МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Основные системы энергоблока с реактором РБМК-1000

Учебное пособие

Допущено Федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по УГСН 14.00.00 Ядерная энергетика и технологии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» и по направлению подготовки 14.03.01, 14.04.01 «Ядерная энергетика и теплофизика»

Москва 2021

УДК 621.039.524.2.034.44 (075.8)
ББК 31.47
О 75

Основные системы энергоблока с реактором РБМК-1000: Учебное пособие // В.И. Слободчук, С.Т. Лескин, А.С. Шелегов, Д.Ю. Кашин [Электронный ресурс]. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – 76 с.

Пособие посвящено описанию систем энергоблоков для реакторных установок второго поколения. Материал изложен более сжато, чем в имеющихся монографиях, и дополнен сведениями из инструкций по эксплуатации основного оборудования и систем указанных энергоблоков. Учебное пособие написано в соответствии с учебным планом специальности 14.05.02 – «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг».

Рассчитано на студентов 4, 5 курсов, обучающихся по специальности 14.05.02 – «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», а также по направлению подготовки 14.03.01; 14.04.01 – Ядерная энергетика и теплофизика. Оно также может быть полезным для студентов смежных специальностей, изучающих курс «Ядерные энергетические установки».

Рецензент А.В. Морозов, доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

ISBN 978-5-7262-2752-8

© *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2021*

Редактор *Е.Е. Шумакова*
Оригинал-макет подготовлен *С.В. Тялиной*

Подписано в печать 24.09.2021. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 4,75. Уч.-изд. л. 4,75. Изд. № 014-1.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
155409 Москва, Каширское шоссе, 31.

Содержание

1. Реакторная установка с реактором РБМК-1000. 4
2. Система продувки и расхолаживания (СПиР)..... 9
3. Газовый контур. 11
4. Контур охлаждения каналов системы управления
и защиты (СУЗ), каналов контроля энерговыделения (ДК),
каналов охлаждения отражателя (КОО). 14
5. Система аварийного охлаждения реактора (САОР). 18
6. Система локализации аварий. 26
7. Система защиты реакторного пространства
от превышения давления. 30
8. Трубопроводы острого пара. 33
9. Конденсационная установка 36
10. Система технического водоснабжения. 44
10.1. Основные потребители технической воды..... 44
10.2. Типы систем технического водоснабжения 45
10.3. Влияние температуры охлаждающей воды
и кратности охлаждения на давление в конденсаторе 50
11. Тракт основного конденсата. 52
12. Деаэрационная установка. 61
12.1. Способы деаэрации..... 62
12.2. Типы деаэраторов 65
12.3. Размещение деаэраторов на электростанциях. 71
13. Система питательной воды 72
Список литературы 76

1. Реакторная установка с реактором РБМК-1000

Материалы, изложенные в данном пособии, относятся в основном к энергоблокам с реактором РБМК-1000 второго поколения. В состав энергоблока входят ядерная паропроизводящая установка водографитового типа единичной электрической мощностью 1000 МВт. Технологическая схема энергоблока одноконтурная.

Принципиальная технологическая схема энергоблока с реактором РБМК-1000 представлена на рис. 1.1.

В состав реакторной установки с реактором РБМК-1000 входят: водографитовый реактор РБМК-1000, контур многократной принудительной циркуляции (КМПЦ), контур охлаждения каналов СУЗ и ряд вспомогательных систем.

Реактор водографитовый, канальный, гетерогенный, на тепловых нейтронах. Представляет собой систему металлоконструкций, окружающих графитовую кладку. Форма графитовой кладки близка к цилиндрической. Служит замедлителем нейтронов, состоит из 2488 графитовых колонн, набранных из графитовых блоков. Каждая колонна набирается из 14 графитовых блоков, установленных друг на друга. Графитовый блок представляет собой прямоугольный параллелепипед квадратного поперечного сечения размером 250×250 мм и высотой 600, 500, 300 и 200 мм. Основное количество графитовых блоков имеет высоту 600 мм. Укороченные блоки устанавливаются только первыми и последними по порядку и обеспечивают общую высоту графитовой кладки 8 м. Этим же достигается смещение стыков между блоками соседних графитовых колонн по высоте, что обеспечивает защиту от прямого «простре-ла» нейтронов. Блоки имеют осевое отверстие диаметром 114 мм, образующее в колонне тракт для размещения технологического канала, канала СУЗ. В отверстия колонн бокового отражателя устанавливаются графитовые стержни или тракты каналов охлаждения отражателя. В технологические каналы загружаются тепловыделяющие кассеты с твэлами. Крепление графитовой кладки от перемещения в радиальном направлении осуществляется штангами, расположенными в периферийных колоннах бокового отражателя. Боковой отражатель, имеющий среднюю толщину 880 мм, состоит из графитовых колонн квадратного сечения. Нижний и верхний

отражатели имеют толщину 500 мм. Масса графитовой кладки – около 1700 т. Подробное описание конструкции реактора можно найти в [1]. Некоторые технические характеристики реактора РБМК-1000 приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Основные технические характеристики реактора РБМК-1000

Характеристика	Размерность	Величина
Мощность электрическая	МВт	1000
Мощность тепловая	МВт	3200
Число технологических каналов	шт.	1661
Расход теплоносителя через реактор	кг/с	10440
Давление пара в сепараторах	МПа	6,87
Давление в напорных коллекторах ГЦН	МПа	8,1
Среднее паросодержание на выходе из реактора	масс. %	14,5
Температура теплоносителя, вход/выход	°С	270/284,5
Высота активной зоны	мм	7000
Диаметр активной зоны	мм	11800
Шаг решетки технологических каналов	мм	250

Контур многократной принудительной циркуляции (КМПЦ) предназначен для подачи воды в технологические каналы реактора для отвода тепла от тепловыделяющих сборок и от графитовой кладки. КМПЦ состоит из двух петель, оборудование которых расположено симметрично относительно вертикальной осевой плоскости реактора. Каждая петля осуществляет охлаждение половины топливных каналов реактора. Связь между петлями по воде отсутствует. Схема петли КМПЦ представлена на рис. 1.2.

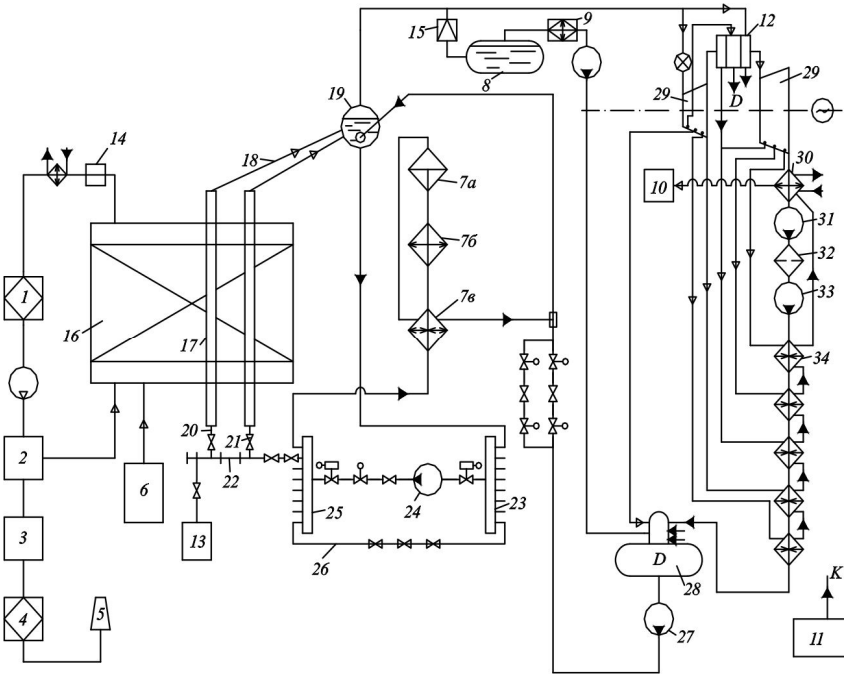


Рис. 1.1. Принципиальная технологическая схема энергоблока с РБМК-1000:

1 – аэрозольный и йодный фильтр, *2* – адсорбер CO_2, CO, H_2, NH_3, *3* – газгольдер для выдержки газа, *4* – аэрозольный фильтр, *5* – вентиляционная труба, *6* – азотная установка, *7а* – фильтр СПИР, *7б* – доохладитель продувки, *7в* – регенеративный теплообменник системы продувки, *8* – барботер, *9* – технологический конденсатор, *10* – спецгазоочистка, *11* – добавка химически очищенной воды, *12* – сепаратор-пароперегреватель, *13* – от гидробаллонов САОР (активная часть), *14* – система КЦТК, *15* – быстродействующая редукционная установка, *16* – графитовая кладка, *17* – технологический канал, *18* – верхние пароводяные коммуникации, *19* – барабан-сепаратор, *20* – нижние водяные коммуникации, *21* – запорно-регулирующий клапан, *22* – раздаточный групповой коллектор, *23* – всасывающий коллектор ГЦН, *24* – ГЦН, *25* – напорный коллектор ГЦН, *26* – байпасная линия, *27* – питательный насос, *28* – деаэратор основной, *29* – турбина, *30* – конденсатор основной, *31*, *33* – конденсатный насос первого и второго подъема, *32* – конденсатоочистка, *34* – ПНД

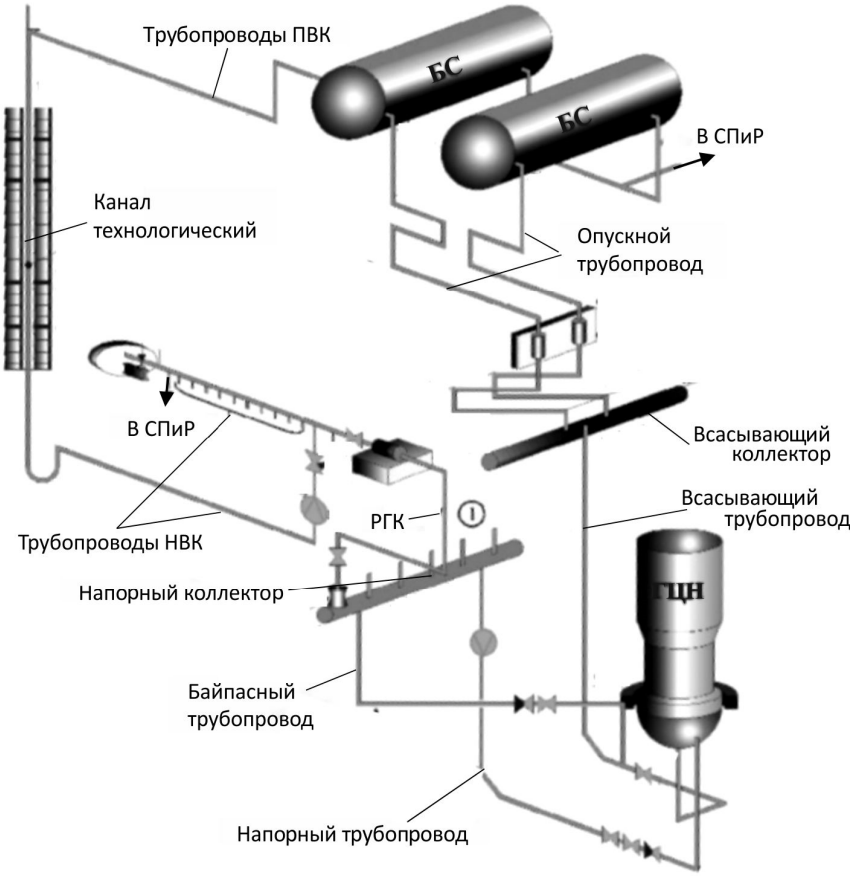


Рис. 1.2. Схема петли КМПЦ

Одна циркуляционная петля включает: два барабана – сепаратора пара (БС); опускные трубопроводы ∅325×15 мм (12 трубопроводов на один БС); четыре главных циркуляционных насоса (ГЦН) типа ЦВН-8; всасывающий (ВК) и напорный (НК) коллекторы ГЦН Ду900; раздаточные групповые коллекторы (РГК) ∅325×15 мм; трубы нижних водяных коммуникаций (НВК) ∅57×3,5 мм с запорно-регулирующими клапанами (ЗРК) и расходомерами; технологические (топливные) каналы (ТК); трубы верхних пароводяных коммуникаций (ПВК) ∅76×4 мм. Всасывающий и напорный кол-

лекторы ГЦН соединены байпасной линией – трубопроводом диаметром 836×42 мм, на котором установлены нормально открытая задвижка и обратный клапан. Байпасы предназначены для обеспечения естественной циркуляции теплоносителя через реактор при аварийном отключении ГЦН.

В режимах нормальной эксплуатации три из четырех ГЦН находятся в работе, а один – в резерве. После ГЦН вода с температурой 270 °С и давлением 8.1 МПа по напорным трубопроводам, на которых последовательно установлены обратный клапан, запорная задвижка и дроссельно-регулирующий клапан (ДРК), подается в напорный коллектор ГЦН. Оттуда вода поступает в РГК, на входе в которые установлены обратные клапаны, и далее по индивидуальным трубопроводам НВК подается на вход в технологические каналы (ТК). Расход теплоносителя через каждый ТК регулируется с помощью ЗРК. Проходя по ТК, вода нагревается до температуры насыщения, частично испаряется, и пароводяная смесь с температурой 284,5 °С, средним массовым паросодержанием 14,5 % и давлением ~7 МПа по индивидуальным трубопроводам ПВК поступает в БС, где разделяется на пар и воду. Для поддержания одинакового уровня барабаны-сепараторы каждой половины реактора соединены по воде и пару перемычками. Насыщенный пар через паровые коллекторы и трубопроводы острого пара направляется к турбинам. Отсепарированная в БС вода смешивается с подаваемой в них питательной водой и по опускным трубам (12 штук на каждый БС) подается во всасывающий коллектор ГЦН.

Температура воды, подаваемой во всасывающий коллектор, зависит от паропроизводительности реакторной установки. Со снижением паропроизводительности температура несколько возрастает за счет меняющегося соотношения количества воды, забираемой из барабанов-сепараторов с температурой насыщения, и питательной воды с температурой 165 °С. При снижении мощности реактора расход теплоносителя по контуру МПЦ регулируется с помощью ДРК таким образом, что температура на всасе ГЦН обеспечивает необходимый запас до кавитации.

2. Система продувки и расхолаживания (СПиР)

Система предназначена:

в нормальном режиме – для охлаждения продувочной воды контура МПЦ перед очисткой с последующим подогревом ее перед возвратом в контур;

в режиме расхолаживания КМПЦ – для отвода тепла из КМПЦ при плановом останове блока со скоростью не более 10 °С/ч; в аварийных случаях допускается скорость расхолаживания до 30 °С/ч;

в пусковых режимах – для поддержания скорости разогрева КМПЦ от ГЦН не более 10 °С/ч и для сброса дебалансных вод из контура.

В состав СПиР входят:

насосная установка с двумя насосами типа ЦНР 500-115;

теплообменная установка, состоящая из шестисекционного (восьмисекционного) регенератора ПР-РГ1, доохладителя продувки ПР-Д1 и двухсекционного малого доохладителя продувки ПР-Д2;

соединительные трубопроводы и арматура;

средства контроля и управления.

Схема СПиР представлена на рис. 2.1.

Регенератор продувки ПР-РГ1 предназначен для охлаждения продувочной воды перед подачей ее в доохладитель и нагрева очищенной на фильтрах СВО воды перед возвратом ее в контур. Малый доохладитель продувки ПР-Д2 предназначен для дальнейшего охлаждения продувочной воды после регенератора с 68 °С на входе до 45÷50 °С на выходе перед подачей ее на фильтры СВО. Доохладитель продувки ПР-Д1 предназначен для отвода излишков тепла из КМПЦ при разогреве контура от ГЦН и для отвода тепла остаточных тепловыделений и аккумулированного тепла от остановленной ЯППУ при ее расхолаживании.

Система продувки и расхолаживания предусматривает два режима работы:

а) режим продувки;

б) режим расхолаживания.

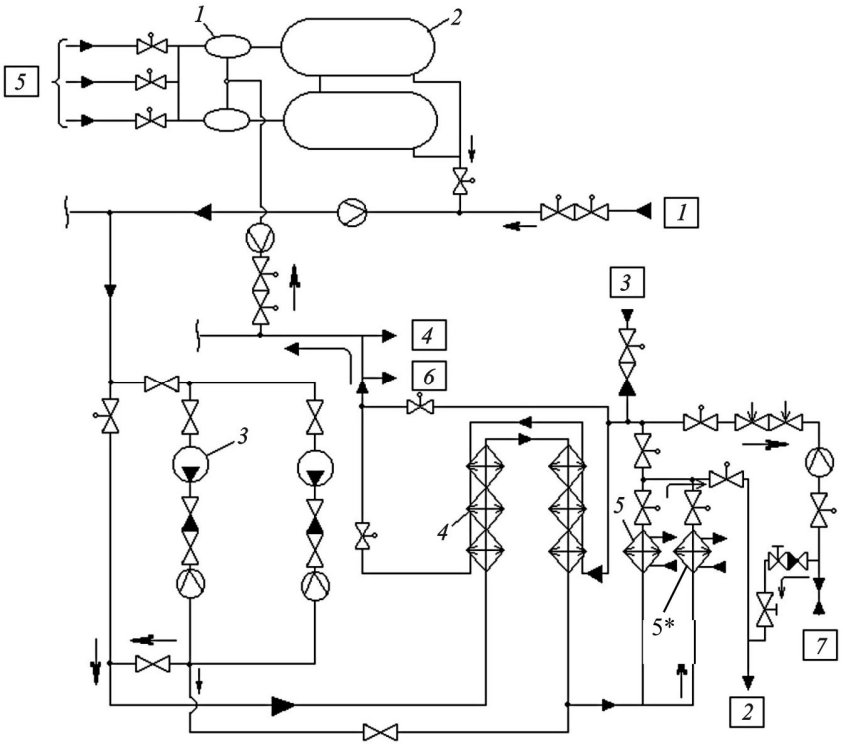


Рис. 2.1. Схема СПиР РБМК-1000:
1 – смеситель, *2* – барабан-сепаратор, *3* – насос расхолаживания (НР – 1,2), *4* – регенератор шестисекционный ПР-РГ1, *5* – доохладитель продувки ПР – Д1, *5** – двухсекционный малый доохладитель продувки ПР – Д2. Линии связи: [1] – от напорного коллектора ГЦН, [2] – на спецводоотчиску (СВО), [3] – от СВО, [4] – в бак опорожнения основного контура, [5] – от питательных электронасосов (ПЭН), [6] – в САОР, [7] – сброс и возврат контура МПЦ при пуске

В режиме продувки СПиР работает при:

ядерном разогреве КМПЦ;

работе блока в номинальном режиме;

при останове блока до перевода системы в режим расхолаживания.

В режиме расхолаживания СПиР работает в следующих случаях:

при разогреве КМПЦ от ГЦН;

при расхолаживании блока для останова;

на остановленном блоке.

В номинальном режиме теплоноситель КМПЦ расходом 200 т/ч (по 100 т/ч с каждой петли) под напором ГЦН поступает в регенератор ПР-РГ1, где охлаждается с 270 до 68 °С за счет отвода тепла обратному потоку, а затем дополнительно охлаждается водой промконтура в малом доохладителе продувки ПР-РД2 до 45–50 °С и поступает на систему очистки контурной воды. Очищенная вода, проходя регенератор ПР-РГ1 в обратном направлении, нагревается с 45–50 °С до 245–250 °С и возвращается в барабаны-сепараторы через смесители на трубопроводах питательной воды.

В режиме расхолаживания блока СПиР обеспечивает снижение температуры воды в КМПЦ, начиная со 180 °С до величины, требуемой по условиям ремонта блока. Циркуляция осуществляется при этом по тракту: барабаны-сепараторы – насосы расхолаживания – большой доохладитель ПР-РД1 – смесители.

СПиР может также использоваться для отвода остаточных тепловыделений реактора в режиме обесточивания собственных нужд энергоблока. Схема работы в этом режиме такая же, как и в режиме расхолаживания.

СПиР также используется для поддержания заданной температуры в КМПЦ при проведении ремонтных работ.

3. Газовый контур

Газовый контур РБМК-1000 относится к системам нормальной эксплуатации, важным для безопасности. Основные функции газового контура:

предотвращение окисления графитовой кладки;

улучшение теплоотвода от графитовой кладки к технологическим каналам;

обеспечение работы системы контроля целостности технологических и специальных каналов (КЦТК);

защита реакторного пространства от аварийного роста давления при разрывах технологических каналов.

Принципиальная схема газового контура представлена на рис. 3.1.

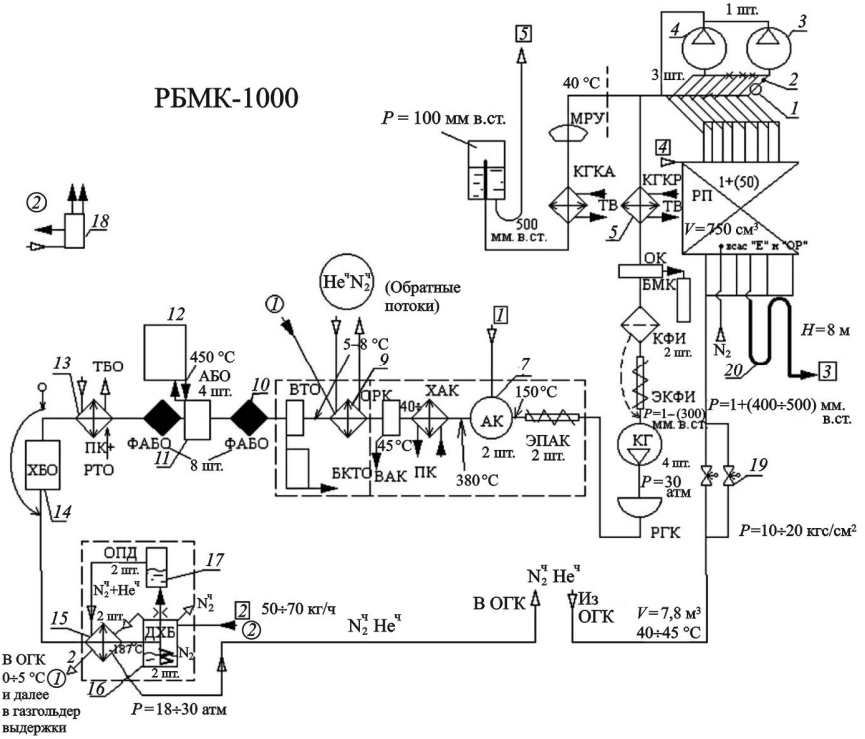


Рис. 3.1. Принципиальная схема газового контура РБМК-1000:
1 – клапан групповой (26 шт.), *2* – датчик влажности (26 шт.), *3* – вакуумирующая установка, *4* – воздуходувка, *5* – рабочий конденсатор газового контура, *6* – компрессор газового контура, *7* – аппарат контактный (АК), *8* – холодильник АК, *9* – ожижитель газового контура, *10* – фильтр-адсорбер блока очистки, *11* – адсорбер блока очистки (АБО), *12* – узел регенерации АБО, *13* – теплообменник блока очистки, *14* – холодильник блока очистки, *15* – теплообменник основной холодного блока, *16* – дефлегматор основного блока, *17* – очиститель пара дефлегматора, *18* – узел приема пара при опорожнении ГК и очистке ГК, *19* – редуктор, *20* – гидрозатвор линии дренажей с верхней плиты схемы ОР.
Линии связи: [1] – кислород на контактный аппарат, [2] – жидкий азот для промывки, [3] – в бак дренажей, [4] – азот для создания избыточного давления вокруг РП, [5] – в вентиляционную трубу

В нормальном режиме система циркуляции газа через кладку работает следующим образом. Газ подается после узла редуцирования (*19*) в реакторное пространство снизу по четырем трубопроводам диаметром 300 мм. С помощью диафрагмы происходит выравнивание расхода газа по сечению входа в кладку реактора. Затем газ проходит по зазорам между поверхностями отверстий в графитовых блоках, канальных труб и колец. Газовые тракты специальных каналов образованы зазорами между кладкой и графитовыми втулками, надетыми на канал. Пройдя кладку, газ на выходе из реактора попадает в индивидуальные для каждого канала импульсные трубки, расположенные в надреакторном пространстве, которые через проходные барабаны выведены в помещение КЦТК.

Далее газ поступает в систему КЦТК, где осуществляется контроль температуры в каждой импульсной трубке и групповой контроль влажности прокачиваемой смеси. Все импульсные трубки разделены на 26 групп, трубки каждой группы подсоединены к своему групповому клапану (коллектору). По коллектору вентиляции или коллектору усиленного отсоса (в зависимости от режима работы системы КЦТК) газ поступает в технологическую часть газового контура реактора и в первую очередь в узел конденсаторов и фильтров. Здесь происходит конденсация водяного пара, попавшего в азотно-гелиевую смесь в случае разгерметизации технологического канала (каналов), а также очистка газовой смеси от йода. Пройдя узел конденсаторов и фильтров, газовая смесь поступает на компрессор газового контура.

Компрессор обеспечивает циркуляцию азотно-гелиевой смеси через реакторное пространство по замкнутому контуру. После компрессоров газ поступает на установку очистки гелия (УОГ). Эта установка предназначена для трехступенчатой очистки газовой смеси от примесей. В состав УОГ входят блок контактных аппаратов, где происходит дожигание водорода и оксида углерода, блок очистки и осушки для удаления примесей (CO_2, NH_3, углерода, паров воды) и блок глубокой очистки (холодный блок). В холодном блоке происходит охлаждение азотно-гелиевой смеси до температуры жидкого азота. Происходит частичная конденсация азота, конденсация других примесей. Очищенная азотно-гелиевая смесь далее поступает в ожижитель газового контура, после него на блок редуцирования и далее в реактор.

Предусмотрен следующий контроль параметров газа, циркулирующего через кладку реактора:

поканальный контроль температуры газа на выходе из реакторного пространства с помощью термопар, установленных в каждой импульсной линии системы КЦТК в специальных карманах перед групповыми клапанами;

постоянный контроль относительной влажности газа на выходе из реакторного пространства в 26 групповых клапанах системы КЦТК и в коллекторе вентиляции системы КЦТК;

автоматический контроль состава газовой смеси в кладке реактора и на выходе из реакторного пространства газоанализаторами;

контроль за расходом газа на входе в реакторное пространство;

контроль давления газа на входе в реакторное пространство во всех парогазовых трубопроводах и в кладке реактора;

периодический контроль влажности и состава газа на входе-выходе из реакторного пространства методом отбора проб и лабораторного анализа (табл. 3.1).

Таблица 2

Допустимое содержание примесей газа на входе-выходе из реактора при расходе газовой смеси 400 нм^3/ч

Место контроля состава газа	Содержание примесей, об. %, не более					
	O_2	$CO+ CO_2$	H_2	CH_4	NH_3	Cl
На входе РП	0,01	0,01	0,3	0,1	0.001	–
На выходе РП	–	0,02	0,6	0,2	0,1	0,001

4. Контур охлаждения каналов системы управления и защиты (СУЗ), каналов контроля энерговыделения (ДК), каналов охлаждения отражателя (КОО)

Для охлаждения каналов СУЗ, датчиков контроля энерговыделения по высоте, пусковых ионизационных камер и охлаждения бокового отражателя создан специальный автономный циркуляционный контур. Он выполняет следующие функции:

поддерживает температуру охлаждающей воды на входе в каналы управления равной ≈ 40 °С;

отводит от каналов органов регулирования определенную тепловую мощность;

обеспечивает охлаждение каналов органов регулирования номинальным расходом в течение не менее трех минут при неработающих насосах;

поддерживает взрывобезопасную концентрацию водорода во всех режимах работы;

поддерживает необходимое качество воды, охлаждающей каналы СУЗ.

Схема контура охлаждения каналов СУЗ, КД, КОО представлена на рис. 4.1.

Каналы СУЗ, КД и АЗ (аварийной защиты) имеют одинаковую конструкцию и различаются только устройствами, которые в них размещаются. Каналы охлаждения отражателя (КОО) по конструкции представляют собой трубки Фильда.

В номинальном режиме вода из раздающего коллектора по индивидуальным трубопроводам подается в верхнюю часть каналов СУЗ и КОО. В каналах СУЗ вода движется сверху вниз, охлаждая каналы, и далее по индивидуальным трубопроводам отводится в сливной коллектор каналов СУЗ и сливной коллектор каналов АЗ, расположенных в подреакторном помещении. В каналах охлаждения отражателя охлаждающая вода из верхней части канала по центральной трубке опускается вниз, по кольцевому зазору поднимается вверх и далее по индивидуальным трубопроводам отводится в сливные коллекторы КОО, расположенные в том же боксе, где и раздающий коллектор. Из сливных коллекторов СУЗ и КОО вода поступает в общий сливной коллектор и подается на вход в теплообменники, где охлаждается технической водой. После теплообменников вода поступает через байпас циркуляционного бака (ЦБ) во всасывающий коллектор насосов. В ЦБ в нормальном режиме работы имеется запас воды, обеспечивающий требуемый подпор для бескавитационной работы циркуляционных насосов. Для исключения образования газовых полостей из верхних точек сливного коллектора СУЗ и теплообменников организованы линии сброса газоводяной смеси в циркуляционный бак.

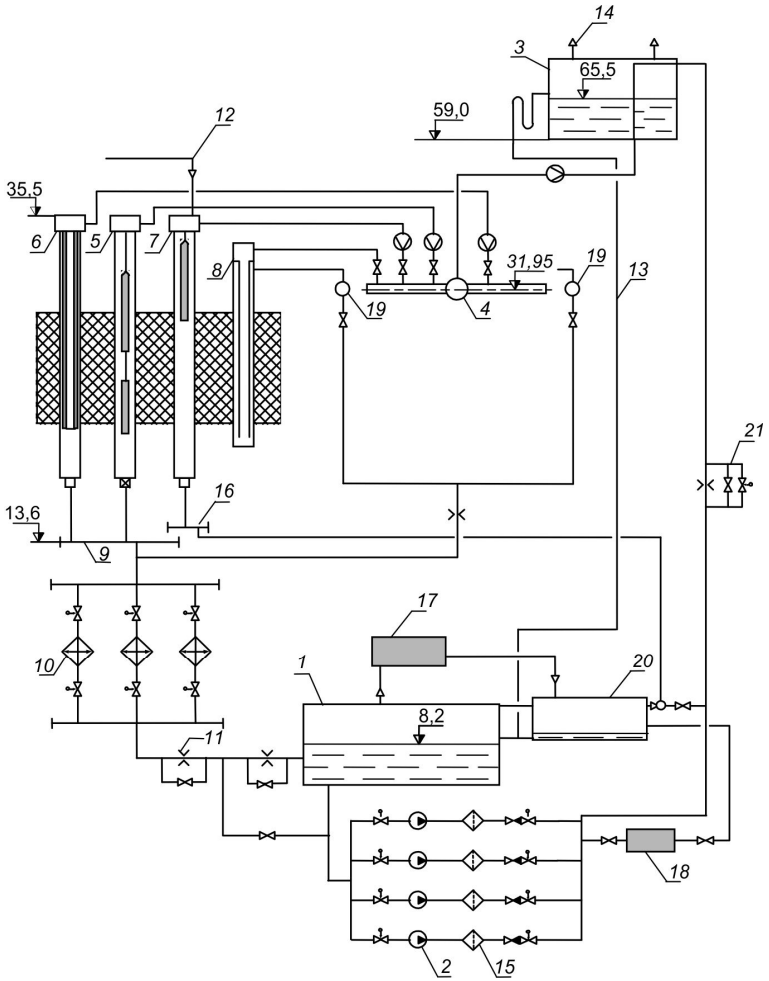


Рис. 4.1. Принципиальная схема контура охлаждения СУЗ И КОО: *1* – циркуляционный бак, *2* – циркуляционные насосы, *3* – аварийный бак (АБ), *4* – раздающий коллектор, *5* – канал СУЗ, *6* – канал СУЗ с КРО, *7* – канал АЗ, *8* – канал охлаждения отражателя (КОО), *9* – сливной коллектор СУЗ, *10* – теплообменники СУЗ, *11* – подпорное устройство, *12* – подвод азота к каналам АЗ, *13* – переливной трубопровод, *14* – вытяжная вентиляция АБ, *15* – механические фильтры, *16* – сливной коллектор АЗ, *17* – система вентиляции баков СУЗ, *18* – установка байпасной очистки, *19* – сливные коллекторы КОО, *20* – сливной бак, *21* – узел регулирования расхода воды

Каналы СУЗ, КД и КОО охлаждаются водой, полностью заполняющей их проходное сечение. Каналы АЗ охлаждаются в пленочном режиме. Охлаждающая вода при взведенных вверх стержнях АЗ в виде пленки стекает по внутренней поверхности канала в его нижнюю часть. На участке активной зоны в каналах АЗ образована газовая полость, которая для исключения накопления водорода вентилируется азотом. Азот подается в головки каналов по индивидуальным трубопроводам от газового раздающего коллектора. Из каналов АЗ азотно-водяная смесь по индивидуальным трубопроводам отводится в сливной коллектор каналов АЗ и далее по трубопроводу, минуя теплообменник, сливается в ЦБ.

В контуре установлены параллельно четыре насоса, в работе находятся два из них. Насосы подают воду в напорный трубопровод, который врезан в раздающий коллектор СУЗ и имеет сифонный участок с воздушником. Это устройство предназначено для исключения слива воды из аварийного бака в циркуляционный бак, минуя каналы реактора, при аварийном отключении насосов.

Если проводились ремонтные работы, связанные с опорожнением контура СУЗ, то контурная вода подается в циркуляционный бак. При этом задвижка на байпасе ЦБ закрыта. После удаления воздуха из всех участков контура задвижка на байпасе ЦБ открывается, и тем самым исключается из циркуляции вода в ЦБ. Это обеспечивает при работе реактора на мощности сокращение выхода в газовый объем ЦБ продуктов радиолиза воды и радиоактивного ^{41}Ar. Газовый объем над уровнем воды в ЦБ продувается воздухом при помощи замкнутой системы вентиляции. Безопасная концентрация водорода обеспечивается дожиганием его на контактных аппаратах замкнутой системы вентиляции. Газ, поступающий в ЦБ из каналов АЗ, направляется в камеру выдержки, а затем сбрасывается через спецвентиляцию в венттрубу.

Аварийный бак (АБ) контура предназначен для обеспечения охлаждения каналов СУЗ при аварийном останове насосов. В этой ситуации вода в раздающий коллектор и далее в каналы поступает из АБ самотеком под действием нивелирного напора. Запас воды в баке и нивелирный напор выбраны таким образом, чтобы обеспечить охлаждение каналов СУЗ и КОО практически номинальным расходом в течение не менее трех минут после останова насосов. За это время система аварийного электроснабжения должна обеспе-

чить включение насосов и восстановление нормального охлаждения.

При снижении уровня воды в АБ на 15 % от номинального подается сигнал на включение в работу резервного насоса, который должен восстановить номинальный уровень в АБ. При снижении уровня в АБ на 25 % от номинального формируется сигнал на срабатывание аварийной защиты реактора.

При нормальной работе контура вода баков АБ и ЦБ не участвует в циркуляции через активную зону и является аварийным запасом. Через переливную трубу АБ соединен с ЦБ, и при превышении уровня в АБ излишки воды сбрасываются в ЦБ. При этом возможно поступление воздуха из АБ в ЦБ, что существенно ухудшает режим работы системы вентиляции ЦБ. При нормальном режиме работы уровень воды в аварийном баке поддерживается на 200 мм ниже уровня горловины переливного трубопровода. Пространство над уровнем воды в АБ продувается воздухом для удаления продуктов радиолиза со сбросом газа в спецвентиляцию.

Очистка воды контура охлаждения каналов СУЗ осуществляется в установке байпасной очистки. Вода на очистку забирается с напора насосов и возвращается после очистки в циркуляционный бак. Предусмотрена также система подпитки контура, которая автоматически включается по сигналу снижения уровня в ЦБ.

5. Система аварийного охлаждения реактора (САОР)

САОР является защитной системой безопасности и предназначена для обеспечения отвода остаточного тепловыделения посредством подачи требуемого количества охлаждающей воды в каналы реактора при авариях, сопровождающихся нарушениями охлаждения активной зоны. К таким авариям относятся: разрывы трубопроводов КМПЦ большого диаметра; разрывы паропроводов свежего пара; разрывы трубопроводов питательной воды. Кроме того, САОР может использоваться для аварийной подачи воды в каналы реактора в ситуациях, не связанных с разрывом трубопроводов, но приводящих к невозможности ее подачи штатными системами (например, запаривание питательных насосов, аварийных питательных насосов).

САОР включается в работу по следующим сигналам:

повышение давления в помещениях трубопроводов КМПЦ ≥ ≥ 0,12 МПа (1,2 кгс/см^2);

снижение уровня в БС на 800 мм и более по отношению к номинальному;

снижение перепада давления между напорным коллектором ГЦН и БС до значения 0,3 МПа (3 кгс/см^2).

САОР должна удовлетворять следующим основным требованиям:

автоматически включаться в работу по сигналу аварии и отличать аварийную половину реактора от неаварийной;

обеспечить подачу воды в аварийную и неаварийную половины реактора с расходами, обеспечивающими отсутствие плавления, массового перегрева и разгерметизации твэлов;

быстродействие САОР должно быть таким, чтобы перерыв в подаче воды в аварийную половину реактора при возникновении аварии не превышал 3,5 с;

система должна состоять из нескольких независимых каналов и обеспечивать требуемую эффективность при независимом от исходного события отказе любого одного канала этой системы.

Система аварийного охлаждения реактора РБМК-1000 состоит из двух подсистем: быстродействующей подсистемы, или подсистемы кратковременного действия, и подсистемы длительного расхолаживания.

Обе подсистемы имеют три независимых канала, каждый из которых обеспечивает подачу в реактор не менее 50 % потребного расхода охлаждающей воды. Тем самым выполняются требования по обеспечению безопасности АЭС, которые предписывают выполнение системой безопасности своих функций в полном объеме при наложении одного независимого от исходного события отказа ее оборудования: при отказе одного канала САОР обеспечит подачу в реактор необходимого расхода охлаждающей воды.

Два канала быстродействующей подсистемы состоят из гидроаккумулирующих баллонов по шесть штук в каждом канале (рис. 5.1). Объем каждого гидробаллона равен 25 м^3, объем воды – 12,9 м^3. Рабочее давление (создаваемое газом) равно 9,8 МПа (100 кгс/см^2). Третий канал – подача воды от питательных насосов, обеспечивающих расход воды в аварийную половину реактора в

количестве не менее 50 % от потребного. При сочетании аварии с обесточиванием потребителей собственных нужд энергоблока расход воды от ПЭН обеспечивается в течение примерно 50 с за счет работы ПЭН на выбеге совместно с турбогенератором. При опорожнении гидробаллонов уровень воды в них снижается. Для исключения попадания газа в реактор в сливной горловине каждого гидробаллона установлен отсечной поплавковый клапан, оснащенный дистанционным указателем положения поплавка. Общий объем воды в гидробаллонах позволяет обеспечить работу быстродействующей подсистемы САОР при любых проектных авариях не менее двух минут.

К моменту исчерпания аккумулирующей способности гидробаллонов быстродействующей подсистемы САОР включается в работу подсистема длительного расхолаживания, которая обеспечивает аварийное охлаждение реактора до перехода на ремонтную схему расхолаживания. Подсистема длительного расхолаживания включает насосы охлаждения аварийной половины реактора (НОАП) и насосы охлаждения неаварийной половины реактора (НОНП).

Подсистема НОАП – это три канала, каждый из которых содержит два параллельно подключенных насоса, обеспечивающих подачу воды расходом около 500 т/ч и теплообменник (рис. 5.2). Вода на всас насосов поступает из бассейна – барботера системы локализации аварий, охлаждается технической водой в теплообменнике и по напорным трубопроводам подается в коллекторы САОР и далее через раздаточные групповые коллекторы и нижние водяные коммуникации поступает на охлаждение технологических каналов.

Подсистема НОНП – также три канала. Насосная часть охлаждения неаварийной половины реактора каждого из каналов включает в себя один насос и обеспечивает подачу воды около 250 т/ч. Вода на всас насосов поступает из баков чистого конденсата и по напорному трубопроводу поступает в коллекторы САОР (рис. 5.3).

Насосы подсистемы длительного расхолаживания подключены к системе надежного электроснабжения. Если аварийная ситуация сопровождается обесточиванием собственных нужд энергоблока, происходит запуск дизель-генераторов. В течение первой минуты включаются НОАП, НОНП, открываются задвижки на напоре насосов, и САОР выполняет свои функции в полном объеме.

Для обеспечения безопасности реакторной установки при наиболее тяжелых аварийных ситуациях проектом предусмотрено пять алгоритмов автоматического включения САОР.

Алгоритм САОР-1 формируется при исходных событиях, вызванных разрывом трубопроводов КМПЦ в прочноплотных боксах и подреакторном помещении. Здесь расположены все трубопроводы наибольшего диаметра – 800–900 мм, опускные трубопроводы, РГК. По совпадению сигнала повышения давления в этих помещениях (признак разрыва и течи теплоносителя) и любого из сигналов – снижение уровня в барабане-сепараторе или уменьшение перепада давления между напорным коллектором ГЦН и барабаном-сепаратором (признак аварийной половины контура) – включается в работу быстродействующая подсистема САОР, подающая воду только в аварийную половину реактора. Примерно через минуту в работу включается подсистема длительного расхолаживания, и вода подается в обе половины реактора.

Алгоритм САОР-2 формируется при исходных событиях, вызванных разрывом трубопроводов КМПЦ в помещениях нижних водяных коммуникаций и барабана-сепаратора или трубопроводов питательной воды. По совпадению любого из сигналов – повышение давления в указанных помещениях или снижение давления в напорном коллекторе питательных насосов (признак течи) с сигналом снижения уровня в барабане-сепараторе (признак выбора аварийной половины) – включается в работу быстродействующая подсистема САОР только на аварийную половину. Подсистема длительного расхолаживания подает воду в обе половины реактора через 1–2 мин.

Алгоритм САОР-3 формируется при исходных событиях, вызванных разрывом паропровода острого пара в любом помещении. Такие аварии приводят к резкому снижению давления в КМПЦ, что может привести к срыву всех ГЦН. Нарушение режима нормального охлаждения может произойти в обеих половинах реактора. В этом случае по совпадению сигналов повышения давления в помещениях барабанов-сепараторов или паропроводов острого пара или сигнала повышения скорости снижения давления в КМПЦ с сигналами снижения давления в барабане-сепараторе до аварийной уставки и отключении всех ГЦН на любой половине КМПЦ включается быстродействующая подсистема САОР с подачей воды на

обе половины реактора с последующим переходом на охлаждение от подсистемы длительного расхолаживания САОР.

В указанных случаях САОР включается в работу в полном объеме.

Алгоритм САОР-4 формируется при исходных событиях, вызванных срабатыванием и незакрытием главного предохранительного клапана (ГПК). В этом случае имеет место опасное снижение давления в КМПЦ не столь резкое, как при разрыве паропроводов острого пара. Для охлаждения реактора достаточно только работы подсистемы длительного расхолаживания САОР. Команда на включение в работу этой подсистемы формируется при совпадении сигнала повышения давления в сбросном паропроводе после ГПК с сигналами снижения давления в барабане-сепараторе до аварийной уставки и отключения всех ГЦН на любой половине КМПЦ. НОАП и НОНП включаются в работу с подачей воды в обе половины реактора.

Алгоритм САОР-5 формируется при исходных событиях, вызванных нарушением подачи питательной воды. Каждый энергоблок оснащен системой аварийной подачи питательной воды. Эта система использует штатные аварийные питательные насосы, которые включаются при отказе основных питательных насосов и подают питательную воду из деаэраторов в барабаны-сепараторы обеих половин КМПЦ. Если имеет место отказ и основных, и аварийных питательных насосов, то формируется команда на включение подсистемы длительного расхолаживания САОР по совпадению сигналов снижения расхода питательной воды в любую половину КМПЦ или сигнала снижения давления в напорном коллекторе питательных насосов с сигналом снижения давления в напорном коллекторе аварийных питательных насосов. Насосы подсистемы длительного расхолаживания подключены к бакам с запасом холодной воды и подают не менее 250 т/ч воды в барабаны-сепараторы каждой половины КМПЦ.

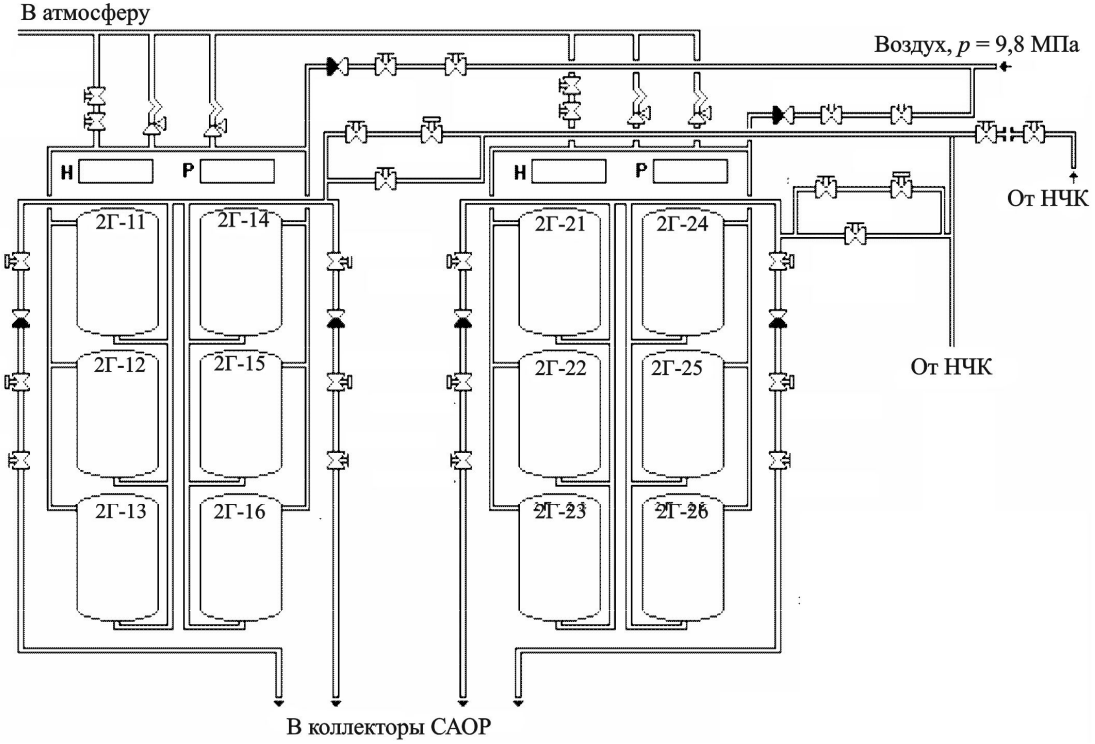


Рис. 5.1. Баллонная подсистема САОР (НЧК – насосы чистого конденсата)

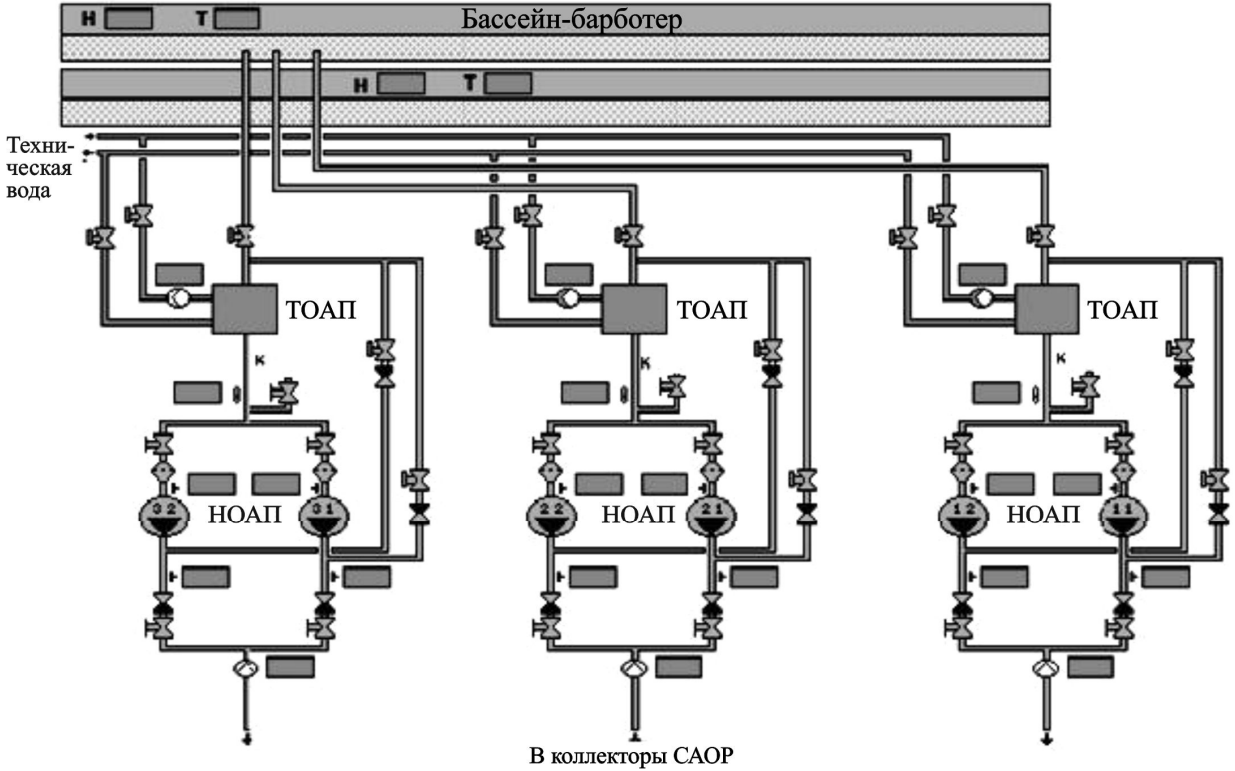


Рис. 5.2. Подсистема НОАП (ТОАП – теплообменник охлаждения аварийной половины)

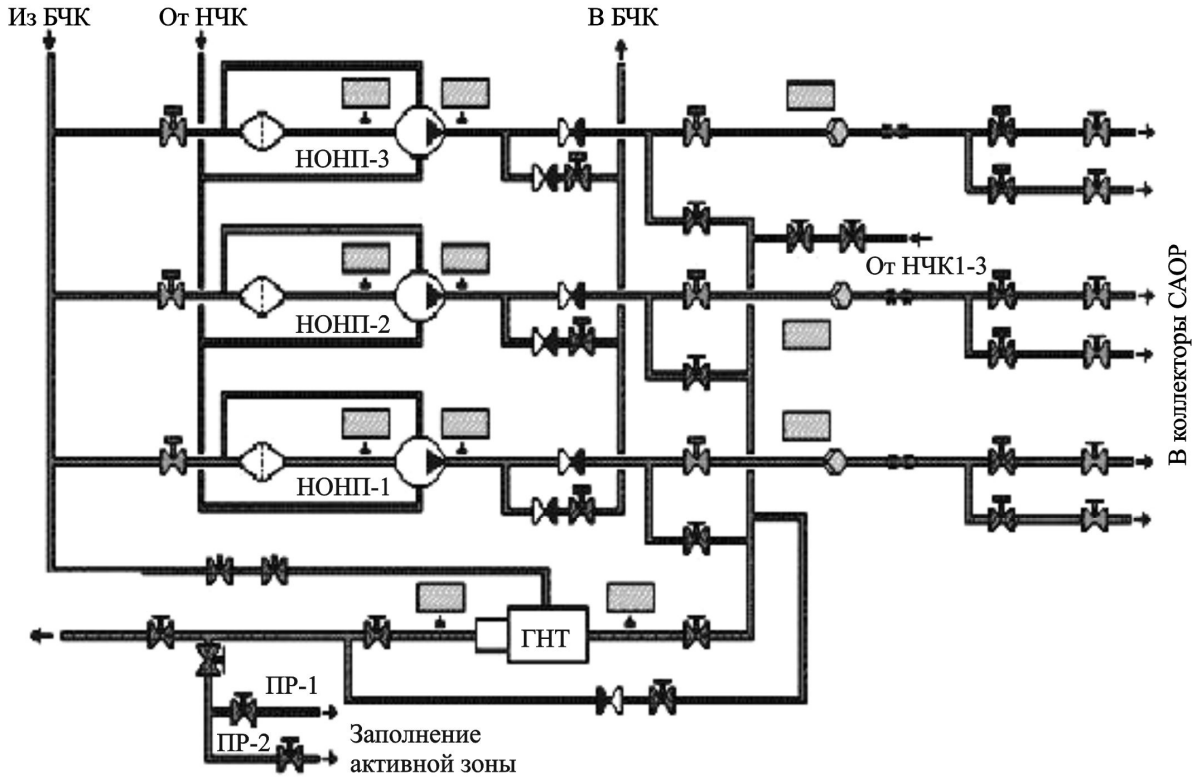


Рис. 5.3. Подсистема НОНП (БЧК – бак чистого конденсата)

6. Система локализации аварий

Локализующая система безопасности (система локализации аварий – СЛА) предназначена для предотвращения или ограничения распространения внутри АЭС и в окружающую среду выделяющихся при аварии радиоактивных веществ.

Система локализации аварий РБМК реализована на модульном принципе, который образует три основные зоны локализации:

прочно-плотные боксы (ППБ), в которых расположены всасывающие и напорные коллекторы ГЦН, сами главные циркуляционные насосы и нижняя часть опускных трубопроводов;

помещения раздаточных групповых коллекторов и нижних водяных коммуникаций;

реакторное пространство.

Снижение давления внутри этих зон локализации, отвод тепла из них и снижение концентрации радиоактивных веществ обеспечивается барботажно-конденсационными системами и системами отвода тепла, очистки сред и удаления водорода.

На энергоблоках РБМК-1000 первого поколения (первый и второй блоки Курской и Ленинградской АЭС) к системе локализации аварий относится в прямом смысле только реакторное пространство. Предполагалось, что выбор материалов, конструкций и технических средств контроля за состоянием материалов и оборудования гарантирует в течение срока службы целостность трубопроводов большого диаметра, а при разрывах трубопроводов меньшего диаметра (до 300 мм) допустим выброс в атмосферу через вышибные панели, расположенные на верхних отметках реакторного отделения.

Помещения, в которых расположены паропроводы, барабаны-сепараторы, пароводяные коммуникации и верхние части опускных труб, при проектировании не были включены в объем системы локализации аварий ни на одном блоке с РБМК-1000. Это объясняется тем, что помещения, содержащие указанные элементы КМПЦ, сообщены с центральным залом неустранимой неплотностью площадью ~5 м^2. Эта неплотность обусловлена необходимостью иметь разборное перекрытие над верхними трактами технологических каналов для перегрузки топлива в процессе эксплуатации реактора. Анализ проектных аварий показал, что разрывы этих трубопрово-

дов не приводят к разгерметизации твэлов, а при выбросе парогазовой смеси через вышибные панели, расположенные в торцах помещений барабанов-сепараторов, радиационные дозы на границе санитарно-защитной зоны не превышают допустимых значений.

Однако на энергоблоках РБМК последующих поколений система локализации аварий существенно изменена. Схема СЛА представлена на рис. 6.1.

Система локализации аварий является частью железобетонного здания блока. Подреакторные помещения с раздаточными групповыми коллекторами и нижними водяными коммуникациями рассчитаны на избыточное давление 0,08 МПа (0,8 кгс/см^2). Температура в этих помещениях при работе реактора составляет около 250 °С. Поверхность помещений с внутренней стороны облицована металлом. Между бетоном и облицовкой имеются теплоизоляционные плиты. Полость между теплоизоляционными плитами и бетоном продувается воздухом системы вентиляции. Для предотвращения повышения давления в помещениях выше расчетного в полу смонтировано восемь паросбросных клапанов *12* (см. рис. 6.1) диаметром 1200 мм каждый. Сброс парогазовой смеси при открытии этих клапанов осуществляется в парораспределительный коридор (ПРК) *14*. В полу помещений смонтированы трапы для отвода воды и конденсата аварийного пара в специальные емкости.

В состав прочно-плотных боксов (ППБ) *6* входят помещения ГЦН, всасывающих и напорных коллекторов, а также шахт опускных трубопроводов КМПЦ. ППБ и ПРК спроектированы на избыточное давление 0,45 МПа (4,5 кгс/см^2). В потолочном перекрытии каждого ППБ находятся мембранные предохранительные клапаны, рассчитанные на открытие при избыточном давлении 0,28 МПа (2,8 кгс/см^2). Общая площадь проходного сечения клапана – 5 м^2. Проектная температура воздуха в этих помещениях ~50 °С.

Прочно-плотные боксы отделены от ПРК панелями обратных клапанов. Эти клапаны открываются в случае разрыва трубопроводов в ППБ. Пар частично конденсируется на трубах поверхностных конденсаторов *13*, установленных в ПРК. Сброс пара из ППБ и ПРК осуществляется под уровень воды бассейна-барботера *18*.

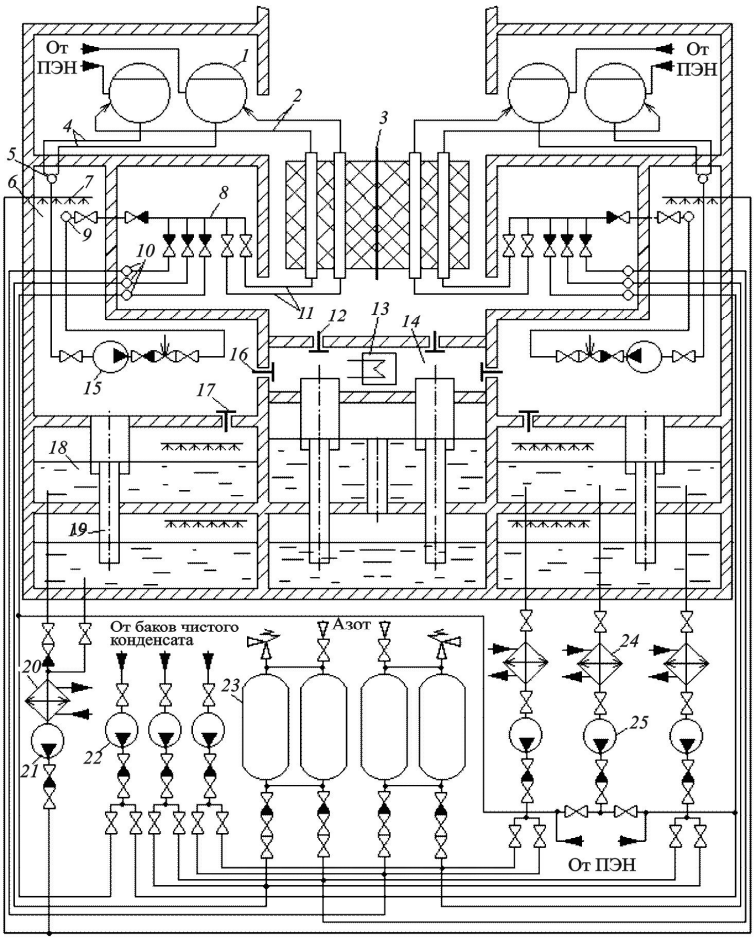


Рис. 6.1. Схема системы локализации аварий РБМК-1000:
1 – барабаны-сеператоры, *2* – верхние пароводяные коммуникации, *3* – канал СУЗ, *4* – опускные трубопроводы, *5* – всасывающий коллектор ГЦН, *6* – прочно-плотный бокс (ППБ), *7* – разбрызгивающие устройства спринклерно-охладительной системы (СОС), *8* – раздаточный групповой коллектор, *9* – напорный коллектор ГЦН, *10* – коллекторы САОР, *11* – нижние водяные коммуникации, *12* – паросбросные клапаны, *13* – поверхностный теплообменник (конденсатор), *14* – парораспределительный коридор, *15* – ГЦН, *16*, *17* – панель обратных клапанов, *18* – бассейн-барботер, *19* – паросбросные трубы, *20* – теплообменник СОС, *21* – насос СОС, *22* – НОНП, *23* – гидробаллоны САОР, *24* – ТОАП, *25* – НОАП

В полу ППБ смонтированы трапы для отвода воды в специальные емкости, однако большая часть воды из помещений с разорвавшимися трубопроводами сливается в бассейн-барботер. В полу ПРК смонтированы трубы для отвода конденсата под уровень воды в бассейн-барботер. Отвод тепла из прочно-плотных боксов при нормальной работе реактора осуществляется системами вентиляции, в частности эжекторными установками. В ППБ и ПРК вся поверхность стен облицована листовой углеродистой сталью толщиной 6 мм.

Бассейн-барботер *18* представляет собой систему конденсации пара при авариях с разрывом КМПЦ. Расположен в главном здании непосредственно под помещениями прочно-плотных боксов и парораспределительным коридором. Это двухэтажная железобетонная емкость, стены и перекрытия которой рассчитаны на избыточное давление 0,45 МПа (4,5 кгс/см^2). В направлении вдоль машинного зала бассейн разделен двумя стенами на три части, а в перпендикулярном к машинному залу направлении – тремя стенами на четыре части. Центральная часть расположена под парораспределительным коридором, а боковые – под прочно-плотными боксами. Разделительные стены в бассейне имеют проемы по воде и воздуху на обоих этажах. Пол и стены облицованы листовой сталью. Нижний этаж связан с верхним двенадцатью переливными трубами Ду600, предназначенными для поддержания уровня воды на верхнем этаже и снижения давления на перекрытия между этажами при аварии.

В средней части бассейна-барботера расположена выгородка, предназначенная для приема парогазовой смеси из реакторного пространства при разрывах топливных каналов. Конструктивно выгородка представляет собой железобетонную двухэтажную емкость, облицованную металлом. Две трубы парогазовых сбросов заглублены каждая на своем этаже на глубину 1,95 м (при общем уровне воды 2,2 м на каждом этаже). На перекрытии, разделяющем выгородку и парораспределительный коридор, установлены два перепускных клапана, которые открываются при перепаде давления 10 кПа (0,1 кгс/см^2).

Спринклерно-охладительная система (СОС) состоит из трех независимых подсистем. Каждая подсистема обеспечивает 50 % подачи охлаждающей воды. Все электропотребители СОС запитаны

от системы надежного электропитания. В состав каждой подсистемы входят насосно-теплообменные установки (НТУ), трубопроводы, арматура. Спринклерная система бассейна-барботера и эжекторные установки ППБ связаны с подающими трубопроводами всех трех подсистем СОС. НТУ всех подсистем расположены в трех отдельных помещениях, оснащенных герметичными дверьми и трапами спецканализации.

В состав одной НТУ входят: теплообменник площадью 843 $м^2$, электроприводной насос производительностью 1080 $м^3/ч$ и напором 0,69 МПа (6,9 $кгс/см^2$), трубопроводы и арматура. Расход технической воды на теплообменник равен 1000 $м^3/ч$. Форсунки спринклерной системы бассейна-барботера расположены равномерно над поверхностью воды обоих этажей. Рабочий перепад давления воды на форсунке составляет 0,1–0,15 МПа (1–1,5 $кгс/см^2$), что обеспечивает расход воды 3,6 $м^3/ч$ и дисперсность капель 2 мм. Число форсунок на нижнем этаже – 140, на верхнем этаже – 148.

7. Система защиты реакторного пространства от превышения давления

Система защиты реакторного пространства (РП) от недопустимого повышения давления предназначена для сохранения целостности металлоконструкций при авариях, связанных с разрывом технологических и специальных каналов. В условиях нормальной эксплуатации система защиты реакторного пространства должна поддерживать герметичность полости РП.

Система защиты реакторного пространства состоит из активной части, предназначенной для формирования сигнала аварийной защиты, выдачи его в логическую часть АЗ и обеспечения срабатывания АЗ при повышении давления в РП более 0,0075 МПа (0,075 $кгс/см^2$) (избыт.), и пассивной части, вступающей в действие при повышении давления в РП более 0,02 МПа (0,2 $кгс/см^2$).

Активная часть системы формирует сигнал АЗ по повышению давления в РП в трех независимых каналах защиты по давлению в РП, измеряемому в:

верхних трубопроводах парогазовых сбросов;

канале отбора проб газа (фистульный канал);

нижних трубопроводах парогазовых сбросов.

Минимальное время от возникновения ситуации до формирования сигнала АЗ составляет 1–2 с. Активная часть системы имеет бесперебойное электроснабжение.

Пассивная часть системы защиты РП от недопустимого повышения давления состоит из трубопроводов и оборудования, необходимого для обеспечения условий нормальной эксплуатации реакторного пространства и отвода парогазовой смеси из РП при возникновении аварийной ситуации. В качестве конденсационного устройства используется бассейн-барботер.

После модернизации система защиты реакторного пространства имеет следующую конфигурацию (рис. 7.1). Сверху к реакторному пространству подведены четыре трубопровода Ду 300 и один Ду 600. Снизу к РП – четыре трубопровода Ду 300, которые попарно объединены в два трубопровода Ду 400, а далее – в трубопровод Ду 600. Этот трубопровод имеет гидрозатворную петлю высотой 28,8 м, исключающую опрессовку РП и заброс воды из бассейна-барботера при повышении давления в нем выше 0,25 МПа (2,5 кгс/см^2) при авариях с разрывом трубопроводов КМПЦ. Концы трубопроводов Ду 600 от верха и низа РП заведены под уровень воды в выгородке бассейна-барботера на глубину 2 м.

На паросбросных трубопроводах, идущих вверх из реакторного пространства, установлены предохранительные устройства (ПУ), настроенные на срабатывание при давлении 0,18–0,2 МПа (1,8–2 кгс/см^2). Они связывают объем реакторного пространства с окружающей средой. Все предохранительные устройства смонтированы на вертикальных патрубках Ду 450, соединяющихся с подводящими трубопроводами с помощью специальных переходников. Все горизонтальные участки трубопроводов и все предохранительные устройства располагаются на крыше помещений барабанов-сепараторов.

В условиях нормальной эксплуатации реактора система находится в режиме дежурства (ожидания). Нарушение условий нормальной эксплуатации реакторной установки приводит к введению в действие в первую очередь активной части системы. При повышении давления в РП на 0,0075 МПа формируется сигнал на срабатывание АЗ. Через 1–2 с стержни СУЗ начинают вводиться в активную зону, и реактор переводится в подкритическое состояние.

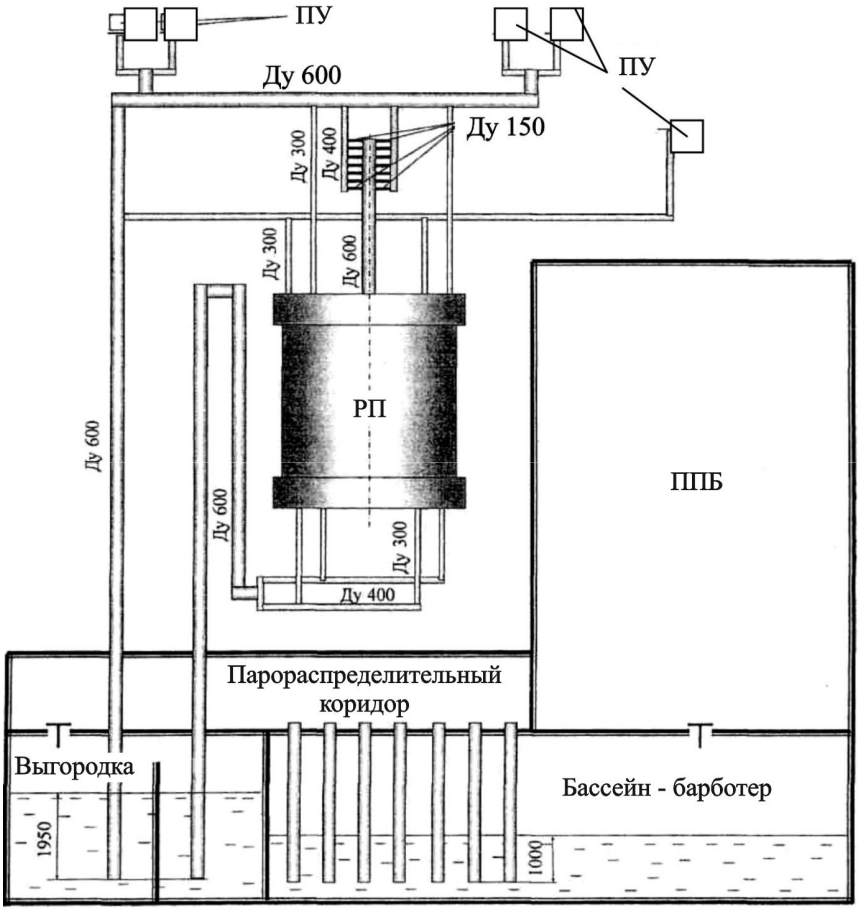


Рис. 7.1. Схема системы защиты реакторного пространства от превышения давления (ПУ – предохранительное устройство, Ду 450)

В случае дальнейшего повышения давления в РП до 0,02 МПа образующаяся при разрыве технологического канала парогазовая смесь может выбрасываться в трубопроводы системы парогазовых сбросов и через гидрозатворы поступать в бассейн-барботер. Здесь пар конденсируется, а неконденсирующиеся газы поступают в воздушное пространство бассейна-барботера и удаляются системой спецвентиляции. При повышении давления в РП до 0,18–0,2 МПа

(избыт.) произойдет срабатывание предохранительных устройств и выброс парогазовой смеси в атмосферу.

8. Трубопроводы острого пара

Система паропроводов свежего (острого) пара предназначена для транспортировки насыщенного пара от барабанов-сепараторов к цилиндру высокого давления (ЦВД) турбины.

Схема паропроводов острого пара энергоблока РБМК-1000 представлена на рис. 8.1. Паропроводы острого пара обеспечивают подачу сухого насыщенного пара давлением 6,8 МПа (69,5 кгс/см^2) к цилиндрам высокого давления турбин.

Пар от БС отводится по четырнадцати пароотводящим трубам в два паровых коллектора, которые объединяются в один главный паропровод Ду 600, и далее пар по четырем паропроводам Ду 600 направляется к турбинам и другим потребителям.

Таким образом, в тепловой схеме блока с реактором РБМК-1000 применены четыре нитки главных паропроводов из стали 20, диаметром 630×25 мм. Для выравнивания давления в БС по сторонам КМПЦ они объединяются общим паропроводом БРУ – ТК, клапанами БРУ – Д и БРУ – К.

Трассировка главных паропроводов в трубных коридорах блока имеет компенсаторы температурных расширений. Главные паропроводы работают часто в условиях переменных температур (разогрев, расхолаживание), и, если не обеспечить свободного перемещения, могут возникнуть дополнительные напряжения, трещины или разрушения в местах напряжений металла.

Схемой (см. рис. 8.1) предусмотрено три байпасных системы приема пара, а именно:

1. Для сброса пара в конденсаторы турбин предусмотрено четыре быстродействующих редукционных установки (БРУ–К). Они используются при аварийных отключениях турбогенератора, а также служат для приема пара при пусках и расхолаживании блока. На каждую пару паропроводов перед главной паровой задвижкой установлено по два БРУ–К (всего 4 шт.) для сброса 50 % общего расхода пара (2950 т/ч). В БРУ-К применено 3-ступенчатое дросселирование и охлаждение пара в паросбросном устройстве (ПСУ)

путем впрыска основного конденсата. Снижение давления и температуры пара проводятся последовательно: сначала снижается давление в клапане с электроприводом до 3 МПа (30 кг/см^2), затем ступенчато за клапаном в диффузорном дросселирующем устройстве с увеличением проходного сечения трубы и последняя ступень – в дроссельной решетке с ПСУ перед входом в конденсатор над трубным пучком. Пропускная способность каждой БРУ-К составляет 725 т/ч.

Открытие БРУ-К происходит при давлении 7,11 МПа (72,5 кгс/см^2).

2. Предусмотрено две быстродействующие редукционные установки сброса пара в технологический конденсатор (БРУ–ТК) и два технологических конденсатора (ТК) для приема небольших количеств пара (200 т/ч) при разогреве блока и выводе реактора на МКУ при отсутствии вакуума в конденсаторе. Или при останове блока в ремонт и окончательном расхолаживании КМПЦ с параметрами $P_{БС} < 1{,}18$ МПа (12 кг/см^2) и $T = 180$ ºС. Пропускная способность каждой БРУ-ТК составляет 100 т/ч.

3. Восемь главных предохранительных клапанов (ГПК) с пропускной способностью 350 т/ч каждый. На каждом паропроводе Ду 600 расположены два главных предохранительных клапана. Срабатывание ГПК происходит от импульсных клапанов по группам, которые имеют свои уставки срабатывания:

1 гр. – 7,36 МПа (75 кгс/см^2) – 2 ГПК;

2 гр. – 7,46 МПа (76 кгс/см^2) – 4 ГПК;

3 гр. – 7,55 МПа (77 кгс/см^2) – 2 ГПК.

На двух паропроводах, подводящих пар к турбинам, установлены четыре клапана БРУ-Д, предназначенных для подачи пара в паропровод собственных нужд блока диаметром 530×8 мм. Потребителями пара БРУ-Д являются: основные эжекторы, испарительная установка, деаэраторы, бойлеры теплофикационной установки, СВО-4. Пропускная способность каждой БРУ-Д составляет 100 т/ч.

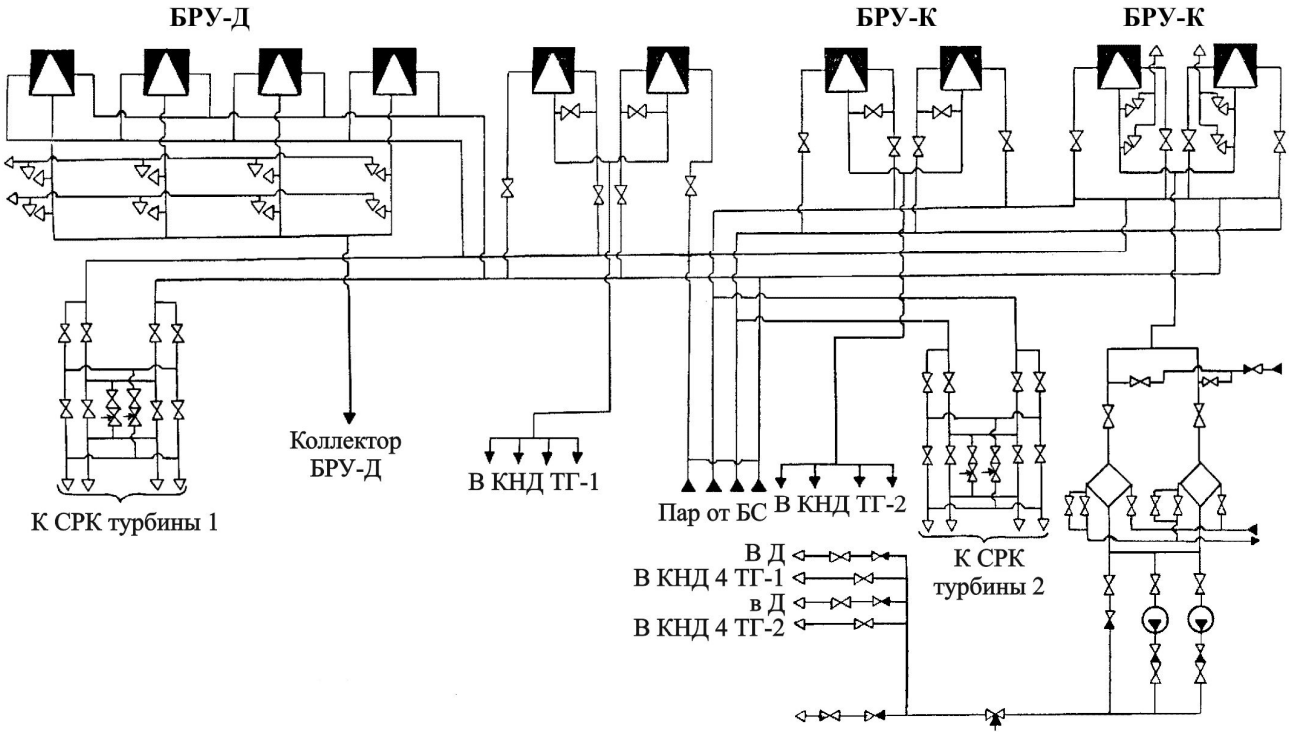


Рис. 8.1. Схема паропроводов острого пара блока РБМК-1000

9. Конденсационная установка

Как известно, на АЭС реализуется цикл Ренкина, предполагающий конденсацию всего отработавшего в турбине пара. Одним из способов повышения термодинамического КПД цикла является снижение конечной температуры рабочего тела, т.е. температуры отвода тепла к «холодному» источнику. Для замыкания рабочего цикла, т.е. для конденсации пара после турбины используется конденсатор. Конденсатор и обслуживающие его устройства называются конденсационной установкой. Основными задачами конденсационной установки являются установление и поддержание вакуума на выхлопе турбины, полная конденсация отработавшего пара и возврат чистого конденсата в цикл. Кроме того, конденсатор выполняет ряд дополнительных функций, а именно:

создание определенного запаса конденсата для устойчивой работы конденсатного насоса;

сбор и утилизацию низкопотенциальных потоков пара и воды из тепловой схемы турбоустановки;

деаэрацию, т.е. удаление растворенных газов (CO_2 и O_2) из конденсата;

прием пара из паросбросных устройств турбины при пусках, остановах и сбросах нагрузки.

Принципиальная схема конденсационной установки представлена на рис. 9.1.

Охлаждение отработавшего в цикле паротурбинной установки пара, как правило, осуществляется водой. Вода может соприкасаться с паром непосредственно или же через теплопроводную стенку. По этому признаку все существующие конденсаторы можно разделить на две основные группы:

1. Смешивающие конденсаторы.
2. Поверхностные конденсаторы.

В смешивающих конденсаторах отработавший пар приходит в непосредственное соприкосновение с охлаждающей водой.

В поверхностных конденсаторах пар всегда омывает трубки снаружи, а вода – изнутри. Поверхность охлаждающих трубок делит конденсатор на две части: паровое пространство и водяное пространство. На АЭС применяются поверхностные конденсаторы.

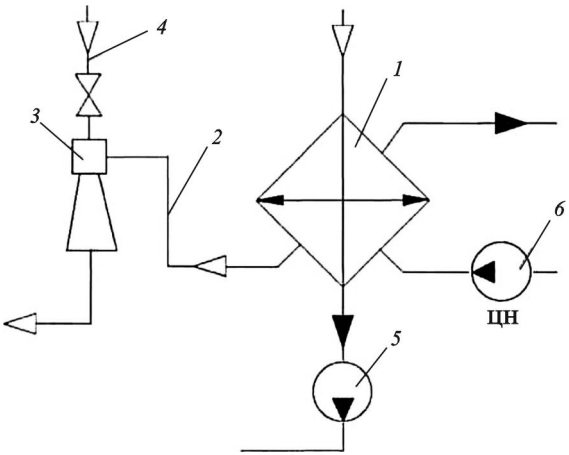


Рис. 9.1. Принципиальная схема конденсационной установки:
1 – конденсатор, *2* – отсос неконденсирующихся газов из конденсатора, *3* – эжектор основной, *4* – рабочий пар на эжектор, *5* – конденсатный насос, *6* – циркуляционный насос охлаждающей воды

Поступающий в конденсатор пар при соприкосновении с холодной поверхностью (охлаждаемой циркуляционной водой) будет конденсироваться. Если поверхность трубного пучка достаточно велика и охлаждающая вода поступает непрерывно в достаточном количестве, то будет происходить полная конденсация поступающего пара. Для непрерывной конденсации пара необходимо непрерывное удаление образующегося конденсата, что осуществляется конденсатными насосами.

В конденсатор поступает не только влажный пар из последних ступеней турбины, но и воздух через неплотности в соединениях корпуса конденсатора с выхлопным патрубком турбины, а также через линии отборного пара и конденсата, находящиеся под разрежением. Для одноконтурных станций необходимо иметь в виду поступление с паром определенного количества продуктов радиолиза, а также радиоактивных благородных газов, проникающих в теплоноситель через неплотности в оболочках твэлов.

Поступление в конденсатор неконденсирующихся газов приводит к увеличению давления в конденсаторе и ухудшению вакуума, уменьшению коэффициента теплоотдачи при конденсации пара, а

также к интенсификации коррозионных процессов. Удаление неконденсирующихся газов из конденсатора осуществляется пароструйными эжекторами.

Эжекторы вместе с неконденсирующимся газом забирают и часть пара из конденсатора, что может привести к потере конденсата. Для уменьшения захвата пара вместе с неконденсирующимся газом место отсоса газов следует выбирать в области завершения конденсации пара в конденсаторе. Выбор этого места зависит от направления потока пара в конденсаторе. Различают конденсаторы с нисходящим, центральным, боковым и восходящим потоками пара. На рис. 9.2 также указано место наиболее оптимального отсоса неконденсирующихся газов.

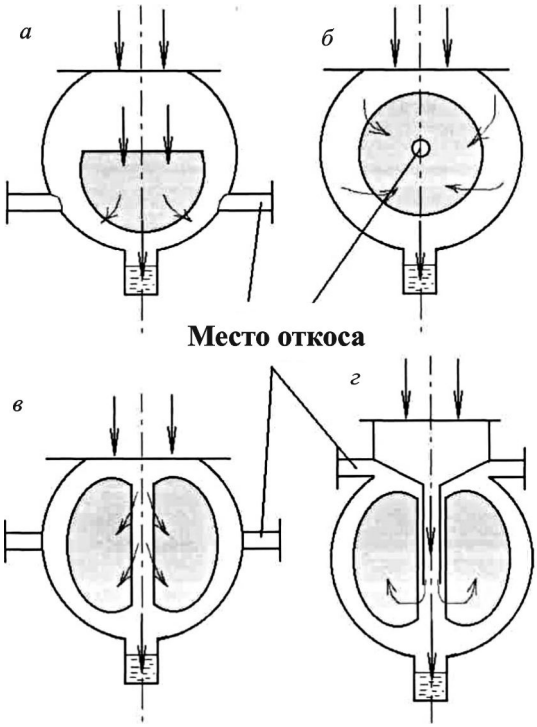


Рис. 9.2. Основные схемы поверхностных конденсаторов:
а)– с нисходящим потоком; *б*) с центральным потоком;
в) с боковым потоком; *г*) с восходящим потоком

Конденсаторы мощных турбин имеют очень большие размеры. Корпус конденсатора имеет прямоугольную форму. Расположение конденсатора может быть подвальным (конденсатор располагается под турбиной) или боковым (конденсаторы располагаются сбоку турбины).

Кроме работы конденсаторов в режиме приема пара из турбины предусматривается сброс пара в конденсатор в обход турбины через быстродействующую редукционную установку (БРУ-К). Сброс пара после БРУ-К осуществляется в паровое пространство переходного патрубка (от турбины к конденсатору). Перед этим патрубком пар после БРУ-К увлажняется за счет впрыска конденсата и проходит через систему дросселей. В них давление пара срабатывается до вакуума в конденсаторе. Система увлажнения и дросселирования располагается вне переходного патрубка, но поставляется вместе с конденсатором. Схема конденсатора представлена на рис. 9.3. Схема паросбросного устройства (ПСУ) представлена на рис. 9.4.

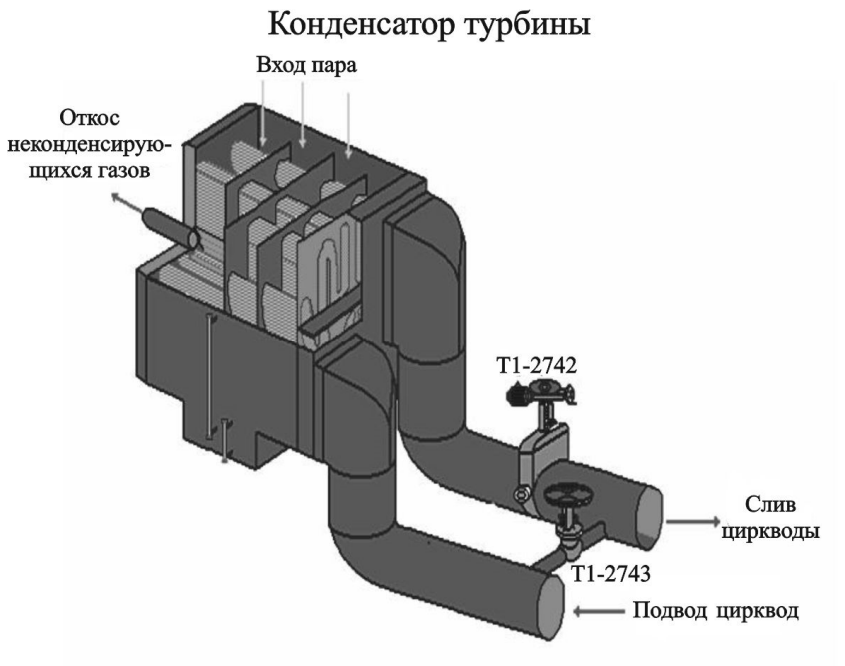


Рис. 9.3. Схема конденсатора

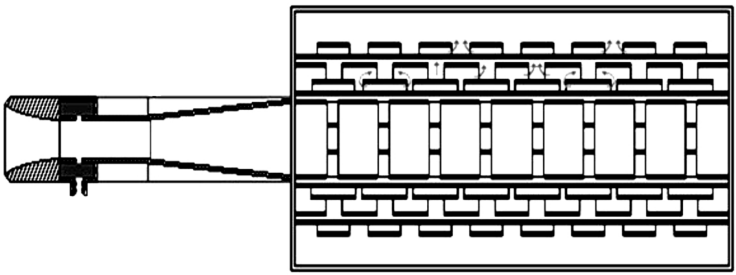


Рис. 9.4. Схема паросбросного устройства (ПСУ)

Принцип работы пароструйного эжектора. Схема одноступенчатого эжектора представлена на рис. 9.5. Пароструйный эжектор – это струйный насос, в котором рабочим телом является пар с давлением 0,4–0,7 МПа. В комбинированном сопле рабочий пар расширяется до сверхзвуковой скорости – на выходе из сопла скорость пара более 1000 м/с. Одновременно понижается давление рабочего пара. Обычно на выходе из сопла создается давление на 1–2 мм. рт. ст. ниже, чем в паровом пространстве конденсатора.

В камере смешения струя пара, выходящая из сопла со сверхзвуковой скоростью, подсасывает (эжектирует) паровоздушную смесь и перемешивается с ней. В результате образуется смесь рабочего пара и паровоздушной смеси.

В диффузоре (расширяющийся канал) давление смеси пара и воздуха поднимается до состояния несколько выше атмосферного.

Для сокращения потерь пара и теплоты (с выбрасываемым в атмосферу паром) пароструйный эжектор может снабжаться специальным теплообменником – холодильником эжектора. В холодильнике паровоздушная смесь соприкасается с холодной поверхностью трубного пучка; пар конденсируется и в виде дренажа (воды) возвращается в схему станции; воздух (неконденсирующиеся газы) выбрасывается в атмосферу.

Одноступенчатый паровой эжектор является очень простым устройством, но его КПД мал, так как в одном диффузоре необходимо повысить давление смеси, поступающей из конденсатора, от 0,003–0,005 МПа (0,03–0,05 кгс/см^2) до давления несколько выше атмосферного (см. рис. 9.5). Поэтому для создания в конденсаторе глубокого вакуума применяются многоступенчатые паровые эжекторы – с двумя или тремя ступенями сжатия (рис. 9.6, 9.7).

Рис. 9.5. Принципиальная схема парового эжектора:
1 – сопло Лаваля, *2* – камера смешения, *3* – диффузор

Кроме основного, постоянно работающего эжектора предусмотрена установка специального пускового эжектора, включаемого в процессе пуска для первоначального удаления воздуха из конденсатора и корпуса турбины. Пусковой эжектор имеет в своем составе те же элементы, что и основной (за исключением, пожалуй, холодильника).

В связи с кратковременностью работы пускового эжектора его конструкция проста. Он выполнен одноступенчатым и без охладителей, а отсасываемая паровоздушная смесь может сбрасываться непосредственно в атмосферу.

Основные технические характеристики конденсатора приведены в табл. 9.1. Учитывая большое влияние давления в конденсаторе на экономичность турбинной установки, основные эжекторы устанавливают с резервом – два работающих и один резервный. Вариант схемы включения эжекторов представлен на рис. 9.8 на примере блока с реактором РБМК-1000.

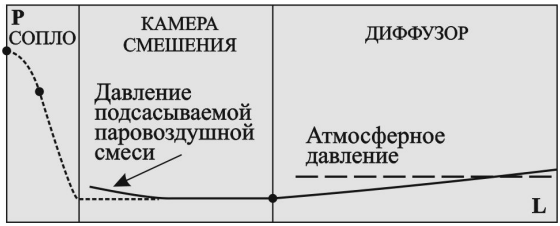


Рис. 9.6. Изменение давления по длине эжектора

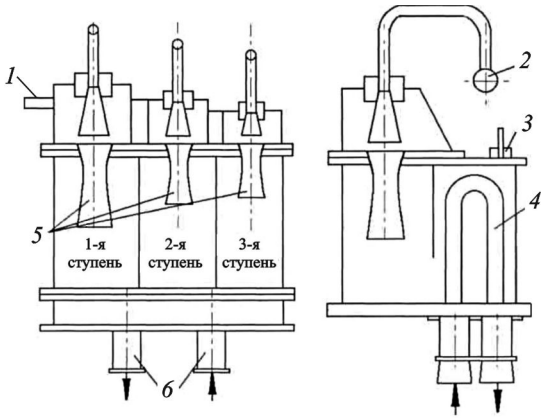


Рис. 9.7. Принципиальная схема основного трехступенчатого эжектора. *1* – вход парогазовой смеси, *2* – подвод рабочего пара, *3* – выхлоп эжектора, *4* – трубная система охлаждения эжектора, *5* – диффузоры, *6* – вход-выход основного конденсата

Таблица 9.1. Основные характеристики конденсатора К-1020

Параметр, размерность	Величина
Поверхность охлаждения, м^2	1020
Расход конденсируемого пара, т/ч	410,9
Абсолютное давление пара, МПа (кгс/см^2)	0,004 (0,04)
Температура пара на выхлопе турбины, °С	29
Температура охлаждающей воды на входе, °С	12
Температура охлаждающей воды на выходе, °С	22,8
Расход охлаждающей воды, т/ч	20720
Количество трубок поверхности теплообмена, шт.	12930
Активная длина трубок, м	8,89
Материал трубок	Сплав (Cu–93 %, Ni–5 %, Fe–1 %, примеси – 1 %)
Давление пара на входе в ПСУ, МПа (кгс/см^2)	0,82 (8,2)
Температура пара на входе ПСУ, °С	178
Давление пара за ПСУ, МПа (кгс/см^2)	0,0124 (0,124)
Температура пара за ПСУ, °С	65
Максимальный расход срабатываемого пара, т/ч	365

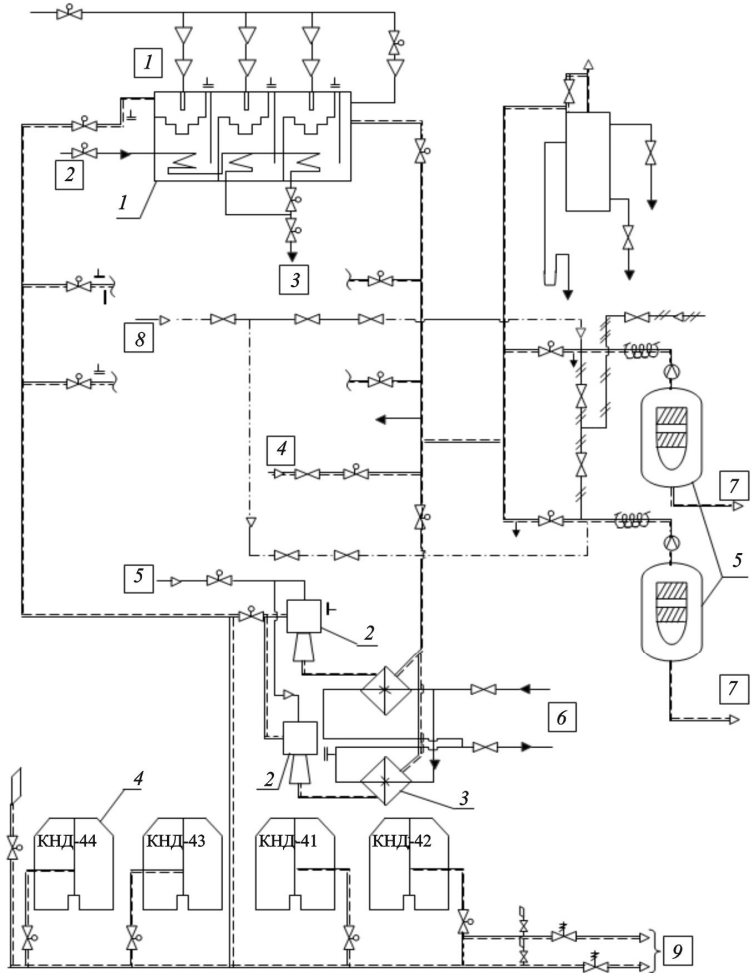


Рис. 9.8. Схема включения эжекторов блока с РБМК-1000:
1 – эжектор основной (3 шт.), *2* – эжектор пусковой (2 шт.), *3* – охладитель эжектора пускового, *4* – основные конденсаторы, *5* – аппарат контактный.

Линии связи: [1] – подача рабочего пара, [2] – от конденсатных насосов первой ступени (КН – I), [3] – к конденсатным насосам второй ступени (КН – II), [4] – от технологического конденсатора, [5] – рабочий пар на эжекторы пусковые, [6] – циркуляционный водовод, [7] – на дезактивацию (СГО), [8] – пар для разбавления газа (чтобы не допустить образования гремучей смеси), [9] – срыв вакуума

10. Система технического водоснабжения

При работе атомной станции от многих ее агрегатов, как основных, так и вспомогательных, а также из отдельных помещений необходимо отводить большое количество тепла в окружающую среду. Отвод тепла в окружающую среду в основном осуществляется водой. Химически неочищенную воду, используемую для охлаждения, называют технической, а отдельные системы охлаждения, объединенные в единую, – системой технического водоснабжения. Для работы АЭС техническое водоснабжение имеет очень важное значение, во многом определяя надежность и экономичность работы станции. Капиталовложения в систему технического водоснабжения могут составлять 5–10 % от стоимости установленного киловатта.

10.1. Основные потребители технической воды

Потребности отдельных агрегатов и помещений в охлаждающей воде и необходимых напорах различны. Основными потребителями технической воды на АЭС являются конденсаторы паровых турбин, маслоохладители и газоохладители турбогенераторов. На долю этих потребителей приходится до 85–90 % всего расхода технической воды. Они образуют так называемый контур циркуляционной технической воды.

Другие потребители можно разделить на группу ответственных потребителей технической воды и группу неответственных потребителей технической воды.

В группу ответственных потребителей технической воды входят теплообменники бассейна выдержки, промконтура, ряда вентиляционных систем, систем безопасности, САОЗ, охлаждения насосов систем безопасности; система охлаждения шахты реактора, бокса парогенераторов и ГЦН; охладители радиоактивных проб воды и пара и др.

В группу неответственных потребителей технической воды входят маслоохладители редукторов ТПН, охладители выпара деаэратора, маслоохладители трансформаторов, охладители вспомогательных питательных электронасосов, насосов слива сепарата,

конденсатных насосов, дренажных насосов, технологический конденсатор, пароэжекторные машины и др.

10.2. Типы систем технического водоснабжения

Тепло, отводимое от оборудования АЭС технической водой, передается конечному охладителю за пределами главного корпуса. По типу конечного охладителя системы технического водоснабжения бывают прямоточные, оборотные и смешанные.

При прямоточной системе технического водоснабжения охлаждающая вода используется однократно. В качестве конечного охладителя в этом случае используется река, море. Схема прямоточной системы технического водоснабжения представлена на рис. 10.1.

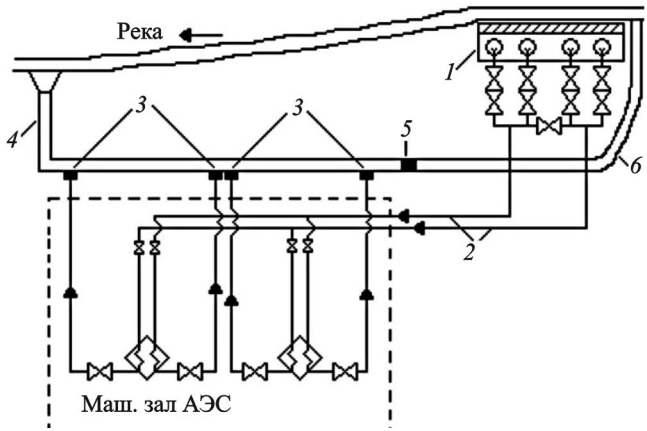


Рис. 10.1. Схема прямоточной системы технического водоснабжения: *1* – береговая насосная станция, *2* – напорные водоводы, *3* – сливные колодцы, *4* – сливной канал, *5* – переключательный колодец, *6* – перепускной канал

Циркуляционные насосы, установленные на береговой насосной станции, подают воду в общий коллектор, откуда она по напорным водоводам поступает в машинный зал. После конденсаторов нагретая вода через сливные колодцы по сливному каналу возвращается в естественный источник (реку). В зимнее время возможно образование ледяной крошки (шуги) на всасе циркуляционных насосов.

Для борьбы с шугой часть нагретой воды через переключательный колодец и перепускной канал может быть подана к водоприемному устройству береговой насосной станции. Циркуляционная вода подвергается только грубой очистке от механических примесей. Для этой цели используются вращающиеся фильтры-сетки. Существенное значение имеет глубина водозабора. Чем она больше, тем холоднее вода, желательна глубина водозабора до 4 м.

Прямоточная система водоснабжения наиболее простая и дешевая. Кроме этого, она обеспечивает наибольший вакуум в конденсаторах турбины, а следовательно, и наиболее высокий КПД рабочего цикла. Однако использование прямоточного водоснабжения ограничено требованиями максимального повышения температуры воды в источнике после сброса в него нагретой воды с АЭС. Повышение температуры воды в естественном водоеме не должно превышать 5 °С летом и 3 °С зимой. Это означает, что дебет источника водоснабжения должен в 3–5 раз превышать потребности станции в охлаждающей воде. Учитывая, что потребности АЭС в охлаждающей воде огромны (например, для энергоблока АЭС электрической мощностью 1000 МВт при работе на насыщенном паре потребности охлаждающей воды составляют около 180000 $м^3$/ч), найти естественный источник для прямоточного водоснабжения довольно сложно. Поэтому на практике чаще используют систему циркуляционного или оборотного водоснабжения. Возможна также смешанная система технического водоснабжения, представляющая собой комбинацию прямоточного и оборотного водоснабжения.

В оборотных системах технического водоснабжения охлаждающая вода используется многократно. Для охлаждения циркуляционной воды используют пруды-охладители, градирни и брызгальные бассейны. В оборотных системах вода циркулирует по замкнутому контуру. Проходя через конденсаторы и другие теплообменники, вода нагревается, а проходя через охладитель, охлаждается. Следует отметить, что основным механизмом охлаждения воды в оборотной системе водоснабжения является испарительное охлаждение. Чем больше поверхность контакта воды с воздухом, тем интенсивнее происходит испарение. Интенсивность испарения зависит также и от относительной влажности окружающего воздуха и погодных условий. Например, при относительной влажности воз-

духа 100 % испарительное охлаждение невозможно. В ветреную погоду интенсивность испарения выше, так как интенсивнее происходит отвод образовавшихся водяных паров от поверхности испарения.

Тип охлаждающих устройств выбирают на основе технико-экономических расчетов с учетом места расположения АЭС. Наиболее простое устройство – естественные или искусственные пруды-охладители. Они получили наибольшее распространение на конденсационных станциях. Схема оборотной системы водоснабжения представлена на рис. 10.2. АЭС располагают вблизи пруда. Подводящий канал подает воду к приемным колодцам. В водоприемниках предусмотрена грубая очистка воды от механических примесей. Установка циркуляционных насосов возможна как на береговой насосной станции, так и в машинном зале. В остальном такая схема близка к прямоточной схеме водоснабжения. Для того

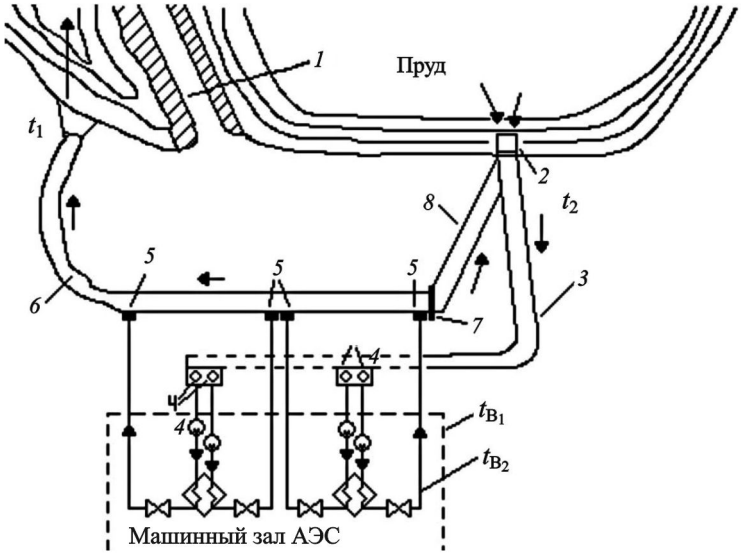


Рис. 10.2. Схема оборотной системы технического водоснабжения с прудом-охладителем:

1 – разделительная (направляющая) дамба, *2* – водоприемник, *3* – подводящий канал, *4* – приемные колодцы, *5* – сливные колодцы, *6* – сливной канал, *7* – переключательный колодец, *8* – перепускной канал

чтобы вода при движении от места сброса до места забора могла охладиться наиболее полно, необходима определенная активная площадь пруда. Для увеличения относительной площади транзитного потока форма пруда должна быть овальной, разделительная (направляющая) дамба должна отклонять транзитный поток в сторону от водоприемного устройства. Оборотная система с прудами-охладителями обеспечивает наибольший вакуум в конденсаторе по сравнению с другими охлаждающими устройствами оборотных систем.

Недостаток прудового водоснабжения – большие гидротехнические работы, большая площадь пруда, необходимость отчуждения больших территорий, иногда сельскохозяйственного назначения.

При прудовом водоснабжении необходимо учитывать потери воды и предусматривать ее восполнение. Потеря воды из прудов связана с испарением ее в результате нагрева на станции, естественным испарением с поверхности, фильтрацией через грунт. Для подпитки прудов-охладителей используется, как правило, подача воды от находящихся рядом рек.

Значительно меньшие площади по сравнению с прудами-охладителями нужны для размещения градирен. Различают градирни открытые, в которых распределительная система расположена на открытом воздухе, и закрытые, где распределительное устройство ограждено башней (башенные градирни).

Для АЭС используются только башенные градирни с естественной тягой. Градирня представляет собой железобетонную башню высотой до 150 м (для мощных энегоблоков) и диаметром до 60–90 м. Схема системы циркуляционного водоснабжения с градирней представлена на рис. 10.3. Основными частями башенной градирни являются: вытяжная башня с опорной конструкцией, оросительное устройство, сборный бассейн. Нагретая вода поступает в центральный распределитель и от него подается на оросительное устройство. В градирнях пленочного типа оросительное устройство состоит из щитов. Со щитов влага стекает пленкой, с которой и происходит испарение. Щиты устанавливаются в несколько ярусов. По сравнению с капельной градирней пленочная допускает большие скорости воздуха без опасения повышенного уноса влаги.

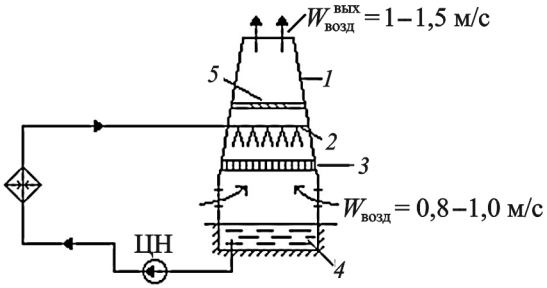


Рис. 10.3. Схема технического водоснабжения с градирней:
1 – вытяжная башня, *2* – водораспределительная система, *3* – ороситель, *4* – водосборный бассейн, *5* – влагоулавливающее устройство

Брызгальные бассейны занимают значительно меньшую площадь по сравнению с прудами-охладителями, но большую, чем градирни. Чаще всего это искусственные водоемы, над которыми через разбрызгивающие сопла подается вода, которую нужно охладить. Поверхность контакта воды с воздухом значительно возрастает, в результате чего увеличивается интенсивность испарительного охлаждения. На рис. 10.4 представлена схема брызгального бассейна. Глубина бассейна должна быть не менее 1,5 м, иначе вода будет сильно прогреваться солнцем. Для уменьшения уноса капель влаги ветром расстояние от крайних сопел до борта бассейна принимают 7–8 м. Бассейны секционируют для удобства чистки и ремонта. На стойках располагаются разводящие трубы, на которых

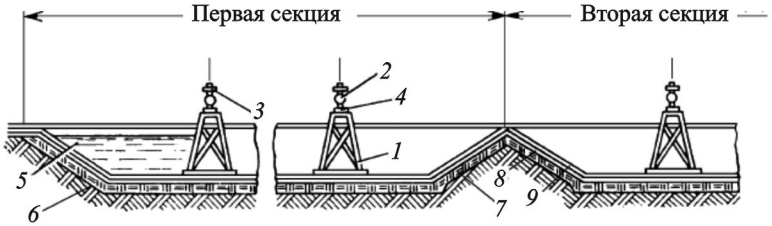


Рис. 10.4. Схема брызгального бассейна:
1 – стальные опорные конструкции, *2* – распределительная труба, *3* – сопла, *4* – опоры, *5* – уровень воды, *6* – гидроизоляционная пленка (полиэтиленовая), *7* – песчаный слой, *8* – первый слой бетона, *9* – второй слой бетона

равномерно распределены вертикальные сопла. Эти сопла распыляют воду, подаваемую циркуляционными насосами. Высота расположения сопел над уровнем воды в бассейне должна быть 1,5–2 м. Для хорошего доступа воздуха ко всем соплам ширина бассейна составляет 50–55 м. При распылении поступающей в сопла воды под давлением 0,1 МПа образуются капли диаметром 1,5–2 мм. При более тонком распылении увеличивается эффект охлаждения, однако увеличивается и потеря воды с уносом капель.

При работе брызгальных бассейнов возможно образование тумана, которое может привести к обледенению ближайших сооружений в зимнее время. Этот факт необходимо учитывать при разработке генерального плана станции. Для поддержания качества воды осуществляют продувку, а для восполнения потерь – подпитку бассейнов.

10.3. Влияние температуры охлаждающей воды и кратности охлаждения на давление в конденсаторе

Очевидно, что температура пара, покидающего турбину и работающего в замкнутом термодинамическом цикле, не может быть ниже температуры охлаждающей среды, которой обычно является вода. Охлаждающая вода является естественным холодильником, необходимым для создания замкнутого рабочего цикла. Свойства водяного пара свидетельствуют, что насыщенный пар с температурой, близкой к температуре окружающей среды, имеет давление ниже атмосферного, т.е. заполненное паром пространство в конденсаторе должно находиться под давлением ниже атмосферного (иначе говорят: под разрежением – вакуумом).

Таким образом, температура конденсации отработавшего в турбине пара определится как сумма (см. рис. 10.5):

а) температуры охлаждающей воды на входе в конденсатор;

б) нагрева охлаждающей воды в конденсаторных трубках;

в) температурного напора на выходе из конденсатора.

Вакуум в конденсаторе оказывает большое влияние на экономичность конденсационной паровой турбины. Нагрев охлаждающей воды зависит от расхода пара в конденсатор и расхода охла-

ждающей воды через него. Запишем уравнение теплового баланса конденсатора (см. рис. 10.5):

$$D_{\text{п}} \cdot (h_{\text{п}} - h'_{\text{к}}) = G_{\text{в}} \cdot C_p \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}).$$

Здесь $h_{\text{п}}$ – энтальпия пара после турбины; $h'_{\text{к}}$ – энтальпия конденсата на линии насыщения после конденсации пара в конденсаторе, $t_{\text{вых}}$ и $t_{\text{вх}}$ – температура охлаждающей воды на выходе и входе в конденсатор; $D_{\text{п}}$ – расход пара из турбины в конденсатор; $G_{\text{в}}$ – расход охлаждающей воды.

Параметр $G_{\text{в}}/D_{\text{п}} = m$ называется *кратностью охлаждения*.

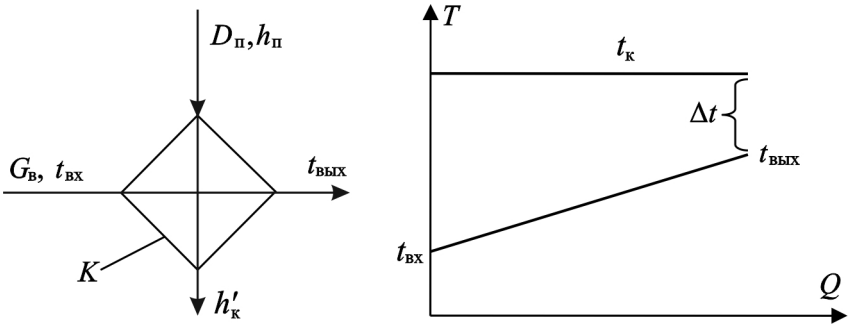


Рис. 10.5. Влияние параметров охлаждающей воды на давление в конденсаторе

Из *T–Q* диаграммы конденсатора (рис. 10.5) и уравнения теплового баланса конденсатора получаем:

$$t_{\text{к}} = t_{\text{вых}} + \Delta t = t_{\text{вх}} + (h_{\text{п}} - h'_{\text{к}}) / (m \cdot C_p) + \Delta t.$$

Если подставить численные значения энтальпии пара и конденсата, а также теплоемкость воды, характерные для параметров пара после турбины, то можно записать:

$$t_{\text{к}} = t_{\text{вх}} + 525/m + \Delta t.$$

Давление в конденсаторе однозначно связано с температурой конденсации, $P_к = f(t_к)$. Графически зависимость давления в конденсаторе от температуры охлаждающей воды $t_{вх}$ и кратности охлаждения m можно представить в виде, изображенном на рис. 10.6. Видно, что кратность охлаждения $m > 80$ выбирать нецелесообразно. Расчетная кратность охлаждения выбирается на основании технико-экономических расчетов. Обычно основные конденсаторы турбины выбираются двухходовыми по охлаждающей воде с кратностью охлаждения 50–65.

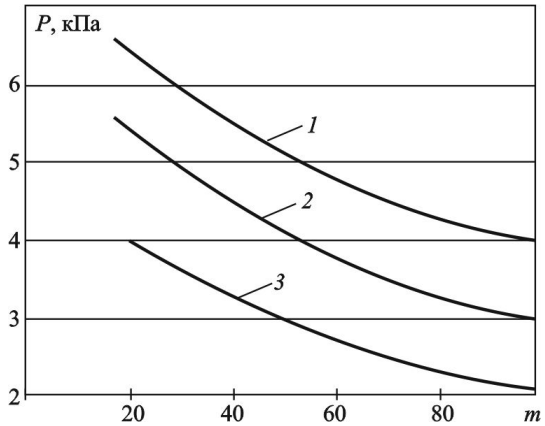


Рис. 10.6. Зависимость давления в конденсаторе от температуры охлаждающей воды и кратности охлаждения:
$1 – t_{вх_1}$, $2 – t_{вх_2}$, $3 – t_{вх}$; $t_{вх_1} > t_{вх_2} > t_{вх_3}$

11. Тракт основного конденсата

Тепловая схема турбоустановки в значительной мере определяется схемой регенеративного подогрева питательной воды и основного конденсата, осуществляемого паром, частично отработавшим в турбине. Пар отводится из турбины через регенеративные отборы и подается по паропроводам на регенеративные подогреватели. В этой системе наименьшее давление конденсата в конденсаторе, наибольшее давление в барабане-сепараторе (для одноконтурной АЭС). Этот перепад давлений должен быть преодолен насосом. Установка на этом пути регенеративных подогревателей суще-

ственно повышает требуемый напор насоса, так как необходимо преодолеть еще и гидравлические сопротивления всех подогревателей. Если для подачи воды установить насос только после конденсатора, то все регенеративные подогреватели будут находиться под давлением, превышающим давление в парогенераторе. Это приведет к удорожанию оборудования.

В связи с этим тракт от конденсатора до барабана-сепаратора разделяют на две части: конденсатный и питательный тракты. Напор конденсатного насоса представляет собой сумму давления в деаэраторе и сопротивления всего конденсатного тракта, в том числе сопротивления регенеративных подогревателей, расположенных до деаэратора. Напор питательного насоса, установленного после деаэратора, складывается из давления в барабане-сепараторе (парогенераторе) и сопротивления регенеративных подогревателей, расположенных после деаэратора (если они предусмотрены технологической схемой). В связи с относительно высокими давлениями воды для этих подогревателей их называют подогревателями высокого давления (ПВД).

Подогреватели, в которых давление нагреваемой воды определяется напором конденсатных насосов, называются подогревателями низкого давления (ПНД).

Система подогрева конденсата до деаэратора называется системой регенерации низкого давления. В ней нагреваемой средой является основной конденсат турбины. Другое название системы – тракт основного конденсата.

В тракт основного конденсата входят: регенеративные подогреватели, конденсатные насосы, холодильники основных эжекторов и эжекторов уплотнений, конденсатоочистка (КО).

Конденсатные насосы предназначены для откачки основного конденсата турбины из конденсатосборника конденсатора, подачи его через систему регенерации низкого давления в деаэратор и обеспечения работы теплообменников.

В турбоустановках АЭС, имеющих кондесатоочистку, устанавливаются две группы конденсатных насосов – первой ступени (КЭН-I) и второй ступени (КЭН-II).

Конденсатные насосы I ступени устанавливаются сразу после конденсатора от конденсатосборников и предназначены для прокачки основного конденсата (ОК) через холодильники эжекторов и

фильтры КО, которые имеют большое гидравлическое сопротивление.

Холодильники эжекторов располагаются после КН-I и служат для конденсации пара, подающегося на эжекторы.

КО – конденсатоочистка, расположена после холодильников эжекторов и предназначена для удаления из конденсата механических примесей и растворенных в конденсате химических соединений, находящихся в ионной форме.

Конденсатные насосы II ступени (КН-II) служат для создания необходимого напора для прокачки основного конденсата через систему ПНД и подачи его в деаэратор.

На АЭС одноподъемная схема включения конденсатных насосов не применяется, так как фильтры конденсатоочистки рассчитаны на сравнительно низкое давление (до 0,785 МПа – 8 кгс/см^2), а такого давления не хватает для прокачки основного конденсата через весь конденсатный тракт и подачи его в деаэратор.

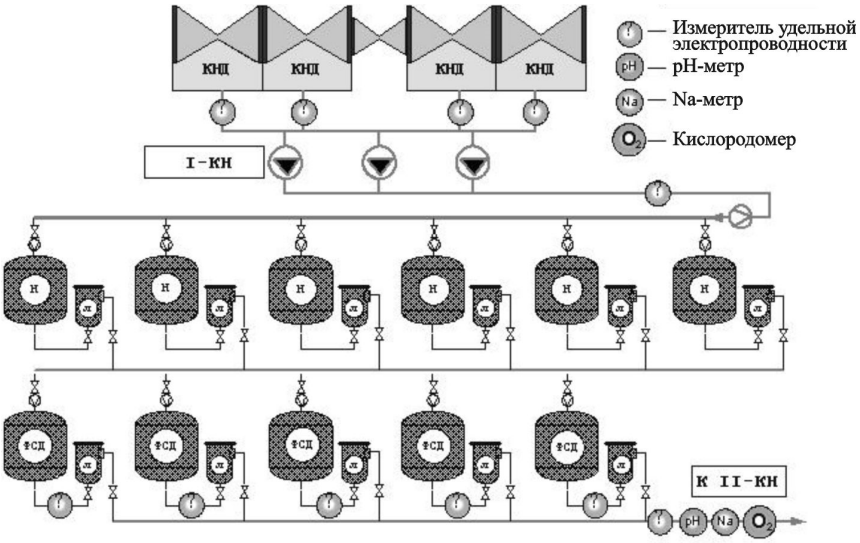


Рис. 11.1. Схема конденсатоочистки РБМК-1000:
Н – катионитовый фильтр, ФСД – фильтр смешанного действия,
Л – фильтр-ловушка

На рис. 11.1 представлена схема конденсатоочистки блока с реактором РБМК-1000. КО предназначена для обессоливания основного конденсата турбины перед подачей его в конденсатный тракт. Обессоливающая установка обеспечивает очистку 100 % расхода конденсата. КО состоит из катионитовых фильтров, фильтров-ловушек и фильтров смешанного действия (ФСД).

Катионитовый фильтр (КФ) предназначен для очистки конденсата от механических примесей, взвешенных продуктов коррозии и катионов растворенных солей при фильтровании его через слой катионита. Фильтр смешанного действия предназначен для удаления растворенных солей из конденсата, прошедшего предварительную очистку на КФ, и обеспечения норм качества воды, установленных для конденсата. Фильтр-ловушка предназначен для улавливания ионитов, проскакивающих через нижнее дренажное устройство ионитового фильтра в процессе работы в результате его частичного или полного повреждения.

Для выбора числа и производительности конденсатных насосов определяющее значение имеет подход к их резервированию. Так как установка конденсатных насосов обходится недорого, то целесообразно использование трех насосов – двух рабочих и одного резервного. К тому же конденсатные насосы выходят из строя чаще, чем питательные. Наличие резервного насоса повышает надежность конденсатного тракта. Конденсатные насосы выбираются с электроприводом. Их мощность значительно меньше, чем питательных насосов. Напор конденсатных насосов определяют, исходя из давления в деаэраторе и необходимости преодоления гидравлического сопротивления всего конденсатного тракта от конденсатора до деаэратора.

Условия работы КН-1 очень тяжелые. Насосы первого подъема работают с минимальным кавитационным запасом в условиях глубокого вакуума на входе и при температуре конденсата на входе, близкой к температуре насыщения. Для улучшения антикавитационных качеств конденсатные насосы выполняют, как правило, двухпоточными с расширенным входом или с предвключенным рабочим колесом. Конденсатные насосы первого подъема с расходом свыше 200 $м^3$/ч изготавливают в вертикальном исполнении.

Конденсатные насосы первой ступени нельзя располагать выше конденсатора из-за отрицательной высоты всасывания и попадания насоса в режим кавитации. Для нормальной работы КН-1 необходим подпор на всасывающей стороне. Этот подпор можно получить, располагая насос ниже конденсатора.

Для конденсатных насосов второй ступени необходимый подпор создается конденсатными насосами первой ступени.

Основные требования, предъявляемые к конденсатным насосам:

обеспечение стабильной напорной характеристики при параллельной работе насосов;

отсутствие присосов воздуха через работающий и неработающий насосы.

Регенеративные подогреватели по принципу передачи теплоты греющего пара делятся на поверхностные и смешивающие. Основное отличие между ними состоит в том, что в смешивающих подогревателях есть непосредственный контакт между нагреваемой и греющей средой, а в поверхностных нагрев происходит через поверхность теплообмена, которой разделены «горячая» и «холодная» среды. По этой причине температура нагрева воды в поверхностном подогревателе всегда ниже температуры конденсации греющего пара.

Применение смешивающих подогревателей термодинамически более выгодно, так как в них нет перепада температур в поверхности теплообмена, и возможно нагреть воду до температуры насыщения греющего пара. При одинаковой температуре подогрева воды давление в отборе на смешивающий подогреватель должно быть ниже, чем давление в отборе на поверхностный подогреватель, благодаря чему уменьшается недовыработка электроэнергии пара отбора, и повышается тепловая экономичность.

Но, с другой стороны, применение смешивающих подогревателей осложняется необходимостью использования конденсатных насосов после каждого смешивающего подогревателя, что осложняет и удорожает схему, особенно при высоком давлении пара в отборе. По этим причинам применение смешивающих подогревателей ограничивается первыми ступенями (после конденсатора) регенеративного подогрева – как правило, не более двух. Чаще всего встречаются схемы со всеми поверхностными подогревателями. Реже – схемы со смешивающими подогревателями.

В поверхностных подогревателях греющий пар конденсируется. Его конденсат (дренаж) не сбрасывается, а используется в схеме регенерации, где его тепло утилизируется. По способу использования конденсата горячего пара схемы с поверхностными подогревателями делятся на: схемы с каскадным сливом дренажа; схемы с дренажными насосами; комбинированные схемы.

В схемах с каскадным сливом дренажа (рис. 11.2) конденсат греющего пара из вышестоящего подогревателя самотеком из-за разности давлений поступает в нижестоящий, где наряду с паром отбора отдает свое тепло основному конденсату. Далее охлажденный конденсат поступает в ПНД с еще меньшим давлением и т.д. Из самого первого по потоку основного конденсата ПНД сумма расходов дренажей всех ПНД поступает самотеком в конденсатор.

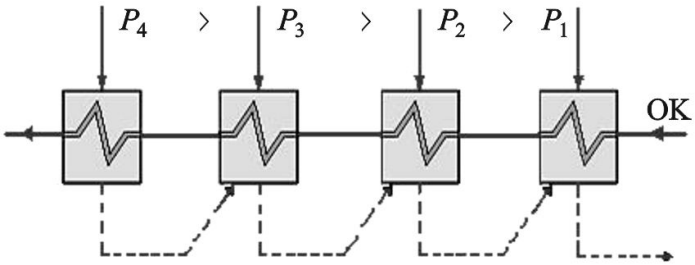


Рис. 11.2. Схема с каскадным сливом дренажей

Преимущества такой схемы:

1) простота (отсутствуют дренажные насосы и их обвязка);

2) 100 % конденсата проходят через БОУ, что очень важно с точки зрения водно-химического режима.

Недостатки схемы каскадного слива:

1) дополнительный «горячий» поток в конденсатор (возрастают потери тепла);

2) из-за уменьшения расходов пара в отборы перегружаются лопатки последней ступени турбины;

3) горячий конденсат пара выше расположенного отбора вытесняет пар нижестоящего отбора с более низким потенциалом, в результате чего снижается термический КПД.

В схемах с дренажными насосами (рис. 11.3) дренаж каждого подогревателя закачивается дренажным насосом в конденсатный тракт за данный подогреватель.

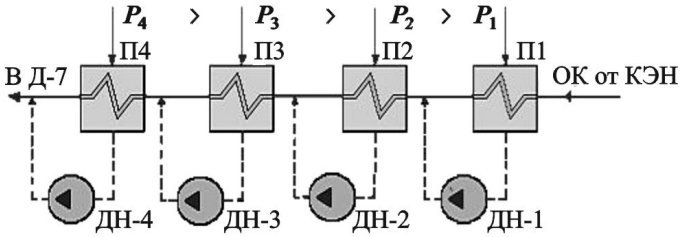


Рис. 11.3. Схема с дренажными насосами

Преимущество – выше термодинамическая эффективность (вытесняется греющий пар выше расположенного отбора с более высоким потенциалом).

Недостаток – требуется большое количество дренажных насосов с их обвязкой.

Комбинированная схема слива дренажа (рис. 11.4) с одним – двумя дренажными насосами является компромиссом между схемой с каскадным сливом и схемой с дренажными насосами. Подогреватели связаны попарно каскадным сливом, а конденсат греющего пара (КГП) каждой пары подогревателей закачивается в тракт основного конденсата своим дренажным насосом.

Для более эффективного использования теплоты КГП в схемах с каскадным и комбинированным сливом применяют охладители дренажа. В тракте низкого давления применяются вынесенные охладители дренажа, которые располагаются в отдельном корпусе.

После вышестоящего подогревателя низкого давления КГП направляется в охладитель дренажа, где отдает часть своего тепла основному конденсату. Охлажденный конденсат греющего пара направляется в нижестоящий подогреватель, где смешивается с его дренажем, а потом закачивается в тракт основного конденсата дренажными насосами (комбинированная схема) или сливается в нижестоящий подогреватель. За счет более полного использования теплоты греющего пара в ступени подогрева с охладителем дренажа тепловая экономичность ПТУ повышается. Поэтому при

уменьшении температурного напора в охладителе дренажа (т.е. разности между температурами охлажденного дренажа и температурой основного конденсата на входе в охладитель дренажа) тепловая экономичность повышается.

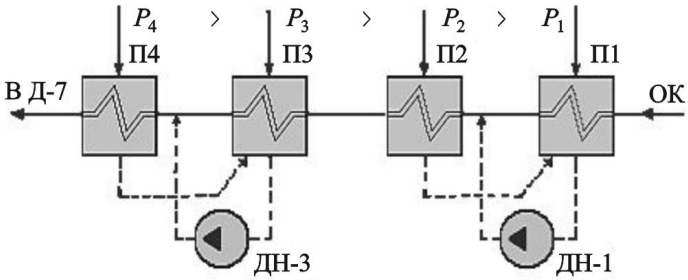


Рис. 11.4. Комбинированная схема

Охладитель дренажа конструктивно сложно выполнить на полный расход основного конденсата (передаваемое в нем основному конденсату тепло в несколько раз меньше, чем в собственно подогревателе). Поэтому через охладитель дренажа пропускается только часть расхода основного конденсата, величина которого устанавливается подбором дроссельной шайбы (рис. 11.5).

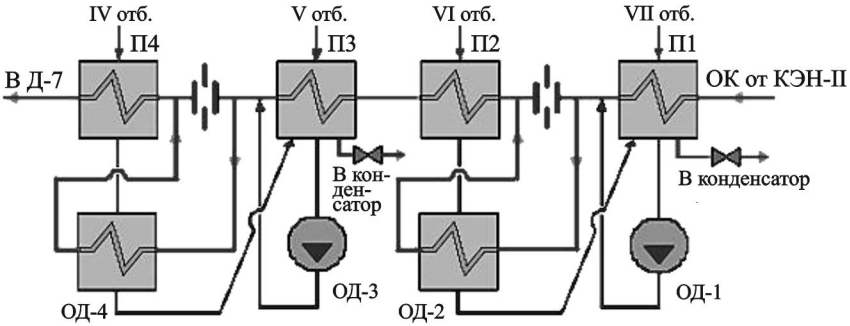


Рис. 11.5. Комбинированная схема с охладителями дренажа

На рис. 11.6 представлен вариант схемы тракта основного конденсата для энергоблока с реактором РБМК-1000.

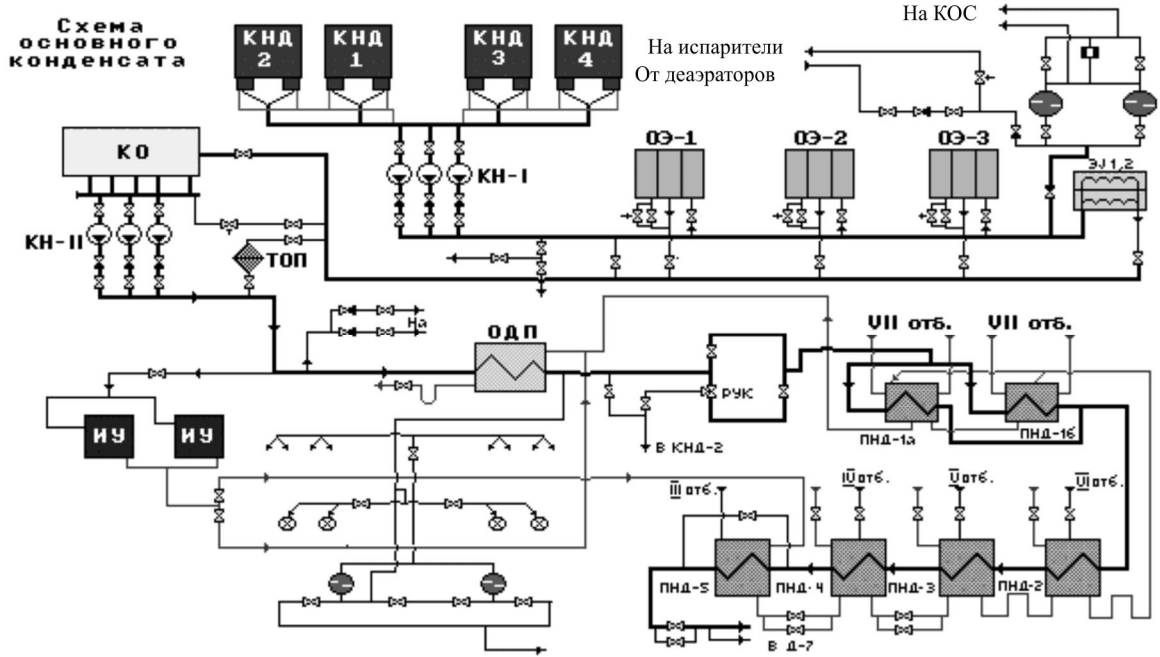


Рис. 11.6. Схема тракта основного конденсата блока с РБМК-100

Основной конденсат (ОК) из конденсатосборников конденсаторов турбины поступает на всас конденсатных насосов 1-й ступени КН-I. После КН-I ОК поступает на охлаждение основных эжекторов и эжекторов уплотнений, где за счет конденсации пара из паровоздушной смеси эжекторов и уплотнений нагревается на ≈1,5–2 °С в номинальном режиме. Все холодильники эжекторов включены параллельно по охлаждающему конденсату.

Далее основной конденсат проходит через фильтры КО и поступает на всас КН-2. После конденсатных насосов 2-й ступени основной конденсат проходит трубное пространство охладителей дренажа подогревателей (ОДП) и через клапан регулятора уровня и рециркуляции (РУК) поступает к подогревателям низкого давления. Часть основного конденсата от РУК по линии рециркуляции поступает в конденсатосборники конденсаторов. РУК автоматически поддерживает заданный уровень конденсата в конденсатосборниках.

Греющий пар на ПНД поступает из отборов турбины. Для исключения возможности обратного заброса на турбину пара или его конденсата каждый из отборов (кроме последнего) защищен одним или двумя быстродействующими обратными клапанами. Слив конденсата греющего пара (дренажей) ПНД выполнен каскадным.

12. Деаэрационная установка

Деаэрационная установка предназначена для:

- удаления растворенных в конденсате коррозионно-активных газов (O_2 и CO_2);
- создания кратковременного запаса питательной воды на АЭС;
- подогрева питательной воды; деаэратор является подогревателем смешивающего типа в системе регенеративного подогрева.

Присутствие кислорода и углекислого газа в питательной воде вызывает электрохимическую коррозию металла паросилового оборудования АЭС, вплоть до образования свищей. Продукты коррозии, откладываясь на поверхностях нагрева, вызывают резкое увеличение термического сопротивления стенок теплообменных труб. Поэтому предельное содержание O_2 и CO_2 в питательной воде

нормируется в соответствии с «Правилами технической эксплуатации ЭС».

Кислород и углекислый газ попадают в основной конденсат вследствие присосов воздуха через неплотности вакуумной системы турбоустановки и с добавочной водой. Кроме того, CO_2 может выделяться при термическом разложении бикарбонатов, попадающих в основной конденсат с присосами охлаждающей воды в конденсаторе.

Деаэрированная вода (т.е. вода после удаления из нее O_2 и CO_2) накапливается в деаэраторном баке, который выполняет функцию емкости для создания кратковременного (3–5 мин) запаса питательной воды на случай внезапного прекращения подачи основного конденсата в деаэратор. Кроме того, деаэраторный бак является демпфирующей (буферной) емкостью для обеспечения стабильного режима работы питательных насосов при резких колебаниях нагрузки энергоблока.

Так как деаэратор является теплообменником смешивающего типа, то его использование в системе регенерации позволяет повысить тепловую экономичность турбоустановки за счет замены поверхностного регенеративного подогревателя смешивающим. Применение деаэратора в качестве одного из регенеративных подогревателей приводит к удешевлению системы регенерации, так как стоимость деаэратора меньше стоимости поверхностного подогревателя (особенно ПВД).

Деаэраторная установка является удобным местом для приема и сбора высокопотенциальных потоков дренажа из различных узлов тепловой схемы турбоустановки (конденсат греющего пара ПВД, сепарат СПП и др.). Вследствие вышеперечисленных причин деаэрационная установка включается в систему регенерации (по воде) между подогревателями низкого давления (ПНД) и питательными насосами и отделяет тракт основного конденсата от тракта питательной воды.

12.1. Способы деаэрации

Для деаэрации воды могут использоваться химическая и термическая деаэрация. Суть химической деаэрации заключается в добавлении в воду химических реагентов для связывания растворенных газообразных примесей. Недостатком этого метода является

его избирательность, поэтому он нашел ограниченное применение. Более распространенным способом является термическая деаэрация. Принцип работы термического деаэратора основан на использовании закона Генри, который можно сформулировать следующим образом: равновесная концентрация растворенного в воде газа $C_г$ (мг/кг) прямо пропорциональна парциальному давлению газа над поверхностью воды $P_г$, т.е.

$$C_г = К_г \cdot P_г,$$

где $К_г$ – константа фазового равновесия (константа Генри). Величина константы Генри зависит от вида газа и температуры и не зависит от количественного состава и давления в системе.

Для удаления растворенных в воде газов – десорбции, необходимо нарушить фазовое равновесие между газами, находящимися над поверхностью воды и растворенными в ней. Проще всего это можно выполнить нагревом воды до температуры насыщения при постоянном давлении. Парциальное давление газов над поверхностью воды при этом уменьшается практически до нуля, растворимость газов резко снижается, и идет интенсивная дегазация. Зависимость растворимости кислорода и углекислого газа в воде от температуры воды при разных давлениях показана на рис. 12.1.

Для обеспечения эффективной деаэрации необходимы большая площадь и время контакта пара с нагреваемой водой. Увеличение площади контакта обеспечивается распылением воды на мелкие капли и струи, а также образованием тонких стекающих пленок. Увеличение времени контакта обеспечивается развитием деаэрационных колонок в высоту. Греющий пар подается снизу, а деаэрируемая «холодная» вода – сверху. При этом обеспечивается наиболее эффективная противоточная схема движения пара и воды.

Потоки воды с более высокой температурой (дренажи подогревателей, сепарат и др.) вводятся в промежуточную часть колонки.

Выпар отводится из верхней части деаэрационной колонки. В зависимости от способа организации контакта пара и воды деаэраторы делятся на следующие основные типы:

- струйно-капельные деаэраторы;
- пленочные деаэраторы;
- барботажные деаэраторы;
- комбинированные деаэраторы.

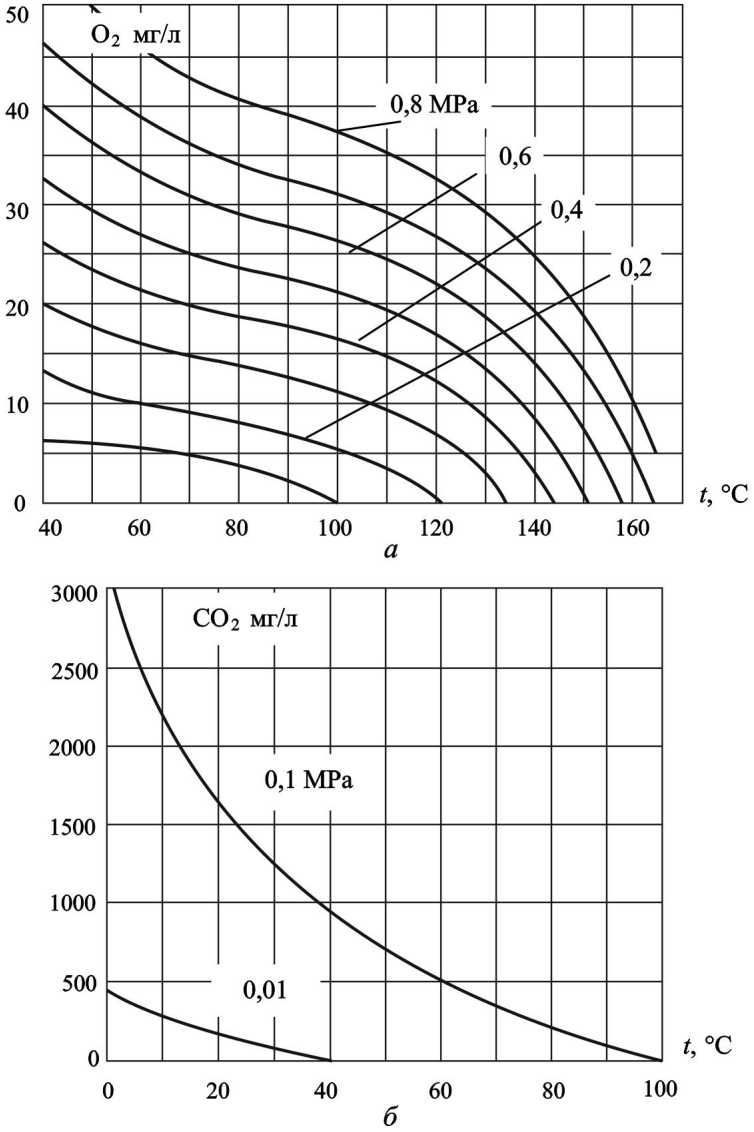


Рис. 12.1. Зависимость растворимости:
а – кислорода в воде; *б* – углекислого газа в воде

12.2. Типы деаэраторов

Для обеспечения эффективной деаэрации необходимы большая площадь и время контакта пара с нагреваемой водой. Увеличение площади контакта обеспечивается распылением воды на мелкие капли и струи, а также образованием тонких стекающих пленок. Увеличение времени контакта обеспечивается развитием деаэрационных колонок в высоту. Греющий пар подается снизу, а деаэрируемая «холодная» вода – сверху. При этом обеспечивается наиболее эффективная противоточная схема движения пара и воды.

Потоки воды с более высокой температурой (дренажи подогревателей, сепарат и др.) вводятся в промежуточную часть колонки. Выпар отводится из верхней части деаэрационной колонки. В зависимости от способа организации контакта пара и воды деаэраторы делятся на следующие основные типы:

струйно-капельные;

пленочные;

барботажные;

комбинированные.

По давлению греющего пара (давлению в деаэрационной колонке) термические деаэраторы делятся на следующие типы:

вакуумные деаэраторы;

атмосферные деаэраторы;

деаэраторы повышенного давления;

В вакуумном деаэраторе давление поддерживается на уровне 0,01–0,075 МПа. Отвод газов осуществляется паровым или водоструйным эжектором. Вакуумные деаэраторы применяются в составе деаэраторной установки подпитки теплосети. Вместо греющего пара в деаэратор может вводится сетевая вода с температурой 100–150 °С, которая является греющим агентом.

В атмосферных деаэраторах давление поддерживается на уровне 0,12 МПа, с целью эвакуации газов из колонки без эжекторов. Атмосферные деаэраторы применяются в составе деаэраторных установок подпиточной воды теплосети и конденсата, возвращаемого с производства на ТЭЦ и ГРЭС.

Деаэраторы повышенного давления применяются для деаэрации питательной воды на ТЭС и АЭС. Рабочее давление в деаэраторе обычно устанавливают на уровне 0,6–0,7 МПа (6–7 кгс/см^2). Одна-

ко в последнее время начинают использование деаэраторов с давлением $p_р$ =1,0–1,2 МПа (10–12 кгс/см^2).

В состав деаэратора входят деаэраторный бак и деаэрационная колонка. На блоках большой мощности на одном деаэраторном баке устанавливаются, как правило, две деаэрацинных колонки.

Для увеличения площади контакта греющего пара и деаэрируемой воды используются разные приемы. Соответственно, деаэраторы по типу деаэрационной колонки классифицируются следующим образом:

струйно-капельные;

пленочные;

барботажные;

комбинированные.

Принципиальное устройство деаэрационной колонки струйно-капельного типа представлено на рис. 12.2. В струйно-капельном деаэраторе деаэрируемая вода системой дырчатых тарелок *6* разделяется на струи, стекающие каскадом вниз. Снизу, навстречу струям воды, движется пар. Характер обтекания паром струй приближается к поперечному. Расположение нескольких тарелок по высоте колонки увеличивает общее время пребывания воды в ней. Площадь отверстий в тарелке составляет около 8 % от общей площади тарелки.

Основной конденсат поступает через патрубок *1* в открытую (или закрытую) кольцевую камеру *3* (изображена открытой), откуда через порог переливается на первую тарелку, в которой имеется горловина для выхода выпара. Потоки «горячих» дренажей (от ПВД и других узлов) подаются через патрубки *2* и разбрызгиваются над промежуточными тарелками через перфорированную трубу *4*. Пар подводится в нижней части через патрубок *5*. Выпар удаляется в верхней части колонки.

Основные недостатки струйно-капельных деаэраторов:

большая высота деаэрационных колонок, превышающая 4 м;

повышенная металлоемкость и сложность внутренних устройств;

небольшой номинальный нагрев воды (10–15 °С);

эффективность деаэратора понижается как при небольших перегрузках (на 10–15 %), так и при нагрузках менее 40 %;

низкая эффективность дегазации воды при струйном дроблении, вследствие эжектирования газов струями воды.

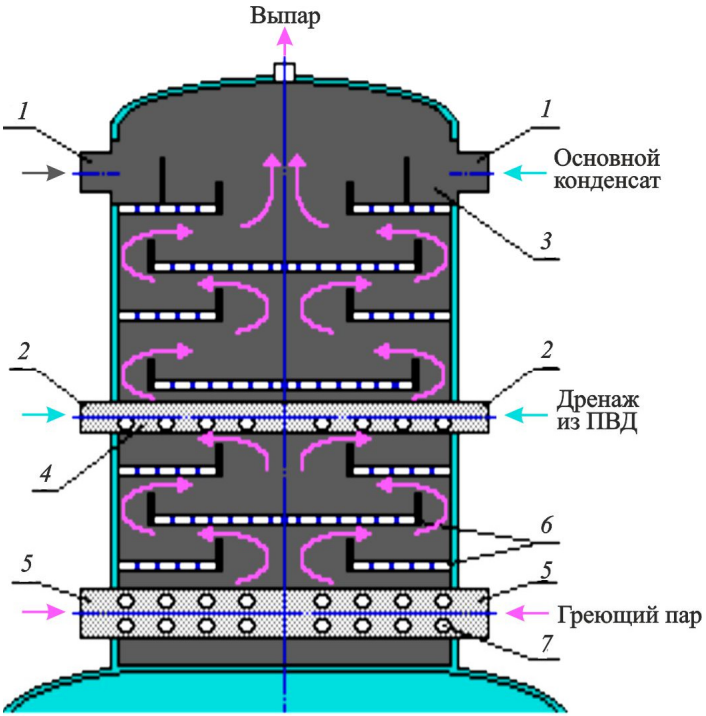


Рис. 12.2. Принципиальное устройство деаэрационной колонки струйно-капельного типа:
1 – подвод основного конденсата, *2* – подвод «горячих» дренажей, *3* – кольцевая камера, *4* – перфорированная труба, *5* – подвод греющего пара, *6* – тарелки, *7* – пароораспределитель

В пленочных деаэраторах (рис. 12.3) деаэрируемая вода в виде тонкой пленки стекает по поверхности насадки. Снизу навстречу пленке воды движется греющий пар, т.е. имеет место противоточная схема. По способам выполнения насадки различают деаэраторы:

с упорядоченной насадкой;

с неупорядоченной насадкой.

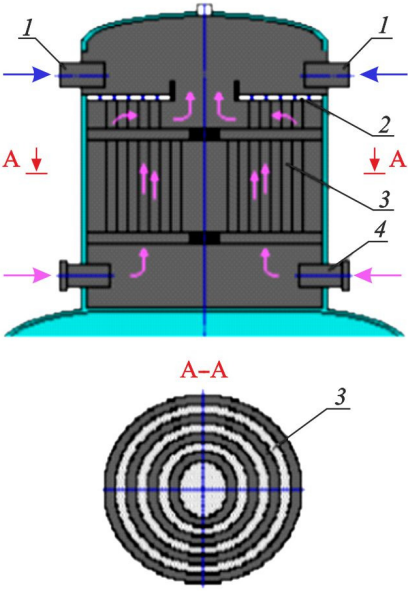


Рис. 12.3. Пленочный деаэратор с упорядоченной насадкой:
1 – подвод воды, *2* – водораспределительная тарелка, *3* – цилиндрическая насадка, *4* – подвод пара

Упорядоченная насадка выполняется из параллельных листов различной формы: плоских вертикальных и наклонных, зигзагообразных, цилиндрических и других, которые собираются в пакеты. Удельная площадь орошения достигает 80 кг/(м^{2}с).

Неупорядоченная насадка (рис. 12.4) выполняется в виде свободной засыпки из множества небольших элементов различной формы, размещаемой на опорной решетке деаэрационной колонки. Элементы неупорядоченной насадки рекомендуется изготавливать из нержавеющей стали вследствие повышенной коррозии в среде с большой концентрацией агрессивных газов. Удельная площадь орошения составляет 30–40 кг/(м^{2}с).

Деаэраторы пленочного типа более устойчивы в работе, чем струйно-капельные, но имеют большее гидравлическое сопротивление по пару, большие металлоемкость и стоимость. Дополнительным недостатком деаэраторов с неупорядоченной насадкой является неустойчивость насадочного слоя и возможность его перемещения под воздействием воды, что приводит к гидравлическим переносам и снижению эффективности деаэрации.

В барботажных деаэраторах (рис. 12.5, 12.6) поток пара вводится в поток воды через специальное барботажное устройство. Проходя через воду, пар дробится на мельчайшие пузырьки, в результате чего увеличивается интенсивность процессов массо- и теплопередачи. В глубине слоя вода несколько перегревается и, поднимаясь вверх, вскипает, благодаря чему идет удаление растворенных в ней газов.

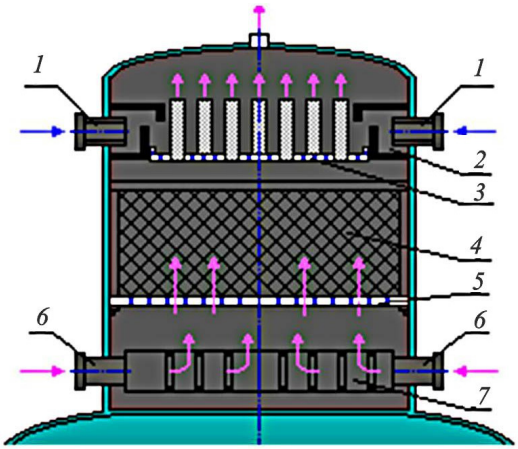


Рис. 12.4. Пленочный деаэратор с неупорядоченной насадкой:
1 – подвод деаэрируемой воды, *2* – кольцевая камера, *3* – водораспределительная камера, *4* – неупорядоченная насадка, *5* – опорная решетка, *6* – подвод пара, *7* – пароораспределитель

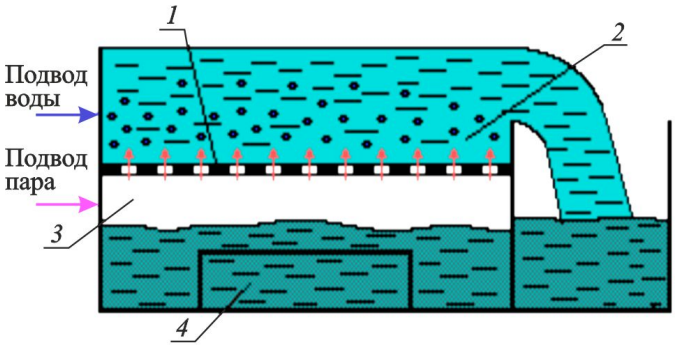


Рис. 12.5. Барботажный деаэратор с «непровальной» барботажной тарелкой:
1 – дырчатый лист, *2* – водовливной порог, *3* – паровая подушка,
4 – отверстие для прохода избыточного пара

Непровальная барботажная тарелка (см. рис. 12.5) представляет собой дырчатый лист, на который сверху поступает вода, а снизу подводится пар. Двигаясь по дырчатому листу, вода непрерывно и многократно обрабатывается паром, подводимым под лист и проходящим через отверстия в нем. При нормальных режимах работы

под листом образуется паровая подушка, которая предотвращает провал жидкости через отверстия дырчатого листа.

Затопленные барботажные устройства (рис. 12.6) располагаются под слоем воды в деаэраторном баке и обеспечивают впрыск и распределение потоков пара в объеме воды. По конструктивному исполнению делятся на сопловые, сопловые с циркуляционными перегородками, с перфорированными коллекторами (трубами или листами), комбинированные.

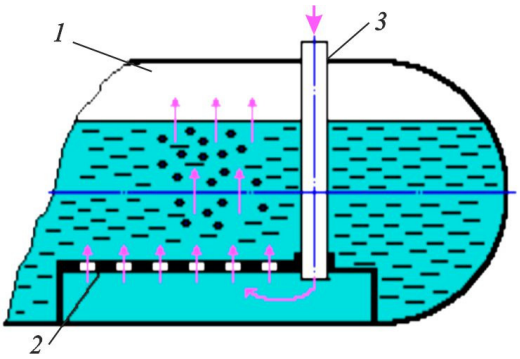


Рис. 12.6. Принципиальная схема затопленного барботажного устройства (с перфорированным листом):
1 – деаэраторный бак, *2* – перфорированный лист, *3* – подвод греющего пара

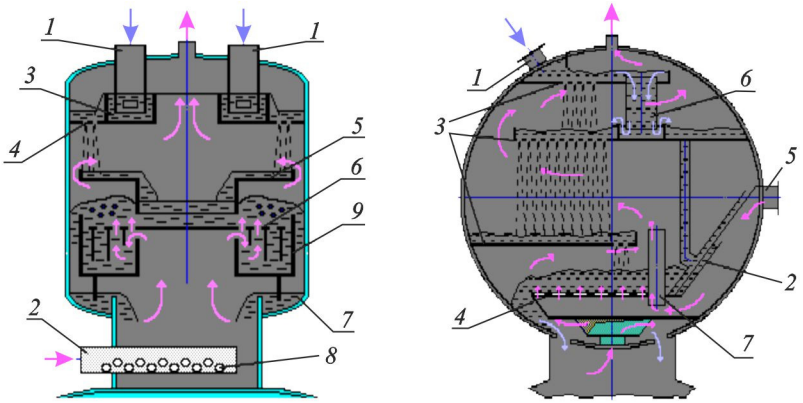
Комбинированные деаэраторы – деаэраторы, сочетающие барботажный принцип работы и струйно-капельный или пленочный. Комбинация струйного и барботажного принципа работы деаэратора позволяет, при сохранении небольшого гидравлического сопротивления по пару:

повысить устойчивость деаэрации при переменных нагрузках;

повысить интенсивность деаэрации;

уменьшить высоту деаэрационной колонки (за счет сокращения числа струйных тарелок).

Наиболее часто применяются комбинированные деаэраторы струйно-барботажного типа с вертикальными (рис. 12.7,*а*) и горизонтальными (рис. 12.7,*б*) колонками.

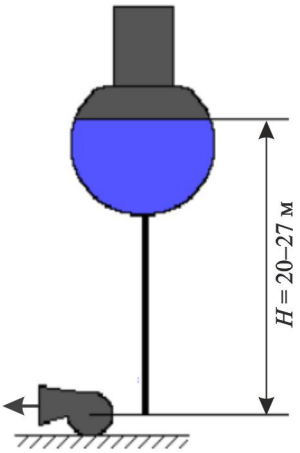


а *б*

Рис. 12.7. комбинированные деаэраторы:
а) *1* – конденсат, *2* – греющий пар, *3* – смеситель, *4* – дырчатый лист, *5* – перепускная тарелка, *6* – барботажное устройство, *7* – гидрозатвор, *8* – парораспределитель, *9* – порог; *б*) *1* – конденсат, *2* – греющий пар, *3* – тарелки, *4* – барботажное устройство, *5* –гидрозатвор, *6*, *7* – перепускной короб

12.3. Размещение деаэраторов на электростанциях

Термические деаэраторы устанавливают на такой высоте над осью входного патрубка питательного насоса, чтобы обеспечивался подпор сверх давления водяных паров при температуре воды, необходимой для безаварийной работы питательных насосов. Требуемая величина подпора определяется паспортными данными насоса.



Давление на входе в насос складывается из давления в деаэраторе и гидростатического давления веса водяного столба. Для деаэраторов повышенного давления высота установки деаэраторов обычно составляет 24–27 м (рис. 12.8).

Рис. 12.8. Расположение деаэратора по отношению к питательному насосу

13. Система питательной воды

На рис. 13.1 представлена схема питательного узла барабанов-сепараторов (БС) энергоблока с реактором РБМК-1000. Питательные узлы предназначены для регулирования, очистки и распределения по БС потока питательной воды, поступающей в КМПЦ от питательных насосов (ПЭН) при заполнении и подпитке контура, а в период работы блока на мощности и в переходных режимах – для автоматического поддержания заданного уровня в БС.

На каждом блоке установлено по два питательных узла, и каждый из них обслуживает БС одной половины КМПЦ.

В состав каждого питательного узла входят:

параллельно расположенные питательные линии, связанные между собой перемычками: две основные питательные линии, образованные трубопроводами диаметром 426×22 мм, и одна пусковая, образованная трубопроводом диаметром 159×9 мм;

трубопроводы, по которым осуществляется подвод питательной воды к питательному узлу от напорного коллектора ПЭН;

трубопроводы, по которым питательная вода поступает в БС.

На каждой питательной линии установлены запорные задвижки Ду 400, обратный клапан Ду 400, регулирующий клапан Ду 250, механический фильтр для улавливания частиц размером более 0,1 мм перед подачей воды в барабан-сепараторы.

На байпасной линии установлены запорные задвижки Ду 150, два регулирующих клапана Ду 150, обратный клапан Ду 150, расходомерная шайба, механический фильтр для улавливания частиц размером более 0,1 мм перед подачей воды в барабаны-сепараторы.

Запорная арматура позволяет отсекать питательные линии при выполнении ремонтных работ.

На двух входных перемычках между основными линиями и байпасной установлено по одной запорной задвижке Ду 150.

Смеситель состоит из корпуса и закрепленного в нем устройства для подачи продувочной воды в середину потока питательной воды, чтобы избежать чрезмерных термических напряжений при смешении двух потоков воды с сильно отличающейся температурой.

На рис. 13.2 представлена схема трубопроводов питательной воды энергоблока РБМК-1000. На блоке РБМК-1000 установлено

четыре деаэратора. Все четыре деаэратора объединены уравнительными трубопроводами по пару и воде и работают как единая установка. В уравнительные трубопроводы по воде предусмотрена подача воды от баков чистого конденсата в аварийных режимах. На уравнительных трубопроводах, а также на коллекторе всаса питательных насосов установлено по две секционирующие задвижки, которые позволяют разделять группы деаэраторов.

Питательный насосный агрегат СПЭ-1650-75 устанавливается в качестве основного питательного насоса и предназначен для подачи питательной воды из деаэраторов в барабаны-сепараторы.

Насос СПЭ-1650-75 – горизонтальный, однокорпусной, секционный, трехступенчатый, с односторонним расположением рабочих колес.

На блоке установлено пять питательных насосов (четыре рабочих, один – резервный). Производительность каждого насоса соответствует примерно половине расхода пара на одну турбину, работающую с номинальной нагрузкой.

Аварийные питательные насосы предназначены для подачи воды в КМПЦ при работе САОР, а также для подпитки КМПЦ при переходных режимах на блоке.

В тракте питательной воды энергоблока с РБМК-1000 не предусмотрены регенеративные подогреватели высокого давления.

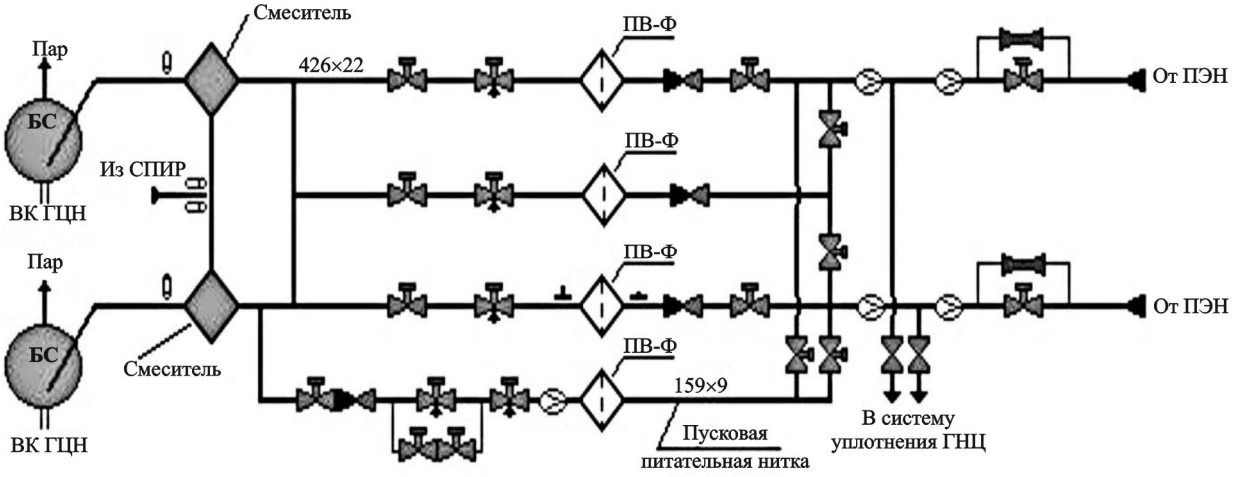


Рис. 13.1. Схема питательного узла энергоблока РБМК-1000

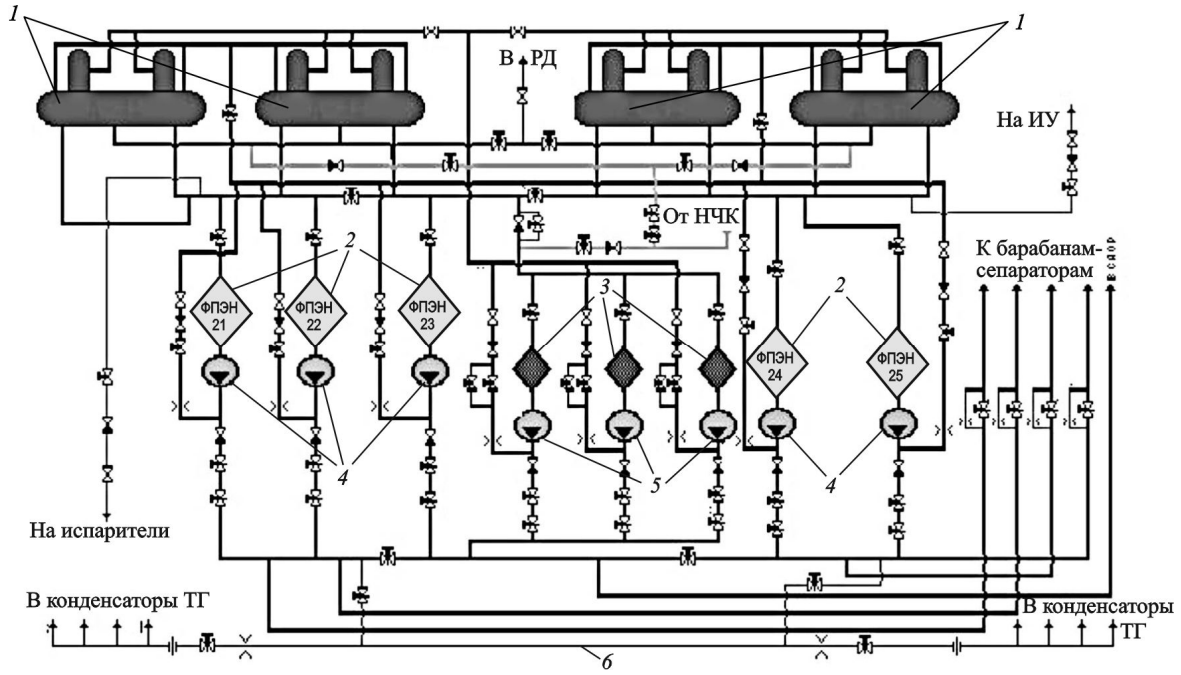


Рис. 13.2. Схема трубопроводов питательной воды энергоблока РБМК-1000:
1 – деаэратор, *2* – фильтр питательного насоса, *3* – фильтр аварийного питательного насоса, *4* – питательный насос, *5* – аварийный питательный насос, *6* – трубопровод промывок

Список литературы

1. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / Под общ. ред. Ю.М. Черкашова. М.: ГУП НИКИЭТ, 2006.

2. Ядерные энергетические установки: Учебное пособие для вузов. Б.Г. Ганчев и др.: Под общей ред. акад. Н.А. Доллежаля. М.: Энергоатомиздат, 1983, 1990.

3. Нигматулин И.Н., Нигматулин Б.И. Ядерные энергетические установки. М.: Энергоатомиздат, 1986.

4. Монахов А.С. Атомные электрические станции и их технологическое оборудование. М.: Энергоатомиздат, 1986.