

Над головками топливных каналов находится поворотное или передвижное защитное перекрытие, упрощающее процесс перегрузки каналов и позволяющее проводить осмотр головок каналов, подводящих и отводящих трубопроводов во время планово-предупредительного ремонта. Перемещение передвижного перекрытия выполняется мостовым краном центрального зала.

Компоновка основного оборудования реактора со сверхкритическими параметрами пара, разводка подводящих и отводящих трубопроводов, расположение напорных и сборных коллекторов, регулирующих и расходомерных устройств выгодно отличается от компоновки реактора с обычными высокими параметрами теплоносителя в первую очередь за счет исключения из схемы барабанов-сепараторов пара и циркуляционных насосов.

В табл. 2 представлены основные характеристики рассмотренных реакторов.

* * *

Из анализа приведенных конструкций уран-графитовых реакторов канального типа с трубчатыми твэлами на докритические и сверхкритические параметры пара следует, что габариты металлоконструкций (верхняя и нижняя плиты, кожух кладки, бак боковой водяной защиты, верхнее перекрытие и графитовая кладка) не зависят от параметров теплоносителя; в небольшой степени от мощности реактора зависит тепловыделение и температурный режим металлоконструкций.

В отличие от реакторов корпусного типа или канального с трубами под давлением и стерженьковыми твэлами при использовании трубчатых твэлов может быть создана единая

Водно-химический режим на АЭС с канальным реактором и ядерным перегревом пара

О. Т. КОНОВАЛОВА, Т. И. КОШЕЛЕВА, В. В. ГЕРАСИМОВ,
Л. С. ЖУРАВЛЕВ, Г. А. ЩАПОВ (С С С Р)

Уран-графитовый кипящий реактор второго блока Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова (БАЭС) работает по одноконтурной тепловой схеме. Генерируемый в реакторе пар направляется непосредственно в турбины, а конденсат этого пара служит основой составляющей питательной воды реактора.

Конструкционным материалом основных элементов и узлов реактора, с которыми сопри-

Основные характеристики реакторов Таблица 2

Характеристика	Первый блок БАЭС (730 ИК; 268 ШПК)	Второй блок БАЭС (732 ИК; 266 ШПК)	Проект (264 КИП; 358 К1П; 400 К2П)
Мощность реактора, <i>Мвт</i> (эл.)	100	200	800—1000
Общая металлоемкость (верхняя и нижняя плиты, кожух, бак биологической защиты и др.), <i>т</i>	1800	1800	~ 2000
Вес барабанов-сепараторов, <i>т</i>	94	156	—
Вес циркуляционного контура, <i>т</i>	110	110	370
Вес графитовой кладки, <i>т</i>	810	810	1200

стандартная конструкция реактора, у которого изменены каналы и узел водопаротрубопроводов.

Для сооружения металлоконструкций реакторов практически не требуется специальных сталей — вполне пригодны материалы, применяемые в котлостроении. Технология изготовления и монтажа реакторов проще технологии изготовления и монтажа паровых котлов.

Машиностроительной базой для сооружения таких реакторов может служить большое число заводов средней оснащенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Доллежалъ, П. И. Алещенков. «Атомная энергия», 5, 223 (1958).
2. Н. А. Доллежалъ и др. Там же, 17, 335 (1964).
3. П. И. Алещенков и др. Там же, 27, 379 (1969).

УДК 621.039.534.24.

касается теплоноситель (вода и водяной пар), является нержавеющей сталь 0X18H10T. Из нее выполнены каналы и оболочки твэлов, а также трубопроводы циркуляционного контура реактора. Барабан-сепаратор и паропроводы острого пара изготовлены из перлитной стали.

Реактор работает с двумя стандартными турбинами ВК-100. Все элементы турбин,

а также регенеративные подогреватели выполнены из стандартных материалов, применяемых в турбостроении. Из перлитных сталей изготовлены корпуса и трубчатка ПВД, паропроводы отборного пара к подогревателям, корпуса деаэраторов, конденсаторов, корпуса ПНД, конденсаторопроводы, трубопроводы питательной воды. Трубчатка ПНД выполнена из латуни, а конденсаторные трубки — из сплава МНЖ-5-1.

Из стали типа 0X18H10T изготовлено ~15% поверхностей контура, из перлитных сталей — 25%, остальные поверхности — из латуни и сплава МНЖ-5-1.

При разнообразном наборе конструкционных материалов, наличии довольно значительных поверхностей из перлитных сталей и генерации пара в реакторе кипящего типа водный режим должен был обеспечить минимальную скорость коррозии конструкционных материалов и минимальные отложения на поверхности твэлов.

Основная трудность обеспечения такого режима связана с радиолизом воды. Как известно, процессы радиолиза воды протекают наиболее интенсивно в реакторах кипящего типа. Это обусловлено тем, что молекулярные продукты радиолиза (кислород, водород) удаляются с паром из воды раньше, чем заканчиваются реакции рекомбинации молекулярных продуктов радиолиза с возникшими радикалами. Предельное значение выхода водорода при радиолизе в кипящих реакторах составляет одну молекулу на 100 эв поглощенной энергии. Такой выход радиолитических продуктов воды можно ожидать только при весьма высоких скоростях выхода генерируемого в реакторе пара, которые, однако, не наблюдаются в реальных условиях.

В реальных условиях выход радиолитических продуктов разложения воды значительно ниже, поскольку при фактических скоростях пара происходит частичная рекомбинация продуктов радиолиза. Выход радиолитического кислорода в реакторе второго блока БАЭС составляет 10 н.л/Мет.ч, что соответствует концентрации его в насыщенном паре после сепаратора, равной 5—6 мг/кг.

При ядерном перегреве пара в пароперегревательных каналах реактора второго блока БАЭС дополнительное увеличение продуктов радиолиза воды не наблюдается.

Газообразные радиолитические примеси теплоносителя (кислород, водород) вместе с паром поступают в турбины, затем с отборным паром—

в регенеративные подогреватели, вызывая усиленную коррозию паро-водяного тракта.

Учитывая особенности коррозионного поведения конструкционных материалов, на втором блоке БАЭС необходимо поддерживать слабо-аммиачный водный режим. Этот режим характеризуется поддержанием в теплоносителе слабощелочной среды ($pH = 8 \div 9,5$) путем введения растворов аммиака. Максимальная концентрация аммиака обусловлена допустимой коррозией медных сплавов и составляет 2 мг/кг.

При проектировании возникли опасения, что такие относительно небольшие концентрации аммиака, недостаточные для подавления радиолиза воды, при своем полном разложении в поле облучения при соединении с кислородом вызовут образование нитрит- и нитрат-ионов. В результате этого может произойти уменьшение величины pH ниже семи. Однако, как показал опыт эксплуатации, скорость образования нитратов невелика и, как правило, не оказывает существенного влияния на величину pH теплоносителя.

Поддержание величины pH питательной воды на уровне 8—9,5 оказывает благоприятное воздействие на перлитные стали. Конденсатопитательный тракт и главным образом ПВД, целиком выполненные из перлитных сталей, работают при температурах не выше 215—217°С. Константа диссоциации гидроокиси аммония (NH_4OH) при температурах 150 и 200°С еще достаточно высока ($7,41 \cdot 10^{-6}$ и $3,3 \cdot 10^{-6}$ соответственно), вследствие чего величина pH при данных температурах незначительно отличается от значений pH при комнатной температуре. Таким образом, содержание в воде 2 мг/кг аммиака обеспечивает величину pH при $t = 150 \div 200^\circ C$ не ниже 9,0.

Как указывалось, каналы и оболочки твэлов БАЭС выполнены из нержавеющей стали. В испарительных каналах, где происходит кипение, создаются реальные условия для концентрирования хлоридов, что при одновременном присутствии радиолитического кислорода может вызвать коррозионное растрескивание нержавеющей стали. В связи с этим содержание хлоридов в циркуляционной воде реактора ограничено весьма жесткими нормами.

В табл. 1 приведены эксплуатационные нормы качества теплоносителя для второго блока БАЭС.

Для поддержания содержания солевых примесей и продуктов коррозии теплоносителя

Нормы качества воды и пара для второго блока БАЭС в период эксплуатации

Таблица 1

Нормируемые показатели	Питательная вода	Циркуляционная вода реактора	Продувочная вода реактора	Насыщенный и перегретый пар	Конденсат турбины
Общая жесткость, не более, <i>мкг-экв/кг</i>	3	15	—	—	3
Щелочность (по смешанному индикатору за вычетом аммиака), не более, <i>мкг-экв/кг</i>	—	—	50	—	—
Натрий (определяемый на пламяфотометре), не более, <i>мкг/кг</i>	—	—	—	—	10
Кремниевая кислота (SiO_3^{2-}), не более, <i>мкг/кг</i>	30	—	1000	20	—
Хлориды (Cl'), не более, <i>мкг/кг</i>	—	30 *	—	—	—
Окислы железа (Fe), не более, <i>мкг/кг</i>	—	60	—	—	—
Содержание меди (Cu), не более, <i>мкг/кг</i>	5	—	—	—	—
Суммарное содержание продуктов коррозии, не более, <i>мкг/кг</i>	—	—	500	—	5
Содержание кислорода (O_2), <i>мкг/кг</i>	10	—	—	—	5
Содержание масел, не более, <i>мкг/кг</i>	300	—	—	—	30
Значение pH, не менее	—	8,0	—	—	—

* В аварийных случаях допускается в течение 20 ч за каждые 1000 ч работы реактора увеличение хлоридов в циркуляционной воде до 150 *мкг/кг*.

в допустимых пределах на втором блоке БАЭС предусмотрена конденсатоочистка, кроме того, осуществляется продувка воды из циркуляционного контура реактора.

В пусковой период достаточно эффективным для очистки от продуктов коррозии оказался механический намывной фильтр. В качестве фильтрующего материала используются специально обработанные древесные опилки.

Осуществление мероприятий по уплотнению конденсаторов турбин со стороны охлаждающей воды позволяет периодически включать в работу конденсатоочистку.

Проектная величина продувки циркуляционного контура реактора составляет 1,5% паропроизводительности. Однако после проведения пусконаладочных работ при установившемся эксплуатационном режиме продувка была снижена до величины менее 1%. Продувка регулируется в зависимости от содержания хлоридов в воде циркуляционного контура реактора. В настоящее время для измерения концентрации хлоридов используется метод с чувствительностью 1 *мкг/кг*. Содержание хлоридов в воде циркуляционного контура реактора при стационарном режиме работы не поднимается выше нормы (30 *мкг/кг*) и в среднем поддерживается на уровне 15—13 *мкг/кг*. При этом величина непрерывной продувки составляет менее 1% паропроизводительности.

Продувочная вода из реактора второго блока направляется на установку спецводоочистки, где обрабатывается продувочная вода первого и второго блоков БАЭС одновременно. Идентичный водный режим, поддерживаемый на этих блоках, позволяет иметь одну установку по переработке продувочных вод.

Для борьбы с коррозией конденсатопитательного тракта производится тщательная деаэрация как питательной воды, так и ее составляющих. При этом осуществляется отсос неконденсирующихся газов из корпусов ПВД и ПНД. Конденсаты греющего пара этих подогревателей направляются каскадно в деаэраторы (ПВД) и конденсаторы (ПНД), где деаэрируются до содержания кислорода в воде 10—50 *мкг/кг*. Содержание кислорода в питательной воде (после деаэратора) составляет 10—15 *мкг/кг*.

Экспериментальная работа по связыванию радиолитического кислорода в греющем паре ПВД добавлением в него растворов гидразингидрата дала положительные результаты. В этом случае содержание кислорода в конденсате греющего пара составляло не более 0,03 *мкг/кг*.

В результате всех мероприятий, проведенных с целью поддержания оптимального водного режима, в настоящее время качество теплоносителя на втором блоке БАЭС характеризуется данными, приведенными в табл. 2.

Фактические показатели качества теплоносителя второго блока БАЭС в период нормальной эксплуатации

Таблица 2

Определяемые показатели	Питательная вода	Циркуляционная вода реактора	Продувочная вода реактора	Насыщенный пар	Перегретый пар	Конденсат турбины
Общая жесткость, <i>мкг-экв/кг</i>	< 3	< 3	3 ÷ 6	—	—	3
Кремниевая кислота (SiO_3^{2-}), <i>мкг/кг</i>	—	—	100 ÷ 300	5 ÷ 15	5 ÷ 15	—
Хлориды (Cl'), <i>мкг/кг</i>	25	25	25	—	—	—
Кислород, <i>мкг/кг</i>	10—15	30	30	$(5 \div 6) \cdot 10^3$	$(5 \div 6) \cdot 10^3$	40—50
Аммиак, <i>мг/кг</i>	1 ÷ 2,5	0,6 ÷ 1,4	0,6 ÷ 1,4	0,8 ÷ 2	0,8 ÷ 2	1 ÷ 2
Значение pH	9,2 ÷ 9,5	8 ÷ 9	9 ÷ 9,5	9 ÷ 9,5	9 ÷ 9,5	9 ÷ 9,5
Окислы железа (Fe), <i>мкг/кг</i>	20—60	20—60	30—60	20—30	20—30	0
Медь (Cu), <i>мкг/кг</i>	—	—	7 ÷ 30	0,4	—	0,8
Удельная активность, <i>к/л</i>	—	—	10^{-5}	—	10^{-7}	—

Как видно из табл. 1 и 2, все показатели водного режима в период нормальной эксплуатации практически находятся в пределах заданных норм.

За состоянием поверхности перлитных сталей на втором блоке БАЭС ведутся постоянные наблюдения. Осмотр различного оборудования, изготовленного из перлитной стали, показал, что элементы оборудования, работающие в тех же условиях, что и на обычных ТЭС (деаэраторы, питательный тракт), ведут себя так же, как на ТЭС.

Часть оборудования, работающего в более тяжелых условиях из-за наличия радиолитического кислорода, наряду с общей равномерной коррозией имеет питтинговую коррозию с глубиной до 0,3—0,5 мм.

Ввиду относительно небольшого срока работы оборудования еще нельзя сделать окончательных выводов о возможности широкого применения перлитных сталей для изготовления ПВД на АЭС кипящего типа.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Слабощелочной водный режим, создаваемый путем дозированного введения аммиака в количестве до 2 мг/л и обеспечивающий в теплоносителе величину pH-9,5, оказался приемлемым для конструкционных материалов, примененных на втором блоке БАЭС.

2. Максимальное уплотнение конденсаторов турбины позволяет работать с периодическим включением конденсатоочистки.

3. Трехлетняя эксплуатация второго блока БАЭС показала, что за этот период не произошло серьезных нарушений в работе оборудования, выполненного из перлитных сталей. Однако из-за относительно короткого срока работы окончательные выводы о применимости перлитных сталей для оборудования, находящегося в контакте с теплоносителем, содержащим миллиграммовые концентрации кислорода (в частности, корпуса и трубчатка ПВД), сделать преждевременно.

Подготовка к пуску атомной электростанции А-1

Е. ХОРВАТ (ЧССР)

УДК 621.311.2:621.03

Важная задача строительства первой чехословацкой АЭС А-1 — комплексное испытание и ввод электростанции в надежную эксплуатацию. Период испытаний и пуска А-1 включает четыре этапа.

Первый этап — комплексное испытание технологического оборудования, которое проводится постепенно, по отдельным эксплуатационным комплектам. Его задачей является проверка оборудования в условиях неактивной эксплуатации при заполнении реактора обыкновенной дистиллированной водой. Комплекты прини-

маются заказчиком после комплексных испытаний, проводимых в соответствии с отчетом. В последнем приведена программа испытаний и перечень условий, при выполнении которых заказчик принимает данный комплект. Координационная часть проекта дает обзор взаимодействия эксплуатационных комплектов при комплексных испытаниях АЭС А-1.

Второй этап — подготовка к физическому и энергетическому пускам. Этап представляет собой заключительную проверку оборудования и характеризует переход в активную эксплуа-