

нового типа); натрий в них охлаждается воздухом.

В каждой петле второго контура имеется своя независимая система, включающая холодную ловушку и индикатор. Одна холодная ловушка рассчитана на расход натрия $10 \text{ м}^3/\text{ч}$. Ловушки контуров идентичны по конструкции (рис. 6) и представляют собой вертикальные цилиндрические сосуды высотой около 6 м и диаметром 1 м. Они установлены в специальных электропечах, а все подводы к ним выполнены сверху. Ловушки первого контура вместе с печами расположены в бетонной защите. Сверху они закрыты слоем чугуна, обеспечивающим доступ к трубам в случае необходимости замены.

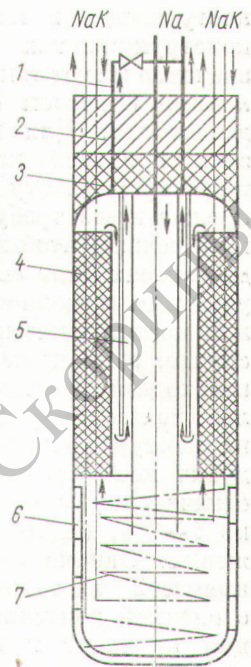
Специальная натрий-калиевая система, отводящая тепло от холодных ловушек, включает два электромагнитных насоса производительностью по $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ и два воздушных теплообменника. Резерв в данной системе не предусмотрен, и в случае выхода из строя какого-либо узла системы часть ловушек будет отключаться.

Аналогичная, но независимая натрий-калиевая система предусмотрена для охлаждения уплотнений арматуры и насосов. В этом случае важно бесперебойное охлаждение, и поэтому обеспечивается 100%-ное резервирование.

Сливные баки первого контура (10 баков по 50 м^3) рассчитаны на слив натрия из всего контура. Баки соединены попарно. Каждая пара помещена в отдельном боксе. Кроме того, в отдельном боксе расположены два таких же бака, постоянно подсоединенных к газовой полости реактора, за счет которых колебания давления газа в реакторе при изменениях объема или температуры натрия поддерживаются в допустимых пределах.

Р и с. 6. Холодная ловушка первого контура:

1 — байпас; 2 — чугунная защита; 3 — теплоизоляция; 4 — набивка (стружка); 5 — рекуператор; 6 — рубашка с NaK; 7 — змеевик с NaK.



Сливные баки второго контура (четыре бака по 50 м^3) рассчитаны на одновременный слив любых двух петель из шести. Заполняются первый и второй контуры из сливных баков при помощи линейных электромагнитных насосов. Слив натрия из контуров свободный.

На реакторе БН-350 предусмотрены меры для обеспечения ремонта и замены натриевого оборудования основных контуров. Выемные части насосов, пучки теплообменников, рабочие органы основных задвижек извлекаются из контура в герметичные скафандры, в которых поддерживается инертная атмосфера. Скафандры позволяют заменять оборудование, не дренируя натрий из контура. Специальный шлюз исключает при этом возможность контакта внутренней полости контура с атмосферой. В этих же скафандрах оборудование переносится в систему отмывки, в которой извлеченные из контура узлы можно промыть от остатков натрия паром и водой, а в случае необходимости обработать дезактивирующими растворами. После такой отмывки оборудование передается на участок ремонта.

Поступила в Редакцию 18/VII 1966 г.

Роль конденсатоочистки в одноконтурных АЭС

Т. Х. МАРГУЛОВА

УДК 621.039.517.6

Показано, что основными примесями питательной воды одноконтурных АЭС являются продукты коррозии. Вследствие высокой растворимости этих примесей в насыщенном паре эффективность удаления их с продувочной водой относительно мала и необходима очистка полного расхода конденсата на ионообменных фильтрах. Такая конденсатоочистка обеспечивает также непрерывную дезактивацию конденсатно-питательного тракта и выводит из контура соли жесткости, попадающие в конденсатор вследствие присоса охлаждающей воды в связи с коррозией конденсаторных трубок. Немаловажную роль играет также защитная функция

конденсатоочистки при возможных аварийных ситуациях. В условиях очистки конденсата скорости его фильтрации могут быть приняты относительно большими, что требует фильтров малых габаритов.

Питательной водой для реакторов одноконтурных АЭС является конденсат с добавлением обессоленной воды. В этих условиях основными примесями оказываются окислы,

поступающие в контур в связи с коррозией конструкционных материалов. Немаловажное значение имеют также соли жесткости, обусловленные присосом охлаждающей воды в конденсаторах. Для поддержания концентрации этих примесей на уровне, обеспечивающем надежную работу активной зоны реактора, прежде всего требуется так организовать водный режим, чтобы коррозия и присос в конденсаторах были сведены к минимуму. Однако, учитывая невозможность полного прекращения поступления примесей в цикл (во всяком случае, в процессе длительной эксплуатации), необходимо одновременно обеспечить и наиболее целесообразный непрерывный вывод их из контура. Один из методов вывода — продувка контура. Для одноконтурной АЭС это означает непрерывный отвод части воды (обычно 1—2%, редко до 4%) на очистные сооружения. Однако анализ поведения отдельных примесей в технологическом контуре АЭС с оценкой допустимых величин их концентраций приводит к выводу, что одного метода продувки недостаточно. В дополнение к ней для одноконтурных АЭС обязательна ионообменная конденсатоочистка, рассчитанная на 100%-ный расход конденсата. Причины и обоснование необходимости этого излагаются ниже.

Поведение окислов конструкционных материалов в контуре

В практике эксплуатации котлов обычных тепловых электростанций неоднократно отмечалось и отмечается, что продукты коррозии значительно выносятся с паром и слабо концентрируются в продувочной воде. Аналогич-

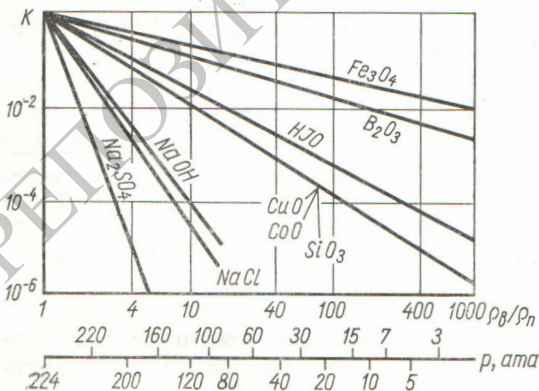


Рис. 1. Изменение коэффициентов распределения для различных примесей воды контура.

ное положение наблюдается и в одноконтурных АЭС. Так, в работах, посвященных водному режиму Дрезденской АЭС, отмечается, что продувка реактора позволяет вывести только около 20% окислов железа, поступающих с питательной водой. Это означает, что большая часть железа выносятся из реактора с насыщенным паром. Проведенные за последнее десятилетие многочисленные работы группы исследователей (О. И. Мартыновой, Д. Г. Цхвирашвили и других под руководством акад. М. А. Стыриковича), посвященные растворимости веществ в насыщенном паре, позволяют количественно оценить переход примесей в пар. На рис. 1 в зависимости от отношения плотностей воды и пара (ρ_v/ρ_w) для различных примесей воды представлены значения так называемого коэффициента распределения K , т. е. отношения содержания растворенных веществ в насыщенном паре и в котловой воде. Поведение окислов железа характеризуется данными для магнетита. Из рис. 1 следует, что растворимость магнетита в паре существенно больше растворимости любых других соединений и значительна даже при малых давлениях. В то же время она в меньшей степени, чем для любых других веществ, зависит от давления. При давлении 70 *атм* величина K для магнетита составляет около 10%, т. е. существенно превышает обычные величины продувки реакторов одноконтурных АЭС.

Баланс любых примесей для парогенерирующей установки составляет

$$(100 + p) S_{п.в} = (K + p) S_{пр.в} \dots, \quad (1)$$

где p — величина продувки, %; $S_{п.в}$, $S_{пр.в}$ — концентрации рассматриваемой примеси в питательной и продувочной водах соответственно.

Строго говоря, при расчетах по продуктам коррозии в уравнении (1) должны быть еще два члена, а именно в левой части член, учитывающий поступление окислов за счет коррозии конструкционных материалов реактора, а в правой член, учитывающий убыль продуктов коррозии в связи с их частичным отложением в реакторе. Однако для одноконтурной АЭС обе эти составляющие малы по сравнению с основными членами уравнения (1) и ими можно пренебречь, тем более что они близки по величине и входят в разные части уравнения.

Если принять количество примеси, внесенной с питательной водой, за 100%, то унос этой примеси с продувочной водой состави-

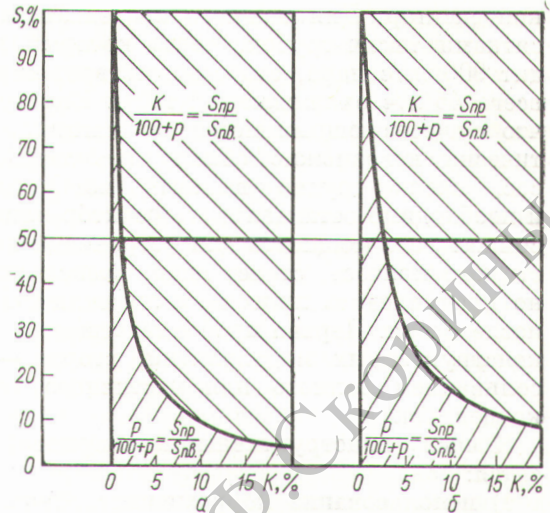
$$\frac{p}{100 + p} + \frac{S_{пр}}{S_{п.в}} \cdot 100\%;$$

с сухим насыщенным паром

$$\frac{K}{100+p} \cdot \frac{S_{п.в}}{S_{п.в}} \cdot 100\%$$

Соотношение примесей, уносимых с продувочной водой и с насыщенным паром, зависит от величины продувки и K . Однако величины продувки изменяются незначительно, а коэффициенты распределения для различных веществ отличаются на порядки (см. рис. 1). В результате для веществ с большим значением K продувка не может быть эффективным способом вывода примесей. Для иллюстрации этого положения на рис. 2 приведено соотношение выноса растворенных примесей с паром и продувочной водой для $p = 1\%$ и $p = 2\%$ при изменении коэффициента распределения K от 0 до 20%. Из рис. 2 следует, что в условиях $K = p$ с насыщенным паром уносится столько же примеси, сколько и с продувочной водой. Если $K < p$, то продувка — основной способ удаления примесей. Но если $K > p$ и особенно $K \gg p$, то вынос данной примеси происходит главным образом с насыщенным паром, и увеличение продувки, например вдвое, не может соответствующим образом увеличить удаление примесей из контура с продувочной водой. Если принять, как отмечалось выше, для Fe_3O_4 при 70 атм $K \approx 10\%$, то с продувочной водой в случае $p = 2\%$ должно уноситься всего около 18%, а с паром — остальные 82% (!). Это означает, что для эффективного вывода из контура продуктов коррозии, находящихся в истинно растворенном состоянии, необходимо обработать весь поток конденсата (конденсатоочистка должна быть рассчитана на 100% производительности по пару).

Растворимость окислов других конструктивных материалов и отдельных металлов, входящих в состав сплавов, исследовалась в меньшем масштабе. Однако имеющиеся данные позволяют заключить, что окислов кобальта и циркония выносятся столько же, сколько и окислов кремния. Следовательно, их эффективный вывод из контура также требует дополнительной продувки реактора 100%-ной конденсатоочисткой, особенно если учесть, что кобальт и цирконий (в меньшей мере и железо) в условиях одноконтурной АЭС являются носителями активности. Поэтому вывод их из той части контура, где паровая среда заменяется водной, весьма важен также с точки зрения непрерывной дезактивации всего последующего тракта и обеспечения большей доступности его при эксплуатации и ремонте.



Р и с. 2. Соотношение выноса растворенных примесей с паром и продувочной водой для $p = 1\%$ (а) и $p = 2\%$ (б) в зависимости от K .

Обработка 100% расходуемого конденсата на ионообменных фильтрах не снимает необходимости непрерывной продувки контура АЭС. После конденсатоочистки концентрации окислов железа в питательной воде будут возрастать в связи с коррозией конденсато-питательного тракта и могут превысить значения, соответствующие истинно растворенному состоянию, в связи с чем в воде появится коррозионный шлам. Это тем более вероятно, так как растворимость окислов железа в воде уменьшается при росте температуры. Эффективный вывод этого железистоокисного шлама, опасного с точки зрения возможности его «прикипания» к оболочкам твэлов, возможен только с продувочной водой и является основным назначением непрерывной продувки реакторов одноконтурных АЭС.

Присосы охлаждающей воды в конденсаторах и борьба с ними

Причины присоса охлаждающей воды могут быть технологического характера (неплотная вальцовка трубок, технологические дефекты в материале трубок), но могут возникать и в процессе эксплуатации (нарушения герметичности в местах вальцовок вследствие вибраций, коррозионные трещины в материале трубок). Эти обстоятельства не позволяют рассчитывать на создание конденсатора без присосов. Наименьшая гарантируемая заводами величина присоса $q = 0,005\%$ от расхода пара через

конденсатор. Для мощного конденсатора с десятками тысяч трубок, через который проходит 900 т/ч пара, это соответствует перетоку всего 45 л/ч охлаждающей воды. Если учесть, что существующими методами контроля практически невозможно обнаружить такой присос, очень трудно выявить места присоса и необходимо останавливать реактор или резко снижать его мощность для устранения недопустимого присоса, станет ясно, насколько важно предупредить присосы и ликвидировать их последствия. Первая проблема решается рядом конструктивных мероприятий, вторая — обессоливанием полного или частичного расхода конденсата.

К числу конструктивных мероприятий относятся:

- 1) использование коррозионностойких сплавов;
- 2) применение трубок с большей толщиной стенки;
- 3) установка двойных трубных досок;
- 4) создание так называемых соленых отсеков в областях у трубных досок и обессоливание конденсата, проходящего через эти полости (30—40% от общего расхода);
- 5) обмазка мест вальцовок уплотняющими пастами типа жидкого найрита.

Опыт теплоэнергетики показывает, что сочетание первого и последнего способов наиболее перспективно. Установка двойных трубных досок, усложняя изготовление и ремонт конденсатора, позволяет устранить лишь влияние присосов в местах вальцовок. Эта же частная задача решается при помощи соленых отсеков. Ниже приведены результаты исследования качества конденсата для конденсатора с солеными отсеками Луганской ТЭЦ (в мг/кг натрия):

Конденсат соленых отсеков (расход ~30—40%) после ионообменных фильтров	5—7
Основной поток конденсата (расход ~60—70%)	65—70
Смесь основного потока конденсата и обессоленного конденсата соленых отсеков	50—60

Отсюда следует, что и этот способ не обеспечивает высокого качества конденсата.

Учитывая весьма развитую поверхность трубок конденсаторов, следует сказать, что присос, связанный с коррозией материала трубок, вполне соизмерим с присосом в местах вальцовок, а возможно, и превышает его, что также следует из приведенных данных.

О коррозии латунных конденсаторных трубок на одноконтурной АЭС в Мелекесе свидетельствует непрерывное поступление в конденсат ионов меди и цинка в связи с обесцинкованием латуни. Опыт использования на этой АЭС двойных трубных досок также показывает, что устранение влияния присоса в местах вальцовок не может полностью решить проблему ликвидации вредного влияния присосов.

Все это на первый план выдвигает необходимость обессоливания конденсата. Стремление к экономии приводит к решению частичного (не 100%-ного) обессоливания конденсата в потоках вблизи мест вальцовок (соленых отсеков). Однако расход конденсата при этом все же велик, что усложняет компоновку оборудования и практически не уменьшает габаритов установки. Поэтому более правилен переход на 100%-ное обессоливание конденсата с повышенными скоростями фильтрации. Так, для конденсатора с расходом пара 900 т/ч при скоростях фильтрации 30 м/ч диаметр фильтра составит 6,2 м, а при скоростях фильтрации 120 м/ч, вполне допустимых для конденсата, диаметр фильтров будет равен только 3,1 м. Присос охлаждающей воды в конденсаторе является источником поступления в конденсат также кремнекислоты, ионов хлора и солей жесткости.

Ограничение концентраций кремнекислоты необходимо только при использовании перегретого пара высоких параметров. Недопустимые концентрации ионов хлора в конденсате возникают, когда присос в конденсаторе приводит к недопустимым значениям содержания солей жесткости. Поэтому влияние присосов охлаждающей воды на водный режим реактора одноконтурной АЭС связано только с влиянием солей жесткости. Причем в реакторе необходимо обеспечить режим теплообмена не только без накипи, но и без шлама. Поэтому не может быть и речи о фосфатировании воды реактора, т. е. его водный режим должен быть бескоррекционным. В таком случае нормирование и контроль водного режима должны проводиться по жесткости продувочной воды реактора. Из рис. 1 следует, что можно пренебречь растворимостью солей в паре до весьма высоких давлений ($K = \sim 0$). Поэтому продувка является эффективным методом выведения солей жесткости из контура (см. рис. 2). Баланс примесей для солей жесткости более прост и определяется уравнением

$$(100 + p) S_{п. в} = p S_{пр}. \quad (2)$$

Концентрация примесей питательной воды определяется выражением

$$S_{п. в} = \frac{q}{100} S_{охл}, \quad (3)$$

где $S_{охл}$ — концентрация рассчитываемой примеси в охлаждающей воде конденсатора.

На рис. 3 приведены результаты расчета жесткости воды в реакторе в зависимости от допустимых величин присоса в конденсаторе и продувки реактора. Жесткость охлаждающей воды принята в соответствии со средним качеством речных вод; обессоливание конденсата не осуществляется. На рис. 3 приведена также допустимая жесткость воды в реакторе, обеспечивающая безнакипный режим его работы (12 мг-экв/кг при постоянной эксплуатации и 25 мг-экв/кг при кратковременной работе). Из рисунка следует, что обессоливание конденсата, во всяком случае для охлаждающих вод с жесткостью до 100 мг-экв/кг, может не применяться только для присосов в конденсаторе порядка 0,001%, что, безусловно, нереально при длительной эксплуатации. Когда присосы составляют 0,005% и тем более 0,01% и больше, обессоливание конденсата необходимо.

Учитывая, что невозможно гарантировать присос только в местах вальцовок и вероятность возникновения его (при незначительных коррозионных разрушениях) в любом месте трубок, следует предостеречь от обессоливания части расхода конденсата. При этом следует иметь в виду, что контроль чистоты конденсата является периодическим и в интервале между отборами проб не исключено повышение присоса, не настолько значительное, чтобы оно отразилось на величине вакуума, но опасное для надежной работы реактора. Например, присос 0,05% считается верхним допустимым пределом с теплотехнической точки зрения, но он, как следует из рис. 3, совершенно недопустим с точки зрения надежности водного режима реактора. Это значит, что конденсатоочистка со 100%-ным расходом конденсата выполняет еще одну важную функцию — защищает реактор от возможных аварийных ситуаций, связанных с повреждением конденсаторных трубок.

Таким образом, на основании изложенного можно заключить, что для одноконтурных АЭС установка ионообменных фильтров на весь расход конденсата обязательна. Это позволяет: 1) выводить окислы железа и других конструкционных материалов из теплоносителя; 2) обеспечить большую доступность оборудования конденсато-питательного тракта; 3) удалять соли жесткости, возникающие в связи с присосом охлаждающей воды в конденсаторе и, следовательно, уменьшать величину продувки реактора без опасения отложений накипи; 4) удалять из конденсата медь и ее окислы, а также некоторые другие металлы (например, цинк), поступающие в контур вследствие коррозии конденсаторных трубок; защищать реактор от возможных аварийных ситуаций, связанных с повреждением конденсаторных трубок.

Основное назначение продувки реактора одноконтурных АЭС со 100%-ной конденсатоочисткой — удаление коррозионного шлама и поддержание жесткости воды реактора на допустимом уровне. В связи с этим ее величина может быть существенно уменьшена, что повышает экономичность установки.

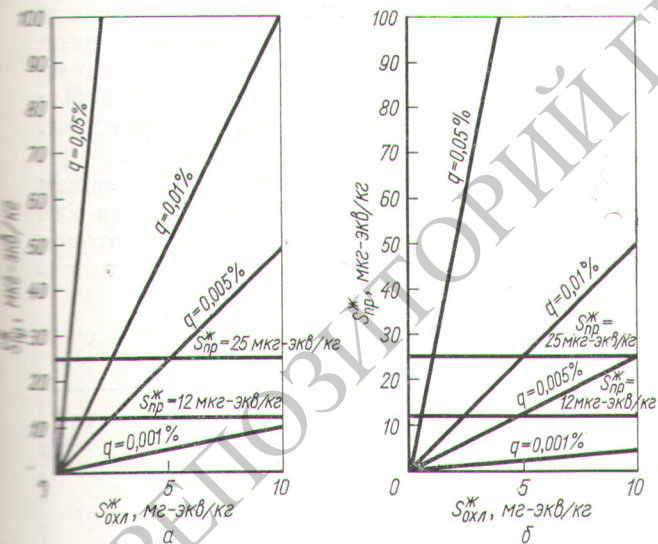


Рис. 3. Зависимость жесткости воды контура от величины присоса в конденсаторе (а — $p=1\%$; б — $p=2\%$).

Поступила в Редакцию 14/VI 1966 г.