованиям, предъявляемым к следующим показателям: щелочность, выход азота в природную среду, межфазный коэффициент распределения;

Система ввода корректирующих добавок (RV) относится к системе нормальной эксплуатации и предназначена для подачи химреагентов (гидразина, аммиака, метабората-лития, морфолина, этаноламина, комплексона типа «Трилон Б») в КПП второго контура для достижения и поддержания требуемого качества конденсата и питательной воды, а также для защиты внутренних поверхностей оборудования ЯЭУ от коррозии при работе ЭБ и консервации оборудования на период его останова.

Система ввода химреагентов (рис. 4.8) состоит из трех подсистем:

- подсистема ввода гидразин-гидрата (RV10);
- подсистема ввода аммиака (метабората-лития или морфолина или этаноламина) (RV20);
- подсистема ввода комплексона «Трилон Б» (RV30).

Подсистема ввода гидразин-гидрата включает в себя:

- два бака-мерника гидразин-гидрата, соединенные между собой переливной трубой для предотвращения перелива и дыхательным трубопроводом для удаления газовой смеси в атмосферу за пределы машзала;
- четыре насоса-дозатора гидразин-гидрата с общим коллектором всаса и общим напорным коллектором;
- трубопроводы приема гидразин-гидрата и химобессоленной воды;
- трубопроводы подачи раствора гидразин-гидрата в КПП на всас или на напор КЭН второй ступени;
- трубопроводы опорожнения баков-мерников в приямок.

Приготовление рабочего раствора гидразин-гидрата производится на узле химреагентов ХВО персоналом химического цеха. Подача рабочего раствора гидразин-гидрата для заполнения бака-мерника производится персоналом турбинного отделения.

После заполнения бака-мерника рабочим раствором необходимо убедиться в соответствии концентрации раствора нормативным требованиям. Для этого делается химический анализ раствора гидразина, и если он не соответствует требованиям, то приготовление раствора нужной концентрации (1...3 %) осуществляется непосредственно в баке-мернике.

Подсистема ввода аммиака (метабората-лития или морфолина или этаноламина) состоит:

- из двух баков-мерников реагентов (аммиака, лития, метабората-лития, морфолина, этаноламина), соединенных между собой переливной трубой и дыхательным трубопроводом;
- трех насосов-дозаторов реагентов с общими коллекторами всаса и напора;
- трубопроводов приема реагентов и химобессоленной воды;

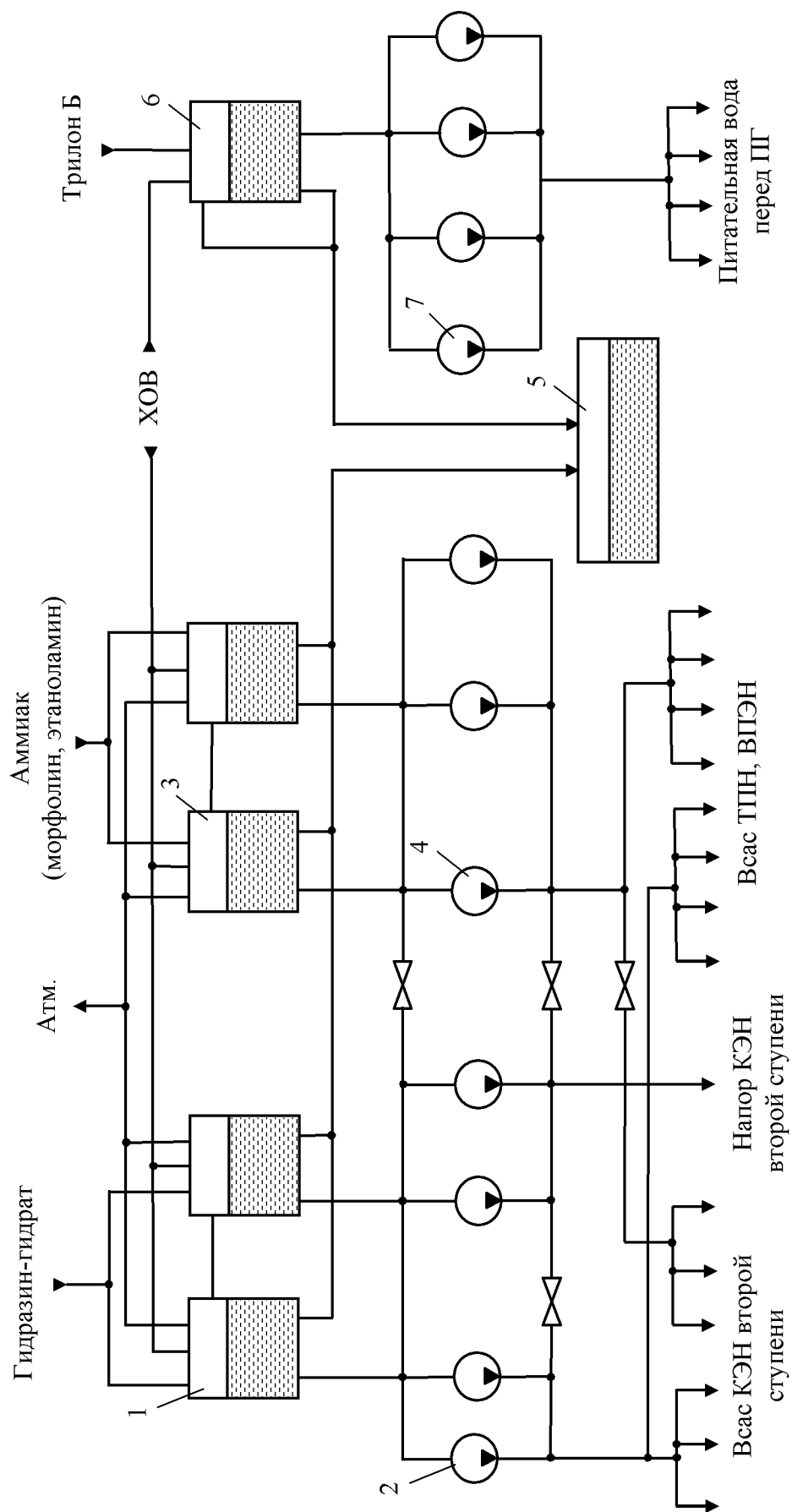


Рис. 4.8. Функциональная схема системы ввода корректирующих добавок во второй контур:

1 – бак-мерник гидразин-гидрата; 2 – насос-дозатор гидразин-гидрата; 3 – бак-мерник аммиака; 4 – насос-дозатор аммиака; 5 – бак-приямок; 6 – бак-мерник комплексона; 7 – насос-дозатор комплексона

- трубопроводов подачи реагентов в КПТ второго контура на всас (напор) КЭН второй ступени или на всас ТПН (ВПЭН);
- трубопроводов опорожнения баков-мерников в приямок.

Приготовление рабочего раствора аммиака и подача его в бак-мерник производится аналогично приготовлению и подаче раствора гидразингидрата, концентрация аммиака должна находиться в пределах 1...2 %.

Приготовление концентрированного раствора метабората лития производится на реагентном узле ХВО. Полученный раствор заливается в 40-литровые фляги и доставляется в систему ввода химреагентов энергоблока. Для одного бака-мерника необходимо две фляги концентрированного раствора метабората-лития. Раствор метабората лития закачивается в бак-мерник из фляги посредством эжектора. После опорожнения обеих фляг в бак-мерник подается химобессоленная вода, при этом учитывается уровень в баке до начала его заполнения. Через час после приготовления рабочего раствора метабората лития производится его химический анализ. Концентрация раствора считается нормальной, если концентрация борной кислоты в нем составляет 1,0...1,8 г/дм³, лития – 0,15...0,25 г/дм³. При этом соотношение концентраций лития к борной кислоте должно находиться в пределах 1:6...7.

Подсистема ввода комплексона «Трилон Б» состоит:

- из одного бака-мерника комплексона, оборудованного дыхательным патрубком и переливной трубой, врезанной в дренажный трубопровод бака-мерника;
- четырех насосов-дозаторов с общим коллектором всаса и общим напорным коллектором;
- трубопроводов приема комплексона и химобессоленной воды;
- трубопроводов подачи раствора комплексона в питательный трубопровод каждого из четырех парогенераторов энергоблока;
- трубопроводов опорожнения баков-мерников в приямок.

Бак-мерник комплексона «Трилон Б» предназначен для приема раствора комплексона от узла приготовления химреагентов ХВО или загрузки комплексона по месту, а также получения требуемой концентрации раствора комплексона путем добавки в бак химобессоленной воды.

В настоящее время подсистема ввода комплексона «Трилон Б» (RV30) на части энергоблоков АЭС не используется.

Характеристика оборудования.

Баки-мерники химреагентов – цилиндрические, металлические емкости, выполненные из стали Ст.3 с антикоррозийным покрытием (бак-мерник комплексона выполнен из нержавеющей стали), имеющие люк для загрузки химреагентов, обвязанные трубопроводами подачи химреагентов и ХОВ, и дыхательными трубопроводами для вывода паровоздушной смеси из баков в атмосферу. Объемы баков:

- гидразин-гидрата – 4 м³;
- аммиака – 4 м³;
- комплексона – 3 м³.

Насосы-дозаторы представляют собой одноплунжерные насосы, являющиеся самостоятельными агрегатами и требующими подключения к электросети однофазного (или трехфазного) переменного тока через магнитный пускатель и кнопки (ключи) управления. Предназначены для объемного напорного дозирования нейтральных и агрессивных жидкостей с температурой 15...200 °С.

Характеристика химических веществ, применяемых в системе.

Гидразин-гидрат – бесцветная жидкость, по запаху напоминающая аммиак. Легко воспламеняется, ядовит. Плотность 1,03 г/см³, содержит 64 % гидразина, сильный восстановитель, легко разлагается под действием катализаторов нагревания. Взрывоопасен в смеси с кислородом. При контакте с асбестом или активированным углем возможно самовозгорание. Токсичен при различных путях поступления в организм. Пары гидразин-гидрата действуют на слизистые оболочки дыхательных путей и глаз. Воздействие раствора гидразина на кожу может привести к дерматитам. Индивидуальные средства защиты: резиновые перчатки, защитные очки, фильтрующий противогаз марки КД или А.

Аммиак водный – водный раствор, содержащий 22...25 % NH₃ (плотность 0,9 г/см³ при 15 °С). Обладает сильными щелочными свойствами. Водный раствор аммиака может вызвать отравление организма. При вдыхании воздуха, содержащего 5% аммиака, начинается резкое удушье, слезотечение, боль в глазах, сильные приступы кашля, головокружение, боль в желудке, рвота. При высокой концентрации аммиак может вызвать ожоги слизистой оболочки глаз и привести к слепоте. Индивидуальные средства защиты: резиновые перчатки, защитные очки, прорезиненный фартук, фильтрующий противогаз марки К или КД.

Метаборат лития – бесцветный водный раствор не имеющий запаха. Обладает раздражающим действием при попадании на кожные покровы. Ядовит, при попадании в организм, вызывает тяжелое отравление, поражая желудочно-кишечный тракт, почки и центральную нервную систему. Индивидуальные средства защиты: резиновые перчатки, защитные очки, фильтрующий противогаз марки КД.

Морфолин представляет собой бесцветную прозрачную жидкость, имеющую слабоаммиачный запах со свойствами слабой щелочи, растворимую в диэтиловом эфире и смешивающуюся с водой и этиловым спиртом. Морфолин используется в качестве нейтрализующей и пассивирующей добавки для ведения водно-химического режима второго контура.

Комплексон «Трилон Б» – белый кристаллический порошок, растворенный в обессоленной воде. Растворимость составляет 10 % (при темпе-

ратуре 20 °С). Заметного физиологического воздействия на организм человека не оказывает. При работах, сопровождающихся пылением порошка «Трилон Б» (при приготовлении водного раствора комплексона), необходимо надевать рукавицы, защитные очки и противопылевой респиратор.

Этаноламин – горючая жидкость с резким аммиачным запахом. С водой и спиртом смешивается во всех отношениях. Обладает щелочными свойствами и при попадании на кожу вызывает раздражение. При попадании внутрь вызывает расстройство органов дыхания, кровообращения, центральной нервной системы, печени. Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны – 0,5 мг/м³. Индивидуальные средства защиты: резиновые перчатки, защитные очки, прорезиненный фартук, фильтрующий противогаз марки К или КД.

4.3. Средства обеспечения ВХР второго контура ЯЭУ с ВВЭР-1200

Для поддержания ВХР второго контура в ЯЭУ с ВВЭР-1200 (В-392М) предусмотрены следующие системы:

- водоподготовительная установка;
- система обессоленной воды здания турбины;
- система деаэрации;
- блочная обессоливающая установка;
- установка коррекционной обработки рабочей среды второго контура;
- система продувки ПГ;
- система очистки продувочной воды;
- автономная обессоливающая установка;

Водоподготовительная установка GCF (система ионообменной очистки исходной воды) предназначена для получения химически обессоленной воды для первоначального заполнения контуров АЭС и подпитки второго контура.

Система обессоленной воды здания турбины (LCP10-80) предназначена для выполнения следующих функций:

- приема в здание турбины обессоленной воды от насосов системы ионообменной очистки исходной воды (GCF), раздачи ее потребителям, главным из которых является конденсатор турбины, и поддержания уровня в нем в условиях нормальной эксплуатации с компенсацией потерь пара и конденсата в технологических системах блока;
- хранения оперативного запаса обессоленной воды;
- подачи «холодной» воды на всас вспомогательного питательного насоса с целью «дорасхолаживания» ПГ при останове блока в ремонт;
- приема «грязного» конденсата из системы дренажей здания турбины и хранения его перед очисткой его в системе автономной химической водоочистки (LDB);

- приема воды после очистки ее на автономной обессоливающей установке (пуск блока, опорожнение ПГ перед их ремонтом);
 - снабжения водой систем второго контура для их промывки, для опробования питательных насосов;
 - подачи обессоленной воды в деаэратор при снижении в нем уровня ниже предельного допустимого для нарушений нормальной эксплуатации;
 - подачи обессоленной воды в деаэратор при останове блока с запретом использования БРУ-К, включая режимы с потерей электроснабжения собственных нужд АЭС и внешней электрической нагрузки;
 - подачи «холодной» воды на всас основных питательных насосов с целью повышения противокавитационного запаса в режимах сброса нагрузки до холостого хода или величины собственных электрических нужд блока (дополнительное, резервное средство);
 - снабжения системы уплотнений вспомогательного питательного насоса (LAJ) и охлаждения его электродвигателя в режимах с потерей электроснабжения собственных нужд АЭС и внешней электрической нагрузки.
- Система LCP10-80 (рис. 4.9) состоит из следующих основных элементов:
- двух баков запаса обессоленной воды объемом по 630 м³ каждый;
 - бака «грязного» конденсата объемом 1000 м³;
 - насоса обессоленной воды – центробежного, с подачей 200 м³/ч и напором 140 м вод. ст.;
 - насосов обессоленной воды – центробежных, с подачей 50 м³/ч и напором 50 м вод. ст.

В условиях нормальной эксплуатации система обеспечивает поддержание в требуемых пределах уровня в конденсаторе турбины за счет регулирующего воздействия на расход воды, поступающей в конденсатор из баков запаса обессоленной воды либо от насосов обессоленной воды (в режимах увеличения расхода подпитки). Восполнение потерь второго контура в условиях нормальной эксплуатации АЭС обеспечивается в конденсаторы турбин в пределах нормированного значения до 1 % от расхода свежего пара (до 65 м³/ч). Кроме того, обеспечивается экстренная подпитка второго контура в деаэратор и в конденсатор в количестве 4...5 % номинальной производительности парогенераторов (не менее 300 т/ч).

В условиях нарушений нормальной эксплуатации обеспечивается питание деаэратора обессоленной водой с поддержанием в нем уровня воды для обеспечения надежной работы питательных насосов. Для подпитки деаэратора в этих условиях система имеет производительность не менее 250 м³/ч, чтобы в условиях останова блока с использованием БРУ-А восполнять отбор воды из деаэратора насосом вспомогательной питательной воды.

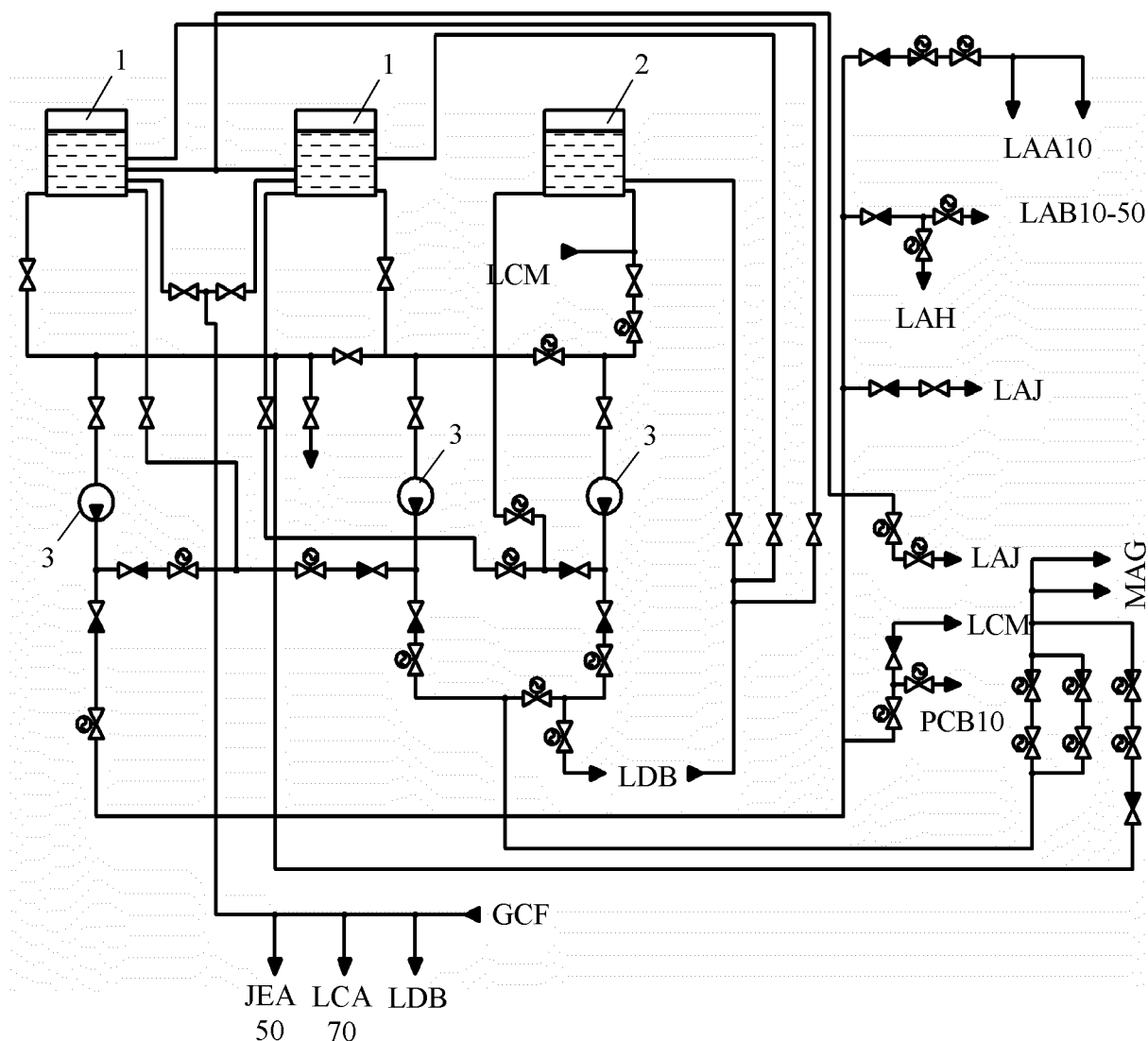


Рис. 4.9. Функциональная схема цепочки системы LCP10-80:
1 – бак запаса обессоленной воды; 2 – бак «грязного» конденсата;
3 – насос обессоленной воды

Система деаэрации (LAA) предназначена для удаления коррозионно-агрессивных газов из питательной воды парогенераторов, а также обеспечивает накопление деаэрированной питательной воды для подпитки второго контура. В отличие от ЯЭУ с ВВЭР-1000 система деаэрации данного проекта включает в себя один деаэратор номинальной производительностью $6300 \text{ м}^3/\text{ч}$ и рабочим давлением $0,871 \text{ МПа}$ (абс.).

Блочная обессоливающая установка LDF (система обезжелезивания и обессоливания конденсата турбины) предназначена для поддержания необходимого качества рабочей среды второго контура с целью минимизации количества отложений на теплообменной поверхности ПГ, в проточной части турбины и в КПП, а также для предотвращения коррозионных и коррозионно-эрозионных повреждений конструкционных материалов ПГ, оборудования и трубопроводов второго контура.

Система LDF (рис. 4.10, 4.11) состоит из трех основных частей:

1. Четырех идентичных групп (трех рабочих и одной резервной), в состав которой входит:

- намывной ионитный фильтр, предназначенный для очистки конденсата от взвешенных и растворенных в нем продуктов коррозии и обессоливания конденсата;

- фильтр-ловушка для исключения попадания ионообменной смолы в основной конденсат;

- насос поддержания слоя с подачей $65 \dots 140 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $43 \dots 55 \text{ м вод. ст.}$

2. Узла приготовления и намыва ионитного порошка (суспензии), включающего:

- бак-мерник суспензии объемом 2 м^3 с мешалкой;

- 2 насоса-дозатора подачи суспензии с максимальной подачей $2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором 40 м вод. ст. ;

- бак намыва суспензии объемом 20 м^3 ;

- 2 насоса намыва суспензии с подачей $200 \dots 350 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $68 \dots 78 \text{ м вод. ст.}$

3. Узла приема пульпы после регенерации, включающего:

- бак приема пульпы объемом 40 м^3 ;

- 2 насоса откачки пульпы с подачей $17 \dots 33 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $41 \dots 51 \text{ м вод. ст.}$

Система обеспечивает очистку $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$ конденсата турбины от продуктов коррозии КПП в период пусковых режимов и $600 \dots 1800 \text{ м}^3/\text{ч}$ конденсата при очистке от растворенных химических примесей при их поступлении в конденсат с присосами охлаждающей воды в конденсаторе.

Система подключается в пусковых режимах ЭБ и во время повышенных присосов охлаждающей воды в конденсаторах турбины.

Перед включением намывных фильтров в работу производится намывка фильтрующего слоя. В бак-мерник загружается порошковый ионит и приготавливается суспензия с массовой концентрацией 4 %. Бак намыва наполовину заполняется обессоленной водой. Также обессоленной водой заполняется контур намыва. После заполнения включаются насосы намыва и обессоленная вода циркулирует по контуру намыва. При помощи насоса-дозатора, суспензия из бака-мерника подается в контур намыва. Работа насоса намыва после отключения насоса подачи суспензии продолжается. При полном осветлении воды в баке намыва насос намыва отключается и включаются насосы поддержания слоя, которые обеспечивают рециркуляцию воды через намывные фильтры для предотвращения сползания загрузки с фильтрующих элементов.

Затем турбинный конденсат подается на очистку в рабочие фильтры. При достижении расхода турбинного конденсата $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ насос поддержания слоя отключается и фильтр нагружается до расхода $600 \text{ м}^3/\text{ч}$.

При достижении концентрации продуктов коррозии в питательной воде $3 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ система отключается. После этого система находится в режиме ожидания. К включению в работу постоянно готов один фильтр.

При повышенных присосах охлаждающей воды в конденсаторах турбины (более $0,35 \text{ дм}^3/\text{ч}$) фильтр, находящийся в режиме готовности, подключается для очистки конденсата от ионных примесей. Другие фильтры подготавливаются для последовательного включения в работу.

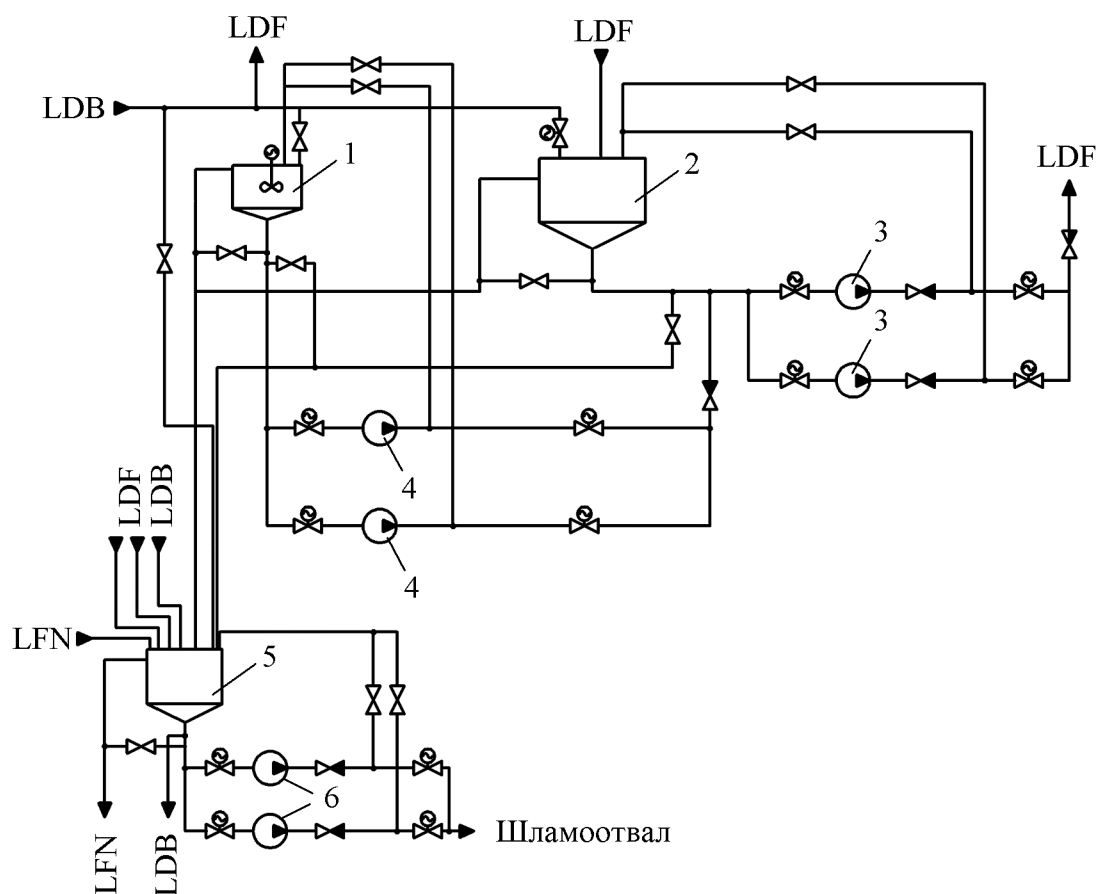


Рис. 4.10. Функциональная схема узлов приготовления и намыва ионитного порошка и приема пульпы после регенерации системы LDF:
1 – бак-мерник суспензии; 2 – бак намыва суспензии; 3 – насос намыва суспензии; 4 – насос-дозатор подачи суспензии; 5 – бак приема пульпы;
6 – насос откачки пульпы

При достижении максимально допустимого перепада давления на фильтре, либо по величине удельной электропроводимости выше $0,2 \text{ мкСм}/\text{см}$ фильтры отключаются на шокую регенерацию. Воду из верхней камеры сливают в дренаж. Затем в фильтр подается сжатый воз-

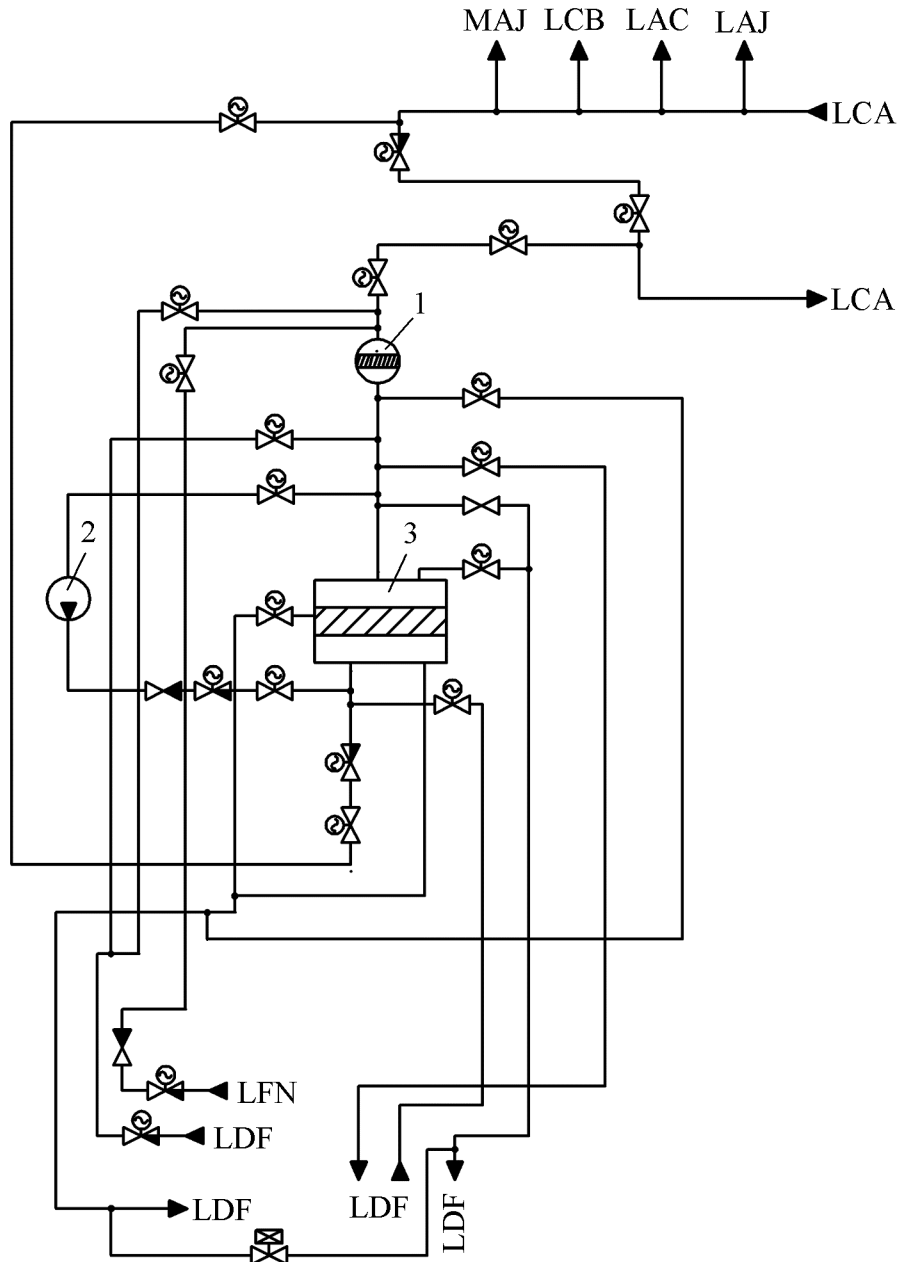


Рис. 4.11. Функциональная схема группы очистки системы LDF:
1 – фильтр-ловушка; 2 – насос поддержания слоя;
3 – намывной ионитный фильтр

Установка коррекционной обработки рабочей среды второго контура (LFN) предназначена для поддержания качества рабочей среды второго контура в соответствии с требованиями к ВХР второго контура с целью минимизации количества отложений на теплообменной поверхности ПГ, в проточной части турбин и в КПП, предотвращения коррозионных и коррозионно-эрозионных повреждений конструкционных материалов ПГ, оборудования и трубопроводов второго контура.

Система обеспечивает подачу следующих реагентов:

- раствора этаноламина (концентрацией 2 %) в систему вспомогательной питательной воды (LAN) и систему основного конденсата (LCA) для создания и поддержания нормируемого значения величины pH в питательной воде;

- раствора гидразин-гидрата (концентрацией 3...5 %) в системы LAN и LCA для создания восстановительных свойств рабочей среды в питательной воде второго контура;

- раствора аммиака (концентрацией 3...5 %) для создания и поддержания нормируемого значения pH питательной воды.

В состав системы LFN (рис. 4.12) входят несколько групп оборудования:

1. Группа приготовления и подачи гидразин-гидрата:

- 2 бака раствора гидразина объемом по $1,6 \text{ м}^3$;
- 2 насоса-дозатора гидразина с подачей $0,001...0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $1,0 \text{ МПа}$;
- 2 насоса-дозатора гидразина с подачей $0,16...0,63 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $1,0 \text{ МПа}$.

2. Группа приготовления и подачи этаноламина:

- 2 бака этаноламина объемом по $4,2 \text{ м}^3$;
- 2 насоса-дозатора этаноламина с подачей $0,01...0,04 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $1,0 \text{ МПа}$;

- насос переносной полупогружной для перекачивания этаноламина с максимальной подачей 77 л/мин и напором $0,14 \text{ МПа}$.

3. Группа приготовления и подачи аммиака:

- 2 бака раствора аммиака объемом по $4,2 \text{ м}^3$;
- 2 насоса-дозатора аммиака с подачей $0,01...0,04 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $1,0 \text{ МПа}$.

4. Узел приема дренажей.

- насос для перемешивания с подачей $3,7...7,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $0,19...0,23 \text{ МПа}$.

- дренажный бак объемом 10 м^3 ;

- насос дренажного бака с подачей $1,0...2,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором $0,47...0,53 \text{ МПа}$;

- каплеуловитель объемом $0,04 \text{ м}^3$.

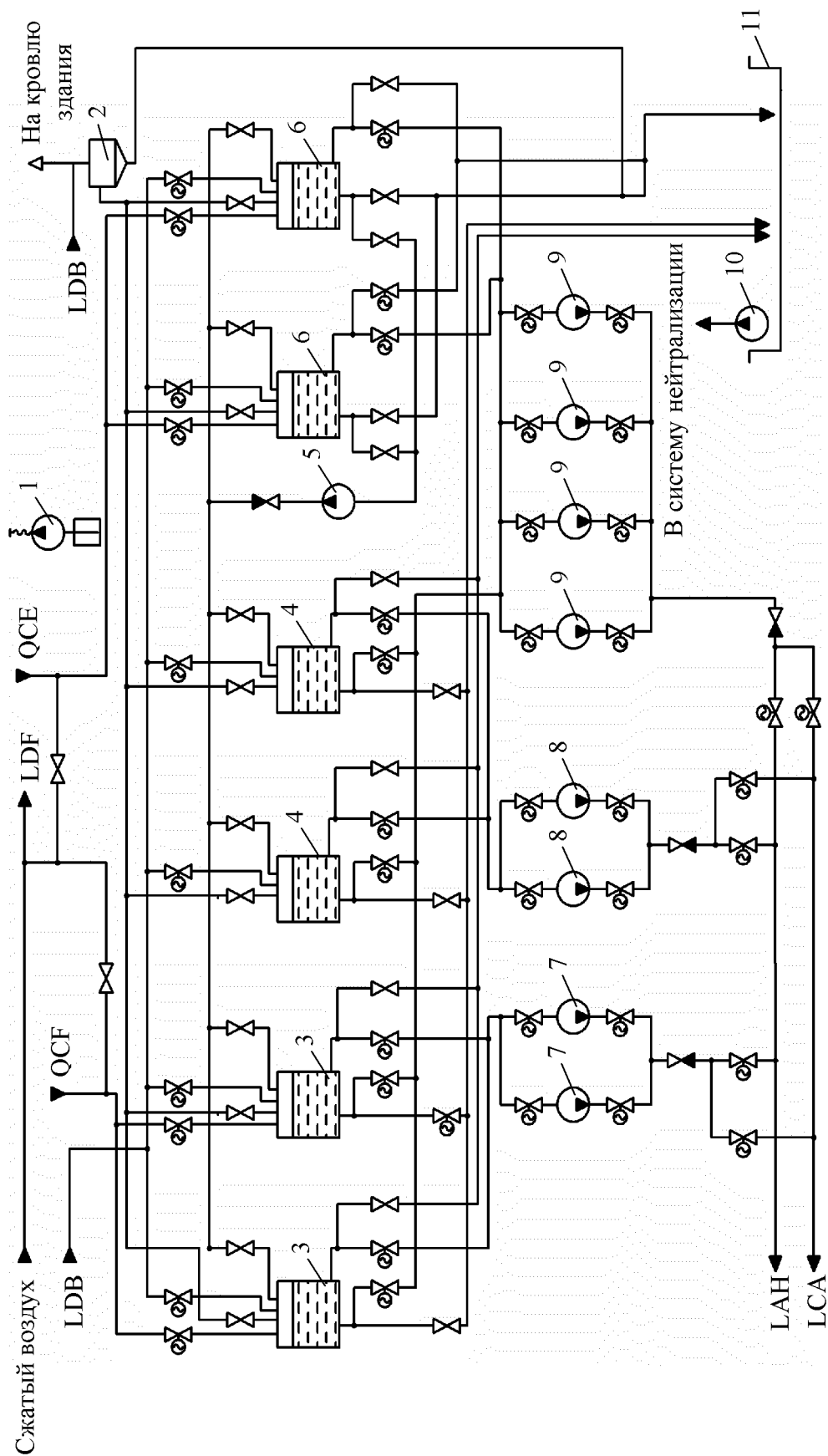


Рис. 4.12. Функциональная схема системы LFN:

- 1 – погружной насос; 2 – каплеуловитель; 3 – бак раствора аммиака; 4 – бак раствора этаноламина;
 5 – насос для перемешивания; 6 – бак раствора гидразина; 7 – насос-дозатор аммиака; 8 – насос-дозатор
 этаноламина; 9 – насос-дозатор гидразина; 10 – насос дренажного бака; 11 – дренажный бак

Концентрированный раствор гидразин-гидрата концентрацией 19 % поступает из системы приема и приготовления гидразина (QCE) в бак приготовления раствора гидразин-гидрата, в котором происходит разбавление раствора до рабочей концентрации 3...5 % при помощи подачи обессоленной воды из системы LCP. Рабочий раствор насосом-дозатором подается в систему LAN или LCA, в зависимости от режима работы блока.

Концентрированный раствор этаноламина поставляется со склада реагентов в канистрах 20...25 л. Далее при помощи погружного насоса (или эжектора) раствор перекачивается в бак хранения рабочего раствора этаноламина и одновременно разбавляется до концентрации 2 %. В случае необходимости раствор может быть разбавлен до меньших концентраций при помощи подачи обессоленной воды из системы. Для перемешивания рабочих растворов в системе LFN предусмотрен насос перемешивания. Насосом-дозатором рабочий раствор подается в систему LCA или LAN в зависимости от режима работы блока.

Система продувки парогенераторов (LCQ10-40) предназначена для продувки ПГ и подачи продувочной воды в систему очистки продувочной воды ПГ LCQ50 с целью поддержания ВХР второго контура. Кроме того, на остановленном ЭБ система обеспечивает дренирование ПГ.

В состав системы LCQ10-40 (рис 4.13) входят следующие элементы:

- 3 насоса продувочной воды ПГ с подачей 112...140 м³/ч и напором 7,84...8,45 МПа;
- регенеративный теплообменник продувки ПГ: трубное пространство – продувочная вода ПГ, межтрубное – очищенная продувочная вода;
- теплообменник доохлаждения продувки и охлаждения дренажей ПГ: трубное пространство – вода промконтура потребителей нормальной эксплуатации, межтрубное – продувочная вода ПГ;
- бак слива воды из ПГ объемом 16 м³;
- насос бака слива воды из ПГ с подачей 40 м³/ч и напором 1,16 МПа.

Главным отличием данной системы от аналогичной в проектах ЯЭУ с ВВЭР-1000 является переход на так называемую «замкнутую» систему продувки, т.е. возвращения очищенной продувочной воды непосредственно в парогенератор, а не в деаэратор.

Главным отличием данной системы от аналогичной в проектах ЯЭУ с ВВЭР-1000 является переход на так называемую «замкнутую» систему продувки, т.е. возвращения очищенной продувочной воды непосредственно в парогенератор, а не в деаэратор.

Перехода на подобную схему продувки был обусловлен следующими причинами:

1. Требование конструкторского бюро «Гидропресс» по увеличению расхода продувки ПГ более чем в 2 раза по сравнению с проектом В-320 (до 140 т/ч).

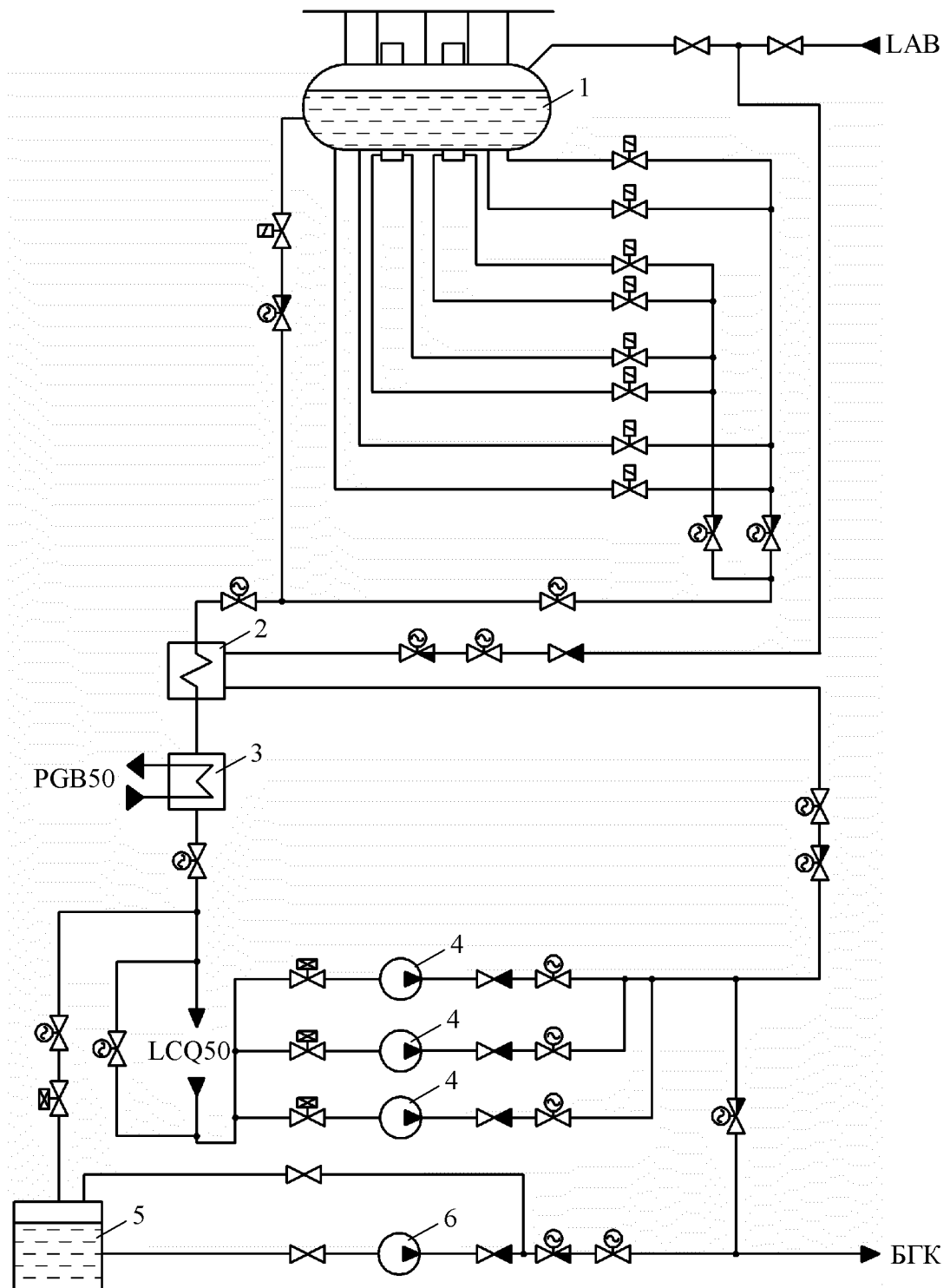


Рис. 4.13. Функциональная схема системы LCQ10-40:
 1 – парогенератор; 2 – регенеративный теплообменник продувки ПГ; 3 – теплообменник доохлаждения продувки и охлаждения дренажей ПГ; 4 – насоса продувочной воды ПГ; 5 – бак слива воды из ПГ; 6 – насос бака слива воды из ПГ

Для реализации данного требования в рамках традиционной системы продувки ПГ необходимо было предусмотреть параллельную работу двух расширителей продувки повышенной производительности, что сопряжено с трудностями одновременной работы расширителей, а также с трудностями компоновки.

2. Переход на замкнутую схему продувки ПГ, помимо исключения из схемы расширителей, решает проблему эрозионного износа и повышенной вибрации арматуры и трубопроводов по причине отсутствия режимов, при которых образуется двухфазная среда.

3. Благодаря наличию в замкнутой схеме продувки ПГ насосов появляется возможность более активного воздействия на расход продувки (в сторону его увеличения) в том ПГ, в котором было замечено снижение расхода из-за осаждения в линиях продувки шлама. Для решения этой проблемы достаточно произвести кратковременное закрытие арматуры на общей линии продувки того ПГ, для которого продувка в рассматриваемое время осуществляется без замечаний.

Достоинства замкнутой схемы продувки ПГ следующие:

- в режиме расхолаживания ПГ в традиционной схеме производительность продувки снижается по мере снижения давления в ПГ, в замкнутой – остается практически неизменной, поскольку производительность продувки определяется работой насоса.

- замкнутая схема продувки ПГ также даст дополнительные преимущества и в условиях нарушения нормальной эксплуатации (отключение циркуляционной петли по причине снижения уровня в ПГ). В этих условиях сохраняется возможность подпитки отключенного ПГ «горячей» водой из соседних ПГ через систему продувки (подпитка по нормальной может привести к гидроударам в питательных линиях и питательном коллекторе парогенераторов).

В то же время замкнутая система имеет ряд недостатков:

- наличие трех насосов продувочной воды ПГ (рабочий, резервный, ремонтный) потребляемой электрической мощностью каждый не более 75 кВт. Однако, эти затраты компенсируются тем, что тепло с продувочной водой ПГ возвращается после регенеративного теплообменника продувки обратно в ПГ, сохраняя при этом свой высокий потенциал (потенциал срабатывается по всей турбине, включая ЦВД), а в традиционной продувке тепло продувочной воды ПГ имеет сниженный потенциал (имеет место только вытеснение отборного пара в деаэраторе);

- при пуске (разогреве ПГ) в процессе вывода «избыточной» воды из ПГ требуется обязательная работа насоса (в том числе и в условиях работы по байпасу фильтров СВО-5). Это требование определяется условиями работы регенеративного теплообменника продувки, а именно допустимой разностью температур прямого и обратного потоков рабочей среды.

Относительно гидравлической устойчивости «замкнутой» схемы продувки ПГ.

Замкнутая схема продувки ПГ имеет следующие особенности, которые учитывались при проектировании для успешной работы насосов продувочной воды ПГ:

1. Сеть, на которую работает насос, характеризуется тем, что гидравлическое сопротивление всасывающей части насоса существенно превышает гидравлическое сопротивление его напорной части. Частично это связано и с тем, что для обеспечения высоких ресурсных показателей насоса он установлен после фильтров СВО-5.

2. Насос должен работать на свою сеть (на четыре парогенератора) во всем диапазоне изменения давления в парогенераторах. Кроме цели очистки, насос должен еще обеспечивать и надежную работу регенеративного теплообменника продувки ПГ (минимизирован разбаланс расходов прямого и обратного потоков).

Таким образом, наибольшие трудности возникают при работе насоса в области давления в ПГ, близкого к атмосферному. Они связаны с тем, что производительность насоса в этом режиме ограничивается величиной кавитационного запаса насоса. Также возможен и режим, при котором при нулевом избыточном давлении в ПГ потребуются одновременная работа насоса и по линии рециркуляции. С повышением давления в ПГ (ориентировочно, начиная с 0,3...0,4 МПа) проблема ограничения расхода насоса в сети, связанная с кавитацией, снимается, что позволяет организовать требуемый расход для вывода «избыточной» воды из ПГ при пуске энергоблока.

В режимах нормальной эксплуатации система функционирует следующим образом. Продувка вводится в работу после поднятия уровня в ПГ и давления, близком к атмосферному при разогреве РУ и ПГ.

Периодическая продувка из штуцеров «карманов» коллекторов и патрубков нижней образующей корпуса ПГ обеспечивается временным открытием соответствующей арматуры, из «солевого» отсека – изменением расхода с помощью регулирующей арматуры. Переходы по периодической продувке обеспечиваются регламентом продувки. При этом суммарный расход продувки всех ПГ не должен превышать 140 т/ч, что обеспечивается положением регулирующего клапана на напоре насоса. Кратковременное отключение продувки одного из ПГ при сохранении имеющегося расхода на напоре насоса приведет к увеличению продувки оставшихся ПГ, что эффективно при засорении шламом линий продувки.

Сброс «избыточной» воды из ПГ в бак «грязного» конденсата начинается при пуске (разогреве ПГ) и давлении в ПГ, близком к атмосферному. Только в этом режиме существуют ограничения по расходу, связанные с кавитационным запасом. При работе ПГ на параметрах обеспечивается

избыточный кавитационный запас за счет высокого давления в ПГ и номинальной температуры перед насосом.

В режимах нормальной эксплуатации система обеспечивает непрерывную подачу продувочной воды парогенераторов на очистку. Расход непрерывной продувки каждого парогенератора составляет:

- из «солевого» отсека – не более 15 т/ч;
- из патрубков на нижней образующей корпуса – 2...5 т/ч;
- из штуцеров «карманов» коллекторов – 2...5 т/ч.

Периодическая продувка из патрубков на нижней образующей корпуса ПГ и из штуцеров «карманов» коллекторов каждого парогенератора осуществляется расходом не более 20 т/ч.

В переходных, пусковых режимах эксплуатации ЭБ и при отклонении качества продувочной воды от требований норм ВХР второго контура продувка из «солевого» отсека каждого ПГ увеличивается до 40 т/ч. Максимальный суммарный расход продувки всех ПГ при включенной периодической продувке одного ПГ в режиме нормальной эксплуатации составляет 140 т/ч.

Продувочная вода парогенераторов поступает в регенеративный теплообменник продувки парогенераторов, частично охлаждается в нем и далее поступает в теплообменник доохлаждения продувки и охлаждения дренажей ПГ. Охлажденная до требуемой температуры продувочная вода ПГ проходит фильтры системы очистки LCQ50, затем насосом продувочной воды ПГ возвращается обратно в парогенераторы через регенеративный теплообменник продувки.

Дренирование расхоложенных ПГ на остановленной и полностью расхоложенной реакторной установке осуществляется из коллектора нижней образующей корпуса ПГ. При этом снижение температуры дренируемой среды производится в теплообменнике доохлаждения продувки и охлаждения дренажей парогенераторов. Далее среда поступает в бак слива воды из ПГ.

Из бака насосом бака слива воды продувочная (котловая) вода подается в бак «грязного» конденсата. Режим работы регулирующей арматуры на напоре насоса бака слива выбирается из условия поддержания в рабочей точке расхода насоса при дренировании ПГ.

Система очистки продувочной воды ПГ (LCQ50-80) предназначена для приема и непрерывной очистки продувочной воды ПГ на ионообменных фильтрах, а также возврата очищенной продувочной воды в систему продувки ПГ.

Система LCQ50 (рис. 4.14) состоит из двух идентичных групп оборудования (рабочей и резервной), в состав каждой их которых входят следующие элементы:

- катионитовый фильтр в H^+ -форме;

- фильтр смешанного действия;
- фильтр-ловушка.

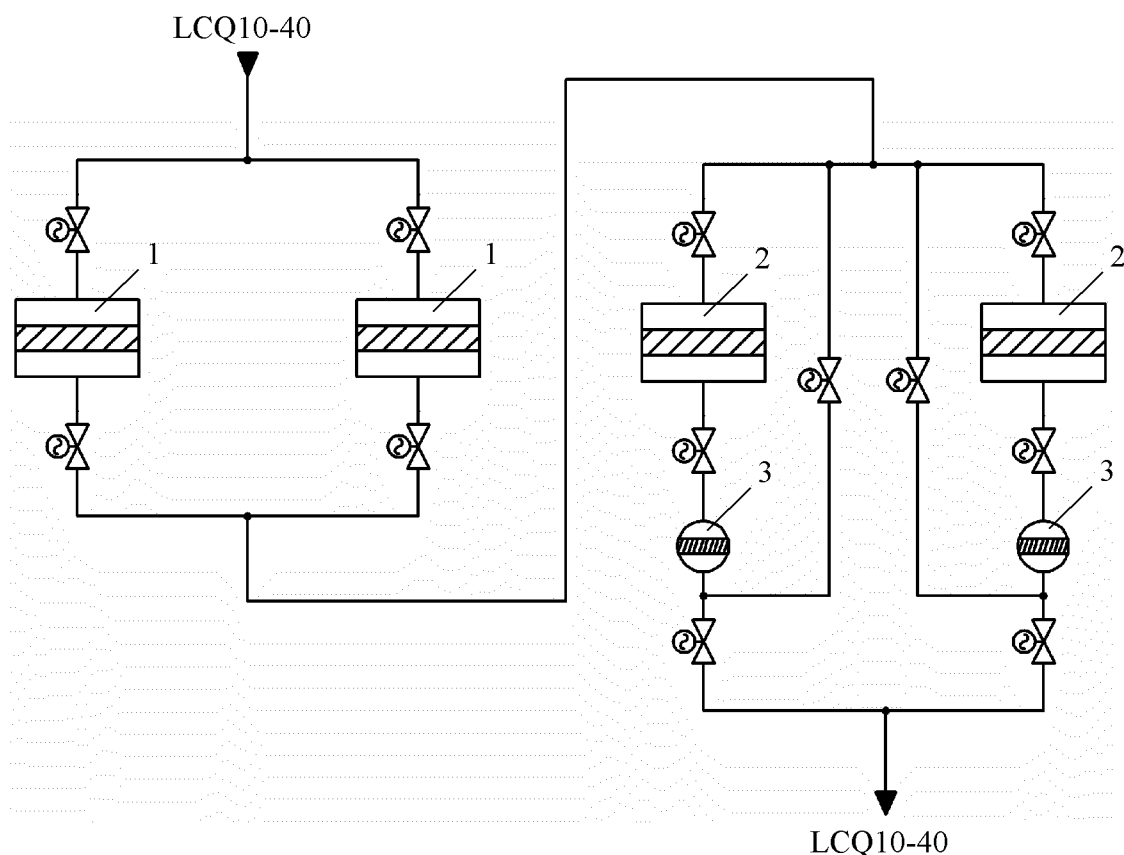


Рис. 4.14. Функциональная схема системы LCQ50:

1 – катионитовый фильтр; 2 – фильтр смешанного действия; 3 – фильтр-ловушка

Продувочная вода ПГ после охлаждения в теплообменнике доохлаждения продувки ПГ до температуры не более 55 °С подается на очистку от взвешенных примесей и от растворенных катионных и анионных примесей на фильтры, включенные последовательно. При превышении величины удельной электропроводности очищенной продувочной воды более 0,3 мкСм/см или увеличении перепада давления на ионообменном фильтре более 0,4 МПа рабочая группа фильтров выводится на регенерацию и включается резервная группа фильтров.

Взрыхляющая промывка ионитных фильтров, выведенных на регенерацию, производится дистиллятом из системы переработки трапных вод (KPF10-60). Регенерационные растворы для регенерации ионообменных смол (5 %-й раствор азотной кислоты для механического и катионитового фильтров, 4 %-й раствор гидроксида натрия для анионитового) подаются из системы приготовления и подачи реагентов КРЈ.

Автономная обессоливающая установка (LDB) предназначена для очистки «грязного» конденсата из системы обессоленной воды здания тур-

бины (LCP) от взвешенных примесей и растворенных катионных и анионных примесей до качества, соответствующего техническим требованиям к ВХР второго контура и системам его обеспечения.

В состав системы входят:

- механический фильтр;
- фильтр смешанного действия;
- фильтр-ловушка.

Конденсат из бака «грязного» конденсата системы LCP насосом обессоленной воды подается на очистку от взвешенных примесей и от растворенных катионных и анионных примесей на фильтры, включенные последовательно.

При превышении величины удельной электропроводимости очищенного конденсата более 0,1 мкСм/см или увеличении перепада давления на механическом фильтре или на ФСД более 0,4 МПа система выводится на регенерацию. Взрыхляющая промывка фильтров производится химически обессоленной водой, которая подается из системы LCP. Для регенерации ионитной загрузки механического фильтра и катионитной загрузки ФСД используется 4 %-й раствор серной кислоты. Для регенерации анионитной загрузки ФСД подается 4 %-й раствор гидроксида натрия.

4.4. Организация ВХР второго контура при различных состояниях энергоблока

4.4.1. Организация ВХР второго контура при работе энергоблока на мощности более 50 % от номинальной

Как уже отмечалось ранее, для второго контура энергоблоков АЭС с ВВЭР предусматривается поддержание одного из следующих ВХР:

- с коррекционной обработкой рабочей среды гидразин-гидратом и, при необходимости, дополнительной обработкой аммиаком и гидроксидом лития (гидразинно-аммиачный ВХР);
- с коррекционной обработкой рабочей среды морфолином и гидразин-гидратом (морфолиновый ВХР);
- с коррекционной обработкой рабочей среды этаноламином и гидразин-гидратом (этаноламиновый ВХР).

Нормы качества рабочей среды второго контура при эксплуатации энергоблока на энергетическом уровне мощности включают нормируемые и диагностические показатели.

Нормируемыми показателями являются показатели качества питательной и продувочной воды ПГ, поддержание которых в допустимых значениях обеспечивает проектный ресурс безопасной и надежной эксплуатации ПГ и оборудования второго контура без снижения экономичности.

К **диагностическим показателям** относятся показатели качества питательной и продувочной воды ПГ, конденсата турбин, насыщенного пара и воды вспомогательных систем, которые дополнительно информируют персонал АЭС о правильности ведения ВХР и отклонения которых указывают на нарушения в работе технологических систем обеспечения ВХР.

Отклонения нормируемых показателей подразделяются на уровни. Для каждого уровня установлен диапазон отклонений показателей от допустимых значений, состояние и допустимое время работы энергоблока.

Нарушением водно-химического режима являются:

- достижение одним или несколькими нормируемыми показателями качества питательной или продувочной воды ПГ предельных значений, соответствующих третьему уровню отклонений при работе энергоблока на энергетических уровнях мощности более 50 % от номинальной, приведенных в табл. 4.1, 4.2 и второму уровню отклонений при работе энергоблока на энергетических уровнях мощности менее (или равном) 50 % от номинальной, приведенных в табл. 4.4, 4.5;

- отклонения нормируемых показателей качества питательной или продувочной воды ПГ от допустимых значений, не устраненные в течение установленного уровнями отклонений времени, приведенных в табл. 4.2-4.5 и непринятие мер по переходу на соответствующие уровни действия, приведенные в настоящем документе;

- отклонения диагностических показателей качества питательной воды ПГ (концентрации железа, меди и величины рН) от контрольных уровней, не устраненные в течение 30 суток, начиная с момента их обнаружения.

Характеристика показателей качества рабочего тела второго контура и мероприятия по их поддержанию согласно действующим нормам.

Удельная электрическая проводимость (X) характеризует условное солесодержание рабочей среды и обуславливается концентрацией диссоциированных газов, нелетучих примесей и собственной проводимостью воды.

Значение электропроводимости Н-катионированной пробы (X_n), определяемое кондуктометром, наиболее полно характеризует интегральную концентрацию всех присутствующих в пробе минеральных примесей, не поглощаемых Н-катионитовым фильтром (хлорид-ионы, сульфат-ионы, углекислота и др.). Например, при величине удельной электропроводимости Н-катионированной пробы 0,2...0,4 мкСм/см содержание растворенных солей в анализируемой среде находится в пределах 0,3...0,6 мкг-экв/дм³ (при температуре 25 °С).

Для обнаружения увеличения содержания нелетучих примесей используются конференциальные кондуктометры, работа которых основана на сравнении удельных электрических проводимостей проб контролируемых потоков.

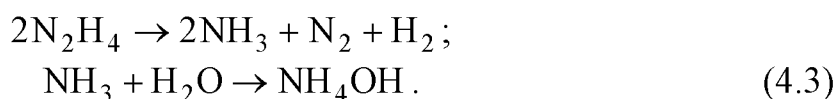
Концентрация кислорода. Коррозионная активность конденсата и питательной воды обусловлена присутствием в них кислорода и углекислоты. Поступление этих агрессивных газов в КПП возможно вследствие присосов воздуха через неплотности вакуумной системы конденсаторов турбин, а также при подпитке ХОВ. Гидразинная обработка КПП в сочетании с термической деаэрацией являются основными способами предупреждения кислородной коррозии конструкционных материалов оборудования питательного тракта, снижения содержания продуктов коррозии в питательной воде.

Концентрация растворенного кислорода в питательной воде за деаэратором не должна превышать 10 мкг/дм^3 . В нормальном режиме работы выпар деаэратора в атмосферу должен быть закрыт. При отклонении значений кислорода от нормируемой величины, вызванном присутствием концентрации газов в питательной воде (кислорода, углекислоты) необходимо открыть выпар деаэраторов в атмосферу для приведения показателей в соответствие с требованиями нормативного документа.

Концентрация натрия. Соли натрия попадают в основной конденсат с присосами охлаждающей воды, при нарушениях в работе сетевых подогревателей, СВО-5, регенеративных теплообменников и при подпитке конденсатно-питательного тракта обессоленной водой. Загрязнение конденсата натрием также возможно после фильтров БОУ в случае некачественного разделения ионитов перед регенерацией и перевода части катионита в натриевую форму во время пропуска регенерационного раствора щелочи.

Ионы натрия повышают щелочность среды, что приводит к щелочной хрупкости в трещинах, щелевых зазорах перлитных и аустенитных сталей (особенно при образовании соединений NaOH , NaHCO_3 и Na_2CO_3). Регламентирование концентрации ионов натрия в конденсате связано с ограниченной способностью БОУ поглощать этот ион, так как натрий является наименее сорбируемым катионом по сравнению с аммиаком и катионами кальция и магния.

Водородный показатель. Величина pH в питательной воде ПП поддерживается в требуемых пределах за счет дозирования гидразин-гидрата, морфолина или этаноламина. Гидразин-гидрат при высоких температурах разлагается с образованием аммиака



Повышенная концентрация гидроксид-ионов способствует упрочению защитных пленок на поверхности металла и снижению скорости коррозии конструкционных материалов КПП.

Концентрация хлорид-ионов. Влияние хлоридов на коррозию хромоникелевых нержавеющих сталей основано на разрушении защитной

пассивной пленки на поверхности металла вследствие образования растворимого хлорида хрома. Разрушение защитной пленки происходит по границам кристаллов, что приводит к коррозионному растрескиванию. Процессу способствует кислород, который играет роль деполяризатора. Хлориды также являются стимуляторами кислородной коррозии углеродистой стали. Ионы хлора способны адсорбироваться окисными пленками и вытеснять из них кислород. В результате такой замены в точках адсорбции получается растворимое хлористое железо, металл при этом окисляется и подвергается дальнейшей коррозии.

Основными источниками поступления хлоридов являются присосы охлаждающей воды в конденсаторах, нарушения в работе сетевых подогревателей, систем ХВО, СВО-5, а также применение некачественных химреагентов.

Концентрация сульфат-ионов. Коррозионно-активные сульфат-ионы оказывают влияние на процессы протекания коррозии хромоникелевых нержавеющей сталей. Разрушение защитной пассивной пленки на поверхности металла под воздействием сульфат-ионов происходит по границам кристаллов, что приводит к коррозионному растрескиванию. Сульфаты также способствуют увеличению скорости коррозии углеродистых сталей и медьсодержащих сплавов.

Возможным источником поступления сульфат-ионов в питательную воду ПГ может быть добавочная обессоленная вода из ХВО, очищенная продувочная вода ПГ, очищенный основной конденсат после БОУ при истощении обменной емкости ионитных фильтров, попадание отмывочных вод после регенерации анионита в результате неплотности арматуры или ошибочных действий персонала, а также деструкция анионита при высоких температурах (разрушение зерен анионита происходит с образованием сульфогрупп).

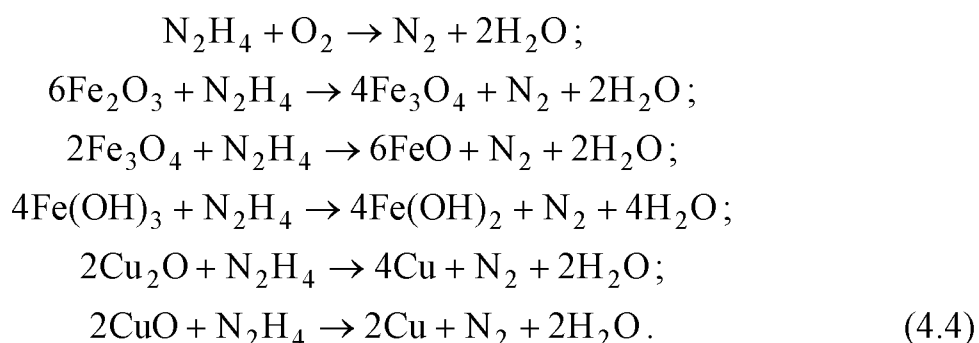
Концентрация железа. Основную массу загрязнений в нерастворенном состоянии составляют продукты коррозии конструкционных материалов пароводяного тракта. В основном это оксиды железа и меди. Концентрация железа характеризует протекание процессов коррозии и эрозии конструкционных материалов, массопереноса, смыва отложений во время переходных режимов работы оборудования второго контура.

Концентрация меди характеризует протекание коррозионных процессов медьсодержащих теплообменных трубок конденсаторов турбин, ПНД, эжекторов, сетевых подогревателей. Поступление меди в ПГ способствует протеканию электрохимической коррозии железосодержащих сплавов, поэтому превышение концентрации меди в КППТ может привести к преждевременному износу оборудования.

Концентрация гидразин-гидрата. Первоначально гидразин-гидрат использовался в качестве основной корректирующей добавки в среду второго контура. Однако впоследствии стало очевидно его негативное влия-

ние на коррозионную стойкость оборудования. Аммиак, который образуется при термическом разложении гидразин-гидрата, активизирует коррозию медьсодержащих сплавов, которые содержатся во втором контуре отечественных ЯЭУ (трубные системы конденсаторов, системы регенерации и т.д.). Поэтому в настоящее время на большинстве отечественных АЭС в качестве корректирующей добавки используется морфолин или этаноламин, а гидразин-гидрат применяется только для связывания кислорода. При таком ВХР концентрации гидразина малы, поэтому влияния на процессы коррозии не оказывают.

Взаимодействие гидразина с кислородом и оксидами металла протекает по следующим химическим реакциям



Гидразин-гидрат в конденсатном тракте восстанавливает оксиды железа, переводя их в формы низшей валентности, способные создавать защитные пленки на поверхности латуни и перлитной стали

Количество вводимого гидразин-гидрата зависит от следующих факторов:

- содержания растворенного кислорода в основном конденсате;
- концентрации и формы оксидов железа и меди;
- расхода основного конденсата;
- потерь гидразина за счет термического разложения в деаэраторах.

Ориентировочное количество гидразин-гидрата (расход рабочего раствора) следует определять по следующей зависимости

$$C_{\text{N}_2\text{H}_4} = \frac{C_1 \cdot Q \cdot K}{C_0 \cdot 1000} \text{ (л/ч)}, \quad (4.5)$$

где C_1 – требуемая концентрация гидразин-гидрата в питательной воде 10...40 мкг/дм³;

C_0 – концентрация рабочего раствора гидразина в баке-мернике, г/дм³;

Q – расход основного конденсата (питательной воды), м³/ч;

K – коэффициент, учитывающий потери и количество гидразин-гидрата, которое необходимо для связывания остаточного кислорода и восстановления продуктов коррозии ($K=3$ при вводе гидразин-гидрата по-

сле БОУ перед ПНД-1; $K = 2$ при дозировании гидразин-гидрата в питательную воду на всас ТПН);

1000 – коэффициент перевода вычисляемой величины в л/ч.

Концентрация морфолина. После отказа от использования в качестве корректирующей добавки второго контура гидразин-гидрата его роль перешла, в основном, к морфолину. В России морфолин впервые был внедрен на Ростовской АЭС в 2001 году.

Использование морфолина в качестве корректирующей добавки для второго контура показало следующие результаты. Концентрация морфолина $2 \dots 5 \text{ мг/дм}^3$ позволяет довести величину рН в питательной воде до 9,3 единиц и при этом стабильно поддерживать значение рН продувочной воды ПГ в установленных пределах.



Морфолин нейтрализует в рабочей среде второго контура двуокись углерода при рН менее 10 единиц с образованием бикарбонатов



и при рН среды более 10 единиц – с образованием карбонатов



Обработка рабочей среды второго контура раствором морфолина способствует снижению концентрации аммиака в КПП, предотвращая возможность вымывания меди с поверхностей оборудования конденсатного тракта, изготовленного из медьсодержащего сплава. Дозирование морфолина в питательную воду парогенераторов снижает скорость протекания коррозионно-эрозионных процессов металла, уменьшая концентрацию продуктов коррозии и, как следствие, снижается степень загрязненности теплопередающих поверхностей ПГ.

Концентрация этаноламина. На некоторых отечественных установках в качестве корректирующей добавки во второй контур применяется этаноламин. Это связано с недостатками морфолина, указанными в предыдущих пунктах настоящего пособия. В России впервые этаноламин был внедрен в 2007 году на Балаковской АЭС. Проведенные испытания показали, что замена морфолинового ВХР на этаноламиновый привела к существенному уменьшению удельной электропроводности сред второго контура. Кроме того, этаноламин с большей надежностью обеспечивает более высокий показатель щелочности среды вследствие термической устойчивости и меньшего количества образованных карбоновых кислот. Концентрация этаноламина $0,8 \dots 1,5 \text{ мг/дм}^3$ позволяет довести величину рН в питательной воде до 9,3 единиц, при этом стабильно поддерживать значение

показателя рН продувочной воды парогенераторов в установленных пределах. Немаловажный фактор в пользу этаноламина при его выборе в качестве корректирующего агента играет такой показатель, как его воздействие на ионообменную смолу, срок эксплуатации которой при этаноламиновом ВХР больше, чем при морфолиновом.

Источники загрязнения рабочей среды второго контура.

Основными причинами и источниками поступления загрязнений в рабочую среду являются:

- присосы охлаждающей воды через неплотности гидравлической части конденсаторов турбины, приводов питательных насосов, бойлеров теплосети и т.д.;
- присосы воздуха через неплотности вакуумной части конденсатного тракта;
- добавочная вода после системы водоподготовки;
- конденсат дренажных баков;
- ионообменные материалы и продукты их деструкции, попадающие в тракт из фильтров БОУ или СВО-5;
- регенерационные растворы и отмывочные воды фильтров БОУ и СВО-5 при некачественной отмывке смол после регенерации;
- протечки турбинного масла через неплотности системы смазки;
- продукты коррозии конструкционных материалов оборудования.

Требования к показателям качества сред второго контура приведены в табл. 4.1 - 4.3.

Т а б л и ц а 4.1

Диагностические показатели качества конденсата турбины (за КЭН-I) и насыщенного пара ПГ при эксплуатации энергоблока на мощности более 50 % от номинальной

Диагностический показатель	Конденсат турбины	Насыщенный пар
	Контрольный уровень	
Гидразинно-аммиачный и морфолиновый режимы		
Удельная электропроводимость Н-катионированной пробы	не более 0,3 мкСм/см	не более 0,3 мкСм/см
Концентрация кислорода	не более 30 мкг/дм ³	—
Концентрация натрия ¹⁾	не более 1,5 мкг/дм ³	—
¹⁾ Для морфолинового ВХР контроль ведется за КЭН-II.		

Т а б л и ц а 4.2

**Нормы качества питательной воды ПГ при эксплуатации энергоблока
на мощности более 50 % от номинальной**

Нормируемые показатели				
Наименование показателя	Допустимое значение	Уровень отклонения от допустимых значений		
		Первый уровень	Второй уровень	Третий уровень
Удельная электропроводимость Н-катионированной пробы	не более 0,3 мкСм/см	более 0,3 мкСм/см до 0,5 мкСм/см	более 0,5 мкСм/см до 1,0 мкСм/см	более 1,0 мкСм/см
Концентрация кислорода	не более 10 мкг/дм ^{3 1)}	более 10 до 30 мкг/дм ³	более 30 до 50 мкг/дм ³	более 50 мкг/дм ³
Диагностические показатели				
Наименование показателя		Контрольный уровень		
Величина рН,		9,0 ± 0,2 ²⁾ ; 8,9...9,3 ³⁾ ; 9,0...9,2 ⁴⁾ ед. рН		
Концентрация железа		не более 15; 10 ³⁾ ; 10 ⁴⁾ мкг/дм ³		
Концентрация меди		не более 2,5 мкг/дм ^{3 5)}		
Концентрация морфолина,		2,5...4,5 мг/дм ^{3 3)}		
Концентрация этаноламина		0,8...1,2 мг/дм ^{3 4)}		
Концентрация гидразина		не менее 10 мкг/дм ³		
Концентрация нефтепродуктов		не более 100 мкг/дм ³		
1) Контроль кислорода – после деаэратора.				
2) Для гидразинно-аммиачного ВХР.				
3) Для морфолинового ВХР.				
4) Для этаноламинового ВХР.				
5) Контроль меди – за последним по ходу конденсата ПНД.				

Области отклонений показателей качества рабочей среды от допустимых значений без снижения мощности энергоблока.

При отклонении показателей качества продувочной воды ПГ от установленных норм (табл. 4.3) для гидразинно-аммиачного водного режима предусмотрены две области отклонений, для морфолинового и этаноламинового ВХР – одна область отклонений.

Первая область отклонений. При увеличении концентрации натрия в продувочной воде ПГ в первой области отклонений (табл. 4.3 и рис. 4.15) необходимо устранить причины отклонения и восстановить показатель в соответствии с нормами. Время работы энергоблока с момента фиксации отклонения не должно превышать 15 суток. При невозможности восстановления в течение 15 суток концентрации натрия в соответствии с нормами необходимо перейти к действиям в соответствии с первым уровнем отклонения.

Т а б л и ц а 4.3

Нормы качества продувочной воды ПГ из «солевого» отсека при эксплуатации энергоблока уровнях мощности более 50 % от номинальной

Нормируемые показатели						
Наименование показателя	Допустимое значение	Область отклонения от допустимых значений без снижения мощности		Уровень отклонения от допустимых значений		
		Первая область	Вторая область ¹⁾	Первый уровень	Второй уровень	Третий уровень
Удельная электропровод-ть Н-катионир-й пробы	не более 5 мкСм/см	—	Рис. 4.15	более 5 до 9 мкСм/см	более 9 до 15 мкСм/см	более 15 мкСм/см
Концентрация натрия	не более 300 мкг/дм ³	более 300 до 500 мкг/дм ³		более 500 до 1000 мкг/дм ³	более 1000 до 1500 мкг/дм ³	более 1500 мкг/дм ³
Концентрация хлорид-ионов	не более 100 мкг/дм ³	—	—	более 100 до 300 мкг/дм ³	более 300 до 500 мкг/дм ³	более 500 мкг/дм ³
Концентрация сульфат-ионов	не более 200 мкг/дм ³	—	—	более 200 до 600 мкг/дм ³	более 600 до 1000 мкг/дм ³	более 1000 мкг/дм ³
Диагностический показатель						
Наименование показателя			Контрольный уровень			
Величина pH			8,5...9,2 ед. pH 8,5...9,4 ²⁾ ед. pH 9,0...9,7 ³⁾ ед. pH			
¹⁾ Для гидразинно-амиачного ВХР. ²⁾ Для морфолинового ВХР. ³⁾ Для этаноламинового ВХР.						

Вторая область отклонений. При величинах удельной электропроводности Н-катионированной пробы и концентрации натрия в продувочной воде ПГ в пределах второй области отклонений (рис. 4.15) необходимо проводить поиск и устранение причин отклонения. Одновременно должна проводиться коррекционная обработка воды ПГ гидроксидом лития. При этом суммарная эквивалентная концентрация ионов лития и натрия в продувочной воде ПГ не должна выходить за область нормальной эксплуатации, указанной на рис. 4.15.

Определение необходимой концентрации лития для поддержания нейтрального значения pH_T по соотношению концентраций натрия и удельной электропроводимости Н-катионированной пробы в продувочной воде ПГ проводится в соответствии с рис. 4.16.

Дозирование гидроксида лития во второй области отклонений продолжается до восстановления соотношения концентрации натрия и удельной электропроводимости Н-катионированной пробы продувочной воды ПГ из «солевого» отсека, соответствующих области нормальной эксплуатации.

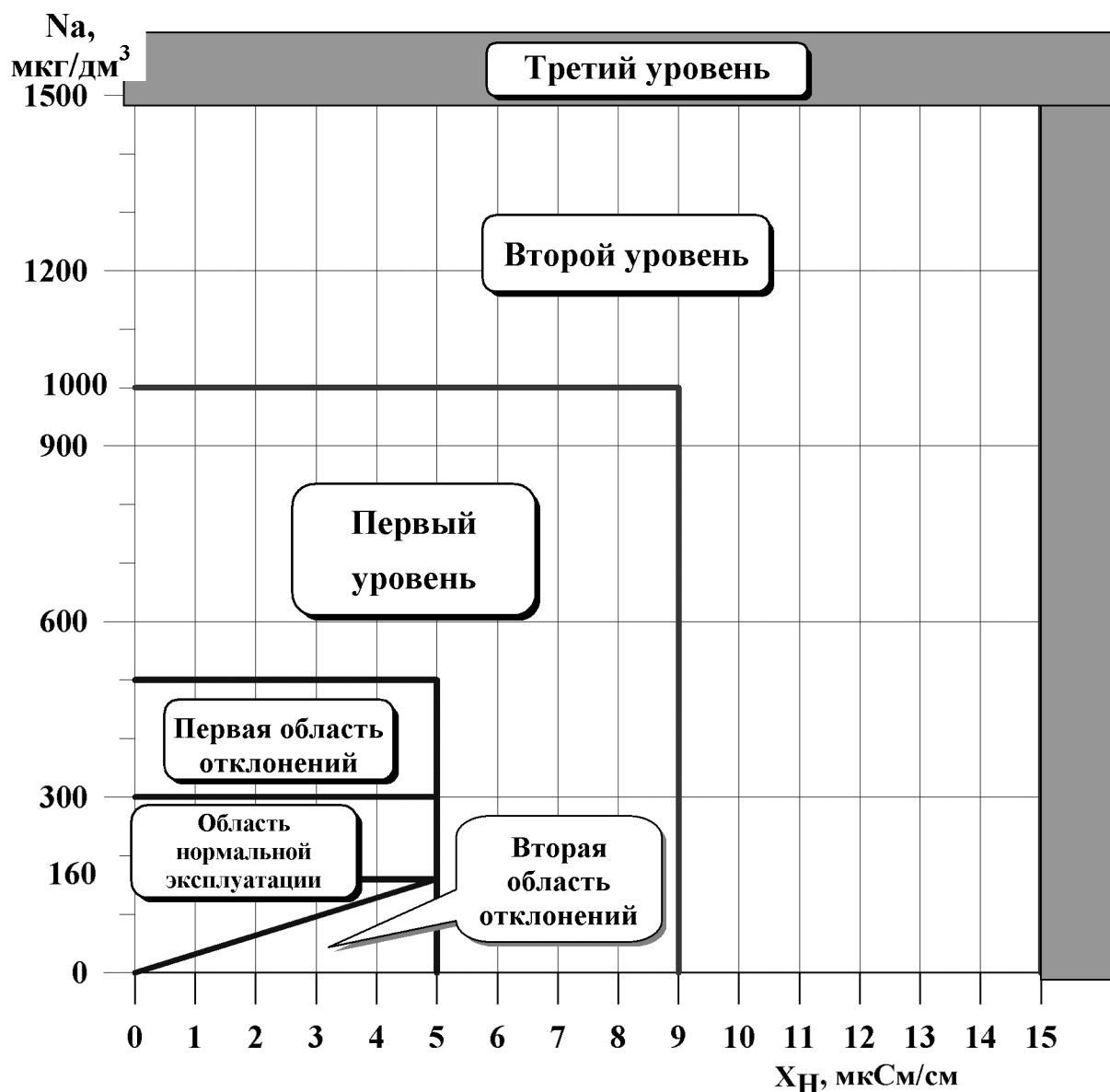


Рис. 4.15. Ограничения по эксплуатации энергоблока при работе на уровнях мощности более 50 % от номинальной при отклонении нормируемых показателей качества продувочной воды ПГ от допустимых значений при ведении гидразинно-аммиачного ВХР

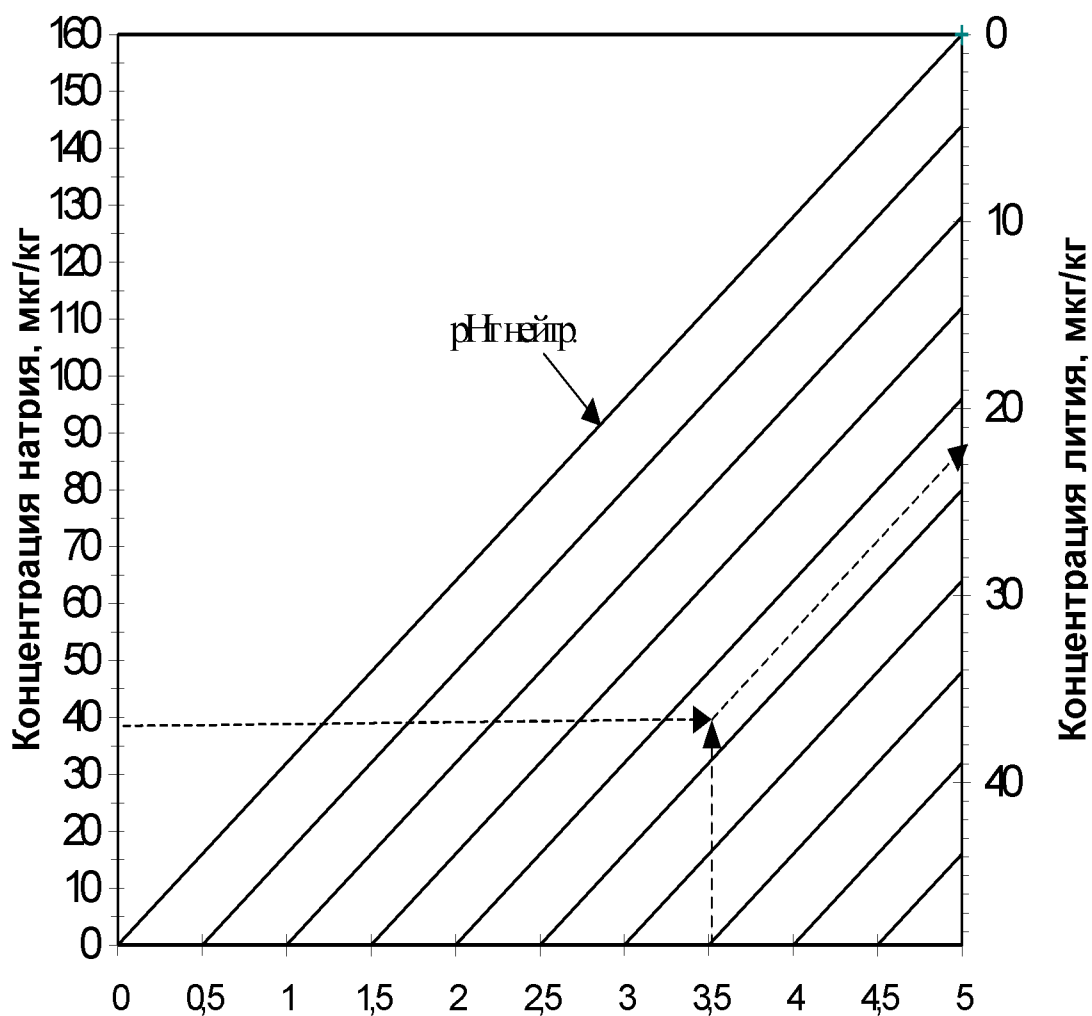


Рис. 4.16. Определение необходимой концентрации лития в воде ПГ для поддержания нейтрального значения pH_T по соотношению концентрации натрия и удельной электрической проводимости Н-катионированной пробы продувочной воды ПГ при ведении гидразинно-аммиачного ВХР

Действия при отклонении нормируемых показателей качества рабочей среды от допустимых значений при работе энергоблока на мощности более 50 % от номинальной.

Первый уровень действия. Допустимая продолжительность работы энергоблока на указанной мощности при отклонении одного или нескольких нормируемых показателей качества питательной или продувочной воды ПГ в пределах первого уровня отклонений, приведенного в табл. 4.2, 4.3 и на рис. 4.15 не должна превышать 7 суток с момента обнаружения отклонения. При невозможности в течение 7 суток выявить причины и устранить отклонения нормируемых показателей мощность энергоблока снижается до значения не более 50 % от номинальной. Последующий подъем мощности энергоблока возможен после устранения причин отклонения и

восстановления нормируемых показателей до допустимых значений согласно указанным требованиям.

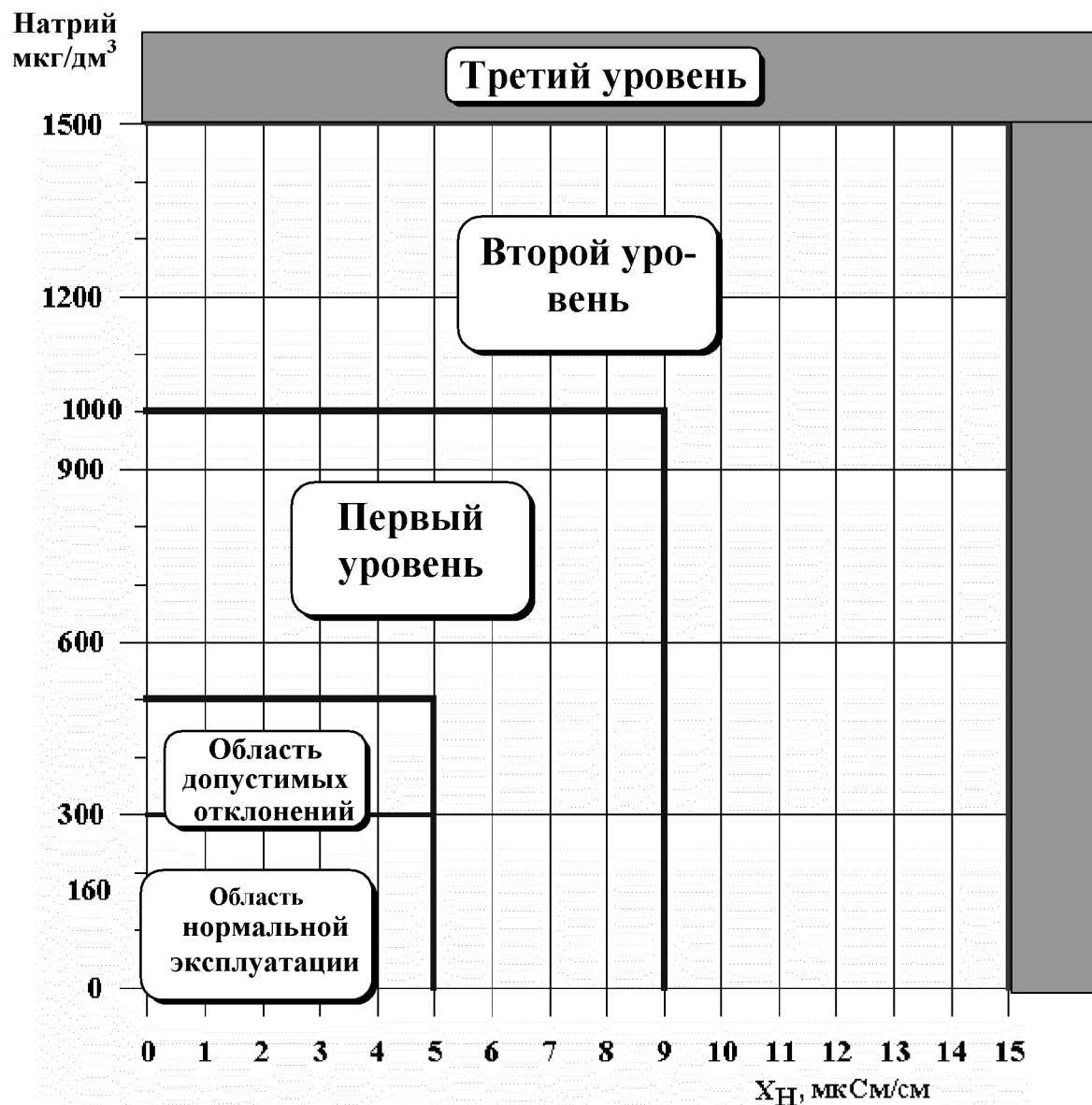


Рис. 4.17. Ограничения по эксплуатации энергоблока при работе на мощности более 50 % от номинальной при отклонении нормируемых показателей качества продувочной воды парогенераторов от допустимых значений при ведении морфолинового и этаноламинового ВХР

Второй уровень действия. Допустимая продолжительность работы энергоблока на энергетических уровнях мощности при отклонении нормируемых показателей в пределах второго уровня отклонений, приведенного в табл. 4.2, 4.3 и на рис 4.15 не должна превышать 24 часа с момента обнаружения отклонения. При невозможности в течение 24 часа выявить причины и устранить отклонения нормируемых показателей энергоблок в нормальной технологической последовательности переводится в состояние

«реактор на МКУ мощности». Последующий подъем мощности энергоблока возможен после устранения причин отклонения и восстановления нормируемых показателей до допустимых значений согласно требованиям табл. 4.4, 4.5.

Третий уровень действия. При достижении нормируемыми показателями качества питательной или продувочной воды ПГ значений третьего уровня отклонений, приведенных в табл. 4.2, 4.3 и на рис. 4.15, энергоблок должен быть в нормальной технологической последовательности переведен в «горячее» состояние. При невозможности в течение 24 часов выявить причины и устранить отклонения нормируемых показателей энергоблок должен быть в нормальной технологической последовательности переведен в «холодное» состояние.

Следует отметить, что ограничения по эксплуатации ЭБ при отклонении показателей качества продувочной воды ПГ, представленные на рис. 4.15, справедливы для гидразинного-аммиачного ВХР. Для морфолинового и этаноламинового режимов указанные ограничения имеют вид, представленный на рис. 4.17.

4.4.2. Организация ВХР второго контура при работе энергоблока на мощности менее 50 % от номинальной

Диагностические и нормируемые показатели качества рабочей среды и ограничения по эксплуатации при работе энергоблока мощности менее 50 % от номинальной при отклонении одного или нескольких нормируемых показателей качества питательной или продувочной воды ПГ приведены в табл. 4.4, 4.5 и на рис. 4.18.

До подключения турбоустановки обработка питательной воды производится гидразин-гидратом и этаноламином с их подачей во всасывающий коллектор вспомогательных питательных насосов. После подключения турбоустановки подача гидразин-гидрата и этаноламина или морфолина осуществляется в коллекторы КЭН-II или перед группой ПНД. После подключения турбоустановки подача гидразин-гидрата осуществляется в коллекторы КЭН-II или перед группой ПНД, а подача аммиака – в коллекторы питательных насосов.

В период пуска ЭБ после объединения питательного и конденсатного трактов ФСД БОУ должны быть полностью или частично включены в работу для обеспечения необходимого качества питательной и продувочной воды ПГ. При работе ЭБ на энергетических уровнях мощности и соблюдении нормируемых показателей качества питательной и продувочной воды ПГ ФСД БОУ могут полностью или частично выводиться из работы.

Т а б л и ц а 4.4

**Нормы качества питательной воды ПГ при эксплуатации энергоблока
на мощности менее 50 % от номинальной**

Нормируемые показатели			
Наименование показателя	Допустимое значение	Уровень отклонения от допустимых значений	
		Первый уровень	Второй уровень
Удельная электропроводимость Н-катионированной пробы	не более 0,5 мкСм/см	более 0,5 до 1,0 мкСм/см	более 1,0 мкСм/см
Концентрация кислорода	не более 10 мкг/дм ³ ¹⁾	более 10 до 50 мкг/дм ³	более 50 мкг/дм ³
Диагностические показатели			
Наименование показателя	Контрольный уровень		
Величина pH	8,2...9,2; 8,5...9,2 ²⁾ ; 8,8...9,2 ³⁾ ед. pH		
Концентрация железа	не более 20 (15 ³⁾) мкг/дм ³		
Концентрация меди	не более 5 (2,5 ³⁾) мкг/дм ³ ⁴⁾		
Концентрация гидразина	не менее 10 мкг/дм ³		
Концентрация морфолина	2,5...4,5 мкг/дм ³ ²⁾		
Концентрация этаноламина	0,7...1,2 мкг/дм ³ ³⁾		
Концентрация нефтепродуктов	не более 100 мкг/дм ³		
¹⁾ Контроль кислорода – после деаэратора.			
²⁾ Для морфолинового ВХР.			
³⁾ Для этаноламинового ВХР.			
⁴⁾ Контроль меди – за последним по ходу конденсата ПНД.			

Т а б л и ц а 4.5

**Нормы качества продувочной воды ПГ при эксплуатации энергоблока
на мощности менее 50 % от номинальной мощности**

Нормируемые показатели			
Наименование показателя	Допустимое значение	Уровень отклонения от допустимых значений	
		Первый уровень	Второй уровень
Удельная электропроводимость Н-катионированной пробы	не более 9 мкСм/см	более 9 до 15 мкСм/см	более 15 мкСм/см
Концентрация натрия	не более 1000 мкг/дм ³	более 1000 до 1500 мкг/дм ³	более 1500 мкг/дм ³

Концентрация хлорид-ионов	не более 300 мкг/дм ³	более 300 до 500 мкг/дм ³	более 500 мкг/дм ³
Концентрация сульфат-ионов	не более 600 мкг/дм ³	более 600 до 1000 мкг/дм ³	более 1000 мкг/дм ³
Диагностический показатель			
Наименование показателя		Контрольный уровень	
Величина pH		8,0...9,0; 8,2...9,3 ¹⁾ ; 8,7...9,5 ²⁾ ед. pH	
¹⁾ Для морфолинового ВХР.			
²⁾ Для этаноламинового ВХР.			



Рис. 4.18. Ограничения по эксплуатации энергоблока при работе на мощности менее 50 % от номинальной при отклонении нормируемых показателей качества продувочной воды ПГ от допустимых значений

Действия при отклонении нормируемых показателей качества рабочей среды от допустимых значений при работе энергоблока на мощности более 50 % от номинальной.

Первый уровень действия. Допустимая продолжительность работы энергоблока на мощности менее 50 % от номинальной при отклонении нормируемых показателей качества питательной или продувочной воды ПГ в пределах первого уровня отклонений, приведенного в табл. 4.4 и 4.5 и на рис. 4.18, не должна превышать 15 суток с момента обнаружения отклонения. При невозможности в течение 15 суток выявить причины и устранить отклонения нормируемых показателей энергоблок в нормальной технологической последовательности переводится в состояние «реактор на минимально-контролируемом уровне мощности». Последующий подъем мощности энергоблока возможен после устранения причин отклонения и восстановления нормируемых показателей до допустимых значений.

Второй уровень действия. При достижении нормируемыми показателями качества питательной или продувочной воды ПГ значений второго уровня отклонений, приведенного в табл. 4.4 и 4.5 и на рис. 4.4, энергоблок должен быть переведен в «горячее» состояние. При невозможности в течение 24 часов выявить причины и устранить отклонения нормируемых показателей энергоблок в нормальной технологической последовательности переводится в «холодное» состояние.

5. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СВОЙСТВ ФИЛЬТРОВ КОНТУРОВ ЯЭУ АЭС

Восстановление или регенерация фильтров систем, обеспечивающих требуемый ВХР контуров ЯЭУ, является важной операцией, позволяющей снизить экономические затраты на замену фильтров, а также уменьшить время подготовки систем ВХР к работе. Как известно, фильтры контуров ЯЭУ предназначены для очистки рабочей среды через слой загруженного в них сорбента. Для полного изучения процесса регенерации фильтров нужно иметь представление об их устройстве и принципе действия.

5.1. Устройство и основы эксплуатации фильтров

В настоящее время существует значительное количество различных фильтров различного исполнения и функционального действия. Кратко рассмотрим основные из них.

5.1.1. Классификация фильтров

1. По характеру загруженного сорбента и роли фильтра в конкретной технологической схеме все фильтры подразделяются:

- на механические;
- катионитовые;
- анионитовые;
- смешанного действия.

2. По способу создания напора воды, который необходим для преодоления гидравлических сопротивлений, возникающих в процессе фильтрации, фильтры являются напорными аппаратами.

3. По способу выполнения технологических операций регенерации ионообменные фильтры делятся на следующие:

- параллельноточные;
- противоточные;
- ступенчато-противоточные;
- с выносной регенерацией.

В параллельноточных фильтрах предусмотрен пропуск воды и регенерационного раствора через слой ионита в одном и том же направлении.

В противоточных фильтрах вода и регенерационный раствор пропускаются через слой ионита в противоположных направлениях.

В ступенчато-противоточных фильтрах, содержащих два слоя загрузки, вода и регенерационный раствор пропускаются через слои загрузки в обратной последовательности.

Выносная регенерация базируется на применении специальной аппаратуры для регенерации. При этом фильтрующий слой из ионитового фильтра удаляется. Остальные способы регенерации предусматривают выполнение регенерации слоя отработанного ионита в корпусе ионитного фильтра.

4. По расположению в пространстве продольной оси аппарата различают следующие фильтры:

- вертикальные;
- горизонтальные.

На АЭС, в основном, используются вертикальные фильтры.

Кроме вышеупомянутых механических и ионообменных фильтров широкое применение находят фильтры-ловушки, которые часто называют ловушками зернистых материалов. Данный вид фильтра служит для предупреждения поступления фильтрующего материала в очищенную воду при нарушении целостности внутрикорпусных устройств фильтра, после которого устанавливается ЛЗМ.

5.1.2. Типовые схемы обвязки фильтров

Для обеспечения различных режимов использования и технического обслуживания все фильтры имеют соответствующее оборудование. На рис. 5.1 показана типовая схема обвязки механического фильтра, на рис. 5.2 – ионообменного фильтра.

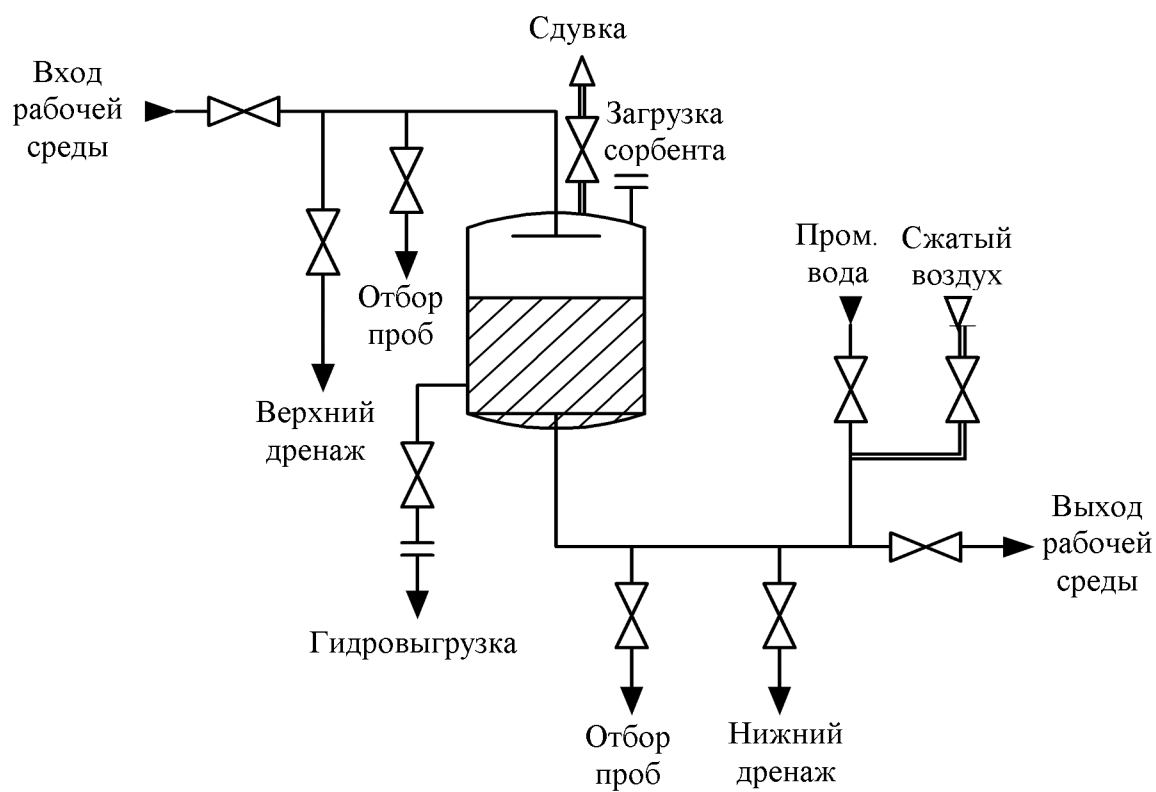


Рис. 5.1. Схема обвязки механического фильтра

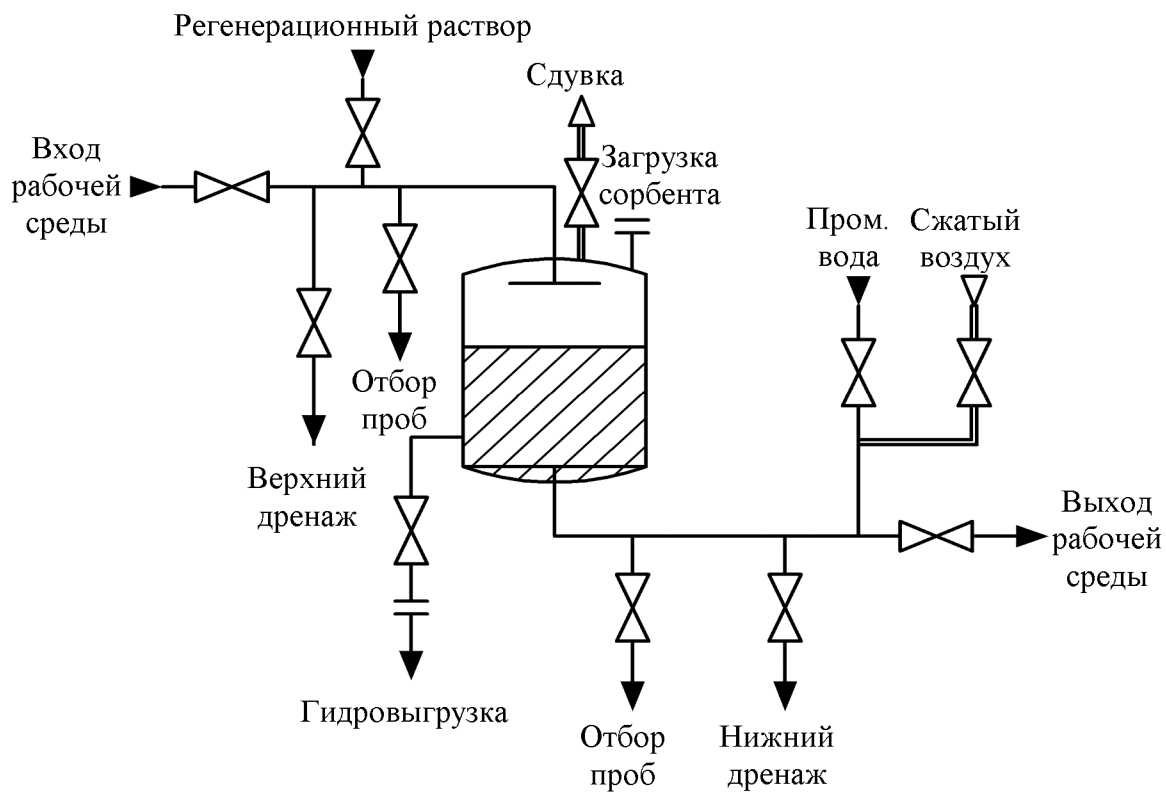


Рис. 5.2. Схема обвязки ионообменного фильтра

Рассмотрим назначение вспомогательных систем и оборудования, которые обеспечивают различные режимы использования и технического обслуживания фильтров.

Исходная вода насосами подается в верхнюю часть фильтра, где происходит равномерное распределение рабочей среды по площади сорбента. Очищенная вода отводится с нижней части фильтра.

Система промывочной воды предназначена для проведения взрыхления и последующей отмывки, а также для обеспечения гидровыгрузки фильтрующего материала. Данные операции производятся обратным током воды по отношению к потоку рабочей среды.

Система сжатого воздуха служит для взрыхления сорбента и транспортировки фильтрующего материала при его гидровыгрузке из фильтра.

Система реагентов служит для подачи регенерационных растворов: азотной (серной) кислоты – на катионитовый фильтр, гидроксида натрия или калия – на анионитовый.

Система пробоотбора предназначена для проведения химического и радиохимического контроля технологических сред. При нескольких последовательно установленных фильтрах, начиная со второго и далее, пробоотбор непосредственно перед фильтром может отсутствовать, а анализ, характеризующий состояние рабочей среды, производится из отобранной пробы после предыдущего фильтра.

Трубопровод нижнего дренажа служит для опорожнения рабочей среды из фильтра, а также для отвода с фильтра регенерационного раствора и воды при послерегенерационной отмывке.

Трубопровод верхнего дренажа предназначен для отвода рабочей среды при проведении взрыхляющей отмывки фильтра.

Трубопроводы нижнего и верхнего дренажей объединяются в один коллектор, из которого рабочий поток можно направить:

- в трап спецканализации;
- бак-отстойник системы СВО-3;
- баки осветленных трапных вод системы СВО-3;
- баки отмывочных вод СВО-5 и т.д.

Трубопровод сдувки служит для удаления воздуха при заполнении и пропуске через фильтр рабочей среды, а также для заполнения фильтра воздухом при дренировании его от рабочей среды.

Трубопровод загрузки сорбента предназначен для загрузки через него фильтрующего материала, а также для замера высоты сорбента фильтра. В верхней части данного трубопровода монтируется глушка.

На рис. 5.3 показана схема обвязки ловушки зернистых материалов. В ловушке рабочая среда проходит через фильтрующие патроны, в которых задерживаются механические частицы размером более 0,25 мм.

К вспомогательным системам и трубопроводам, обеспечивающим эксплуатацию ловушки зернистых материалов, относятся:

- система промывочной воды, предназначенная для промывки ЛЗМ в целях удаления из нее крупно- и среднedisперсных частиц и фильтрующего материала;
- система промежуточного хранения жидких радиоактивных отходов, служащая для приема сорбента при удалении его из ЛЗМ;
- трубопровод дренажа, предназначенный для опорожнения ловушки зернистых материалов, а также для удаления через данный трубопровод крупно- и среднedisперсных частиц при промывке фильтра;
- трубопровод сдувки, служащий для удаления воздуха при пропуске через ловушку рабочей среды и для заполнения ЛЗМ воздухом при дренировании ее от рабочей среды.

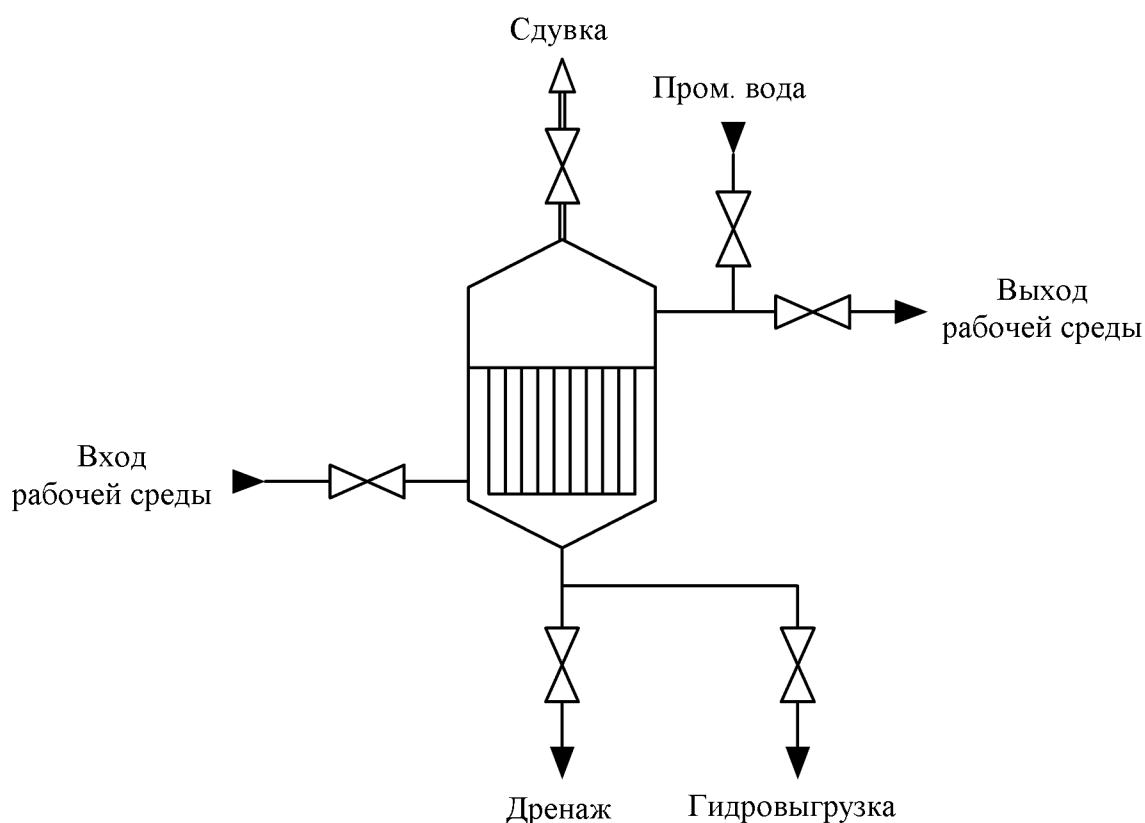


Рис. 5.3. Схема обвязки ловушки зернистых материалов

Система промежуточного хранения жидких радиоактивных отходов предназначена для приема фильтрующего материала при его гидровыгрузке из фильтра. Выдача сорбента при гидровыгрузке осуществляется из нижней части фильтра. Для предотвращения ошибочной гидровыгрузки на данном трубопроводе сразу после арматуры смонтирован фланцевый разъем с глушкой внутри. На период гидровыгрузки глушка снимается, а после окончания операции устанавливается на прежнее место.

5.1.3. Конструкция фильтров

В основном, фильтр СВО представляет собой цилиндрический сосуд вертикального расположения со сферическими крышкой и днищем. Фильтр устанавливается на фундамент с помощью трех опор либо опирается на цилиндрический корпус биологической защиты.

Основными составными частями фильтра (рис. 5.4) являются:

- цилиндрический кожух;
- верхнее и нижнее глубоковыпуклые днища;
- верхняя водораспределительная система;
- нижняя водосборная система.

Для обеспечения доступа к внутрикорпусным устройствам фильтра в целях их осмотра, ремонта и монтажа имеется фланцевый разъем, соединяющий между собой цилиндрический кожух и верхнее глубоковыпуклое днище. Для фильтров большого диаметра (1600 мм и 2500 мм) аналогичный фланцевый разъем отсутствует и для этого служит лаз, устанавливаемый в верхней части цилиндрического кожуха. Кроме того, в верхней части кожуха располагаются смотровые окна, позволяющие контролировать состояние сорбента без вскрытия фильтра.

В корпусе фильтра имеются следующие штуцеры:

- вход и выхода очищенной воды;
- воздушник;
- загрузка сорбента – к данному штуцеру приваривается фланец с глушкой, которая снимается для загрузки фильтрующего материала. Если фильтр очищает радиоактивную среду, к штуцеру приваривается вертикальный трубопровод, второй конец которого с фланцем и глушкой подводится к верхнему съемному перекрытию помещения. На период загрузки перекрытие демонтируется, после окончания данной операции устанавливается на прежнее место;
- выгрузка сорбента;
- опорожнение фильтра.

Внутри фильтра смонтированы верхняя водораспределительная и нижняя водосборная системы. В унифицированных фильтрах верхняя водораспределительная система состоит из небольшого по длине вертикального коллектора с заглушенным концом. К отверстиям, имеющимся у коллектора, присоединены в одной горизонтальной плоскости перфорированные трубы. Эти трубы обращены отверстиями вверх, свободные концы труб заглушены и крепятся к верхнему днищу с помощью консольных опор. В плане такая конструкция имеет вид лучей, расходящихся из одного центра, в связи с чем ее называют «звездной». Число лучей в «звезде» для всех фильтров, имеющих данный тип верхней водораспределительной системы, составляет шесть.

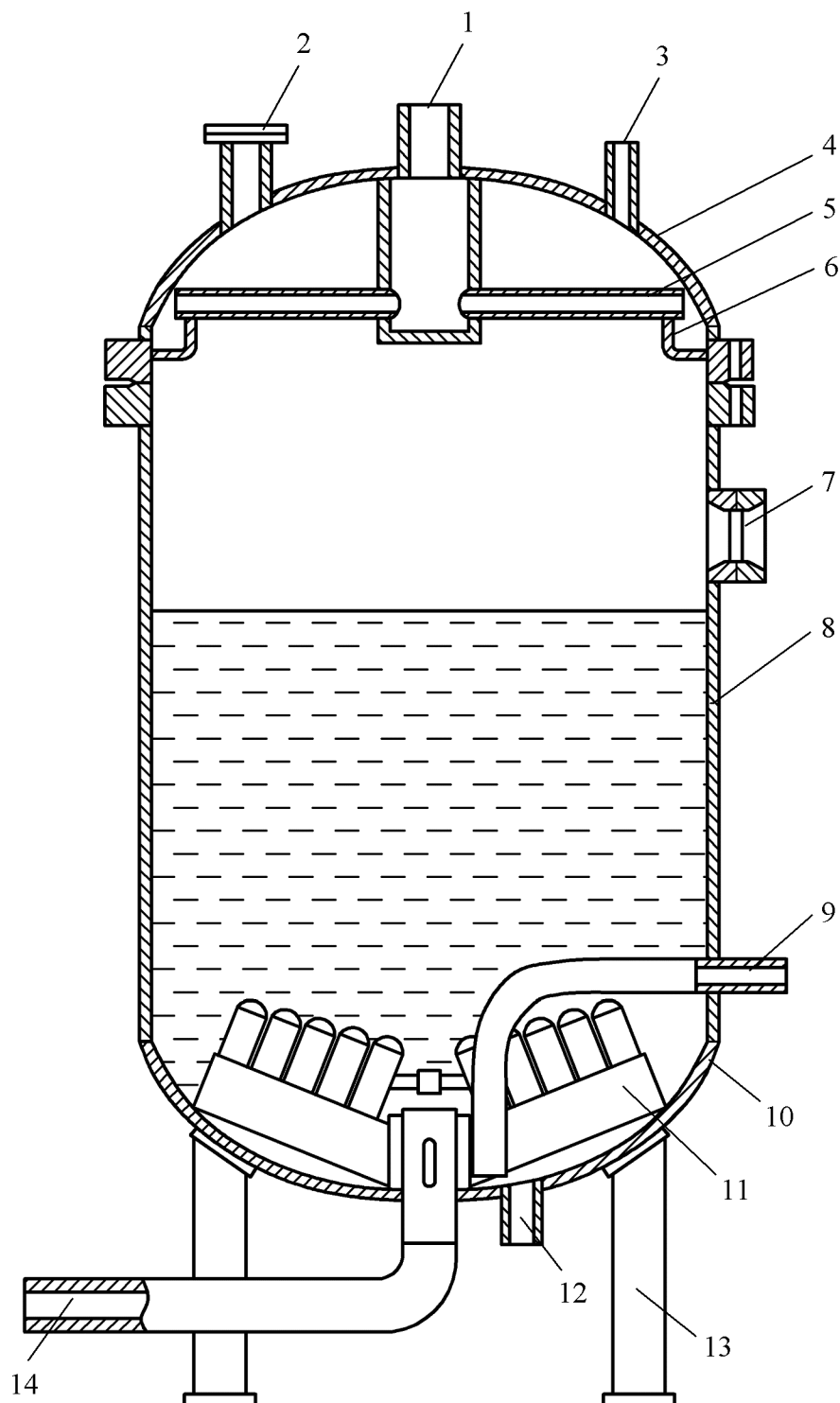


Рис. 5.4. Конструкция наиболее распространенного фильтра блока СВО:
 1 – вход воды; 2 – загрузка сорбента; 3 – воздушник;
 4 – верхнее глубоковыпуклоеднище; 5 – верхняя распределительная система;
 6 – консольная опора; 7 – смотровое окно; 8 – цилиндрический кожух;
 9 – выгрузка сорбента; 10 – нижнее глубоковыпуклое днище;
 11 – нижняя водосборная система; 12 – опорожнение фильтра;
 13 – опора; 14 – выход очищенной воды

При ударе струй воды, выходящих из отверстий распределительной системы, о верхнее днище и изменении направления движения происходит гашение кинетической энергии потока, поступающего из трубопровода в фильтр. Разделение общего потока на множество струй способствует выравниванию скоростей по сечению аппарата на подходе к слою сорбента. Пространство между верхним распределительным устройством и поверхностью фильтрующего материала, заполненное водой, носит название водяной подушки. Оно необходимо для выполнения операции взрыхления, предшествующей, в частности, операции регенерации ионита, т. е. пропуску через отработанный слой регенерационного раствора. Соотношение высот водяной подушки и слоя сорбента выбирают, исходя из условий расширения слоя при взрыхлении на величину 40...60 %. Удаляемая при взрыхлении вода отводится из фильтра через верхнюю распределительную систему. Через эту же систему во время регенерации поступает регенерационный раствор требуемой концентрации.

Подводя итог вышесказанному, отметим, что верхняя распределительная система предназначена:

- для распределения очищаемой воды;
- сбора взрыхляющей воды;
- распределения регенерационного раствора (для ионообменного фильтра).

Под слоем фильтрующего материала находится нижняя водосборная система (нижнее распределительное устройство), предназначенная так же, как и верхняя распределительная система, для равномерного распределения общего потока воды по сечению аппарата, а также для предотвращения выноса частиц ионита в трубопровод обработанной воды. Первая задача разрешается созданием больших местных сопротивлений в отверстиях и щелях распределительного устройства, существенно превышающих все прочие сопротивления по ходу движения воды в фильтре. Устранение попадания зерен сорбента в фильтрат достигается созданием проходных сечений в дренажном устройстве размером меньше размера частиц фильтрующей среды.

Итак, нижнее распределительное устройство предназначено:

- для отвода очищенной в фильтре воды;
- отвода послерегенерационного раствора (для ионообменного фильтра);
- подвода воды для взрыхления и последующей промывки сорбента;
- подвода сжатого воздуха для взрыхления сорбента;
- подвода воды и сжатого воздуха для выгрузки фильтрующего материала из фильтра.

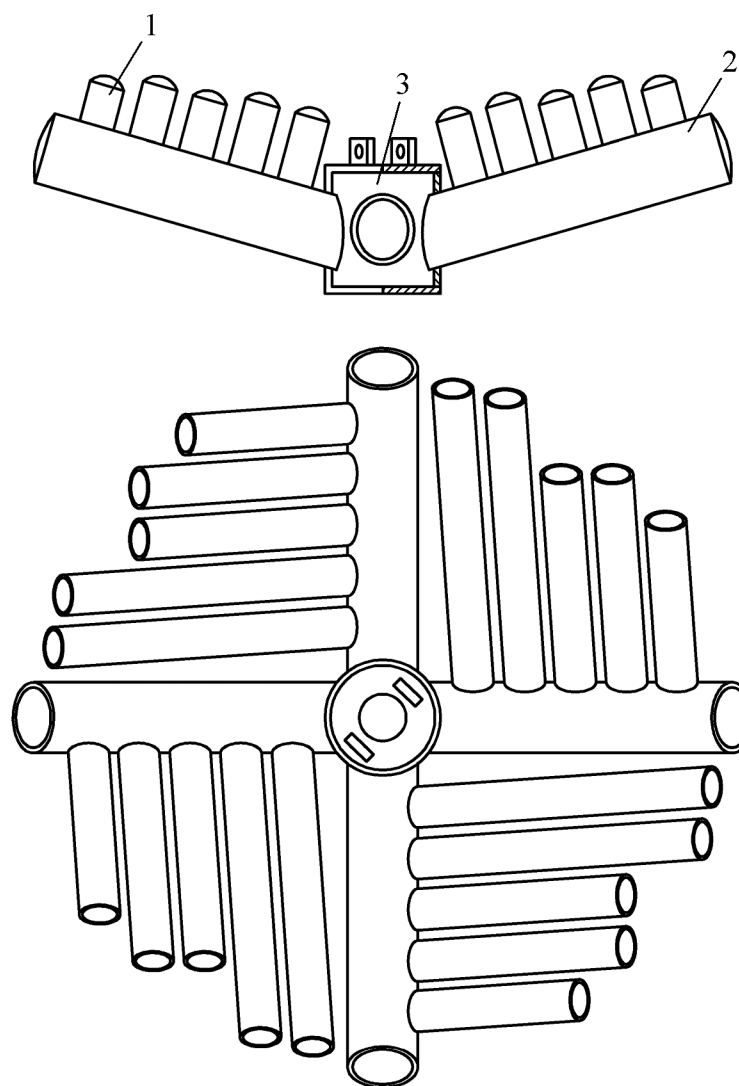


Рис. 5.5. Нижняя водосборная система фильтра:
1 – фильтрующий элемент; 2 – сборная труба; 3 – нижняя труба

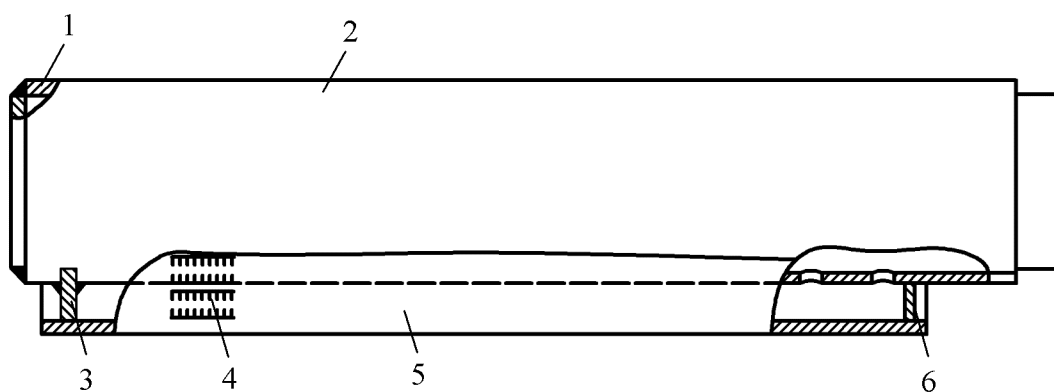


Рис. 5.6. Фильтрующий элемент:
1 – глушка; 2 – фильтрующая труба; 3 – глушка; 4 – щели 0,25;
5 – перфорированный желобок; 6 – глушка

Нижняя водосборная система (рис. 5.5) состоит из центрального коллектора (нижней трубы), к которому присоединены четыре сборные трубы с одним заглушенным концом. В свою очередь, к сборным трубам приварены фильтрующие элементы, которые по всей длине имеют отверстия, перекрытые общим перфорированным желобком с щелями размером 0,25 мм. Как отверстия в фильтрующих трубах, так и поперечные щели в желобках обращены вниз.

Вся нижняя водосборная система в целом является съемной и монтируется на направляющей трубе нижнего днища с помощью штифта. Все элементы нижнего и верхнего распределительных устройств изготавливаются из нержавеющей стали.

Кроме описанного фильтра на блоке СВО находят применение фильтры со следующими особенностями:

- при установке в обслуживаемых помещениях для очистки малоактивных вод фильтры снабжаются защитным кожухом, в который засыпается чугунная дробь в целях создания биологической защиты;
- при наличии в исходной воде нефтепродуктов внутри фильтра имеется маслосепарационная вставка, служащая для концентрирования находящихся в рабочей среде нефтепродуктов и являющаяся одновременно верхней водораспределительной системой.

Ловушка зернистых материалов (рис. 5.7) представляет собой аппарат вертикального расположения, опирающийся на две опоры и состоящий из следующих основных элементов:

- цилиндрического кожуха;
- глубоковывуклой крышки;
- глубоковывуклого днища;
- фильтрующих патронов.

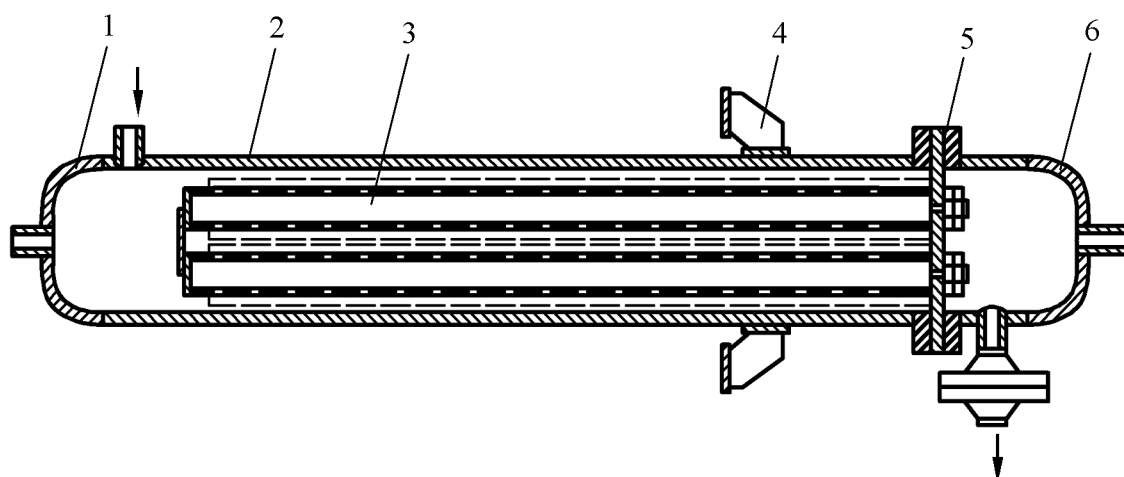


Рис. 5.7. Ловушка зернистых материалов:

- 1 – глубоковывуклое днище; 2 – цилиндрический кожух; 3 – фильтрующий патрон;
4 – опора; 5 – трубная доска; 6 – глубоковывуклая крышка

Верхняя крышка крепится к кожуху с помощью фланцевого разъема и является съемной. Внутри ЛЗМ установлена съемная трубная доска, в которой с помощью гаек крепятся фильтрующие патроны. Для жесткости фильтрующие патроны скреплены между собой с помощью ребер. В зависимости от требуемого максимального расхода через фильтр-ловушку рассчитывается соответствующее необходимое количество фильтрующих патронов. На АЭС применяются два вида ловушек:

- максимальной производительностью $65 \text{ м}^3/\text{ч}$ с 13 фильтрующими патронами;

- максимальной производительностью $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ с тремя патронами.

Фильтрующий патрон (рис. 5.8) представляет собой перфорированную трубу внешним диаметром 50 мм с заглушенным нижним концом и просверленными по всей ее длине вертикальными рядами отверстий диаметром 6 мм. Эти отверстия перекрыты шестью фильтрующими желобками, каждый из которых снабжен щелями размером 0,25 мм с шагом между ними 2 мм.

Исходная вода, поступающая в нижнюю часть ЛЗМ, проходит очистку на фильтрующих патронах от возможных взвешенных частиц и фильтрующего материала, затем через перфорированные трубы поступает в верхнюю часть фильтра-ловушки и далее – выходит из фильтра. Сопротивление всей фильтрующей системы при максимально возможном расходе через ЛЗМ для обоих их видов составляет $0,3 \text{ кгс/см}^2$.

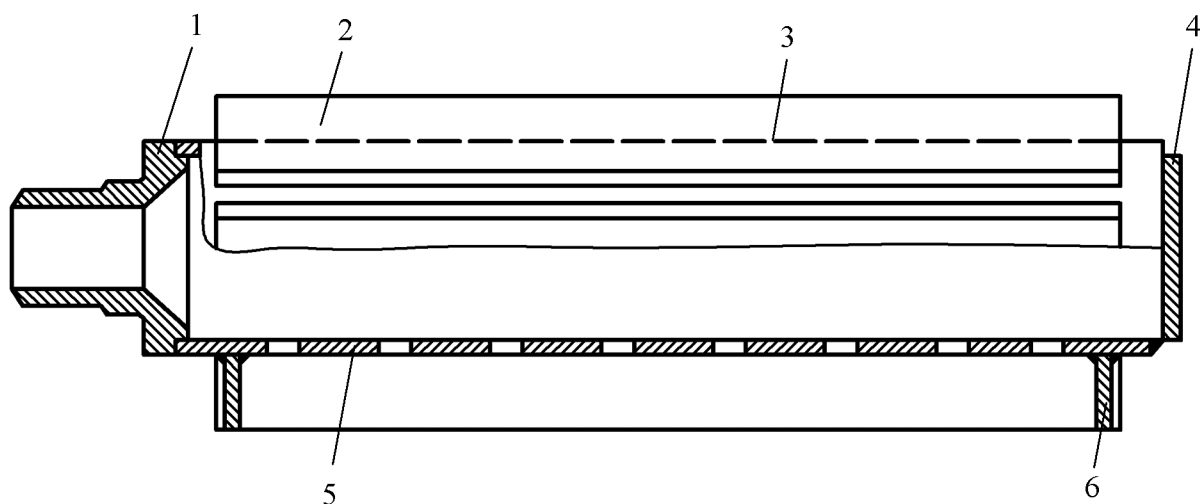


Рис. 5.8. Фильтрующий патрон:

1 – втулка; 2 – перфорированный желобок; 3 – щели 0,25;
4 – глушка; 5 – фильтрующая труба; 6 – глушка

5.1.4. Основы эксплуатации фильтров

Фильтры и ЛЗМ вводятся в работу при необходимости очистки соответствующей среды или согласно графика взамен выведенного на регла-

ментные работы фильтра. Контроль параметров работы фильтров и осуществляется по приборам, установленным на щите СВО (ХВО).

Подготовка фильтра и ввод его в работу.

В качестве исходного состояния рассмотрим ионообменный фильтр, который загружен фильтрующим материалом, отрегенирован, отмыт, заполнен водой и находится в резерве. Вся арматура в обвязке фильтра закрыта.

Перед вводом фильтра в работу производится его внешний осмотр, а также осмотр арматуры и трубопроводов обвязки. Затем открываются «коренные» вентили на импульсных трубопроводах к датчикам КИП, проверяется целостность и исправность самих контрольно-измерительных приборов.

Если ионообменный фильтр вводится в работу после длительного нахождения в резерве, то рекомендуется его предварительная отмывка водой. Перечень фильтров и технология данной отмывки определяются соответствующими инструкциями по эксплуатации.

Итак, открывается арматура на трубопроводе основного потока, обеспечивается подача на фильтр рабочей среды (включается насос, подается заявка персоналу смежных подразделений и т.д.) и открытием соответствующей арматуры производится воздухоудаление из фильтра. Необходимость данной операции обусловлена тем, что попадание воздуха в фильтрующий слой у механических фильтров вызывает увеличение потери напора в слое сорбента, а у ионообменных фильтров, кроме того, из-за налипания мельчайших пузырьков воздуха на поверхность зерен ионита снижается обменная емкость фильтра.

Необходимо помнить, что в зависимости от радиоактивности очищаемой рабочей среды трубопровод сдувки подводится:

- к рядом расположенной с фильтром воронке;
- к трапу спецканализации;
- в камеру сдувок.

После воздухоудаления по прибору со щита СВО (ХВО) либо по приборам, расположенным по месту, контролируется перепад давления на включенном в работу фильтре. При наличии в схеме обвязки фильтра приборов автоматического химконтроля они включаются в работу.

Подготовка ЛЗМ и ввод ее в работу.

Как и в случае с фильтром, перед вводом в работу ЛЗМ производится ее внешний осмотр, а также осмотр арматуры и трубопроводы обвязки, открываются «коренные» вентили на импульсных трубопроводах к датчикам КИП, проверяется целостность и исправность самих контрольно-измерительных приборов. После этого открывается арматура на трубопроводе основного потока, обеспечивается подача на ЛЗМ рабочей среды и производится воздухоудаление. Контролируется перепад давления на вве-

денной в работу ловушке зернистых материалов, который должен быть не более $0,3 \text{ кгс/см}^2$.

Техническое обслуживание фильтра и ЛЗМ при очистке рабочей среды.

В период нормальной эксплуатации оперативный персонал СВО осуществляет контроль:

- расходов через фильтры и ЛЗМ, перепадов давления на них и температуры перед ионообменными фильтрами;
- водно-химических показателей работы фильтров по приборам автоматического химконтроля и переданным лаборантом результатам анализов ручного химконтроля;
- состояния работающих фильтров, ЛЗМ, трубопроводов и арматуры обвязки оборудования путем проведения периодических осмотров, но не менее чем через каждые два часа.

Вывод из работы фильтра и ЛЗМ в резерв.

После прекращения подачи на фильтр и ЛЗМ рабочей среды закрывается арматура на трубопроводе основного потока. Открывается арматура сдувки на фильтре и на ЛЗМ, давление внутри оборудования уравнивается с атмосферным, после чего данная арматура закрывается.

5.2. Взрыхляющая промывка фильтров

В процессе работы механического фильтра сорбент загрязняется взвешенными частицами, в результате чего возрастает его гидравлическое сопротивление или наблюдается проскок взвешенных частиц в фильтрат. Последнее особенно характерно для активированного угля.

При работе ионообменного фильтра также происходят уплотнение фильтрующего слоя и накопление в слое ионита пылевидных частиц. Уплотнение слоя в процессе истощения ионита обуславливается изменением степени набухания зерен в связи с изменением ионной формы сорбента. Накопление пылевидных частиц связано с постепенным истиранием зерен ионообменного материала, а также с поступлением грубодисперсных примесей с недостаточно осветленной исходной водой и регенерационным раствором. Кроме того, мелкие частицы фильтрующего материала могут иметь место и при первичной загрузке сорбента в фильтр. Накопление в фильтрующем слое мелких фракций приводит не только к повышению перепада давления, но и к неравномерному распределению скоростей потока по сечению аппарата (явление «каналообразования»), что уменьшает эффективность работы фильтра.

Для исключения подобных явлений служит операция взрыхляющей промывки фильтра, которую осуществляют водой, пропуская ее снизу вверх. Таким образом, взрыхление фильтра производится при наличии одного из следующих условий:

- в фильтр загружен новый фильтрующий материал;
- перепад давления на работающем фильтре больше предельного значения;
- прозрачность очищенной воды после фильтра меньше нормируемой величины (только для механического фильтра);
- перед регенерацией фильтра.

Промывку сорбента производят током воды снизу вверх с расходом, обеспечивающим расширение объема загрузки примерно в 1,5 раза, что позволяет зернам фильтрующего материала свободно перемещаться в потоке воды. Отрывающиеся с поверхности зерен частицы загрязнений и измельченные частицы фильтрующего материала удаляются вместе с водой. Для повышения эффективности промывки и снижения количества промывочной воды предварительно производится взрыхление фильтрующего материала водой или сжатым воздухом.

Таким образом, взрыхляющая промывка фильтра состоит из двух последовательно проводимых операций: взрыхления фильтрующего материала и собственно взрыхляющей промывки. Вода для данных операций берется из баков собственных нужд либо из баков отмывочных вод. Интенсивность взрыхления и последующей промывки, обеспечивающая приведение во взвешенное состояние всей массы сорбента, зависит от вида сорбента, диаметра его зерен и высоты загрузки в фильтре. Поэтому для каждого фильтра в процессе его эксплуатации устанавливается оптимальное значение расхода промывки. Данные значения приводятся в соответствующих инструкциях по эксплуатации технологических систем.

Для описания данной технологической процедуры рассмотрим схему обвязки фильтра, приведенную на рис. 5.9.

Исходное состояние рассматриваемой схемы: фильтр заполнен водой, вся арматура обвязки закрыта.

Взрыхление фильтрующего материала водой. Открывается запорно-регулирующая арматура 4 на трубопроводе подвода взрыхляющей воды и 7, 9 – на трубопроводе отвода воды в спецканализацию. В целях контроля взрыхления и последующей промывки допускается открытие арматуры 6 на трубопроводе сдувки, но при большой протяженности и трассировки трубопровода сдувки (например, при подводе данного трубопровода к камере сдувок) или при малой удельной плотности сорбента (например, активированный уголь) данную арматуру рекомендуется не открывать. После открытия всей вышеперечисленной арматуры обеспечивается подача промывочной воды к фильтру и путем плавного открытия-закрытия арматуры 3 в течение одной минуты производится взрыхление фильтрующего материала. Необходимо помнить, что резкое открытие данной арматуры может привести к деформации штифта, который крепит нижнюю водосборную систему на направляющей трубе нижнего днища фильтра, что

влечет за собой нарушение прилегания вышеуказанных элементов, а как следствие – вынос сорбента из фильтра. По окончании взрыхления арматура 3, 4, 9 закрывается.

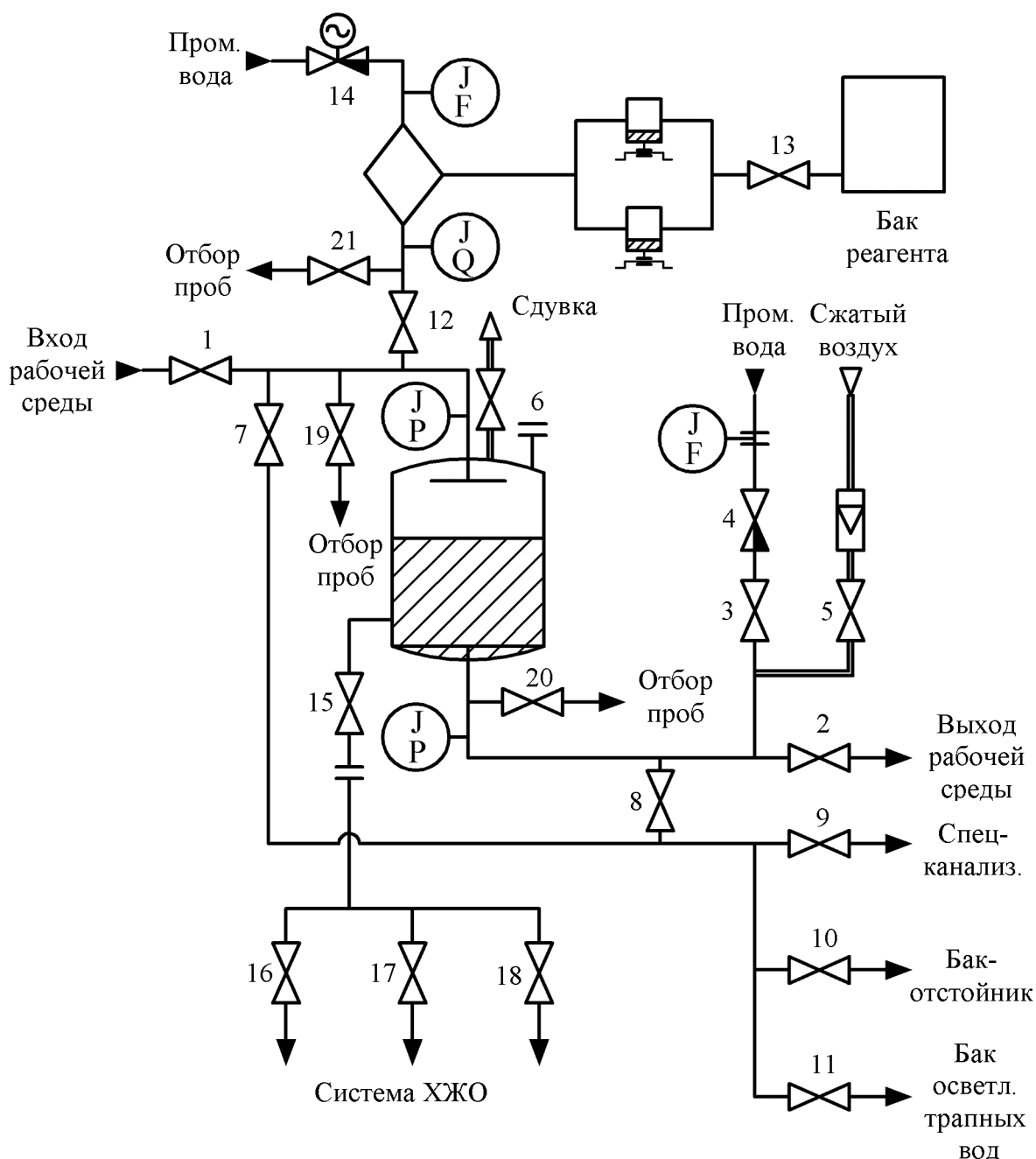


Рис. 5.9. Принципиальная схема обвязки ионообменного фильтра

Взрыхление фильтрующего материала сжатым воздухом. Перед взрыхлением открывается арматура 6, 8, 9, тем самым опускается водяная подушка фильтра (фильтр поддрилируется), после чего арматура 8, 9 закрывается. Обеспечивается подача сжатого воздуха к фильтру и открытием арматуры 5 устанавливается требуемое, согласно инструкции по эксплуа-

тации, давление на выходе из фильтра. Взрыхление производится в течение десяти минут.

Взрыхляющая промывка фильтрующего материала. После окончания взрыхления необходимо дать фильтрующему материалу отстояться в течение примерно двух минут. Собирается схема взрыхляющей промывки. Для этого открывается арматура 3, 10 и, если была закрыта, арматура 7. Плавным открытием регулирующего клапана 4 устанавливается требуемый инструкцией по эксплуатации расход воды. Если предварительно взрыхление производилось сжатым воздухом, то в первое время будет происходить дозаполнение фильтра, после чего начнется непосредственно взрыхляющая промывка. Контроль отсутствия выноса сорбента с водой после фильтра ведется через трубопровод сдувки при открытой арматуре 6 либо через трубопровод дренажей путем периодического открытия 9. Оптимальным расходом воды при взрыхляющей промывке будет являться такой максимальный расход, при котором после фильтра будет отсутствовать вынос фильтрующего материала. Если же при установлении расхода воды на взрыхляющую промывку будет наблюдаться вынос сорбента, промывка временно прекращается. По истечении пяти минут подача промывочной воды возобновляется, причем расход устанавливается несколько меньше значения, при котором наблюдался вынос фильтрующего материала. При достижении требуемой прозрачности воды после фильтра взрыхляющая промывка прекращается, вся ранее открытая арматура закрывается.

Промывка фильтра-ловушки зернистых материалов.

Промывка фильтра-ловушки производится при достижении перепада давления на ней более допустимого. Достижение такого перепада может возникнуть в двух случаях:

- в связи с накоплением взвешенных частиц и пылевидного сорбента, выдаваемых фильтром, который установлен перед ЛЗМ;
- при выносе фильтрующего материала из фильтра, установленном перед ЛЗМ, обусловленного выходом из строя нижней водосборной системы фильтра.

Рассмотрим технологию промывки фильтра-ловушки (рис. 5.10).

В случае определения в процессе эксплуатации ЛЗМ перепада давления на ней более допустимого принимаются меры по прекращению подачи рабочей среды через ловушку (нитка фильтров выводится из работы) и закрывается арматура 1, 2 на трубопроводе основного потока. Далее собирается схема промывки фильтра-ловушки промывочной водой в трап спецканализации – открывается арматура 4, 5, обеспечив тем самым подачу воды к ЛЗМ, и с помощью регулирующей арматуры устанавливается номинальный расход на трубопроводе промывочной воды. По истечении примерно пяти минут подача воды к ЛЗМ прекращается и закрывается арматура 4, 5. Открывается арматура 1, 2, а также арматура на пробоотборной

линии между фильтром и ЛЗМ (если протяженность данной линии невелика) и обеспечивается подача рабочей среды.

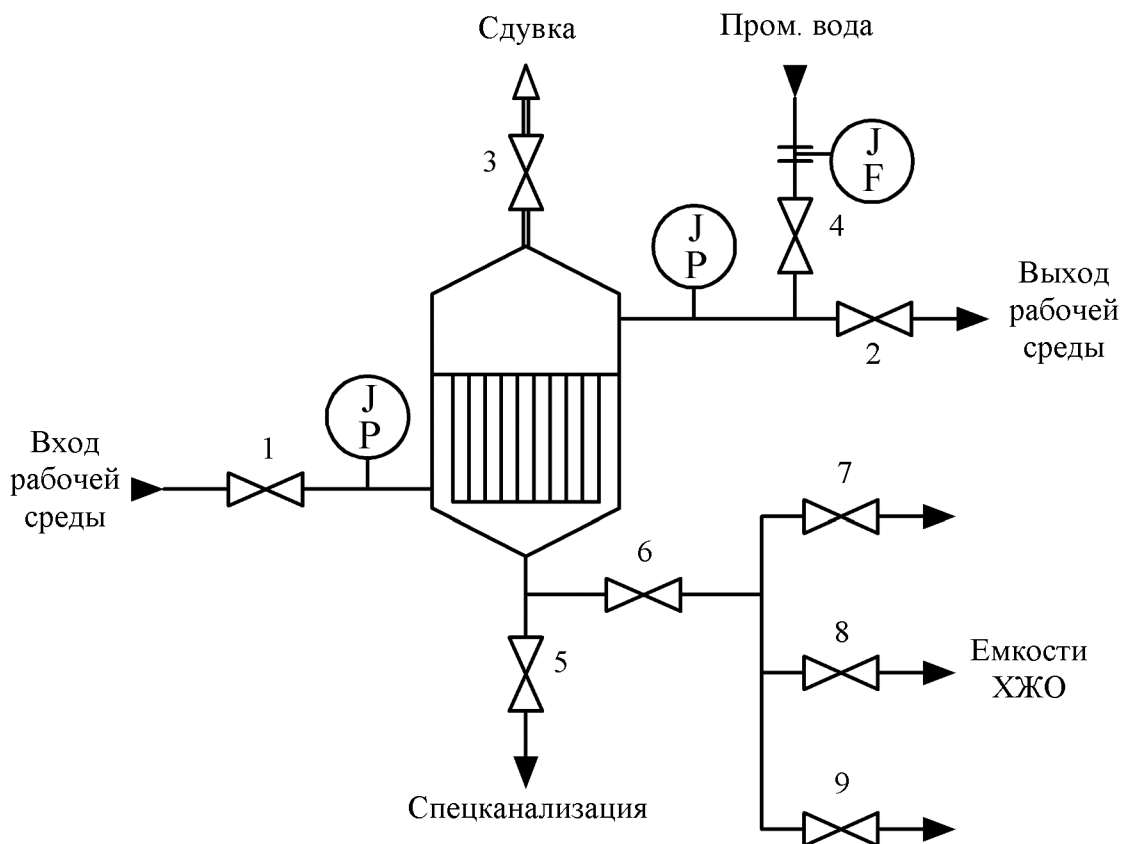


Рис. 5.10. Принципиальная схема обвязки фильтра-ловушки

Если через пробоотборную линию отсутствует вынос фильтрующего материала и перепад давления на ЛЗМ в течение примерно десяти минут не увеличился до значения более $0,3 \text{ кгс/см}^2$, причиной предыдущего увеличения перепада было накопление взвешенных частиц и пылевидного сорбента в фильтрующих патронах фильтра-ловушки. В этом случае оборудование остается в работе. Если же через пробоотбор наблюдается вынос сорбента и перепад давления на ЛЗМ постоянно увеличивается при пропуске через него рабочей среды, то это свидетельствует о выходе из строя нижней распределительной системы фильтра. В этом случае прекращается подача рабочей среды, фильтр выводится в ремонт, а ФЛ промывается в одну из емкостей фильтрующего материала.

5.3. Регенерация ионообменного фильтра

При истощении ионообменного материала, т. е. насыщении сорбента той или иной группой ионов до их проскока в фильтрат, производится регенерация ионитов кислотой и щелочью. Возможность регенерации катионита (анионита), а именно, перевод его в исходную ионную форму, обу-

славливается обратимостью реакции ионного обмена. Вспомним, как работает катионит при очистке исходной воды



где R^-H^+ – катионит, в котором подвижным обменным катионом является H^+ , а неподвижным анионом – высокомолекулярная часть R^- ; Na^+ – катион, поступивший на катионит.

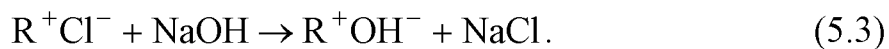
Процесс очистки воды соответствует протеканию реакции слева направо, процесс регенерации катионита должен отвечать протеканию этой же реакции в обратном направлении. Из вышеприведенного уравнения видно, что для получения катионита в H^+ -форме необходимо, создать избыток ионов водорода в фильтре по отношению к ионам натрия. Для этой цели необходимо, чтобы отработанный ионит контактировал с какой-либо кислотой.

На АЭС для данной цели используется азотная кислота HNO_3 . Реакция регенерации катионита азотной кислотой в молекулярной форме может быть записана следующим образом



Для обеспечения регенерации анионитового фильтра применяется, соответственно, щелочь, имеющая в своем составе гидроксильную группу OH^- . На АЭС в качестве регенерационного раствора для различных технологических систем применяются гидроксиды натрия $NaOH$ и калия KOH . Чтобы обеспечивался процесс регенерации анионита, необходим избыток гидроксильной группы OH^- по отношению к анионам в фильтрующем материале.

Реакция регенерации анионита гидроксида калия в молекулярной форме может быть записана так



Регенерация ионообменного фильтра производится, как правило, при наличии одного из следующих факторов:

- в фильтр загружен (дозагружен) новый фильтрующий материал, находящийся в солевой форме;
- один из показателей водно-химического режима после работающего фильтра выше нормируемого значения.

Вновь, как и ранее, для рассмотрения технологии регенерации ионообменного фильтра возьмем схему обвязки, показанную на рис. 5.9.

Исходное состояние рассматриваемой схемы: произведена взрыхляющая промывка фильтра, он заполнен водой и вся арматура обвязки закрыта.

На первом этапе, стадии подготовки и начала регенерации, производится настройка расхода и концентрации регенерационного раствора. Собирается технологическая схема подачи промывочной воды через смеситель реагента на требующий регенерацию фильтр и далее – в бак осветленных трапных вод. Для этого необходимо открыть запорную арматуру 12, 8, 11, обеспечить подачу воды к смесителю и регулирующим клапаном 14 установить требуемый соответствующей инструкцией по эксплуатации расход через фильтр. Далее собирается схема и включается насос-дозатор, на смеситель подается концентрированный раствор реагента с таким расходом, чтобы концентрация после смесителя была 5 %. Расход концентрированного раствора устанавливается с помощью изменения хода плунжера насоса-дозатора или степенью открытия арматуры 13 на выходе из бака. Концентрация регенерационного раствора перед фильтром контролируется по показанию концентратомера и по результатам анализа проб, отобранных через пробоотборную линию 21.

Пропуск регенерационного раствора через фильтр осуществляется, как правило, один час, после чего насос-дозатор отключается и разбирается схема подачи концентрированного раствора на смеситель.

Последняя операция регенерационного цикла ионита – послерегенерационная отмывка, которая нужна для удаления из слоя фильтрующего материала остатки продуктов регенерации. Для этого с помощью регулирующего клапана 14 расход промывочной воды через фильтр увеличивается до соответствующего значения. Затем через каждый час осуществляется контроль за ходом отмывки посредством анализов проб после фильтра. Объем и нормируемые величины анализов определяются соответствующими инструкциями по эксплуатации, но в любом случае контролируются значение pH и кислотность для катионитового фильтра и щелочность – для анионитового.

При достижении требуемых анализов воды после фильтра послерегенерационная отмывка прекращается (перекрывается подача воды к фильтру и закрывается вся ранее открытая арматура).

Гидровыгрузка фильтрующего материала производится при наличии одного из следующих факторов:

- истечение срока службы сорбента;
- неудовлетворительные анализы работы фильтра;
- необходимость ремонта нижней распределительной системы.

Гидровыгрузка осуществляется в одну из емкостей фильтрующих материалов хранилища жидких радиоактивных отходов.

При рассмотрении технологии гидровыгрузки вновь обратимся к рис. 5.9. Исходное состояние рассматриваемой схемы: фильтр заполнен водой, вся арматура обвязки закрыта. В первую очередь, снимается глушка с фланцевого разъема после арматуры 15. Далее открывается арматура 3, 15, 16 и обеспечивается подача в фильтр промывочной воды с требуемым расходом. Одновременно открытием арматуры 5 устанавливается требуемый расход сжатого воздуха через фильтр. При малой протяженности трубопровода сдувки за ходом гидровыгрузки можно следить посредством периодического открытия арматуры 6.

Гидровыгрузка, как правило, осуществляется в течение двух часов, после чего закрывается вся ранее открытая арматура, подача воды в фильтр прекращается и он дренируется от остатков воды. После этого разуплотняется люк фильтра и проверяется количество оставшегося фильтрующего материала: если уровень сорбента в фильтре не более 100...150 мм, гидровыгрузка считается законченной. Глушка после арматуры 15 устанавливается на прежнее место.

Загрузка фильтрующего материала производится, как правило, через штуцер загрузки в верхней части фильтра, реже – через люк. Готовится требуемое количество сорбента. При этом учитывается, что если это ионит и он находится в сухом товарном виде, отличительной его особенностью является способность к последующему набуханию в воде, что приводит к увеличению объема примерно на 20 % и незначительному сжатию под действием регенерационного раствора. Иониты ядерного класса поступают от производителей уже в набухом состоянии в растворе соли.

Соответствующее количество сорбента загружается в фильтр. Причем, если загрузка производится через соответствующий трубопровод и протяженность данного трубопровода велика (что характерно для фильтров по очистке радиоактивных сред), рекомендуется во избежание забивания трубопровода отрегулировать расход воды через шланг к нему с одновременным дренированием фильтра через арматуру 8, 9.

По окончании загрузки измеряется уровень сорбента в фильтре, после чего на трубопровод загрузки устанавливается глушка (уплотняется люк фильтра). Затем фильтр заполняется водой: открывается арматура 3, 6 обеспечивается подача в фильтр промывочной воды и плавно, без рывков приоткрывается регулирующий клапан 4. При появлении устойчивой струи из воздушника фильтра закрывается арматура 6 и давление в фильтре увеличивается до 9 кгс/см². При этом особое внимание уделяется фланцевому разъему на трубопроводе загрузки (люку фильтра). По окончании опрессовки подача воды в фильтр прекращается, закрывается арматура 3, 4 и открытием арматуры 6 давление внутри фильтра уравнивается с атмосферным.

Если требуется набухание свежезагруженного сорбента, его оставляют для этой цели в фильтре в водной среде на время 16...24 ч, после чего производится взрыхляющая отмывка фильтрующего материала, а при необходимости – и регенерация, причем время пропуска регенерационного раствора увеличивается вдвое.

6. КОНТРОЛЬ ВХР В КОНТУРАХ АЭС

6.1. Основы организации лабораторного и автоматического контроля качества воды контуров ЯЭУ АЭС

Одной из основных задач контроля водно-химического режима является оценка состояния эксплуатирующегося теплоэнергетического оборудования в отношении коррозии и образования различного вида отложений, что позволяет судить об эффективности ведения ВХР за предшествующий период.

Для того, чтобы судить о состоянии ВХР на работающем оборудовании, когда возможность «заглянуть внутрь» полностью исключена, остается другой путь наблюдения за протеканием отдельных физико-химических процессов – следить за изменением концентраций тех примесей в рабочей среде, которые могут участвовать в этих процессах.

Химический контроль воды и пара на различных участках контуров ЯЭУ призван характеризовать фактическое состояние водного режима и его соответствие или размеры отклонений от действующих норм.

Как известно, нормы качества воды и пара контуров содержат перечень определенных показателей, которые принято называть нормируемыми с указанием пределов, в которых может изменяться величина каждого показателя. В качестве нормируемых обычно устанавливаются те показатели, поддержание которых обеспечивает безопасный проектный ресурс надежной работы всего оборудования без снижения его экономичности.

Для того, чтобы иметь представление о фактическом качестве пара и воды на всех участках контуров ЯЭУ, для которых установлены нормы, необходимо отбирать пробы рабочей среды и систематически выполнять соответствующие анализы. Такой повседневный контроль называют ***эксплуатационным (оперативным) или текущим химическим контролем.***

Определение нормируемых показателей является минимально необходимым, но не всегда достаточным для того, чтобы установить причины возникновения тех или иных нарушений водного режима.

Когда с помощью эксплуатационного химического контроля зафиксировано отклонение качества воды или пара от действующих норм, прежде всего, необходимо установить причины такого отклонения. Только определив эти причины, можно принять меры по их устранению и упорядочить

ВХР того участка, где наблюдается его отклонение. При выявлении причин нарушения ВХР, химический контроль сочетают с другими видами контроля, такими как радиохимический, радиометрический, физико-химический и т.д.

Отклонение в процессе эксплуатации нормируемых показателей от установленных значений требует оперативного вмешательства персонала станции в работу систем обеспечения ВХР, а при невозможности достижения в короткий срок требуемых значений – снижения мощности или останова блока.

Таким образом, из выше сказанного видно, что *химконтроль предназначен для выяснения причин нарушений ВХР.*

Определение качества отдельных потоков пара и воды в работающем оборудовании, качества и количества реагентов, вводимых в контуры энергоблока, химического состава отложений, образовавшихся в оборудовании, все это служит разрешению второй задачи организации химического контроля – выявлению различных неполадок и дефектов водного режима.

Не менее важные задачи возлагаются на химический контроль при проведении консервации оборудования, при водных и химических отмыках, при наладке и режимных испытаниях нового и модернизированного оборудования. Контроль за проведением водных и химических промывок имеет целью наблюдение за ходом промывки, правильностью осуществления принятой технологии, за эффективностью удаления отложений и коррозией металла под действием моющих реагентов.

Для решения рассмотренных выше основных задач химического контроля ВХР необходимо опираться на принципиальную схему химического контроля, которая должна учитывать особенности оборудования и условия его эксплуатации.

Система химического контроля предназначена для получения оперативной информации о состоянии водно-химического режима контуров ЯЭУ в целях поддержания нормируемых показателей качества теплоносителя и рабочей среды при эксплуатации энергоблока.

Система химического контроля включает:

- систему автоматизированного химического контроля;
- систему лабораторного химического контроля.

Совокупность данных систем АХК, ЛХК и технических параметров средств обеспечения ВХР должна представлять собой информационную модель ВХР контуров ЯЭУ. Сбор, обработку и архивацию данных системы химического контроля необходимо проводить с использованием современных средств вычислительной техники, устройств связи с объектом контроля, программного обеспечения интерфейса пользователями для работы с базами данных. При этом данные системы АХК должны обрабатываться

автоматически с установленной частотой опроса средств измерения, а данные системы ЛХК должны периодически вноситься в базу данных ВХР.

Содержанием принципиальной схемы химического контроля является следующая информация

- точки отбора проб;
- объем контроля;
- график отбора проб;
- методы анализа отбираемых проб (автоматические и ручные).

В широком смысле понятие «точка отбора проб» охватывает не только место взятия пробы из аппарата или трубопровода, но и необходимые приспособления для отбора проб (холодильники, терморегуляторы, дроссельные устройства, зонды, арматуру и т.д.).

Под объемом контроля понимают перечень показателей качества рабочей среды.

6.1.1. Основы организации лабораторного химического контроля

Для организации правильного химического контроля качества теплоносителя и рабочей среды ЯЭУ основным условием является отбор представительной пробы, т.е. наиболее близкой по своему составу по всем компонентам к составу контролируемой среды.

Пробу называют **представительной**, когда концентрации определяемых примесей в пробе совпадают со средней их концентрацией в контролируемом объекте.

Техника отбора проб должна по возможности исключать причины, вызывающие нарушение представительности проб. Нарушение представительности пробы может возникнуть в процессе отбора, транспортировки или длительного хранения пробы перед ее обработкой.

Для того чтобы проба была представительной необходимо, чтобы на всех ранее перечисленных этапах, состав ее по определяемым химическим показателям никак не менялся. Очень легко нарушается представительность пробы, в которой находятся легколетучие вещества. Такими веществами в контурах ЯЭУ являются кислород и аммиак. При определении кислорода все операции необходимо проводить в условиях изоляции пробы от окружающего воздуха. Поэтому, анализ на кислород проводится по месту отбора (в проботборной камере). При определении аммиака проба отбирается в герметично закрываемую емкость, и анализ производится вскоре после ее взятия.

При определении рН и электропроводности пробы, во избежание контакта ее с воздухом (что приводит к искажению результатов), необходимо отобрать пробу до верха проботборной емкости и герметично закрыть ее крышкой. Анализ проводится сразу после отбора.

Для уменьшения влияния на представительность пробы продуктов коррозии конструкционных материалов пробоотборные линии должны быть изготовлены из аустенитной нержавеющей стали.

Пробы воды отбираются из трубопроводов пробоотборными зондами (рис. 6.1), причем скорости потока в трубопроводе в месте отбора пробы и в устье зонда должны быть равны друг другу при расходе отбираемой среды 14 ± 3 г/с (50 ± 10 кг/ч).

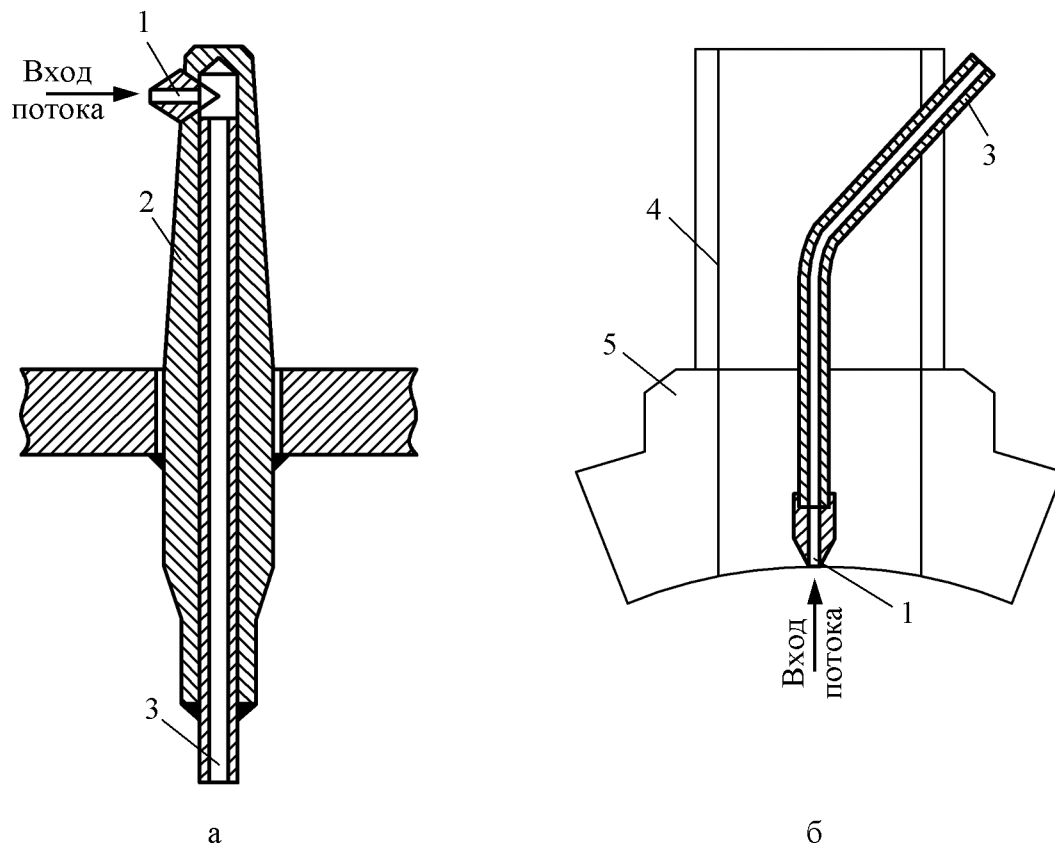


Рис. 6.1. Пробоотборные зонды для отбора воды (а) и насыщенного пара (б):
1 – устье зонда; 2 – приварной штуцер; 3 – трубка 10х2 мм из нержавеющей стали;
4 – трубопровод (паропровод); 5 – сепаратор или парогенератор

Для получения представительных проб насыщенного пара их отбирают на выходе из парогенератора пробоотборными трубами, установленными во входных сечениях обычно средней и крайних паропроводящих труб.

Отобранная проба воды и пара проходит через устройство подготовки пробы, состоящее в общем случае из холодильника и дросселя, предназначенных для снижения температуры до 35 ± 5 °С и давления до 0,12...0,14 МПа. При подаче пробы в приборы автоматического химического контроля в устройство подготовки пробы входит механический фильтр для удаления взвешенных примесей. Перед кондуктометром вода

дополнительно проходит Н-катионитовый фильтр для удаления ионов аммиака и гидразин-гидрата при аммиачно-гидразинном водном режиме.

Для охлаждения радиоактивных сред используется вода промежуточного контура технической воды во избежание выхода радионуклидов в окружающую среду при появлении течи в холодильнике. Для охлаждения неактивных сред может использоваться непосредственно техническая вода.

Для того, чтобы проба была представительной, она должна отбираться непрерывно. Сливается вода, как правило, в специальную канализацию. Для снижения пароводяных потерь на АЭС внедряется схема с непрерывным протоком отбираемой среды по закрытой трубной системе со сбросом воды в баки организованных протечек. При отборе проб открывается вентиль 7 и закрывается вентиль 6 (рис 6.2).

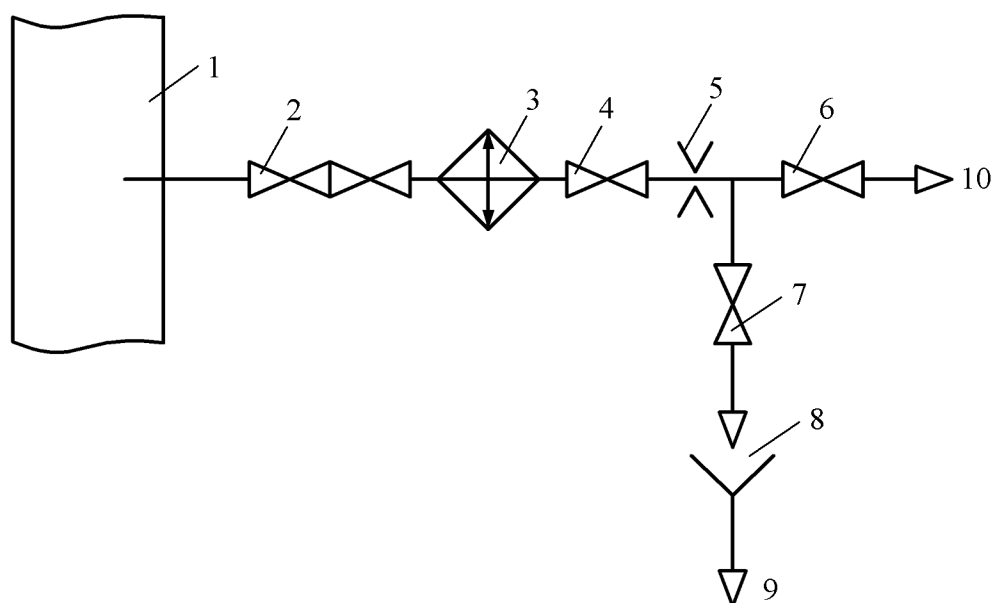


Рисунок 6.2. Принципиальная схема отбора проб:
1 – зонд пробоотборный; 2 – вентиль запорный; 3 – холодильник;
4, 6, 7 – вентили; 5 – дроссель; 8 – отбор пробы; 9 – слив
в спецканализацию; 10 – слив в бак организованных протечек

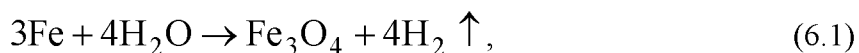
В целях исключения загрязнения пробы продуктами коррозии вся трубная разводка и холодильники выполняется из нержавеющей стали.

Пробы на ручней анализ отбираются, в основном, в полиэтиленовую, плотно закрывающуюся тару во избежание загрязнения пробы ионами натрия и кремниевой кислоты в результате выщелачивания их из стекла. При отборе проб на содержание продуктов коррозии и радионуклидов пробу подкисляют во избежание сорбции указанных компонентов стенками тары.

Как правило, линии отбора проб должны выводиться в специальное закрытое помещение, оборудованное вытяжной вентиляцией. Радиоактивные пробы выводятся в специальные защитные боксы, подсоединенные к вытяжной вентиляции. В тех случаях, когда вывести пробоотборные линии в специальное помещение не представляется возможным, защитные боксы устанавливают вблизи места отбора.

Источники загрязнения питательной воды выявляются, в основном, посредством измерения солесодержания (электропроводности) всех составляющих питательной воды. Определяются также значение рН, жесткость, содержание кремниевой кислоты, натрия, хлоридов. По этим же показателям контролируется работа установок переработки природной и радиоактивных вод. Контроль деаэрации осуществляется по содержанию кислорода в конденсате турбин и питательной воде до точки ввода гидразина (если проводится гидразинная обработка воды).

Процессы коррозии косвенно контролируются по содержанию в воде железа, меди, хрома, цинка и других элементов, а также водорода, образующегося по реакции



если нет других источников его образования, например радиолиза. Прямой метод измерения, скорости коррозии основан на периодическом определении убыли массы индикаторных пластинок, помещенных в теплоноситель в различных участках тепловой схемы.

Косвенный метод определения количества отложений на теплопередающей поверхности заключается в определении разности содержания накипеобразователей (продуктов коррозии, солей жесткости, кремниевой кислоты) в теплоносителе до и после определенного участка поверхности нагрева. Метод применим только для прямоточных ПГ. Прямой метод основан на снятии отложений с определенной поверхности механическим, химическим или каким-либо другим способом с последующим определением их количества и качественного состава, включая и радионуклиды, если определяется загрязнение оборудования радионуклидами.

Для контроля герметичности оболочек твэлов проба циркуляционной воды, выдержанная в течение двух часов для распада короткоживущих радионуклидов упаривается до сухого остатка. Измеряется общая активность сухого остатка и активность некоторых продуктов деления урана: стронция, цезия, бария и др. По значению активности можно судить о степени герметичности твэлов. Аналогично ведется контроль работы установок переработки радиоактивных вод, герметичности трубных пучков ПГ АЭС с реактором ВВЭР и уноса радионуклидов насыщенным паром.

6.1.2. Основы организации автоматического химического контроля

Для оперативного контроля водно-химического режима АЭС особенно целесообразно использовать автоматические приборы. При этом эффективным является применение не отдельных автоматических приборов, а системы химического контроля, предусматривающей автоматическое проведение всех операций контроля качества теплоносителя.

Подготовленная к анализу проба поступает в датчики автоматических приборов химического контроля. Получаемая с приборов информация, преобразованная в унифицированный сигнал 0,5 мА постоянного тока, подается на вторичные регистрирующие приборы. Сигналы о нарушениях водно-химического режима выводятся на щит химического контроля и блочный щит управления.

Оперативно с помощью автоматических приборов целесообразно контролировать только те показатели качества теплоносителя, нарушение которых может быть оперативно устранено. К таким нарушениям относятся присосы охлаждающей воды в конденсаторы турбин, поступление загрязняющих веществ с добавочной водой, истощение ионообменных фильтров установок обработки воды, появление кислорода в питательной воде, недостаток или избыток корректирующих добавок и т.п.

В тех случаях, когда нормируемые показатели качества теплоносителя выражают результаты сравнительно медленно текущих процессов, например, коррозии конструкционных материалов, контроль с помощью автоматических приборов нецелесообразен.

При автоматизации контроля водно-химического режима на АЭС с ВВЭР различают системы химического контроля для первого и второго контуров.

Принципиальная схема отбора проб теплоносителя первого контура АЭС с ВВЭР изображена на рис. 6.3. Автоматически определяются электропроводность, значение рН, содержание растворенного водорода, ионов калия и концентрация борной кислоты.

Принципиальная схема отбора проб рабочей среды второго контура АЭС с ВВЭР изображена на рис. 6.4. В основном, автоматический контроль ВХР второго контура ведется по таким показателям, как электропроводность, значение рН, содержание кислорода и натрия.

6.2. Основы организации химического контроля качества теплоносителя первого контура

Для контроля качества теплоносителя и технологических сред вспомогательных систем первого контура предусмотрены следующие точки отбора проб:

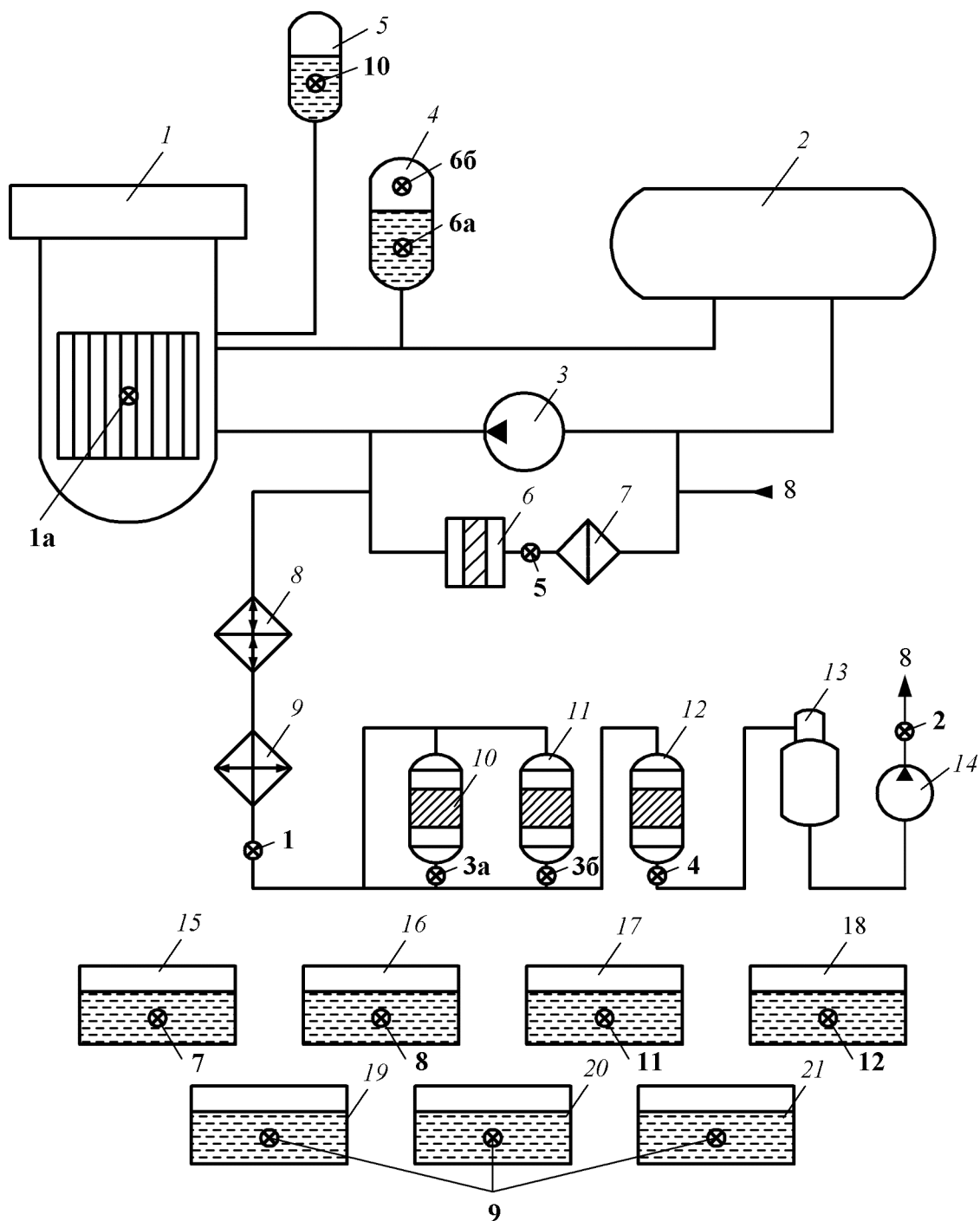


Рис. 6.3. Принципиальная схема отбора проб первого контура ЭБ с ВВЭР:

1 – ядерный реактор; 2 – парогенератор; 3 – ГЦН; 4 – компенсатор давления;
 5 – гидроаккумулирующая емкость; 6 – ВТФ; 7 – фильтр-ловушка; 8 – регенеративный теплообменник продувки; 9 – доохладитель продувки; 10 – КФ СВО-2 (в H^+ -форме);
 11 – КФ СВО-2 (в $\text{NH}_4^+ - \text{K}^+$ -форме); 12 – АФ СВО-2; 13 – деаэратор подпитки;
 14 – подпиточные агрегаты; 15 – баки «чистого» конденсата; 16 – бак аварийного запаса борной кислоты (ГА-201); 17 – баки щелочного раствора борной кислоты;
 18 – бассейны выдержки отработанного топлива; 19 – баки борного концентрата;
 20, 21 – баки аварийного запаса борного концентрата

точка 1 – после доохладителя продувки первого контура для контроля качества теплоносителя при работе реактора на энергетическом уровне мощности;

точка 1а – из активной зоны реактора для работы автоматического бо-ромера;

точка 2 – за подпиточными насосами для контроля качества подпиточной воды и воды, подаваемой для уплотнения вала главного циркуляционного насоса;

точки 3а и 3б – за катионитовыми фильтрами СВО-2 для контроля работоспособности этих фильтров;

точка – 4 за анионитовыми фильтрами СВО-2 для контроля работоспособности этих фильтров;

точка – 5 за высокотемпературными механическими фильтрами;

точки 6а и 6б – водная и паровая фаза компенсатора давления;

точка 7 – из баков «чистого» конденсата;

точка 8 – из бака аварийного запаса раствора борной кислоты;

точка 9 – из баков концентрированного раствора борной кислоты;

точка 10 – из гидроаккумулирующих емкостей;

точка 11 – из баков щелочного раствора борной кислоты;

точка 12 – из бассейнов выдержки топлива.

В объем контроля всегда включаются все нормируемые и диагностические показатели. Те показатели, которые не входят в нормы, но наблюдение за которыми может быть полезным с точки зрения расширения или уточнения представлений о характере протекания физико-химических процессов и влияния на эти процессы режимных условий, называются **контролируемыми**. К числу контролируемых относят также показатели, которые не вошли в перечень нормируемых и диагностических лишь потому, что для них не установлены количественные пределы из-за отсутствия методов воздействия на величину этих показателей.

Перечень нормируемых и диагностических показателей остается неизменным на протяжении всего периода действия норм водного режима и может быть изменен только при пересмотре этих норм.

Объем и периодичность химического контроля качества теплоносителя, подпиточной воды и других сред приведены в табл. 6.1...6.5.

Качество раствора в гидроемкостях системы аварийного охлаждения зоны, в баке аварийного запаса борной кислоты, концентрированного раствора борной кислоты и в баках щелочного раствора борной кислоты спринклерной установки на содержание борной кислоты должно контролироваться непрерывно автоматически и лабораторными методами один раз в неделю, по остальным показателям лабораторными методами – один раз в месяц.

Т а б л и ц а 6.1

**Минимально необходимые объем и периодичность химического контроля
качества теплоносителя первого контура при работе энергоблока на мощности**

Показатели качества	Периодичность	
	АХК	При неработающем АХК
Массовая концентрация борной кислоты	АХК	ЛХК один раз в сутки
Массовая концентрация растворенного водорода	АХК	ЛХК один раз в сутки
Водородный показатель рН	АХК	ЛХК один раз в сутки
Массовая концентрация растворенного кислорода	АХК	ЛХК три раза в неделю. При АХК водорода – ЛХК один раз в неделю. При концентрации водорода менее 2,2 мг/дм ³ – ЛХК один раз в смену
Массовая концентрация хлорид-ионов	ЛХК один раз в сутки	
Массовая концентрация фторид-ионов	ЛХК один раз в неделю	
Массовая концентрация сульфат-ионов	ЛХК один раз в неделю	
Молярная концентрация ионов калия	ЛХК один раз в сутки	
Молярная концентрация ионов лития	ЛХК один раз в сутки	
Молярная концентрация ионов натрия	ЛХК один раз в сутки	
Массовая концентрация аммиака	ЛХК один раз в смену	
Массовая концентрация нитрат-ионов	ЛХК один раз в смену в течение суток после включения в работу КФ после его регенерации	
Массовая концентрация железа	ЛХК один раз в неделю	
Массовая концентрация меди	ЛХК один раз в неделю	
Массовая концентрация общего органического углерода	ЛХК один раз в неделю	
Примечание. Концентрация фторид-ионов контролируется в течение 1000 часов после перегрузки топлива		

Т а б л и ц а 6.2

Минимально необходимые объем и периодичность химического контроля качества теплоносителя первого контура в состояниях РУ «Горячий останов», «Полугорячий останов», «МКУ»

Показатели качества	Периодичность	
	АХК	При неработающем АХК
Водородный показатель pH	АХК	ЛХК два раза в сутки
Массовая концентрация борной кислоты	АХК	ЛХК по требованию, но не реже одного раза в смену
Массовая концентрация растворенного кислорода	АХК	ЛХК один раз в сутки
Массовая концентрация хлорид-ионов	ЛХК один раз в сутки	
Массовая концентрация фторид-ионов	ЛХК один раз в сутки	
Массовая концентрация растворенного водорода	АХК	ЛХК один раз в сутки
Молярная концентрация ионов калия	ЛХК один раз в сутки	
Молярная концентрация ионов лития	ЛХК один раз в сутки	
Молярная концентрация ионов натрия	ЛХК один раз в сутки	
Массовая концентрация аммиака	ЛХК один раз в сутки	
Массовая концентрация сульфат-ионов	ЛХК один раз в неделю	
Массовая концентрация нитрат-ионов	ЛХК один раз в смену в течение суток после включения в работу КФ после	
Массовая концентрация железа ¹⁾	ЛХК один раз в неделю	
Массовая концентрация меди ¹⁾	ЛХК один раз в неделю	
Массовая концентрация органического углерода ¹⁾	ЛХК один раз в неделю	

¹⁾ При пуске энергоблока после проведении дезактиваций оборудования первого контура контроль концентрации продуктов коррозии и общего органического углерода выполняется не реже одного раза в смену.

Примечание 1. Массовая концентрация водорода определяется при переводе РУ из состояния «Работа на мощности» в состояние «Горячий останов».

Примечание 2. Концентрация фторид-ионов контролируется в течение 1000 часов после перегрузки топлива.

Т а б л и ц а 6.3

Минимально необходимые объем и периодичность химического контроля качества подпиточной воды первого контура и воды, подаваемой в систему уплотнения ГЦН

Показатели качества	Периодичность	
	АХК	При неработающем АХК
Водородный показатель pH	АХК	ЛХК один раз в смену
Массовая концентрация растворенного кислорода	АХК	ЛХК один раз в сутки
Массовая концентрация аммиака	ЛХК один раз в смену	
Массовая концентрация хлорид-ионов	ЛХК один раз в смену	
Массовая концентрация ионов натрия	ЛХК один раз в сутки	
Массовая концентрация кремниевой кислоты	ЛХК один раз в неделю	
Массовая концентрация сульфат-ионов	ЛХК один раз в неделю	
Массовая концентрация железа	ЛХК один раз в неделю	
Массовая концентрация общего органического углерода	ЛХК один раз в неделю	
Примечание. Контроль массовой концентрации кремниевой кислоты допускается проводить в баках «чистого» конденсата и в баках обессоленной воды с периодичностью один раз в неделю.		

В периоды отклонения одного или нескольких нормируемых показателей качества теплоносителя от диапазона допустимых значений в пределах первого или второго уровней минимальная периодичность контроля для нормируемых показателей составляет не менее одного раза в смену.

При отклонениях диагностических показателей качества теплоносителя от контрольных уровней минимальная периодичность контроля для диагностических показателей составляет не менее одного раза в сутки.

Объем и периодичность химического контроля за работой ионообменных фильтров установки очистки теплоносителя первого контура устанавливается АЭС, исходя из требований по обеспечению качества теплоносителя и подпиточной воды.

Для проведения химического контроля должны применяться аттестованные методы и средства контроля.

Т а б л и ц а 6.4

**Минимально необходимые объем и периодичность хим. контроля
теплоносителя в «холодном» состоянии РУ, состоянии
«Останов для ремонта», воды бассейна перегрузки при перегрузке топлива
и воды бассейна выдержки топлива при всех состояниях РУ**

Показатели качества	Периодичность			
	При перегрузке топлива		Без перегрузки топлива	
	АХК	При неработающем АХК	АХК	При неработающем АХК
Водородный показатель pH	ЛХК один раз в сутки	—	ЛХК один раз в неделю	—
Массовая концентрация борной кислоты	АХК	ЛХК один раз в смену	АХК	ЛХК один раз в смену
Массовая концентрация хлоридов	ЛХК один раз в сутки	—	ЛХК один раз в сутки	—
Массовая концентрация фторидов	ЛХК один раз в сутки	—	—	—
Массовая концентрация сульфат-ионов	ЛХК два раза в неделю	—	ЛХК два раза в неделю	—
Массовая концентрация железа	ЛХК два раза в неделю	—	ЛХК два раза в неделю	—
Массовая концентрация общего орг. углерода	ЛХК два раза в неделю	—	ЛХК два раза в неделю	—
Прозрачность	ЛХК один раз в сутки	—	—	—

Т а б л и ц а 6.5

Мин. необходимые объем и периодичность химконтроля качества сред КД

Показатели качества	Периодичность	
	Водная фаза из нижней части	Паровая фаза из верхней части
Массовая концентрация водорода	—	1)
Массовая концентрация кислорода	—	2)
Массовая концентрация борной кислоты	3)	—
¹⁾ Контроль осуществляется при превышении верхнего значения концентрации водорода в теплоносителе, установленного для первого уровня действия. ²⁾ Контроль осуществляется при превышении верхнего нормируемого значения концентрации кислорода в теплоносителе первого контура, установленного для второго уровня действия. ³⁾ Контроль осуществляется при проведении водообмена первого контура с изменением концентрации борной кислоты более, чем на 1 г/дм ³ .		

6.3. Основы организации химического контроля качества рабочей среды второго контура

Совокупность данных систем АХК, ЛХК и технических параметров средств обеспечения водно-химического режима представляет собой информационную модель ВХР второго контура. Сбор, обработка и архивация данных системы химического контроля проводится с использованием современных средств вычислительной техники, устройств связи с объектом контроля, программного обеспечения интерфейса пользователя для работы с базами данных. При этом данные системы автоматизированного контроля обрабатываются автоматически с установленной частотой опроса средств измерения, а данные системы лабораторного химического контроля периодически вносятся в базу данных ВХР.

Регистрацию и представление информации по ведению водно-химического режима энергоблоков, а также управление ВХР осуществляется при помощи средств вычислительной техники, не исключая при этом возможности использования информации со щитов АХК. Информация по водно-химическому режиму должна предоставляться оперативному персоналу блочного щита управления, а также административно-техническому персоналу химического цеха и водно-химической лаборатории.

Нормируемые показатели ВХР должны измеряться аттестованными методиками выполнения измерений и с использованием средств измерительной техники, внесенными в Государственный реестр средств измерений или прошедших государственную метрологическую аттестацию. Для измерений диагностических показателей допускается использование измерительных средств, подлежащих метрологической аттестации. Все средства измерительной техники должны проходить поверку (калибровку) в установленном порядке.

Для контроля качества рабочей среды и технологических сред вспомогательных систем второго контура нормативным документом предусмотрены минимально необходимый и рекомендуемый объем АХК ВХР второго контура, а также минимально-необходимый объем и периодичность ЛХК ВХР второго контура.

Для контроля качества рабочей среды второго контура предусмотрены следующие точки отбора проб:

- точка 1 – всасывающий коллектор конденсатных насосов первой ступени;
- точка 2 – главный конденсатор;
- точка 3 – напорный коллектор конденсатных насосов первой ступени;
- точка 4 – после ЭМФ блочной обессоливающей установки для контроля его работоспособности;



12 – ЭМФ; 13 – ФСД; 14 – КЭН-2; 15 – ПНД; 16 – ТПН; 17 – ПВД; 18 – конденсатор ТПН

- точка 5 – после ФСД блочной обессоливающей установки для контроля их работоспособности;
- точка 6 – напорный коллектор конденсатных насосов второй ступени;
- точка 7 – после подогревателей низкого давления;
- точка 8 – после деаэратора;
- точка 9 – после подогревателей высокого давления;
- точка 10 – свежий пар после парогенераторов;
- точка 11 – дренажные баки машзала;
- точка 12 – баки запаса конденсата;
- точка 13 – баки аварийного запаса химически обессоленной воды системы аварийной питательной воды парогенераторов;
- точка 14 – коллектор продувки парогенераторов
- точка 15 – после фильтров системы очистки продувочной воды парогенераторов (СВО-5) для контроля их работоспособности;
- точка 16 – сепарат после СПП;
- точка 17 – конденсат подогревателей сетевой воды системы теплофикации;
- точка 18 – конденсат из конденсаторов турбопитательных насосов.

Т а б л и ц а 6.6

Обязательный объем АХК ВХР второго контура

Место отбора пробы	Наименование показателя, единица измерения ¹⁾
Конденсат турбин	X_n , мкСм/см [Na ⁺], мкг/дм ³
Конденсат за КЭН-I	X_n , мкСм/см [O ₂], мкг/дм ³ [Na ⁺], мкг/дм ³
Конденсат за КЭН-II ²⁾	X_n , мкСм/см [Na ⁺], мкг/дм ³
Питательная вода за деаэратором	[O ₂], мкг/дм ³
Питательная вода за группой ПВД	X_n , мкСм/см рН, ед.рН
Насыщенный пар на выходе из ПГ	X_n , мкСм/см
Продувочная вода ПГ	X_n , мкСм/см рН, ед. рН [Na ⁺], мкг/дм ³
Вода на выходе СВО-5	X ³⁾ , мкСм/см X_n ⁴⁾ , мкСм/см [Na ⁺] ⁴⁾ , мкг/дм ³

Окончание табл. 6.6

Конденсат после ФСД БОУ	$X^{3)}$, мкСм/см $X_n^{4)}$, мкСм/см $[Na^+]^{4)}$, мкг/дм ³
Добавочная вода после ФСД	X , мкСм/см
¹⁾ В случае отказа или отсутствия автоматических средств измерения, выполняется лабораторный контроль с частотой один раз в смену. ²⁾ Для блоков, не имеющих конденсатных насосов второй ступени (КН-II), измерения производить за установкой очистки турбинного конденсата. ³⁾ При ведении гидразинно-аммиачного ВХР. ⁴⁾ При ведении этаноламинового и морфолинового ВХР.	

Т а б л и ц а 6.7

Рекомендуемый объем АХК ВХР второго контура

Место отбора пробы	Наименование показателя, единица измерения
Вода дренажных баков	X_n , мкСм/см
Конденсат пара ТПН	X_n , мкСм/см или Na , мкг/дм ³
КГП бойлеров теплосети	X_n , мкСм/см или Na , мкг/дм ³
КГП подогревателей сырой воды	X_n , мкСм/см или Na , мкг/дм ³
КГП СВО-3	X_n , мкСм/см

Т а б л и ц а 6.8

Рекомендуемый объем и периодичность ЛХК ВХР второго контура

Место отбора	Наименование показателей	Периодичность
Питательная вода за ПВД	$Fe^{1)}$	1 раз в неделю
	$Cu^{1)}$	1 раз в неделю
	N_2H_4	1 раз в смену
	$NH_3^{2,3,4)}$	1 раз в сутки
	Этаноламин ³⁾	1 раз в смену
	Морфолин ⁴⁾	1 раз в смену
	Нефтепродукты	1 раз в сутки

Продувочная вода из «солевых» отсеков ПГ	Cl ⁻ SO ₄ ²⁻ 5) Li ⁺ Этаноламин ³⁾ Морфолин ⁴⁾ Fe Cu	1 раз в смену 5 раз в неделю 1 раз в смену 1 раз в сутки — — —
Продувочная вода ПГ из «карманов» коллекторов	Na	1 раз в неделю
Вода на выходе СВО-5	pH Этаноламин ³⁾ Ацетат-ион ³⁾	1 раз в смену 2 раза в неделю 1 раз в неделю
Вода в баках аварийного запаса обессоленной воды	X	1 раз в неделю
Вода в баках запаса обессоленной воды	X	Один раз в сутки и перед заполнением ПГ и оборудования второго контура
	pH Cl ⁻ SiO ₂	Перед заполнением ПГ и оборудования второго контура
¹⁾ Анализы выполняются на атомно-эмиссионном спектрометре. ²⁾ При ведении гидразинно-аммиачного ВХР. ³⁾ При ведении этаноламинового ВХР. ⁴⁾ При ведении морфолинового ВХР. ⁵⁾ Анализы выполняются на ионном хроматографе.		

6.4. Основные методы контроля показателей качества рабочих сред, используемые на АЭС

В соответствии с требованиями отраслевых нормативных документов для проведения химического контроля должны применяться метрологически аттестованные методы и средства контроля.

Каждый метод как ручного, так и автоматического контроля имеет следующие характеристики:

- минимально определяемое количество контролируемого вещества;
- время, необходимое для проведения одного определения;
- погрешность определения и т.п.

В зависимости от конкретных задач, возможностей и требований ВХР следует, прежде всего, выбрать метод контроля, а также установить способ его реализации: автоматический или ручной. При контроле показателей, имеющих оперативное значение, следует использовать по возможности автоматический контроль.

Получение неточной информации, то есть по существу дезинформации, может повести к неправильным действиям персонала и вызвать нарушения в работе оборудования.

В связи с этим нельзя не отметить еще один важный фактор, оказывающий огромное влияние на правильность получения информации. Это рациональная загрузка персонала, ведущего химический эксплуатационный контроль.

Излишнее, не оправдываемое актуальными задачами эксплуатации количество аналитических определений, загружая дежурных аналитиков, будет снижать достоверность выдаваемой ими информации.

Методы химического анализа, применяемые для контроля качества теплоносителя первого контура, в основном унифицированы. Это экспресс-методы, которые позволяют при минимальных затратах времени на проведение анализа получить максимально достоверный результат. Единообразие методов обеспечивает получение более надежной и сопоставимой информации, которая помогает обобщать опыт ведения ВХР на разных установках. Рекомендуемые методы анализа подробно описаны в пособиях по аналитической химии для лаборантов водно-химических лабораторий.

Среди основных методов количественного анализа применяемых при химическом как ручном, так и приборном контроле на АЭС, можно выделить следующие:

1. *Метод титрования (нейтрализации)*, при котором измеряется объем раствора реагента известной концентрации, реагирующий с определяемым компонентом примесью.

2. *Гравиметрический метод*, при котором измеряется масса трудно-растворимого соединения, либо присутствующего в растворе в виде примеси, либо появляющегося при взаимодействии определяемого компонента с добавляемым реагентом.

3. *Оптические (фотометрические и спектральные) методы*, когда содержание определяемого компонента устанавливается по результатам взаимодействия лучистой энергии с анализируемым веществом;

4. *Электрохимические и некоторые другие физико-химические методы:*
- *потенциометрические* – с помощью ионоселективных методов измеряют активные концентрации отдельных ионов, окислительно-восстановительный потенциал и т.п.;

- *кондуктометрические* – концентрацию одного или нескольких ионов определяют по удельной электрической проводимости раствора;

5. *Различные физические методы:*

- *методы структурного анализа* (рентгенографический, кристалло-оптический и др.);

- *радиометрический метод* – концентрацию радиоактивного нуклида, входящего в состав определяемого компонента, устанавливают

измерением интенсивности излучения, сопровождающего самопроизвольный радиоактивный распад ядер атомов;

- *метод активационного анализа* – элементарный состав исследуемого вещества определяют с помощью искусственной радиоактивности, появляющейся вследствие облучения исследуемого образца потоком заряженных частиц вещества или потоком нейтронов;

- массоспектрометрический метод – идентифицируют стабильные и радиоактивные изотопы элементов в соответствии с различием в их массе.

6. Различные спектральные методы.

Основным средством реализации системы оперативного химического контроля водного режима любой современной АЭС являются автоматические приборы.

Ручные лабораторные методы и приборы используются для исследовательского контроля, для контроля показателей качества среды, не имеющих непосредственного оперативного значения, а также для периодической проверки правильности действия автоматических анализаторов.

Кратко рассмотрим сущность основных методов количественного анализа применяемых при химическом как ручном, так и приборном контроле на АЭС.

Метод нейтрализации (титрования) применяют для определения концентрации растворов кислот и оснований, солей, подвергающихся гидролизу, и технологических показателей, таких, как кислотность и щелочность воды. При использовании методов нейтрализации конец титрования определяют по изменению концентрации ионов водорода. Точка эквивалентности характеризуется некоторым определенным значением рН, которое зависит от характера образующихся в точке эквивалентности продуктов и их концентрации.

Точки эквивалентности фиксируют с помощью индикаторов, изменяющих свою окраску в зависимости от значений рН. Обычно окраска индикатора изменяется в интервале примерно двух единиц рН, причем весьма неравномерно. Существует некоторое значение рН в пределах этого интервала, вблизи которого окраска изменяется наиболее резко. Это значение рН называется показателем индикатора. Последний должен совпадать со значением рН, наблюдаемым в точке эквивалентности, что наблюдается не всегда и может вызвать так называемую индикаторную погрешность, значение которой колеблется в весьма широких пределах. Поэтому при использовании методов нейтрализации весьма существенен правильный подбор индикатора, применение которого обеспечивает сведение к минимуму индикаторной погрешности.

Для правильного выбора того или иного индикатора служат так называемые кривые нейтрализации, показывающие изменение концентрации ионов при титровании по методу нейтрализации.

Физико-химические методы анализа основаны на функциональной связи между составом анализируемой среды и ее физическими и физико-химическими свойствами. В соответствии с используемыми для проведения анализа свойствами среды физико-химические методы анализа, применяемые для определения состава водных растворов на АЭС, подразделяют, в основном, на оптические, электрохимические и хроматографические.

В оптических методах используется связь между оптическими свойствами анализируемой среды (светопоглощением, светорассеиванием, преломлением света) и ее составом. К этим методам относятся фотоколориметрический, нефелометрический и турбидиметрический.

Электрохимические методы основаны на исследовании электрохимических свойств анализируемых сред при измерении удельной электрической проводимости растворов и равновесных электродных потенциалов, наблюдении за процессом поляризации микроэлектрода, количественном электрохимическом превращении вещества. К этим методам соответственно относятся кондуктометрический, полярографический, электровесовой и кулонометрический.

Хроматографический метод анализа основан на различии распределения веществ между двумя фазами. Особое значение хроматография имеет как универсальный метод разделения веществ и их концентрирования, что позволяет проводить определение микроколичеств вещества.

Существуют и другие классификации физико-химических методов анализа. Основная особенность, отличающая физико-химические методы анализа от химических и сближающая их скорее с физическими методами заключается в том, что в этих методах анализа используется не просто взаимодействие контролируемого вещества с тем или иным реактивом, а взаимодействие этого вещества с электрическим током или различного вида полями и излучениями.

Физические методы анализа – это такие методы, при которых определение элемента основывается на свойствах его атомов и ядер атомов.

К физическим методам относятся эмиссионный спектральный анализ, использующий однозначную зависимость между строением атома данного элемента и волновым составом светового излучения возбужденных атомов – спектром элемента, радиометрические методы анализа, основанные на измерении интенсивности радиоактивности анализируемой пробы, являющейся следствием самопроизвольного распада или спонтанного деления ядер атомов некоторых элементов.

В случае применения активационного радиометрического анализа, связанного с возникновением искусственной радиоактивности при облучении анализируемого образца потоком заряженных частиц или нейтронов,

можно определять концентрации короткоживущих радиоактивных нуклидов порядка $10^{-12} \dots 10^{-14}$ мкг вещества.

Действие потенциометрических приборов основано на измерении электродвижущей силы гальванического элемента, составленного из измерительного (индикаторного) электрода, селективного по отношению к контролируемому иону, и электрода сравнения, потенциал которого известен и стабилен. В качестве измерительных в настоящее время используют преимущественно ионоселективные электроды.

В настоящее время разработаны ионоселективные электроды, а на их базе лабораторные и автоматические приборы, позволяющие определять значительную часть ионов, содержащихся в водах электростанции.

Боромеры. До настоящего времени задача определения концентрации борной кислоты окончательно не решена. Предложены различные варианты определения количества борной кислоты в анализируемом водном растворе. Практически получили распространение методы определения концентрации либо титрованием, либо по плотности раствора, либо измерением нейтронного потока.

Основные методы определения растворенных в воде газов.

При анализе водного теплоносителя АЭС возникает задача определения содержания в нем растворенного водорода, кислорода, угольной кислоты в довольно широком диапазоне изменения их концентраций. В настоящее время существует ряд приборов, лабораторных и автоматических, пригодных для выполнения этих анализов.

Характерной особенностью приборов для контроля за газовыми примесями является наличие двух основных операций: выделение из анализируемой жидкости контролируемой газовой примеси и определение концентрации газовой примеси в анализируемой жидкости. Газовую примесь из анализируемой пробы выделяют обычно десорбцией каким-либо другим газом, не вступающим в реакцию с контролируемым газом.

В последнее время получили распространение анализаторы с полупроницаемой мембраной, через которую растворенный газ из анализируемой воды проникает к чувствительному элементу. Для измерения концентрации газовой примеси используют методы физико-химического и физического анализа.

Водородомеры. Для определения концентрации растворенного в воде водорода на электростанциях используют как лабораторные, так и автоматические приборы. При непрерывном производственном контроле применяют автоматические термокондуктометрические приборы, при периодическом лабораторном контроле – серийные газовые хроматографы.

Кислородомеры. В настоящее время приборостроительная промышленность освоила производство автоматических кислородомеров, дей-

ствующих на основе электрохимического, кондуктометрического, фотоэлектрического и термокондуктометрического методов.

7. СИСТЕМЫ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ВОД

При эксплуатации ЭБ АЭС накапливается большое количество жидких радиоактивных отходов. Так, только при снижении концентрации борной кислоты в теплоносителе при пуске ЭБ и в течение кампании за счет водообмена получают несколько тысяч кубических метров раствора борной кислоты с низкой концентрацией бора и загрязненной радиоактивными веществами. Поэтому возникает необходимость переработки этого раствора.

Также большое количество ЖРО появляются при проведении различных технологических операций (регенерация СВО-2, дезактивация оборудования и помещений, опорожнение различных систем и механизмов и т.д.). Эти отходы нужно перерабатывать и утилизировать. С этой целью на АЭС используют установки СВО-3, СВО-6, СВО-7.

7.1. Назначение, состав и принцип действия системы СВО-3

Система очистки трапных вод (OTR) предназначена для сбора трапных вод, их предварительной очистки от радиоактивных загрязнений, механических и химических примесей, переработке на выпарной установке (с целью концентрирования объема радиоактивных вод) и получения кубового остатка с захоронением в емкостях ХЖО.

Следует помнить, что трапные воды включают в себя:

- неорганизованные протечки первого контура и спецкорпуса;
- воды дезактивации оборудования и помещений контролируемой зоны;
- воды дренирования оборудования во время вывода в ремонт;
- воды после взрыхления, отмывок и регенерации СВО-2;
- сбросы химических лабораторий;
- некондиционный дистиллят из контрольных баков СВО-3,6,7;
- декантат из промежуточного узла хранения ЖРО.

Трапные воды характеризуются сложным химическим составом, высокой засоленностью (до 10 г/дм^3 , в среднем 3 г/дм^3) и содержат органические вещества, коллоидные примеси, а также борную кислоту. Удельная активность трапных вод изменяется в пределах $10^{-8} \dots 10^{-5}$ Ки/л. Активность вод значительно увеличивается во время ремонтов и достигает значений 10^{-4} Ки/л и более.

Очистка трапных вод на установке СВО-3 ведется в три этапа:

1. Механическая очистка.

2. Дистилляция, дегазация и конденсирование.

3. Ионнообменная очистка дистилляционных вод.

Функциональная схема системы СВО-3 представлена на рис. 7.1.

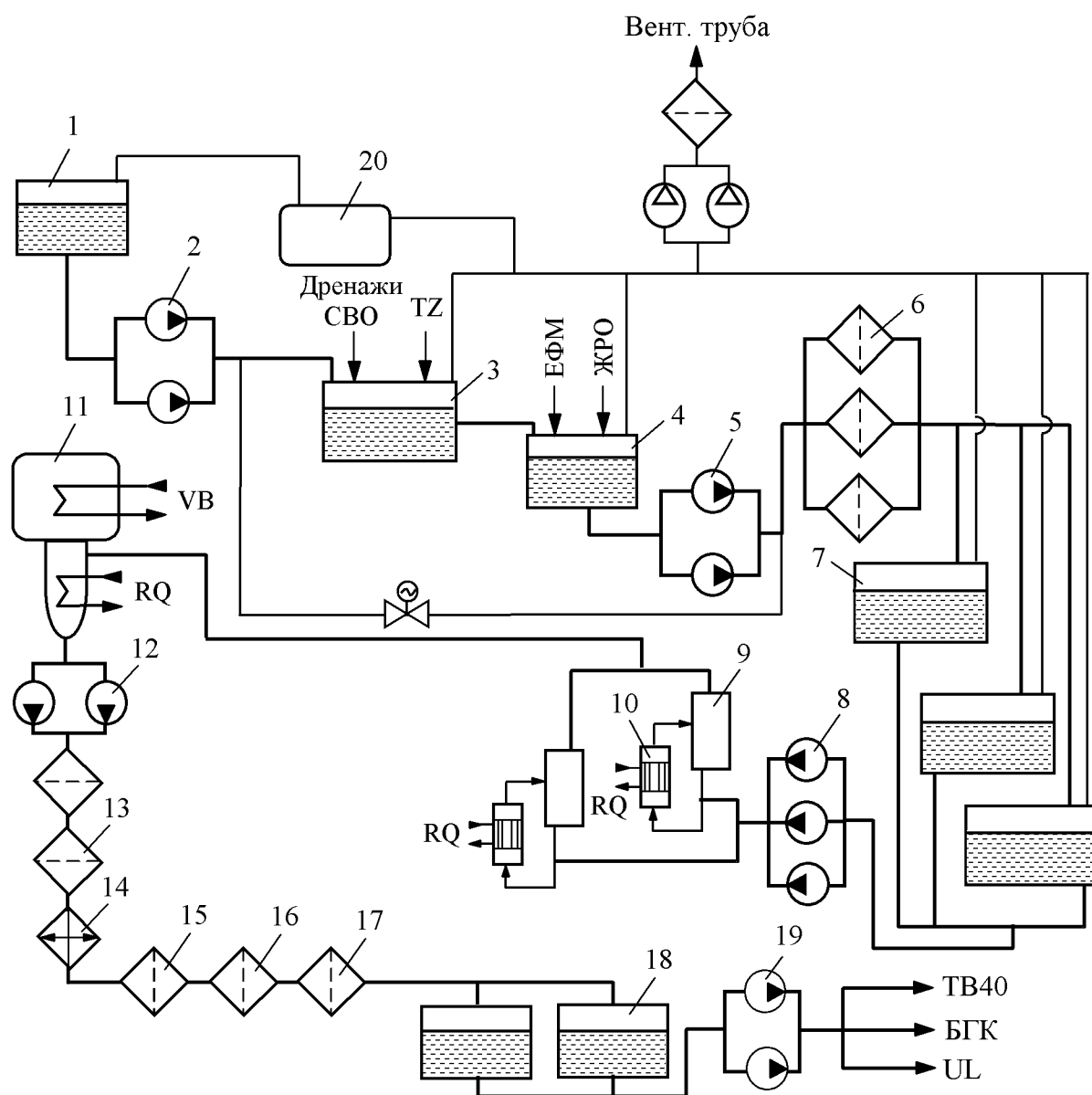


Рис. 7.1. Функциональная схема системы СВО-3:

- 1 – бак-приямок; 2 – насосы бака-приямка; 3 – бак-отстойник; 4 – бак декантата;
- 5 – насосы декантата; 6 – механические фильтры предочистки; 7 – баки трапных вод;
- 8 – насосы трапных вод; 9 – выпарной аппарат; 10 – доупариватель;
- 11 – конденсатор-дегазатор; 12 – насосы дегазированной воды; 13 – механические обезмасливающие фильтры; 14 – охладитель дистиллята; 15 – КФ в H^+ -форме;
- 16 – АФ в OH^- -форме; 17 – фильтр-ловушка; 18 – контрольные баки;
- 19 – насосы очищенной воды; 20 – монжюс

Трапные воды по системе спецканализации поступают в «приемный» отсек бака-приямка трапных вод, где происходит первичный отстой механических примесей. Далее эти воды переливаются через перегородку в «чистый» отсек. В нижней части каждого отсека имеется дырчатый коллектор для взрыхления скапливающегося на дне шлама сжатым воздухом. Из каждого отсека предусмотрен отсос шлама монжюсом. Насосами бака-приямка трапные воды откачиваются в бак-отстойник, куда поступают также трапные воды РО и дренажи установок СВО-4,5,6,7. В случае ремонта этого бака предусмотрена подача трапных вод непосредственно на фильтры предочистки, минуя бак-отстойник. Бак-отстойник имеет коническое днище для улучшения условий откачки шлама и снабжен для этого трубопроводом к монжюсу.

Отстоявшаяся вода (декантат) по переливной трубе поступает в бак декантата, служащий буферной емкостью для обеспечения нормальной работы насосов декантата. В этот бак также поступает декантат из емкостей фильтрующих материалов и резервной емкости жидких радиоактивных отходов, а также вода из блока мастерских. Далее декантат перекачивается насосами декантата через механические фильтры предочистки в баки трапных вод (три бака по 200 м³). Механические фильтры предочистки служат для очистки трапных вод от мелкодисперстных примесей и частично коллоидных частиц на керамических шариках.

Очищенная на механических фильтрах трапная вода накапливается в одном из баков трапных вод до уровня 6 м, после чего переводится на другой бак. В заполненном баке трапных вод определяется рН и при необходимости корректируется подачей NaOH до величины 10,5...10,8. Это вызвано тем, что при значениях рН менее 10,0 наблюдается отложение осадков на внутренних поверхностях труб греющей камеры выпарного аппарата и унос с парогазовой фазой окислов азота, соединений йода, а при рН более 10,8 уносится рутений. Верхний предел величины рН ограничивается в основном пенообразованием в выпарном аппарате.

Трапная вода из баков трапных вод насосами подается в выпарной аппарат. Исходная вода подается в нижнюю часть трубного пространства греющей камеры, поднимается по трубам, нагревается до насыщения и частично испаряется. Парогазоводяная смесь через верхнюю перепускную трубу попадает в сепаратор, в котором в результате резкого снижения скорости движения происходит сепарация основной массы капель воды. В результате их укрупнения и слияния вода стекает в нижнюю часть сепаратора и по нижней перепускной трубе возвращается в греющую камеру. Вторичный пар поднимается вверх и проходит через жалюзийный отбойник, на котором из-за многократного изменения направления потока пара происходит дальнейшее отделение капель влаги из пара. Затем пар промывается на барботажной тарелке и на насадке из колец Рашига.

Глубокое концентрирование упариваемого раствора производится в отдельном выпарном аппарате (доупаривателе). При этом часть раствора из выпарного аппарата постоянно перетекает в доупариватель за счет более низкого расположения доупаривателя. Особенностью работы доупаривателя является то, что в результате давления столба жидкости, перетекающей из выпарного аппарата, зона кипения выпариваемого раствора выносится за пределы греющей камеры. Это уменьшает возможность образования отложений на греющей поверхности. Генерируемый пар проходит очистку на беспровальной тарелке и жалюзийном сепараторе и направляется под барботажную тарелку выпарного аппарата. Подача осуществляется путем поддержания в доупаривателе более высокого давления, чем в выпарном аппарате.

Концентрируемый раствор при достижении 200 г/дм^3 периодически сливается самотеком в монжюс, откуда сжатым воздухом вытесняется в емкость кубового остатка узла промежуточного хранения жидких радиоактивных отходов. Достижение искомой концентрации солей определяется по так называемой температурной депрессии, т.е. увеличению температуры кипения концентрата более температуры насыщения воды при рабочем давлении.

Из выпарного аппарата вторичный пар поступает в конденсатор-дегазатор, где осуществляется конденсация пара и дегазация вторичного конденсата. Конденсатор-дегазатор состоит из трех частей: конденсатора, дегазационной колонки и испарителя-конденсатоотводника.

Выделившиеся газы из конденсатора-дегазатора поднимаются через центральный патрубок в линию сдувки из пространства конденсатора на дефлегматор сдувок, в котором происходит конденсация влаги из сдувок, прежде чем подать сдувку в систему спецвентиляции.

После конденсации и дегазации дистиллят вторичного пара с температурой около 104°C насосами дегазированной воды подается на механические обермасливающие фильтры, загруженные активированным углем, охлаждается в охладителе дистиллята до 50°C и направляется далее для очистки на ионообменные фильтры. Очистку дистиллята на ионообменных фильтрах ведут до проскока ионов натрия и калия после КФ и хлоридов после АФ.

После очистки на ионнообменных фильтрах дистиллят подается в контрольные баки, откуда после проведения химического и радиохимического анализа и получения положительных результатов подается в баки системы чистого конденсата или сбрасывается в баки собственных нужд блока СВО, а также в бак грязного конденсата турбинного цеха или в промышленно-ливневую канализацию.

В случае неудовлетворительного результата радиохимического анализа дистиллят проходит повторную очистку воды на ионнообменной цепоч-

ке или сбрасывается в бак-приямok трапных вод для повторной переработки. Ионнообменные фильтры загружены ионнообменными смолами КУ-2-8 и АВ-17-8 на высоту 1500 ± 100 мм, диаметр фильтров 1000 мм.

7.2. Назначение, состав и принцип действия системы СВО-6

Система регенерации борной кислоты (TD) предназначена для переработки борсодержащей воды баков реакторного отделения в целях получения дистиллята и очищенного борного концентрата, возвращаемых в технологический цикл.

Система СВО-6 состоит из двух основных и одной резервной ниток. В состав СВО-6 входят:

- выпарная установка;
- блок фильтров очистки дегазированной воды;
- блок фильтров очистки «грязного» борного концентрата.

Выпарная установка включает в себя следующие компоненты:

- выпарной аппарат;
- конденсатор-дегазатор;
- дефлегматор сдувок;
- насосы дегазированной воды и «грязного» борного концентрата;
- систему обвязки и КИП.

Кроме основных компонентов, входящих в состав СВО-6, работу установки обеспечивают ряд вспомогательных систем и узлов:

- система греющего пара предназначена для подачи греющего пара на выпарной аппарат в целях образования вторичного пара и на конденсатор-дегазатор для обеспечения дегазации;
- система конденсата греющего пара служит для отвода конденсата греющего пара после выпарного аппарата и конденсатора-дегазатора;
- система технической воды предназначена для подачи воды на конденсатор-дегазатор и дефлегматор сдувок для охлаждения вторичного пара, а также для охлаждения подшипников дегазированной воды;
- система реагентов предназначена для подачи растворов NaOH и HNO_3 в выпарной аппарат, а также подачи HNO_3 в конденсатор-дегазатор в целях проведения химических промывок;
- система промывочной воды предназначена для промывки и заполнения чистым дистиллятом выпарного аппарата;
- система газовых сдувок служит для удаления из оборудования газов и их очистки.

Функциональная схема системы СВО-6 представлена на рис. 7.2.

Борсодержащая вода баков реакторного отделения насосами подается на выпарной аппарат СВО-6. Благодаря образованию вторичного пара и отводу его на конденсатор-дегазатор в выпарном аппарате происходит

концентрирование раствора борной кислоты. Вторичный пар поступает в конденсатор-дегазатор. В конденсаторе-дегазаторе происходит освобождение пара от растворимых газов. Затем пар проходит через конденсатор, где охлаждается и направляется на узел очистки, состоящий из ионообменных фильтров (катионитового и анионитового). После очистки дистиллят подается в один из баков дистиллята реакторного отделения. При неудовлетворительных анализах дистиллята предусматривается его повторная очистка на ионообменных фильтрах.

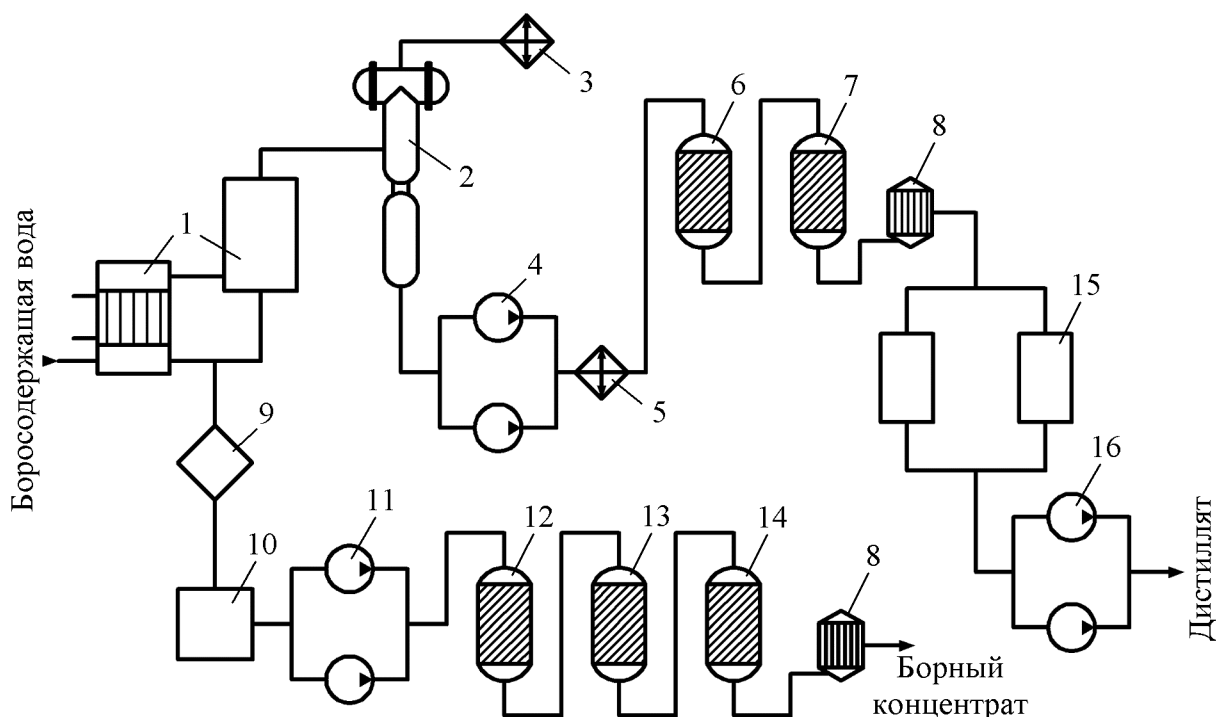


Рис. 7.2. Функциональная схема системы СВО-6:

- 1 – выпарной аппарат; 2 – конденсатор-дегазатор; 3 – дефлегматор сдувок;
 4 – насосы дегазированной воды; 5 – теплообменник охлаждения дистиллята;
 6, 13 – катионитовый фильтр; 7, 14 – анионитовый фильтр; 8 – ЛЗМ; 9 – теплообменник;
 10 – бак насоса «грязного» борного концентрата; 11 – насосы «грязного» борного концентрата; 12 – механический фильтр; 15 – контрольные баки дистиллята;
 16 – насосы контрольных баков дистиллята

При достижении концентрации борной кислоты в выпарном аппарате 40 г/дм^3 производится слив концентрата через теплообменник в бак, после чего данный «грязный» борный концентрат проходит очистку на механическом, катионитовом и анионитовом фильтрах.

Очищенный раствор подается в баки реакторных отделений, а при отсутствии необходимости пополнения этих баков, а также при неудовлетворительных анализах после фильтров концентрат подается в баки слива вод бассейнов перегрузки и выдержки СВО-4.

7.3. Назначение, состав и принцип действия системы СВО-7

Система очистки вод спецпрачечной (OUG) предназначена для очистки воды, принятой из спецпрачечной, а также вод душевых в случаях неудовлетворительных показателей анализов проб при радиационном контроле в целях повторного использования очищенной воды в технологическом цикле спецпрачечной.

Система СВО-7 состоит из двух ниток: рабочей и резервной.

Функциональная схема системы СВО-6 представлена на рис. 7.3.

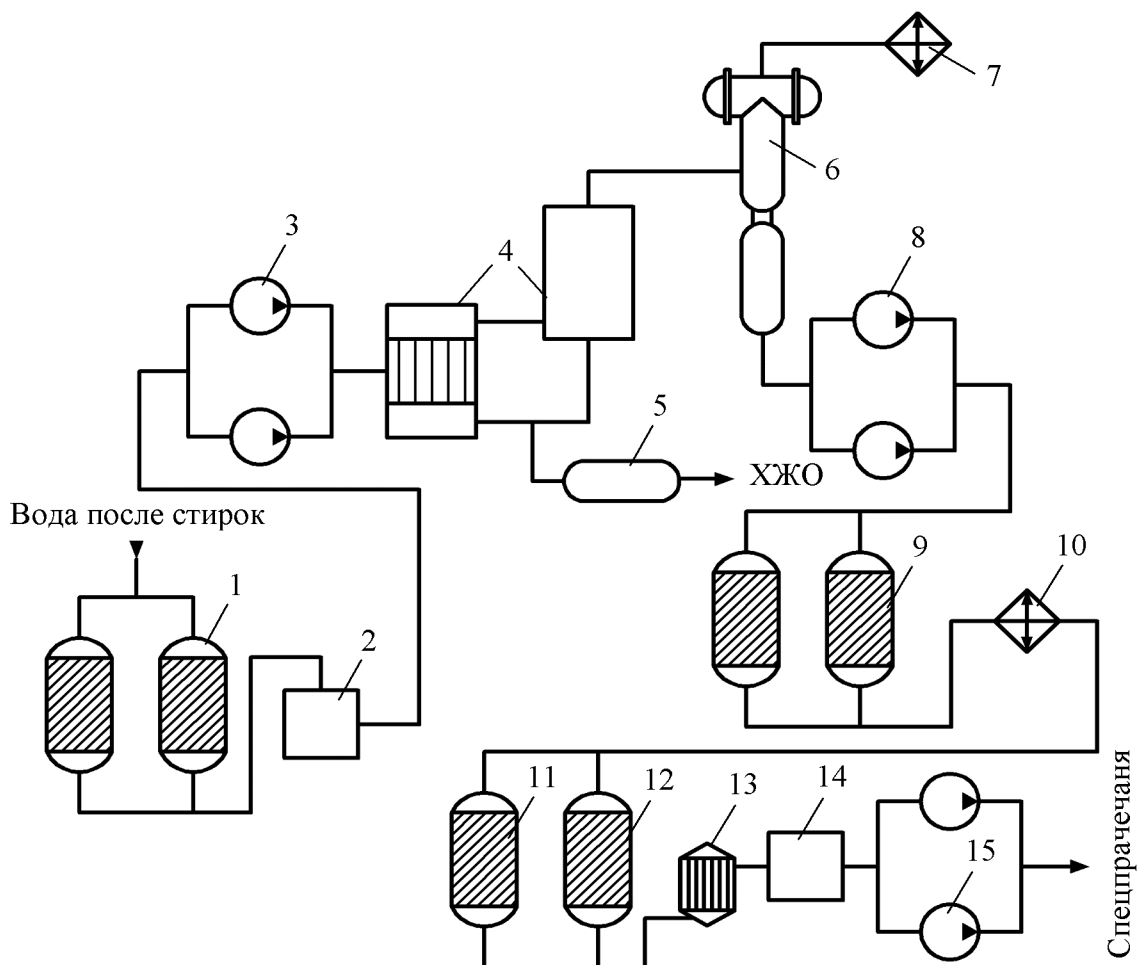


Рис. 7.3. Функциональная схема системы СВО-7:

- 1 – фильтр предочистки; 2 – приемный бак; 3 – насос приемного бака;
- 4 – выпарной аппарат; 5 – монжюс; 6 – конденсатор-дегазатор;
- 7 – дефлегматор сдувок; 8 – насос дегазированной воды; 9 – механический фильтр; 10 – теплообменник охлаждения дистиллята;
- 11 – катионитовый фильтр; 12 – анионитовый фильтр;
- 13 – ЛЗМ; 14 – контрольный бак; 15 – насос контрольного бака

Характеристики, устройство и принцип работы оборудования системы СВО-7 аналогичны системе СВО-3.

Работа системы СВО-7 включает следующие режимы:

- прием в бак вод спецпрачечных и душевых;
- разогрев выпарной установки;
- очистка вод спецпрачечной и душевых на выпарной установке и узле доочистки дистиллята. Вода, поступающая из спецпрачечной «грязной» зоны баков и баков дозиметрического контроля, характеризуется наличием поверхностноактивных веществ, мыла, сульфанола, соды, щелочи, кислоты, перманганата калия. Удельная активность этих растворов может достигать больших значений.

Вода спецпрачечной поступает на фильтры предочистки, где производится очистка от механических примесей и масла, а затем поступает в приемный бак.

8. ОТМЫВКА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

8.1. Водно-механическая отмывка теплообменных поверхностей парогенераторов

Водно-механическая отмывка теплообменной поверхности ПГ предназначена для удаления отслоившихся отложений и шлама с трубчатки на этапе расхолаживания ПГ при температуре первого контура 70...90 °С.

Водно-механическая отмывка выполняется следующим образом:

1. ПГ заполняются водой до уровня 3500 мм от вспомогательных питательных или аварийных питательных насосов.

2. Блочные редуccionные установки сброса пара в атмосферу открываются на 10...20 %.

3. В линию периодической продувки ПГ подается сжатый воздух.

4. Через 30 минут сжатый воздух дополнительно подается в линию дренажа ПГ и редуccionные установки закрываются.

5. При достижении давления в ПГ 2 кг/см² подача сжатого воздуха прекращается.

6. ПГ дренируются с расходом 25...30 м³/ч, при этом отбираются пробы котловой воды при уровнях в парогенераторе 2; 1,5; 1 и 0,5 м и выполняется анализ проб на содержание Fe, Cu и значение pH.

7. Дренирование ПГ производится только через СВО-5. Откачку по байпасу СВО-5 разрешается производить только по разрешению административно-технического персонала реакторного цеха. После дренирования давление в ПГ сбрасывается путем открытия редуccionных установок сброса пара в атмосферу.

8. ПГ снова заполняются до уровня 3500 мм.

Данные работы выполняются по отдельной бланк-программе, в которой указаны меры безопасности, последовательность действий, ответственные и т.д. По результатам анализа проб дренируемой котловой воды ПГ начальник водно-химической лаборатории принимает решение о повторном проведении отмывки.

Съем технологических отложений с поверхности теплообмена ПГ считается успешным при остаточном содержании отложений (определяется после вскрытия ПГ по второму контуру) на контролируемых участках трубного пучка не более 25 г/м^2 и при отсутствии шлама в межтрубном пространстве и на нижней образующей корпуса. В случае превышения указанного уровня удельной загрязненности главный инженер принимает решение о повторной отмывке на этапе разогрева.

Эксплуатация ПГ при наличии на поверхности трубного пучка на любом контролируемом участке отложений в количестве 150 г/м^2 запрещена.

Места снятия отложений показаны на рис. 8.1.

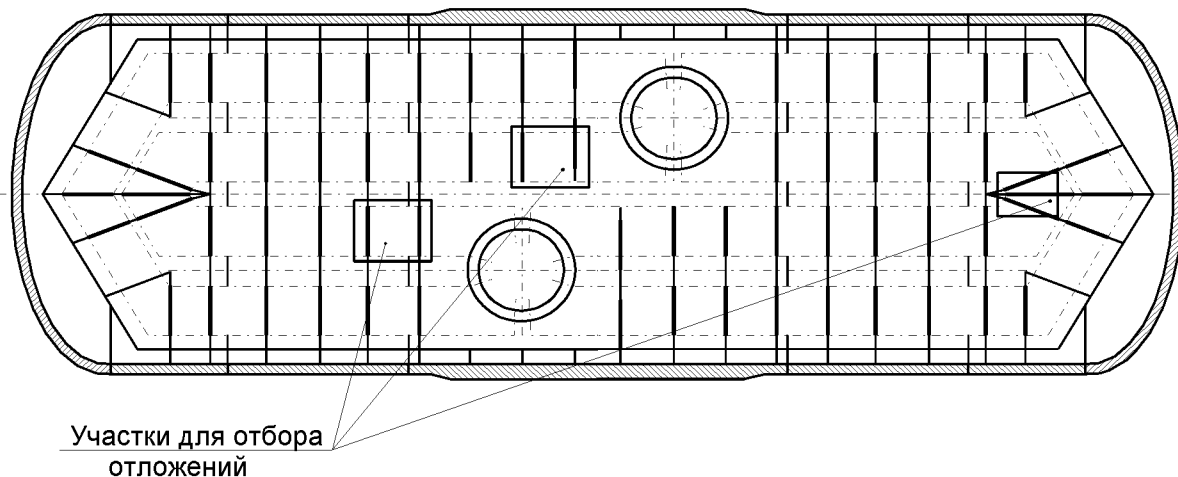


Рис. 8.1. Места снятия отложений с теплообменной поверхности ПГ

8.2 Химическая отмывка теплообменных поверхностей парогенераторов

8.2.1. Требования к химической отмывке парогенераторов

Химическая отмывка ПГ проводится для удаления отложений и шлама с поверхностей трубчатки, коллекторов и корпуса ПГ с целью устранения подшламовой коррозии и улучшения теплообмена, а также для удаления восстановленной меди и для исключения электрохимической коррозии контактной гальванической пары медь-железо.

Химическая отмывка ПГ должна проводиться на остановленном энергоблоке в период ППР или в период расхолаживания РУ по разработанной на АЭС и согласованной в установленном порядке программе или инструкции.

Программа или инструкция проведения химической отмывки должна определять этапы отмывки, концентрацию реагентов, применяемых на каждом этапе, длительность этапов, температуру отмывочного раствора и критерии окончания отмывки, а также предусматривать проведение водно-механической отмывки ПГ по окончании химической отмывки.

Контроль химических и технологических параметров в период выхода солей во время останова энергоблока и их последующий анализ позволяет оценить количество и состав солей, которые накопились в ПГ.

Сроки проведения химических отмывок устанавливаются в каждом конкретном случае по результатам коррозионного обследования внутренних поверхностей ПГ с учетом средней концентрации продуктов коррозии в питательной воде в течение топливных кампаний после предыдущей химической отмывки. Если в течение топливной кампании после предыдущей химической отмывки средняя суммарная концентрации железа и меди в питательной воде ПГ более 10 мкг/дм^3 , очередная химическая отмывка проводится при достижении удельной загрязненности на теплообменных трубках более 100 г/м^2 , но не реже чем один раз в 4 года.

При планировании химической отмывки ПГ на этапе расхолаживания РУ решение о ее проведении принимается с учетом результатов коррозионного обследования внутренних поверхностей ПГ при предыдущем останове. Для прогнозирования длительности времени между отмывками используется график зависимости продолжительности межотмывочного периода ПГ от средней суммарной концентрации железа и меди в питательной воде ПГ (рис. 8.2).

Конкретный способ отмывки выбирается исходя из анализа эксплуатационных условий: состояния трубного пучка, технологической схемы и т.д. и согласовывается с главным конструктором ПГ. При этом необходимо руководствоваться следующим основным требованием: ***эксплуатация ПГ при наличии на поверхности трубного пучка на любом контролируемом участке отложений в количестве 100 г/м^2 и более запрещается.***

Перед проведением химической отмывки ПГ должен быть произведен контроль эффективности продувки и, при необходимости, поиск места закупорки шламом продувочных и дренажных линий. Контроль эффективности линий проводится следующим способом:

- после расхолаживания ПГ до температуры ниже 100°C открывается периодическая продувка ПГ из карманов и измеряются температуры по длине труб. Граница холодного и горячего участка определяет наличие места закупорки;

- перед проведением барботажной отмывки ПГ проводится продувка трубопроводов периодической продувки ПГ сжатым воздухом с замером температуры трубопроводов.

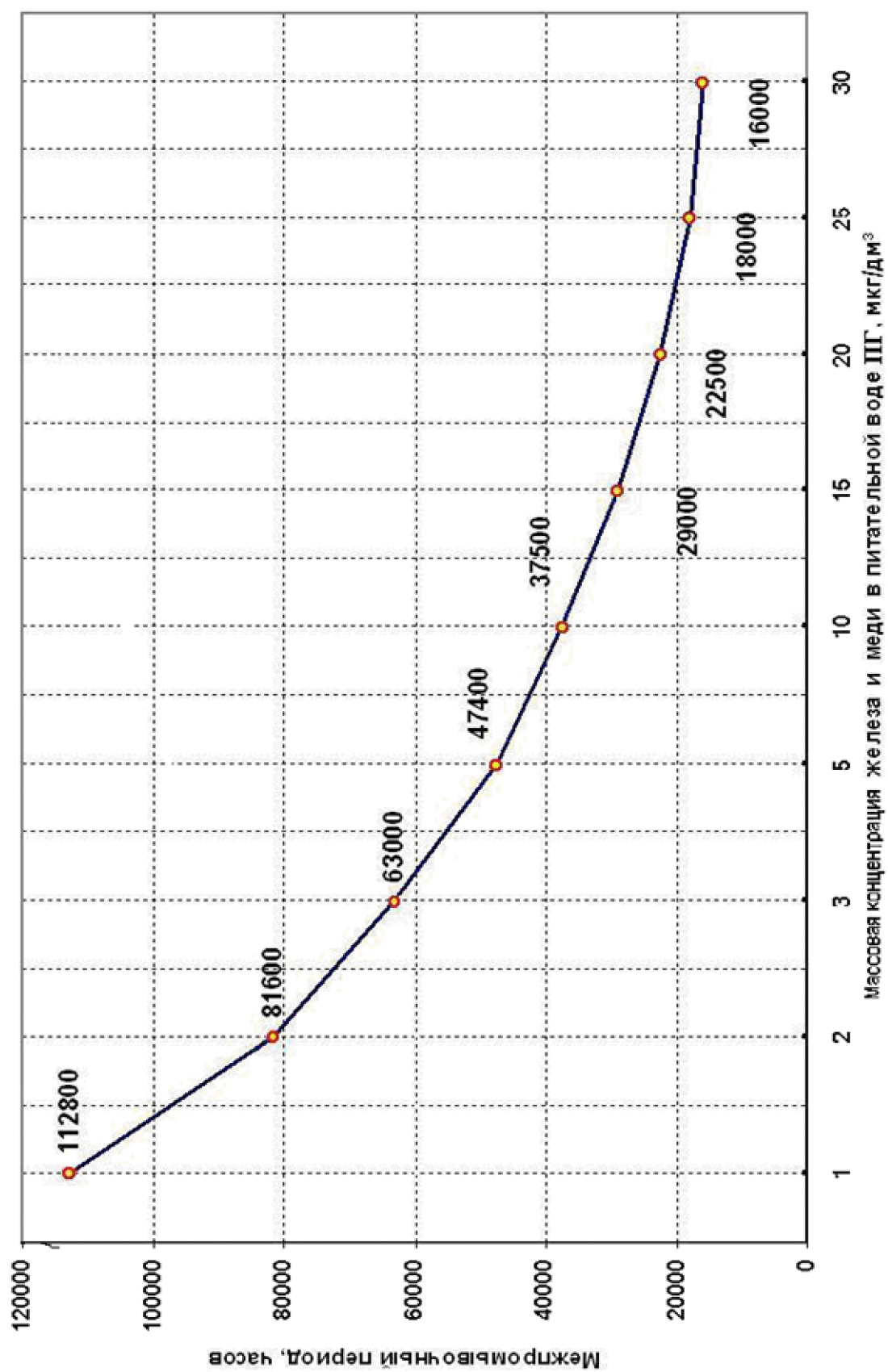


Рис. 8.2. Гистограмма определения межотмывочного периода ПП

8.2.2. Химическая отмывка в период останова

Технология химической отмывки трубного пучка ПГ от эксплуатационных отложений определяется химическим составом этих отложений. Анализ эксплуатационных данных показывает, что на поверхности трубного пучка ПГ отложения в основном имеют железомедный окисный состав (Fe_2O_3 – 85...90 % и Cu – 4...15 %).

Наиболее эффективным способом удаления отложений такого состава является многоэтапная отмывка с последовательным удалением окислов меди и железа.

Технология отмывки должна предусматривать циркуляцию раствора в ПГ. На втором этапе удаления окислов железа рекомендуется повышения температуры раствора до 150 °С (системами первого контура) и сбросом пара в атмосферу (для повышения эффективности перемешивания раствора и удаления отложений из мест дистанционирования).

Рекомендуемые химико-технологические параметры этапов химической отмывки ПГ приведены в табл. 8.1. Необходимость повторения этапов отмывки определяется эффективностью удаления отложений (по стабилизации соединений Fe, Cu). Допускается применение других химических реагентов в зависимости от химического состава отложений. Применение их и технология химической отмывки ПГ должны согласовываться с главным конструктором ПГ.

Т а б л и ц а 8.1

Рекомендуемые параметры отмывки ПГ

Наименование	Этапы отмывки			
	I	II	III	Оконч-я отмывка
Этилендиаминтетрауксусная кислота (ЭДТК), г/кг	10...30	20...30	3...10	–
Перекись водорода (H_2O_2), г/кг	2...3	–	2...3	–
Гидразин-гидрат (N_2H_4), г/кг	–	1	–	0,02
Величина pH (за счет добавки аммиака)	9,8...10,2	7,8...8,2	9,8...10,2	8,8...9,2
Хлорид-ионы, мг/кг, не более	15	15	15	15
Температура раствора, °С	60	90	30...40	30...40
Длительность, час	15	15	5	2

После каждого этапа отмывки раствор дренируется из ПГ. При вводе растворов на всех этапах химической отмывки разность температуры корпуса ПГ и температуры подаваемого раствора должна быть не более 60 °С.

После проведения химической отмывки проводится водно-механическая отмывка трубного пучка от отслоившихся отложений и шлама. Затем ПГ опорожняется. При этом отрезаются (отсоединяются) трубопроводы продувки от штуцеров ПГ, и ПГ промывается питательной водой со сливом воды в бокс до прозрачности 85...90 %. Подача питательной воды осуществляется с помощью шланга через вертикальные коридоры теплообменного пучка, опускаемые участки между погружным дырчатым листом и корпусом ПГ и со стороны днищ. Для отмывки по центральному вертикальному коридору теплообменного пучка равномерно по длине ПГ (в 5...6 местах) производится демонтаж дырчатых листов. Для интенсивного выхода смываемой воды из ПГ штуцеры продувок и дренажа периодически продуваются воздухом с внешней стороны ПГ.

После этого осматриваются трубный пучок в контролируемых местах, по длине центрального вертикального коридора, а также корпус ПГ в доступных местах, и определяется коррозионное состояние поверхностей и отсутствие шлама. Фиксируется чистота осматриваемых поверхностей, а также проходимость линий продувки. Отмывка (химическая и водно-механическая) считается законченной, если удельная загрязненность на контролируемых участках трубного пучка не более 25 г/м^2 , в межтрубном пространстве и на нижней образующей корпуса отсутствует шлам.

8.2.3. Химическая отмывка при рабочих параметрах

Отмывка трубного пучка ПГ от эксплуатационных отложений при рабочих параметрах заключается в следующем: в процессе работы ПГ в питательную воду в течение 24 часов (одного цикла) вводится отмывочный раствор. Дозировка раствора проводится по одному циклу поочередно в каждый ПГ. В процессе дозирования раствора расход продувки ПГ устанавливается не менее 1 % от номинальной паропроизводительности. Выводимые из ПГ эксплуатационные отложения удаляются на фильтры СВО-5.

В качестве отмывочного раствора используются ЭДТК или аммонийная или калиевая соль ЭДТК (комплексоны), а также гидразин-гидрат.

Концентрация комплексона и гидразин-гидрата в питательной воде перед ПГ поддерживается до 10 и до 2 мг/дм^3 , соответственно, а при значении рН продувочной воды не более 10,2 и обеспечении концентрации хлоридов в рабочей среде второго контура – согласно установленных норм. При этом содержание хлоридов в ЭДТК должно быть менее 1 % массы.

Конкретные отмывочные композиции указанных реагентов, длительность дозирования, концентрация в питательной воде и общая продолжительность отмывки устанавливается в зависимости от состава отложений, величины удельной загрязненности труб и получаемого эффекта.

Дозирование отмывочного раствора выполняется поочередно в каждый отмываемый парогенератор. При этом повторение ввода раствора для каждого отмываемого ПГ проводится после стабилизации качества продувочной воды по соединениям железа, меди, общей жесткости, кремниевой кислоты.

Основные требования при проведении отмывки при рабочих параметрах:

- ввод (дозирование) отмывочного раствора должен проводиться индивидуально в каждый ПГ с помощью насоса-дозатора;
- место ввода должно находиться в неотсекаемой части напорного питательного трубопровода (после ПВД) непосредственно перед герметичной оболочкой;
- врезка в питательный трубопровод должна выполняться таким образом, чтобы концентрированный раствор отмывочной композиции подавался в центральную часть потока питательной воды, т.е. исключалось попадание раствора на внутренние поверхности питательных трубопроводов;
- раствор, дозируемый в ПГ, должен быть хорошо перемешан и не должен содержать нерастворившиеся кристаллы ЭДТК. Температура (не менее 50 °С) и концентрация исходного раствора в узле приготовления выбираются из условия полного и надежного растворения ЭДТК;
- в питательной воде в период дозирования должны быть созданы следующие концентрации реагентов: ЭДТК – до 10 мг/дм³, гидразин-гидрата – до 2 мг/дм³;
- продувка отмываемого ПГ должна быть максимальной по условиям пропускной способности продувочных линий, но не менее 1 %;
- перед началом отмывки фильтры СВО-5 должны быть отрегенерированы и подготовлены к приему загрязненной продувочной воды;
- по условиям работы блока и фильтров СВО-5 первые порции продувочной воды могут сбрасываться в спецканализацию, а последующие должны очищаться на фильтрах.

9. ОСНОВЫ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЯЭУ С РБМК

9.1. Особенности ВХР ЯЭУ с РБМК

Для рассмотрения основ ВХР ЯЭУ с реакторами кипящего типа (РБМК) необходимо понимание того, какие среды внесены в схему водно-химического режима.

В понятие «водный теплоноситель» для ЯЭУ с РБМК включены:

- вода контура многократной принудительной циркуляции (КМПЦ);

- конденсат турбин;
- насыщенный пар;
- питательная вода и ее составляющие;
- вода контура СУЗ;
- вода заполнения и подпиточная вода.

Как известно, ЯЭУ с РБМК является одноконтурной, поэтому существенным недостатком такой схемы с точки зрения ВХР является загрязненность вырабатываемого реактором пара радиоактивными примесями, поступающими в пар из реакторной воды. Именно загрязнение насыщенного пара является практически единственной причиной поступления радионуклидов в конденсат турбины.

Кроме того, загрязнение рабочей среды РБМК обусловлено следующими факторами:

- присосами охлаждающей воды через неплотности конденсаторов турбин,
- присосами воздуха через неплотности вакуумной системы конденсаторов турбин;
- коррозией конструкционных материалов;
- радиолизом воды;
- выходом продуктов деления ядерного топлива в реакторную воду в результате разгерметизации оболочек ТВЭЛОВ;
- поступлением примесей с добавочной и подпиточной водой.
- ионообменными материалами и продуктами их деструкции, попадающими в тракт из ионообменных установок очистки воды;
- регенерационными растворами и отмывочными водами конденсаторочистки при некачественной отмывке смол после регенерации;
- протечками турбинного масла через неплотности системы смазки.

При многократной циркуляции разделение пароводяной смеси, поступающей в барабан-сепаратор, никогда не бывает полным. Насыщенный пар, выходя из барабана, увлекает с собой некоторое количество капелек реакторной воды вместе с содержащимися в ней растворенными солями. При внезапном снижении давления в реакторе может наблюдаться значительное кратковременное ухудшение качества пара вследствие бросков реакторной воды, вызванных ее вскипанием. Такое же явление наблюдается при значительном повышении уровня в барабане-сепараторе. Примеси кипящей в реакторе воды переносятся в пар с каплями испаряемой воды, уносимой насыщенным паром (механический или капельный унос). Поэтому контроль качества пара ведется по его влажности.

Основным источником загрязнения питательной воды в КПП растворимыми солями являются присосы охлаждающей воды при негерметичности трубок в конденсаторах.

Присосы воздуха через неплотности вакуумной системы – основной источник загрязнения конденсата растворенным кислородом.

Коррозионные процессы конструкционных материалов являются основным источником загрязнения конденсата тяжелыми металлами: железом, медью, цинком, хромом, никелем, кобальтом и др. Основной причиной коррозии является наличие в конденсате кислорода. Его влияние особенно сказывается при нейтральном водном режиме на коррозии трубок конденсаторов, выполненных из медных сплавов. В результате воздействия среды, содержащей агрессивные агенты (кислород, угольная и другие кислоты, щелочи и пр.), происходит коррозионное разрушение металла или сплава вследствие электрохимических и химических процессов. Электрохимическая коррозия приводит к выделению из воды твердых веществ (отложений). Химическая коррозия приводит к выделению взвешенных частиц (шлама). Вблизи теплопередающей поверхности концентрация примесей возрастает на несколько порядков, и поэтому создаются условия для образования отложения и развития коррозионных процессов. При этом часть примесей может выделяться в твердую фазу на внутренних поверхностях нагрева, образуя накипи.

Примеси, находящиеся в воде при различных физико-химических процессах, ведут себя по-разному. Одни вещества, выделяясь из раствора в виде твердой фазы, кристаллизуются на поверхностях нагрева или охлаждения и при этом образуют прочную плотную накипь; треть оставшихся частиц выпадают в толще воды в виде взвешенных шламовых частиц. Частицы, образующие шлам, откладываются в застойных зонах. При резких температурных колебаниях в стенках парообразующих труб накипи отслаиваются потоком циркулирующей воды и переходят в шлам. В свою очередь, шлам, находящийся в циркуляционной воде, образует вторичные накипи на теплопередающих поверхностях.

Отложения на поверхностях твэлов повышают температуру оболочки твэлов выше допустимой, что снижает надежность их работы и повышает опасность их расплавления. Перегрев оболочек твэлов приводит к их растрескиванию и образованию микротрещин.

Вода и пар при взаимодействии с элементами конструкций могут частично растворять их (коррозионное повреждение), а затем осаждают продукты коррозии. В результате коррозионного повреждения образуются свищи, трещины. Распространенными химическими агентами являются кислород, хлориды натрия и калия, карбонаты кальция и магния и др. Наиболее трудно предотвратить загрязнение вод продуктами коррозии, откладывающимися в реакторном контуре на поверхностях активной зоны.

Ограничения поступления продуктов коррозии достигаются выбором коррозионно-стойких конструкционных материалов, оптимальным водно-химическим режимом и глубокой очисткой воды контуров.

В мощных радиационных полях, создаваемых в активной зоне реакторов, небольшое количество воды подвергается радиолизу. Образующиеся в РБМК газы: радиолитический кислород и водород, энергично переходят в пар. Повышение концентрации кислорода в воде КМПЦ за счет радиолиза приводит к коррозии аустенитной стали и циркониевых сплавов, перекись водорода способствует образованию защитной окисной пленки Fe_3O_4 . Кислород является одним из источников образования радионуклидов ^{16}N , активность которого достаточно высока. Загрязнение вод другими радионуклидами происходит вследствие активации продуктов коррозии конструкционных материалов и разгерметизации и разрушения твэлов.

Причинами разгерметизации и разрушения твэлов являются следующие процессы:

- коррозия под напряжением, вызванная воздействием продуктов деления йода и цезия, концентрация которых возрастает по мере выгорания;
- эрозионные, кавитационные и вибрационные воздействия со стороны теплоносителя, связанные с технологическими режимами работы ЭБ;
- образование отложений и накипи на оболочках твэлов;
- коррозия циркониевых сплавов под действием агрессивных примесей теплоносителя

В РБМК разгерметизация оболочек твэлов приводит к поступлению радионуклидов в циркуляционную воду, активность которой значительно возрастает. В результате этого активируется оборудование, что представляет большую опасность для обслуживающего персонала. С повышением активности теплоносителя растет активность пара, а это неизбежно приводит к созданию опасной радиационной обстановки в машинном зале.

Продукты коррозии, отложившиеся в активной зоне реактора, активируются в нейтронном поле. При последующем выносе продуктов коррозии и распространении их по контуру циркуляции появляются источники радиоактивного излучения за пределами активной зоны, действие которых не прекращается и после останова реактора.

Современные технологии и схемы водоподготовки позволяют получить воду высокой степени чистоты с весьма малыми концентрациями примесей. Несмотря на это, часть примесей попадает в реактор и активируется в нейтронном поле. В результате реакции активации примесей образуются радионуклиды, не являющиеся продуктами коррозии, обладающие периодом полураспада от нескольких секунд до нескольких лет. Характерно образование радионуклидов ^{24}Na , ^{31}Si и др. Спустя несколько суток после останова реактора активность КМПЦ определяется содержанием радионуклидов коррозионного происхождения, так как при эксплуатации идет непрерывное накопление в контуре продуктов коррозии.

Продукты деления урана в большинстве своем находятся в газообразном состоянии или образуют аэрозоли. При разрушении или разгерметиза-

ции твэлов газообразные продукты деления (Xe, Kr) поступают в кладку реактора или циркуляционную воду. То же самое, только в большей степени, происходит при извлечении разрушенных ТВС. Газообразные и аэрозольные продукты деления разносятся азотно-гелиевой смесью по всему газовому контуру и через неплотности проникают в производственные помещения. При поступлении продуктов деления газообразные радионуклиды разносятся паром по системам машинного зала и через неплотности в оборудовании проникают вместе с паром в производственные помещения. Криптон и ксенон при испускании β -частиц переходят в радионуклиды рубидия и цезия. Газообразный йод при снижении температуры переходит в твердое состояние. Радиоактивные частицы оседают на наружной поверхности технологических трубопроводов и оборудования, на стенах, полах, увеличивая радиоактивный фон в помещениях АЭС. Радиоактивные аэрозоли, рассеянные в воздухе производственных помещений, оказывают вредное воздействие на обслуживающий персонал.

Вода первичного заполнения, а также подпиточная вода содержит газы и растворенные соли в небольших концентрациях. Подпитка ЭБ осуществляется в конденсаторы турбин, поэтому все примеси, содержащиеся в подпиточной или добавочной воде, поступают в конденсат. Наиболее распространенными из них являются хлориды натрия и калия, сульфаты и карбонаты кальция и магния, кремниевая кислота, ионы железа, кислород, двуокись углерода, масла.

Конденсат турбин является основной составляющей питательной воды, поэтому качество питательной воды зависит от качества конденсата. Примеси с питательной водой попадают в КМПЦ, где происходит многократное упаривание воды, что приводит к увеличению концентрации растворенных в ней солей примерно в 10 раз.

В отличие от ЯЭУ с ВВЭР на АЭС с РБМК-1000 принят **нейтральный бескоррекционный ВХР без подавления радиолиза воды.**

Особенностями данного ВХР являются:

- отсутствие корректирующих добавок в теплоноситель;
- отсутствие систем подавления радиолиза воды;
- высокая чистота питательной воды.

Водный режим поддерживается нейтральным за счет очистки воды методом ионного обмена. Водород и кислород, образовавшиеся в процессе радиолиза воды, уносятся с насыщенным паром и способствуют обескислороживанию реакторной воды. Содержание кислорода в реакторной воде не превышает 0,1 мг/кг. При такой концентрации в воде высокой чистоты кислород тормозит коррозионные процессы. Кроме того, при радиолизе воды образуется перекись водорода, которая в результате термического и радиационного разложения вызывает равномерное образование на поверхности стали магнетита, что снижает скорость коррозии.

Особенностью ВХР является наличие в циркуляционной воде и острым паре большого количества радиолитического кислорода и небольшого количества перекиси водорода, т.е. имеет окислительный характер. Это условие накладывает требования на выбор конструкционных материалов. Правильная организация ВХР для одноконтурных ЯЭУ обязательно включает очистку всего потока турбинного конденсата и продувочной воды контура циркуляции.

Конденсат греющего пара теплообменников системы регенерации каскадно сливается в конденсаторы для очистки от продуктов коррозии совместно с основным конденсатом.

Основным потоком, определяющим ВХР КМПЦ, является питательная вода. Для снижения коррозии углеродистой стали и, следовательно, загрязнения питательной воды железом при нейтральном ВХР должна быть обеспечена высокая чистота питательной воды (электропроводность не более 0,1 мкСм/см) путем очистки на фильтрах конденсатоочистки.

Кислород из питательной воды удаляется в конденсаторах и деаэраторах. Большое поступление продуктов коррозии в питательную воду наблюдается в первые сутки после пуска блока. Для снижения загрязнения питательной воды окислами железа перед пуском проводится отмывка КПП водой с очисткой ее на фильтрах конденсатоочистки.

Большое внимание уделяется плотности конденсаторов турбин. Загрязнения из воды КМПЦ удаляются на установке очистки продувочной воды КМПЦ.

9.2. Организация ВХР ЯЭУ с РБМК

Водно-химический режим ЯЭУ с РБМК, как и водный режим ядерных установок с ВВЭР, характеризуется нормируемыми и диагностическими показателями.

Нормируемыми показателями качества являются показатели, соблюдение которых обеспечивает проектный ресурс безопасной и надежной эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС без снижения экономичности..

Диагностическими показателями являются показатели, которые предназначены для определения причин возможных отклонений ВХР от нормируемых показателей.

Нарушением ВХР КМПЦ и контура СУЗ являются отклонения одного или нескольких нормируемых показателей качества от величины (диапазона) нормируемого значения, не устраненные в течение установленного времени.

Отклонения нормируемых показателей качества воды КМПЦ и воды контура СУЗ подразделяются на уровни. Для каждого уровня установлены как предельные значения показателей, так и максимально-допустимое время работы энергоблока.

Нарушением ВХР КПП, воды заполнения и подпиточной воды контуров, воды вспомогательных систем являются отклонения одного или нескольких нормируемых показателей качества от величины (диапазона) нормируемого значения, не устраненные в течение 72 часов, начиная с момента их обнаружения.

Значения показателей качества рабочих сред ЯЭУ с РБМК приведены в табл. 9.1.

Т а б л и ц а 9.1

Значения показателей качества рабочих сред ЯЭУ с РБМК

Наименование показателя	Показатели качества					
	Вода КМПЦ		Конденсат после конденсатоочистки		Питательная вода	
	Н	Д	Н	Д	Н	Д
Удельная электропроводимость, мкСм/см, не более	0,3	–	0,1	–	0,1	–
Водородный показатель, ед. рН	–	6,5...8,0	–	–	–	–
Концентрация меди, мкг/дм ³ , не более	10	–	–	2	–	2
Концентрация хлорид-ионов, мкг/дм ³ , не более	20	–	–	2	–	3
Концентрация сульфат-ионов, мкг/дм ³ , не более	–	30	–	3	–	3
Концентрация нитрат-ионов, мкг/дм ³ , не более	–	15	–	2	–	2
Концентрация кислорода, мкг/дм ³ , не более	–	–	–	50	20	–
Концентрация кремниевой кислоты, мкг/дм ³ , не более	–	200	–	–	–	–
Концентрация железа, мкг/дм ³ , не более	–	10	–	–	–	5
Концентрация натрия, мкг/дм ³ , не более	–	20	–	2	–	2
Концентрация нефтепродуктов, мкг/дм ³ , не более	–	–	–	–	–	20
Концентрация алюминия, мкг/дм ³ , не более	–	–	–	–	–	–

Наименование показателя	Показатели качества			
	Вода контура СУЗ		Вода заполнения и подпиточная вода контуров	
	Н	Д	Н	Д
Удельная электропроводимость, мкСм/см, не более	–	–	–	1,3
Водородный показатель	4,5...6,5	–	–	5,5...7,2
Концентрация меди, мкг/дм ³ , не более	–	–	–	–
Концентрация хлорид-ионов, мкг/дм ³ , не более	20	–	10	–
Концентрация сульфат-ионов, мкг/дм ³ , не более	–	50	–	10
Концентрация нитрат-ионов, мкг/дм ³ , не более	–	1500	–	5
Концентрация кислорода, мкг/дм ³ , не более	–	–	–	–
Концентрация кремниевой кислоты, мкг/дм ³ , не более	–	–	–	–
Концентрация железа, мкг/дм ³ , не более	–	5	–	–
Концентрация натрия, мкг/дм ³ , не более	–	–	10	–
Концентрация нефтепродуктов, мкг/дм ³ , не более	–	–	–	100
Концентрация алюминия, мкг/дм ³ , не более	–	15	–	–
Н – нормируемый показатель. Д – диагностический показатель. Концентрация кислорода в питательной воде определяется после деаэраторов. Водородный показатель рН определяется при удельной электрической проводимости более 0,3 мкСм/см. Предельно допустимая величина присосов охлаждающей воды в конденсаторах турбин определяется по удельной электрической проводимости конденсата турбин на напоре КЭН-I. В зависимости от качества охлаждающей воды удельная электрическая проводимость должна быть для: Смоленской АЭС – не более 0,20 мкСм/см; Курской АЭС – не более 0,25 мкСм/см; Ленинградской АЭС – не более 0,40 мкСм/см.				

Уровни отклонений нормируемых показателей качества воды КМПЦ и контура СУЗ приведены в табл. 9.2, 9.3.

Т а б л и ц а 9.2

Уровни отклонений нормируемых показателей качества воды КМПЦ

Наименование показателя	Значение показателей качества		
	Уровни отклонений		
	первый	второй	третий
Удельная электропроводимость, мкСм/см	$0,3 < X \leq 1,0$	$1,0 < X < 3,0$	$X \geq 3,0$
Концентрация хлорид-ионов, мкг/дм ³	$20 < Cl \leq 50$	$50 < Cl < 100$	$Cl \geq 100$
Концентрация меди, мкг/дм ³	$10 < Cu \leq 20$	$20 < Cu < 50$	$Cu \geq 50$

Т а б л и ц а 9.3

**Уровни отклонений нормируемых показателей качества
воды контура СУЗ**

Наименование показателя	Значение показателей качества	
	Уровни отклонений	
	второй	третий
Водородный показатель, ед. рН	$6,5 < pH < 6,8$ $4,2 < pH < 4,5$	$pH \geq 6,8$ $pH \leq 4,2$
Концентрация хлорид-ионов, мкг/дм ³	$20 < Cu < 100$	$Cu \geq 100$

Эксплуатационные ограничения при отклонениях показателей качества воды КМПЦ и воды контура СУЗ и действия персонала при отклонениях:

Первый уровень отклонения. При отклонении одного или нескольких нормируемых показателей качества воды КМПЦ в пределах первого уровня допустимое время работы реактора на уровне мощности более 50 % от номинальной не должно превышать 7 суток. При невозможности в течение 7 суток выявить причины и устранить отклонения нормируемых показателей мощность реактора снижается до значения не более 50 % от номинальной. Допустимое время работы реактора на данном уровне мощности не должно превышать 72 часа. При невозможности в течение 72 часов выявить причины и устранить отклонения нормируемых показателей реактор останавливается и расхолаживается. Последующий подъем мощности реактора допускается после устранения причин отклонения. Это относится также ко второму и третьему уровням отклонений

Второй уровень отклонения. При отклонении одного или нескольких нормируемых показателей качества воды КМПЦ в пределах второго уровня не более чем через 4 часа мощность реактора снижается до значения не более 50 % от номинальной. Допустимое время работы реактора на данном уровне мощности не должно превышать 24 часа. При невозможности

сти в течение 24 часов выявить причины и устранить отклонения нормируемых показателей реактор останавливается и расхолаживается.

При отклонении одного или нескольких нормируемых показателей качества воды контура СУЗ в пределах второго уровня и невозможности в течение 72 часов выявить их причины и устранить реактор также останавливается и расхолаживается.

Третий уровень отклонений. При отклонении одного или нескольких нормируемых показателей качества воды КМПЦ и воды контура СУЗ в пределах третьего уровня не более чем через 4 часа реактор должен быть остановлен и расхоложен.

9.3. Средства обеспечения ВХР ЯЭУ с РБМК

Установка байпасной очистки воды КМПЦ СВО-1 (рис. 9.1) предназначена:

- для поддержания заданного водно-химического режима КМПЦ;
- вывода из контура осколочных нелетучих радиоизотопов;
- снижения наведенной активности;
- снижения уровня радиоактивного загрязнения парового и конденсатно-питательного тракта.

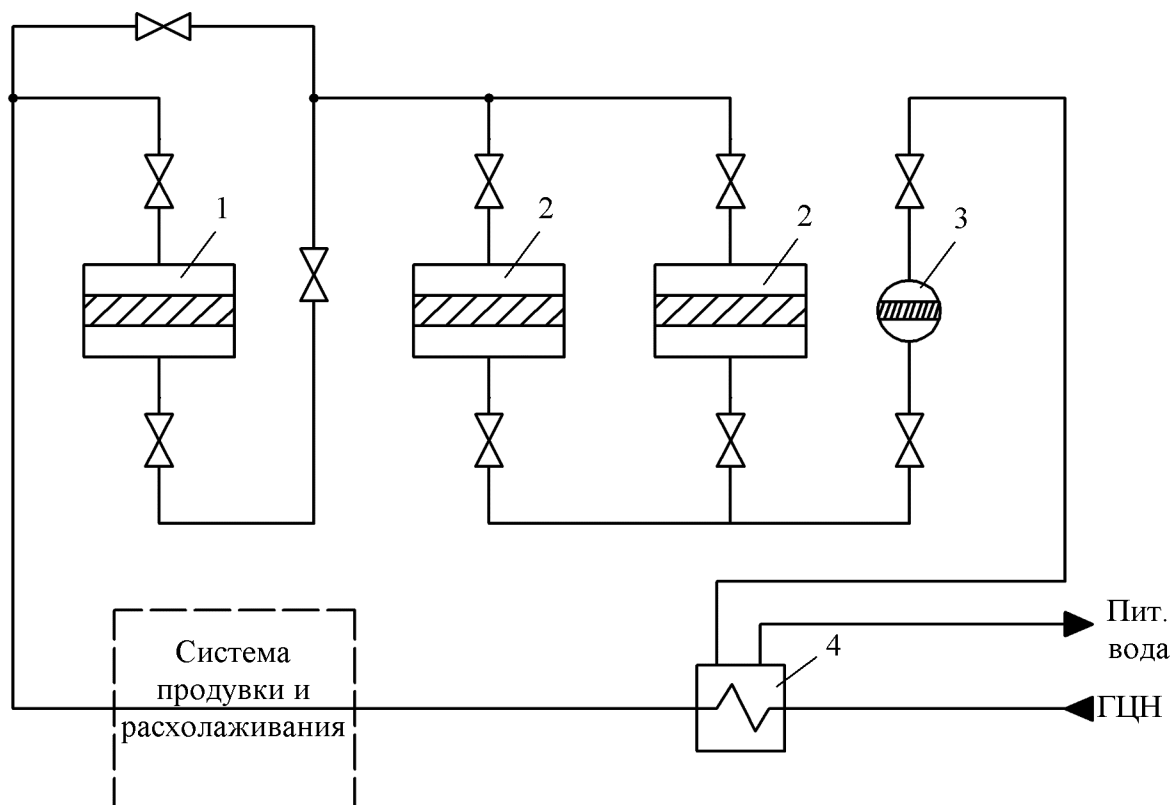


Рис. 9.1. Функциональная схема СВО-1 РБМК:
1 – механический фильтр; 2 – ФСД; 3 – фильтр-ловушка;
4 – регенеративный теплообменник

Установка очищает продувочную воду реактора, которая с напора главного циркуляционного насоса после охладителя поступает на установку с температурой не более 50 °С, после чего возвращается в контур, смешиваясь с питательной водой.

Очистка воды производится на последовательно включенных фильтрах: механическом, загруженном катионитом, и двух параллельно работающих фильтрах смешанного действия, загруженных катионитом и анионитом в соотношении 1:2. В условиях работающих ЯЭУ расход воды, поступающей на установку, составляет 200 т/ч.

Механический фильтр предназначается для очистки воды КМПЦ от растворенных солей жесткости: железа, тяжелых металлов и механических примесей. Фильтр смешанного действия предназначается для очистки воды КМПЦ от растворенных солей. Фильтр-ловушка ионитов предназначается для очистки воды от мелкой фракции, разрушенной при истирании смолы и радиационном воздействии. Регенерация и повторное использование ионообменных смол не производится из-за высокой активности и их старения под действием радиационного облучения.

Установка очистки воды бассейнов выдержки технологических кассет (СВО-2) предназначена:

- для очистки воды бассейна выдержки кассет от коррозионного шлама и взвешенных частиц;
- осветления воды бассейна на глубину 7 м;
- очистки воды от растворенных солей.

Охлаждение воды в бассейнах выдержки осуществляется с помощью специальной системы охлаждения, а также за счет теплообмена воды с воздухом помещения. Кроме того, вода в бассейнах выдержки необходима и для защиты обслуживающего персонала от радиационного излучения технологических каналов после выгрузки из реактора.

Обеспечение контроля качества воды бассейнов выдержки производится с помощью установки СВО-2. Нормы ВХР бассейна выдержки должны максимально соответствовать рабочей среде КМПЦ. Однако выдержать эти нормы в полной мере не представляется возможным по причине специфических условий работы бассейнов. Наличие прямого контакта с атмосферой приводит к поглощению углекислого газа и понижению рН, а также к увеличению электропроводности.

Производительность установки 50 м³/ч, в форсированном режиме – до 100 м³/ч. Вода из нижней части бассейна забирается насосами и подается в намывной фильтр, где происходит очистка от механических примесей. Затем вода направляется в ФСД, где происходит обессоливание, и через фильтр-ловушку ионитов возвращается в верхнюю часть бассейна выдержки. Перед включением установки в работу проводится намыв на

фильтрующие элементы механического фильтра перлита с узла приготовления и намыва.

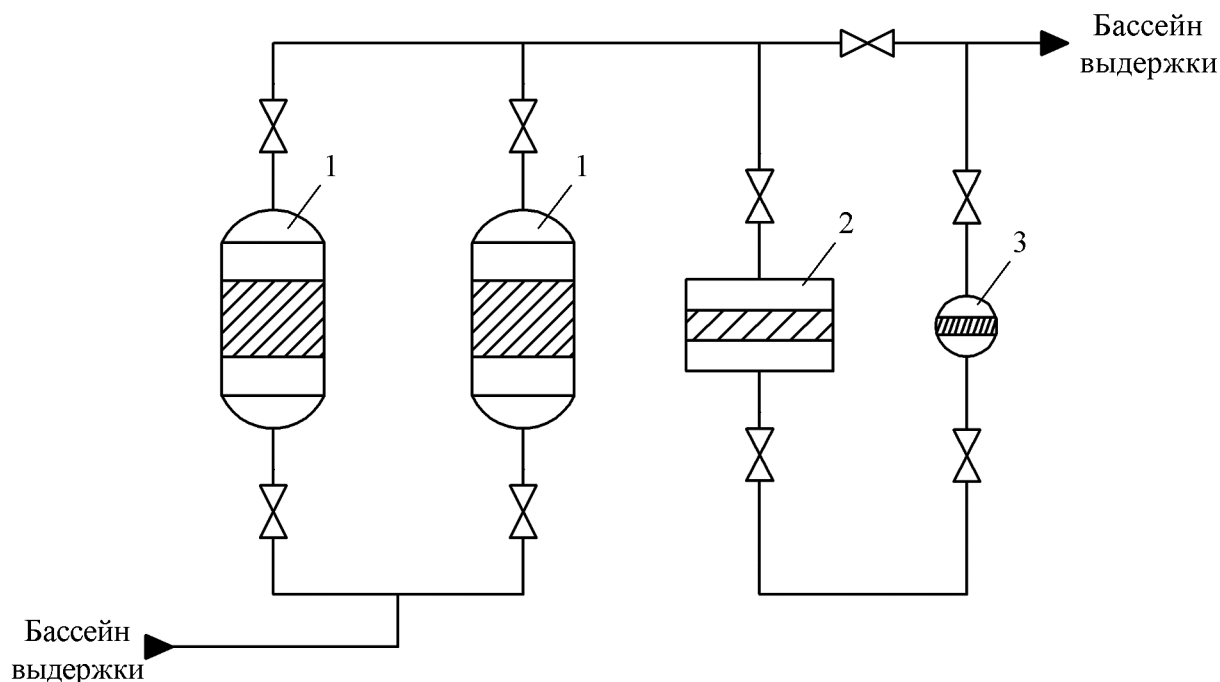


Рис. 9.2. Функциональная схема СВО-2 РБМК:
1 – намывной фильтр; 2 – ФСД; 3 – фильтр-ловушка

Установка очистки продувочной воды контура охлаждения СУЗ (СВО-3). Система управления и защиты реактора обеспечивает устойчивое автоматическое поддержание мощности на заданном уровне. Она позволяет с помощью поглощающих стержней выравнивать распределение нейтронного потока по радиусу и высоте активной зоны и компенсировать изменение реактивности реактора во время переходных режимов и останова.

Поглощающие стержни СУЗ выполнены из карбида бора в оболочке из алюминиевого сплава. Стержни в процессе работы реактора охлаждаются водой с температурой 40...70 °С. Для организации циркуляции охлаждающей воды предназначен контур охлаждения каналов СУЗ. Вода из аварийного бака СУЗ самотеком поступает в напорный коллектор СУЗ и далее по индивидуальным напорным трубопроводам на вход в каждый канал. В каналах СУЗ вода движется сверху вниз, охлаждая каналы, а затем поступает в теплообменники. Часть воды из напорного трубопровода (10 м³/ч) подается в систему очистки СВО-3.

Установка СВО-3 предназначена для очистки продувочной воды от солевых примесей, продуктов коррозии, масел, механических суспензий и поддержания водно-химического режима контура СУЗ. Солевые примеси в контур СУЗ поступают с присосами охлаждающей технической воды в теплообменниках, а продукты коррозии и масла поступают из технических

приводов стержней СУЗ. Кроме вышеперечисленных источников загрязнений вода контура СУЗ загрязняется и продуктами радиационно-химических реакций. Деаэрация воды контура СУЗ не предусмотрена.

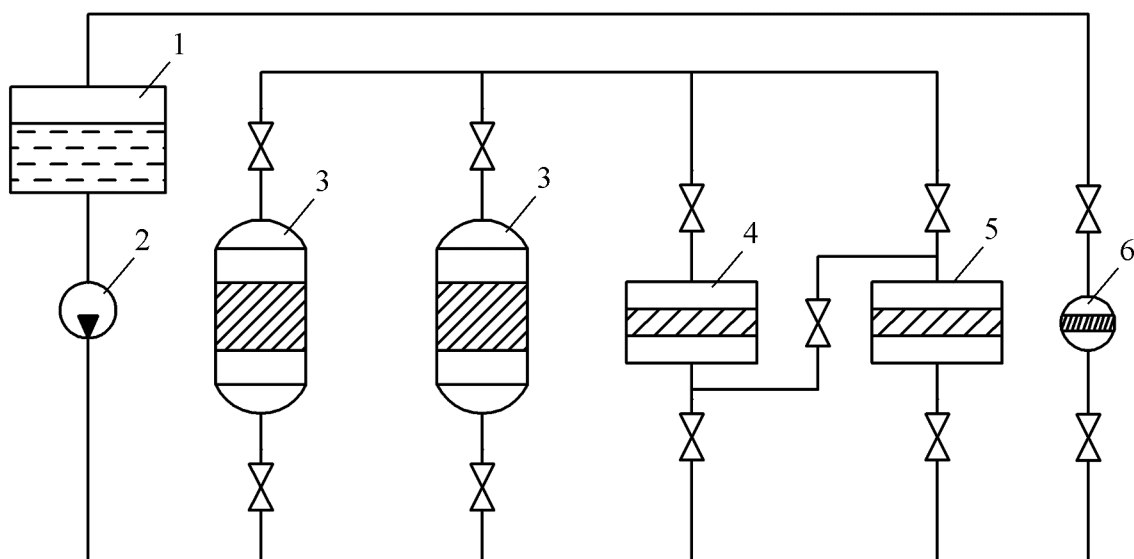


Рис. 9.3. Функциональная схема СВО-3 РБМК:
1 – циркуляционный бак; 2 – насос; 3 – намывной фильтр;
4 – КФ; 5 – АФ; 6 – фильтр-ловушка

Установка очистки трапных вод (СВО-4) (рис. 9.4) выполняет функцию удаления из трапных вод растворимых солей и радионуклидов. Очищенная вода направляется в обратный цикл.

Очистка радиоактивных вод является многоступенчатым процессом, который включает в себя:

- очистку методом дистилляции на выпарной установке;
- дегазацию для удаления из конденсата вторичного пара радиоактивных благородных газов (ксенона, криптона) и угольной кислоты;
- доочистку конденсата выпарной установки методом фильтрации в фильтрах с активированным углем для очистки от органических и механических примесей, а также в ионообменных фильтрах от растворимых в воде солей.

Кратность упаривания в выпарном аппарате составляет 20...40. Хуже очищается вода от коллоидных примесей. Коэффициент очистки от масел не превышает 10^2 .

Схема очистки предусматривает подачу трапных вод на выпарную установку, состоящую из выпарного аппарата, доупаривателя и конденсатора-дегазатора. Выпарной аппарат и доупариватель соединены водяными и паровыми коммуникациями и представляют собой единый аппарат со ступенчатым испарителем раствора.

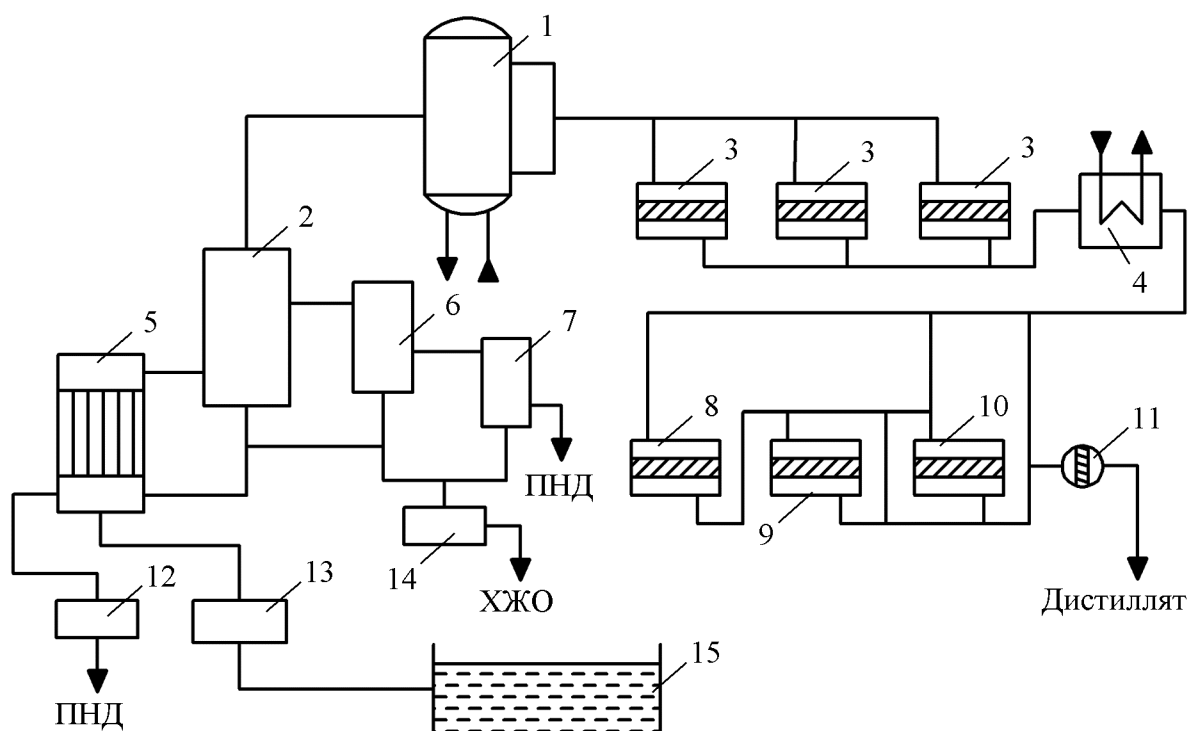


Рис. 9.4. Функциональная схема СВО-4 РБМК:

- 1 – конденсатор-дегазатор; 2 – выпарной аппарата; 3 – механический фильтр;
 4 – охладитель дистиллята; 5 – греющая камера выпарного аппарата;
 6 – доупариватель; 7 – греющая камера доупаривателя; 8 – КФ; 9 – АФ;
 10 – ФСД; 11 – фильтр-ловушка; 12 – уравнильный бачок; 13 – теплообменник;
 14 – монжюс; 15 – бак трапных вод

Установка очистки воды организованных протечек (СВО-5) (рис. 9.5) предназначена для очистки вод протечек, поступающих от насосов, сальниковой арматуры, пробоотборных точек и другого оборудования, от которого предусмотрен организованный отвод.

Вода оргпротечек собирается в приемные емкости, а затем насосами подается на установку СВО-5, которая состоит из двух намывных фильтров, катионитового и анионитового фильтров, включенных последовательно, где очищается от механических и растворенных примесей. Очистка воды от механических примесей основана на задержании этих примесей слоем фильтроперлита, намытого на фильтрующие элементы намывных фильтров. Очищенные воды оргпротечек используются в качестве подпиточной воды. Производительность установки 100 т/ч.

Схемой предусмотрена взаимосвязь СВО-5 и СВО-6. Если ионообменная часть СВО-6 выведена на регенерацию, то воду, поступающую в СВО-6, можно очищать в СВО-5. Кроме того, воду, очищенную в установке СВО-5, можно направлять на более тонкую очистку в СВО-6.

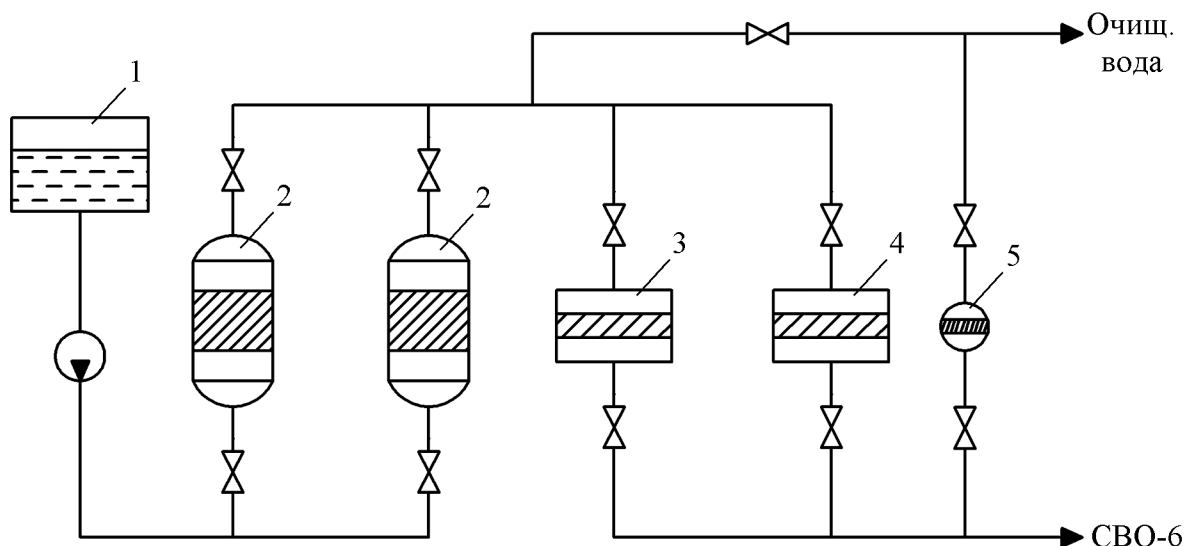


Рис. 9.5. Функциональная схема СВО-5 РБМК:
1 – бак «грязных» оргпротечек; 2 – намывной фильтр;
3 – КФ; 4 – АФ; 5 – фильтр-ловушка

Установка очистки промывочных вод и вод взрыхления (СВО-6) (рис. 9.6) предназначена для очистки отмывочных вод и вод взрыхления, возвращаемых с установок спецводоочистки и конденсатоочистки, от продуктов коррозии и растворенных примесей, а также для подачи промывочной воды на установки СВО и конденсатоочистки.

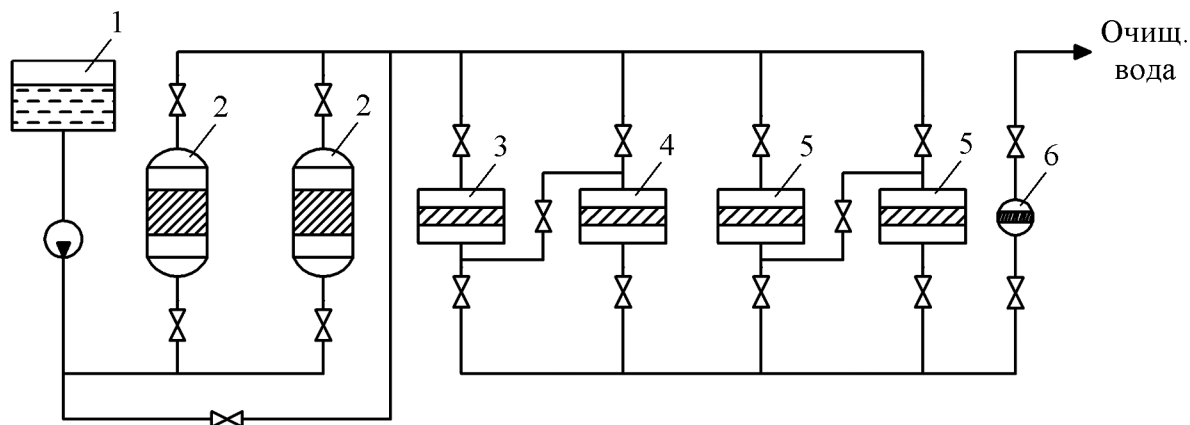


Рис. 9.6. Функциональная схема СВО-6 РБМК:
1 – бак грязных вод; 2 – намывной фильтр; 3 – КФ;
4 – АФ; 5 – ФСД; 6 – фильтр-ловушка

Вода для очистки собирается в приемные емкости установки, затем насосами подается на намывные фильтры и далее на ионообменные фильтры и фильтр-ловушку ионитов. Для более глубокой очистки конденсата и вод после СВО-5 в установке предусмотрена очистка на фильтрах смешанного действия.

Вода из баков «грязных» вод насосами подается на намывной фильтр, где проходит очистку от механических примесей и масла. В качестве фильтрующего материала намывного фильтра служит фильтроперлит. После намывных фильтров вода поступает на ионитовые фильтры. Фильтры смешанного действия расположены после катионитового и анионитового фильтров. После фильтра-ловушки ионитов вода установки СВО-6 поступает в баки очищенных вод. Производительность установки 100 т/ч.

По мере истощения обменной емкости ионитов производится их регенерация на СВО-13. Смолы, не восстанавливающие обменную емкость после регенерации, перегружаются в ХЖО.

Установка приготовления регенерационных растворов (СВО-7). В ЯЭУ с РБМК используется большое количество технологических вод, которые очищаются до требуемой чистоты в соответствии с нормами качества вод с использованием ионообменных смол. Смолы в процессе очистки переходят в солевые формы и в этой связи теряют свои ионообменные свойства. Для их восстановления иониты подвергаются регенерации. В качестве регенеративных растворов для катионитов используют разбавленную (5 %) азотную кислоту, а для регенерации анионитов используют 4 %-й гидроксид натрия.

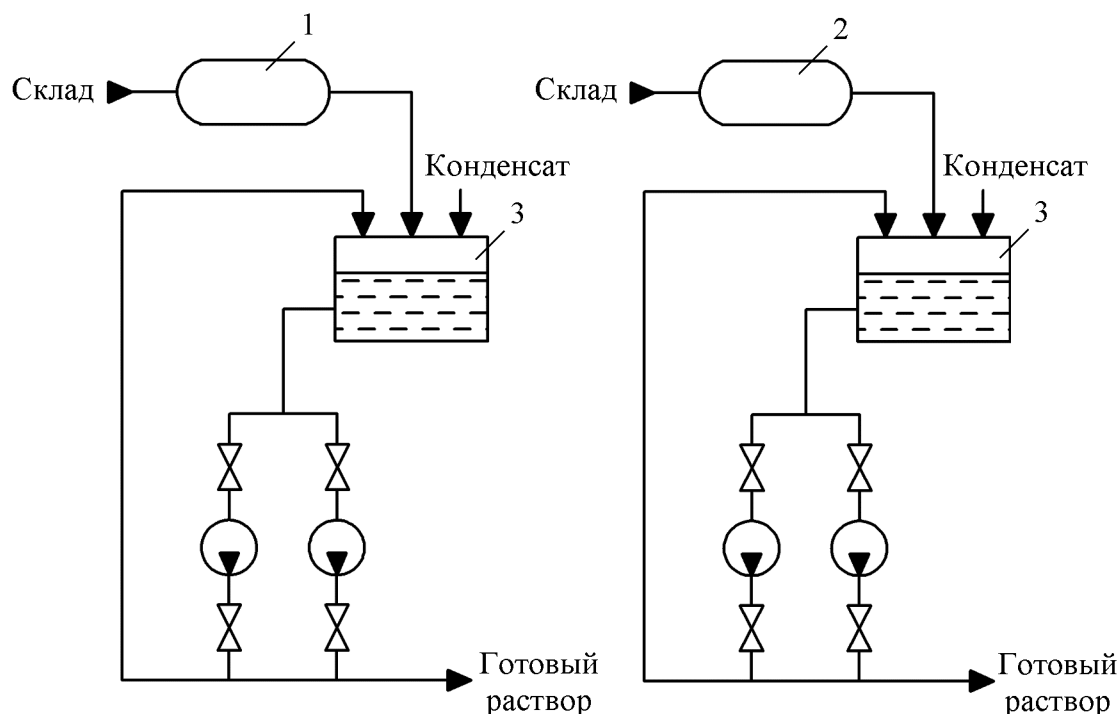


Рис. 9.7. Функциональная схема СВО-7 РБМК:
1 – монжюс со щелочью; 2 – монжюс с кислотой;
3 – бак щелочи; 4 – бак кислоты

Установка СВО-7 (рис. 9.7) имеет баки смешения, в которые со склада химреагентов подается концентрированная кислота и щелочь. Баки пред-

варительно заполняются чистым конденсатом. Перемешивание раствора осуществляется насосами по линии рециркуляции. Этими же насосами приготовленный раствор подается на регенерацию фильтров.

Установка приготовления дезактивирующих растворов (СВО-8).

По мере загрязнения радионуклидами технологического оборудования, а также с целью уменьшения дозовых нагрузок на обслуживающий персонал, на АЭС проводят дезактивацию оборудования. Для этого готовятся дезактивирующие растворы, содержащие кислоты, щелочи, поверхностно-активные вещества и другие компоненты.

Установка СВО-8 (рис. 9.8) включает в себя баки для приготовления разбавленных растворов кислот и щелочей и работает периодически. Первоначально баки заполняются чистым конденсатом, а затем со склада химических реагентов в них поступают концентрированные растворы реагентов в количестве, необходимом для приготовления требуемых концентраций. Сухие реагенты загружаются вручную через люк. Перемешивание и подогрев растворов осуществляются их циркуляцией через теплообменник. Подача приготовленных растворов потребителю осуществляется поочередно по одному трубопроводу. Подача дезактивирующих растворов для дезактивации КМПЦ осуществляется по самостоятельному трубопроводу, подающему растворы на всас насосов установки СВО-12.

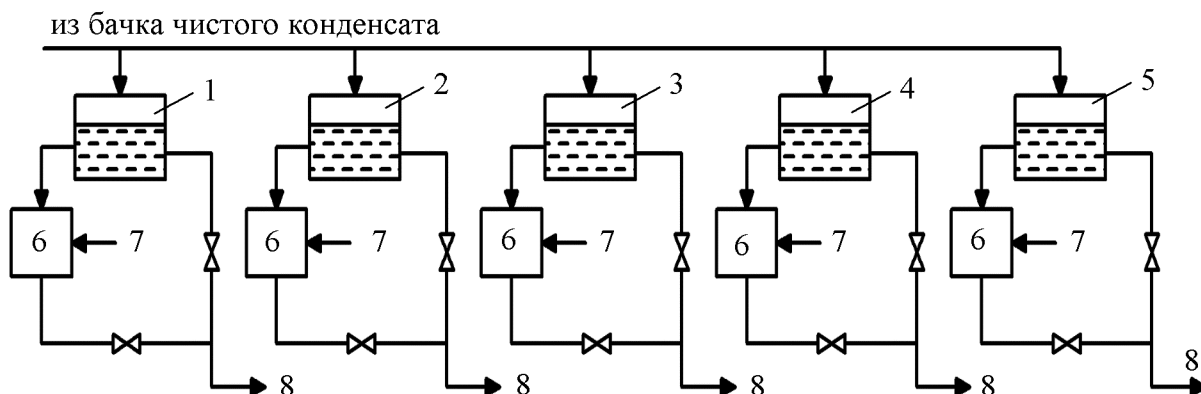


Рис. 9.8. Функциональная схема СВО-8 РБМК:

1 – перекись водорода; 2 – щавелевая кислота; 3 – азотная кислота; 4 – щелочь;
5 – чистый конденсат; 6 – теплообменник; 7 – пар; 8 – потребитель

Установка повторного использования дезактивирующих растворов (СВО-9) предназначена для дезактивации съемного оборудования в ваннах дезактивации и в ультразвуковой ванне.

Дезактивация съемного оборудования проводится с использованием кислот и щелочей, которые по мере дезактивации активируются и могут иметь активность 10^{-6} Ки/дм³ и более. Если активность используемых дезактивирующих растворов не превышает 10^{-6} Ки/дм³, то они сливаются в баки повторного использования. Далее растворы через теплообменники

подаются в бак дезактивации для очистки и повторного использования. Те дезактивирующие растворы, которые имеют активность выше 10^{-6} Ки/дм³, сбрасываются из баков в трап спецканализации.

Установка перекачки отработанных смол и перлита хранилище отходов (СВО-10) работает периодически. Отработанные ионообменные смолы и перлит из фильтрующих установок спецводоочисток и конденсатоочистки пневмотранспортером подаются в монжюс, откуда сжатым воздухом выгружаются в баки смол и перлита в хранилище жидких и твердых отходов.

Установка приготовления и намыва перлита (СВО-11) предназначена для подачи суспензии перлита на намывные фильтры установок СВО-2, СВО-3, СВО-5 и СВО-6.

Из контактных чанов суспензия перлита насосами намыва подается на фильтр из расчета 600 г на 1 м² фильтрующей поверхности. Частицы перлита намываются на фильтрующие элементы и за счет многократной циркуляции по контуру намыва образуют равномерный слой толщиной 4...5 мм на проволоке патрона. Вода, транспортирующая фильтроперлит, постепенно осветляется. Процесс намыва считается законченным, когда прозрачность пробы этой воды составляет примерно 30 %.

Установка очистки дезактивирующих растворов (СВО-12). При работе реактора образуется большое количество радионуклидов, которые создают условия повышенной радиационной опасности для обслуживающего персонала и негативно влияют на теплофизические процессы.

Для обеспечения соответствующих норм радиационной безопасности при обслуживании, а также при ремонте и осмотре оборудования, необходимо проведение регулярной дезактивации трубопроводов совместно с активной зоной реактора. Для этого используется большое количество дезактивирующих растворов, которые загрязняются по мере эксплуатации. Их очистка производится в установке СВО-12, которая включает в себя катионитовые и анионитовые фильтры, а также фильтр-ловушку ионитов. Производительность установки составляет 500 т/ч. Установка рассчитана на поочередную дезактивацию каждой петли КМПЦ совместно с активной зоной реактора. При истощении ионитов проводится их регенерация.

Установка очистки вод бассейнов-барботеров (СВО-13) (рис. 9.9) предназначена для очистки воды бассейна-барботера от продуктов стояночной коррозии, радионуклидов, поступающих с острым паром из редукционных устройств, и поддержания ее качества в соответствии с установленными нормами. Установка работает периодически в случае отклонения качества воды в бассейне от нормы. Состоит из двух ниток. Схема предусматривает их взаимозаменяемость.

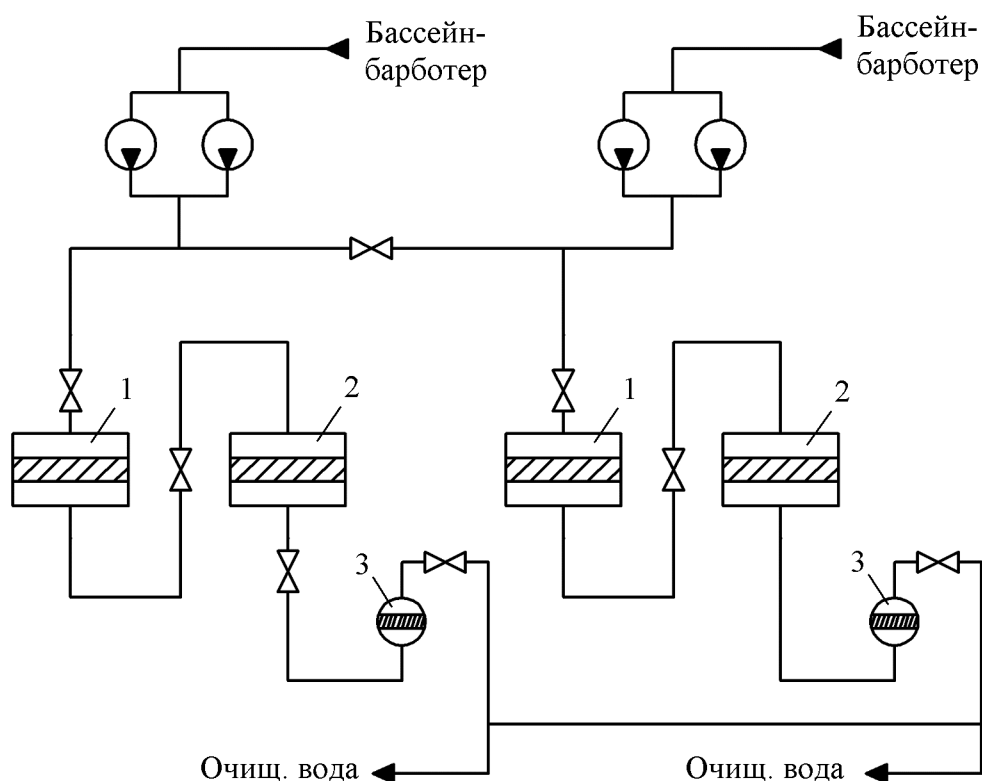


Рис. 9.9. Функциональная схема СВО-13 РБМК:
1 – катионитовый фильтр; 2 – анионитовый фильтр; 3 – фильтр-ловушка

Установка подготовки смол неядерного класса (СВО-14) предназначена для проведения регенерации и отмывки смол, а также для перетранспортировки поступивших на ХВО ионитов. Состоит из анионитового и катионитового фильтров.

Установка очистки воды промежуточного контура реакторного отделения (СВО-15). Вода промконтура загрязняется, в основном, продуктами коррозии конструкционных материалов, а также растворимыми примесями, поступающими с присосами охлаждающей воды в теплообменниках промконтура. Для очистки воды промконтура реакторного отделения, предназначена установка СВО-15. Продувка контура осуществляется с производительностью 10 т/ч.

Конденсатоочистка. В процессе работы энергоблока конденсат турбин загрязняется продуктами коррозии пароводяного тракта, которые выносятся насыщенным паром из барабанов-сепараторов, а также различными солями вследствие присоса охлаждающей воды. На качество конденсата турбин также влияет качество потоков вод, поступающих в конденсатор. Чтобы не допустить поступления в питательную воду различных примесей, в том числе и при аварийном разрыве трубок конденсаторов, предусмотрена конденсатоочистка производительностью 2700 м³/ч.

Установка обеспечивает нейтральный безкоррекционный водно-химический режим ЯЭУ с РБМК и является средством поддержания норм

качества конденсатно-питательного тракта. Кроме конденсата турбин на конденсатоочистку подается конденсат греющего пара ПНД, технологических конденсаторов, бойлеров промконтра теплосети, промконтра парогенераторов.

На механических фильтрах происходит очистка от нефтепродуктов, взвешенных веществ, мелкодисперсных продуктов коррозии и частично от катионов растворенных солей. Затем конденсат направляется на ФСД, где практически полностью поглощаются все ионы растворенных солей, содержащиеся в конденсате после механических фильтров.

В процессе длительной очистки конденсата происходит истощение обменной емкости ионитов, снижение коэффициента очистки. В этом случае фильтры регенерируются. Регенерацию проводят при удельной электропроводимости $0,3 \text{ мкСм/см}$, концентрации натрия на выходе МФ равной 5 мг/дм^3 .

Конденсатоочистка обеспечивает снижение удельной активности конденсата не менее чем на 2 порядка. При нормальной эксплуатации установки нагрузка отдельных МФ и ФСД не превышает $600 \text{ м}^3/\text{ч}$.

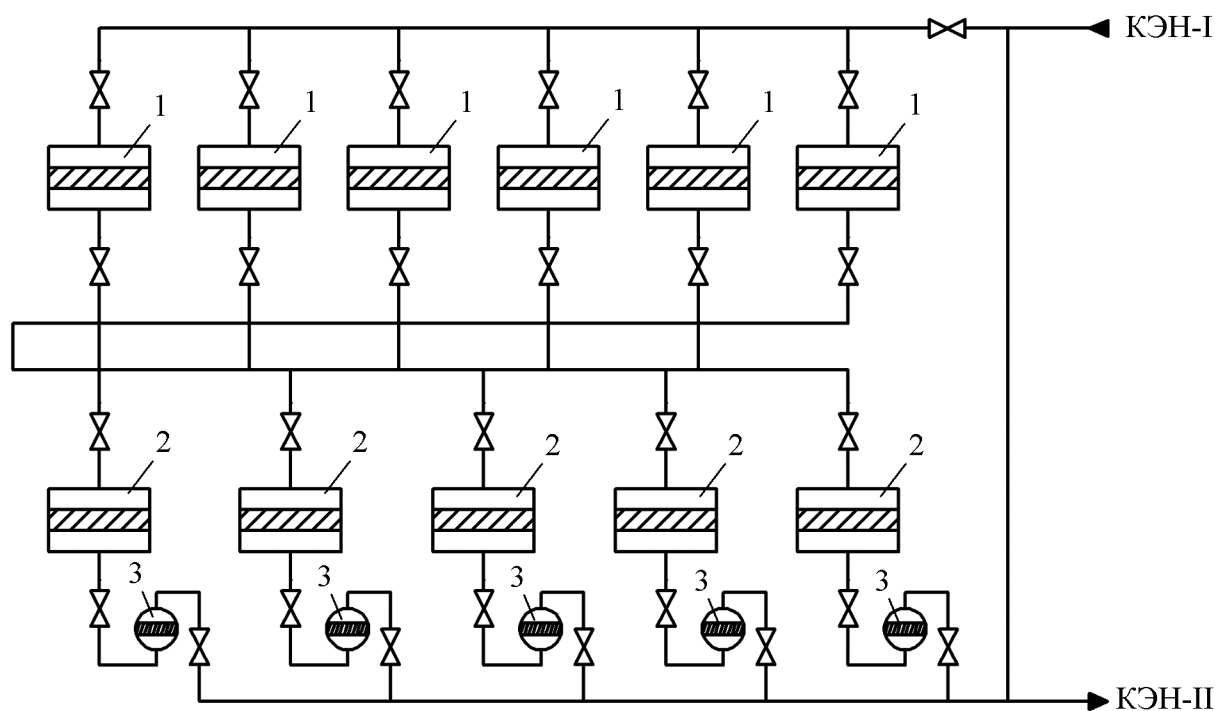


Рис. 9.10. Функциональная схема установки конденсатоочистки РБМК:

1 – механический фильтр; 2 – ФСД; 3 – фильтр-ловушка

Приложение А

Обозначения технологических систем ЯЭУ с ВВЭР-1000 (В-320)

OTR	–	система очистки трапных вод
OUG	–	система очистки вод спецпрачечной
RE	–	система очистки турбинного конденсата
RV	–	система ввода корректирующих добавок во второй контур
TB-20	–	система реагентного хозяйства
TC	–	система байпасной очистки теплоносителя
TD	–	система регенерации борной кислоты
TE	–	система очистки продувочной воды первого контура и организованных протечек
TM	–	система очистки вод бассейнов выдержки и перегрузки топлива и баков аварийного запаса борной кислоты
VB	–	система технической воды неответственных потребителей
VF	–	система технической воды ответственных потребителей

ЯЭУ с ВВЭР-1200 (В-392М)

FAL	–	система подачи вод бассейна выдержки на очистку
FBA	–	система проверки тепловыделяющих сборок и других элементов активной зоны
FKT	–	система приготовления и подачи дезактивирующих растворов
GCF	–	водоподготовительная установка
JEА50	–	система контроля уровня в ПГ и влажности пара
JMN	–	спринклерная система
JND	–	система аварийного ввода бора
KBA	–	система продувки-подпитки
KBB	–	система хранения теплоносителя эксплуатационного качества
KBC40-60	–	система борного концентрата
KBD	–	система подачи реагентов в теплоноситель первого контура
KBE50-60	–	система низкотемпературной очистки теплоносителя
KBF	–	система переработки теплоносителя
KBH	–	система очистки вод бассейна выдержки и перегрузки
KPF10-60	–	система переработки трапных вод
KPJ	–	система приготовления и подачи реагентов
KWC	–	система гидроиспытаний и продувки датчиков КИП боросодержащей водой

LAA	– система деаэрации
LAB10-50	– основные питательные насосы
LAC	– питательные насосы
LAN	– система вспомогательной питательной воды
LAJ	– вспомогательный питательный насос
LCA	– система трубопроводов основного конденсата
LCA70	– система трубопроводов возврата основного конденсата в деаэратор
LCB	– система насосов основного конденсата
LCM	– система дренажей здания турбины
LCQ10-40	– система продувки и дренажей парогенераторов
LCQ50	– система очистки продувочной воды парогенераторов
LCP10-80	– система обессоленной воды здания турбины
LDB	– система автономной обессоливающей установки
LDF	– система обезжелезивания и обессоливания конденсата турбины
LFN	– система коррекционной обработки второго контура
PCB10	– система охлаждения потребителей здания турбины
MAG	– система конденсаторов турбины
MAJ	– система вакуумирования главных конденсаторов
QCE	– система приема и приготовления гидразина
QCF	– система приема и приготовления аммиака

ЛИТЕРАТУРА

1. *Хоршева М.И.* Водоподготовка, спецхимочистка и химический контроль на атомных электростанциях / М.И. Хоршева. – Севастополь: СИЯЭиП, 2000. – 336 с.
2. *Акимов А.М.* Системы и оборудование химических цехов АЭС / А.М. Акимов, А.В. Кулибов, А.А. Кузьмин. – Севастополь: СИЯЭиП, 2002.
3. *Маргулова Т.Х.* Водные режимы тепловых и атомных электростанций / Т.Х. Маргулова, О.И. Мартынова. – М.: Высшая школа, 1987.
5. *Мартынова О.И.* Химический контроль водного режима атомных электростанций / О.И. Мартынова, Л.М. Живилова, Н.П. Субботина. – М.: Атомиздат, 1980.
6. *Сукрушев А.В.* Водный режим контуров АЭС / А.В. Сукрушев, Ю.В. Браславский: учеб. пособие. – Севастополь: СНУЭЯиП, 2013. – 220 с.; ил.
7. *Воронов В.Н.* Химико-технологические режимы АЭС с водородными энергетическими реакторами: учеб. пособие для вузов / В.Н. Воронов, Б.М. Ларин, В.А. Сенина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 390 с.: ил.
8. *Рощектаев Б.М.* Водно-химический режим АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК-1000: учеб. пособие / Б.М. Рощектаев. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 132 с.
9. *Карелин В.А.* Водоподготовка для АЭС. Проектирование и расчет водоподготовительной установки: учеб. пособие / В.А. Карелин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 98 с.
10. *Гостьков В.В.* Режимы и нормы эксплуатации оборудования по химико-радиационному цеху АЭС / В.В. Гостьков. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 1999. – 258 с. – ISBN 5 – 89482-033-2.
11. Стандарт организации «Водно-химический режим первого контура энергоблоков атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000. Нормы качества теплоносителя и средства их обеспечения» СТО.1.1.1.02.005.004-2012. – М.: ОАО «Коцерн Росэнергоатом».
12. Стандарт организации «Ведение водно-химического режима второго контура на АЭС с ВВЭР-1000, включающего все применяемые режимы (гидразиино-аммиачный, этаноаминовый, морфолиновый). Нормы качества рабочей среды и средства их обеспечения» СТО.1.1.1.07.003.0818-2010. – М.: ОАО «Коцерн Росэнергоатом».
13. Стандарт организации «Водно-химический режим основного технологического контура и вспомогательных систем атомных электростанций с реакторами РБМК-1000» СТО.1.1.1.02.013.0715-2009. – М.: ОАО «Коцерн Росэнергоатом».

Учебное издание

**Сукрушев Александр Владимирович
Браславский Юрий Валентинович**

**ОСНОВЫ
ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА
КОНТУРОВ ЯЭУ АЭС**

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Изд. № 95/17. Объем 16,25 п.л. Усл. печ. л. 15,11. Уч.-изд.л. 15,925.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»