

СТАТЬИ

Влияние нейтрального кислородного режима на безопасность эксплуатации энергоблоков АЭС с РБМК

И.В. Калиберда, д-р техн. наук, Л.Г. Денисова, ст. науч. сотр.
(НТЦ ЯРБ)

Одна из проблем организации водно-химического режима (ВХР) энергоблоков АЭС с РБМК – поступление продуктов коррозии (ПК) конструкционных материалов в реакторную воду. Нерастворимые ПК конструкционных материалов, поступающие в контур многократной принудительной циркуляции (КМПЦ), проходя через активную зону, активируются, концентрируются и осаждаются в зонах с пониженной скоростью циркуляции в виде шлама и накипи. Вынос из активной зоны ПК с высоким уровнем активности и последующее их осаждение на поверхностях оборудования и трубопроводов КМПЦ приводят в результате сорбции ПК к значительному росту активности вне активной зоны. Присутствие активированных ПК в теплоносителе вызывает ухудшение радиационной обстановки в помещениях КМПЦ и рост облучения эксплуатационного персонала во время ремонтных работ при остановленном реакторе. Решение проблемы ограничения роста дозовых нагрузок персонала может быть достигнуто путем совершенствования ВХР.

В течение срока эксплуатации АЭС с РБМК должна быть обеспечена коррозионная стойкость оборудования и трубопроводов. Коррозионное и коррозионно-эрозионное воздействие теплоносителя и других рабочих сред на конструкционные материалы оборудования и трубопроводов систем АЭС не должно нарушать пределы и условия безопасной эксплуатации АЭС. В соответствии с РБ Г-12-43-97 "Водно-химический режим атомных станций. Основные требования безопасности" ВХР АЭС следует устанавливать, организовывать и поддерживать таким образом, чтобы обеспечивалась целостность защитных барьеров (оболочек тепловыделяющих элементов – твэлов, границы контура теплоносителя, герметичных ограждений локализирующих систем безопасности).

На радиационно-химические процессы в теплоносителе, влияющие на коррозию оболочек твэлов и технологических каналов реакторов РБМК, значительное воздействие оказывает применяемый ВХР.

С течением времени все большее значение приобретает проблема коррозии технологических каналов РБМК-1000. На действующих блоках в отложениях продуктов коррозии в застойных зонах содержится большое количество отложений окислов циркония, обладающих высокой химической стойкостью и механической прочностью. В 90-е годы на отечественных АЭС с РМК-1000 были обнаружены дефекты сварных соединений трубопроводов КМПЦ в результате возникновения межкристаллитной коррозии под напряжением (МКРПН) аустенитных трубопроводов. Образование трещин в сварных соединениях трубопроводов КМПЦ повышает вероятность нарушения целостности третьего физического барьера на пути выхода радиоактивных веществ в окружающую среду, повышает вероятность аварий с разгерметизацией КМПЦ.

Регламентированные показатели ВХР при нормальных условиях эксплуатации на всех АЭС с РБМК в основном поддерживаются в соответствии с нормами, и тем не менее количество обнаруживаемых дефектов (повреждений) сварных соединений трубопроводов КМПЦ на АЭС с РБМК в последние годы увеличивается.

Опыт эксплуатации энергетических реакторов с использованием циркониевых сплавов в качестве конструкционных материалов элементов активных зон показывает, что характер коррозии в значительной мере зависит от ВХР, при котором они эксплуатируются. В кипящих реакторах при бескоррекционном ВХР в результате радиолитического разложения водного теплоносителя с образованием кислородсодержащих продуктов реализуются окислительные условия, при которых происходит коррозия циркониевых сплавов и коррозионные повреждения сварных соединений аустенитных трубопроводов по механизму межкристаллитной коррозии под напряжением. Циркониевые сплавы используются для изготовления оболочек твэлов (Zr + 1%Nb) и технологических каналов (Zr + 2,5%Nb) кипящих канальных реакторов. Помимо общей коррозии, в окислительной среде под облучением циркониевые сплавы подвергаются локальной очаговой ("нодулярной") коррозии. Данный вид коррозии особенно опасен для материала оболочек твэлов. Общая коррозия сварных соединений в зонах термического влияния приводит к образованию коррозионных пленок, которые могут отслаиваться и осыпаться как при работе на мощности, так и в периоды стоянок и перегрузок топлива. Отслоившиеся ПК железа могут оказывать отрицательное влияние на работоспособность тепловыделяющих сборок, способствуя образованию дебриз-эффекта на оболочках твэлов.

Один из способов повышения безопасности работы активной зоны и всего оборудования – совершенствование ВХР АЭС с РБМК. Особую актуальность оно обретает в связи с необходимостью улучшения условий эксплуатации циркониевых сплавов активной зоны и предотвращения МКРПН сварных соединений аустенитных трубопроводов.

Водно-химический режим АЭС с РБМК

В соответствии с ГОСТ 26841-86 "Режим атомных электростанций с кипящими реакторами большой мощности водно-химический. Нормы качества водного теплоносителя основного контура и контура

системы управления и защиты, средства их обеспечения" для АЭС с РБМК поддерживался бескорректионный ВХР, основные особенности которого:

- отсутствие корректирующих добавок;
- отсутствие систем подавления радиолиза;
- необходимость обеспечения высокой степени чистоты питательной воды.

Качество реакторной воды КМПЦ прежде всего определяется составом питательной воды. Качество последней зависит от эффективности конденсатоочистки, режима работы деаэраторов, интенсивности коррозионных процессов в трубопроводах и оборудовании конденсатно-питательного тракта (КПТ), выполненных из углеродистых сталей. ПК в этих трубопроводах являются основным источником поступления продуктов коррозии конструкционных материалов в воду КМПЦ. Одновременно источниками примесей, влияющих на коррозионную агрессивность теплоносителя, являются охлаждающая вода конденсаторов и недостаточная эффективность конденсатоочистки.

Отечественный опыт эксплуатации АЭС с кипящими реакторами определил необходимость пересмотра и ужесточения норм ВХР атомных станций с кипящими реакторами, обусловленную актуальностью решения ряда проблем эксплуатации действующих блоков, а именно:

- повышенные требования к надежности и безопасности эксплуатации энергоблоков с учетом необходимости продления срока их эксплуатации;
- коррозионная повреждаемость тепловыделяющих сборок и технологических каналов;
- коррозионная повреждаемость сварных соединений трубопроводов КМПЦ из аустенитной стали;
- ужесточение дозовых пределов в соответствии с требованиями документа "Нормы радиационной безопасности" НРБ-99;
- ограничение количества образовавшихся радиоактивных отходов и газоаэрозольных выбросов;
- ужесточение требований к химическим сбросам в окружающую среду.

Скорость коррозии аустенитной стали оборудования и трубопроводов КМПЦ в режиме нормальной эксплуатации мала. Как уже упоминалось выше, основной источник поступления продуктов коррозии конструкционных материалов в воду КМПЦ – выполненные из углеродистой стали трубопроводы и оборудование КПТ. В соответствии с действующими нормами концентрация растворенного в воде КМПЦ железа должна быть менее 20 мкг/кг. Из общей поверхности КПТ энергоблока АЭС с РБМК-1000 на поверхность трубных пучков подогревателей низкого давления (ПНД) и головки деаэраторов, выполненных из аустенитной стали 08Х18Н10Т, приходится соответственно 18,3 и 0,25 тыс. м². Площадь поверхности трубопроводов КПТ и баков деаэраторов, выполненных из углеродистой стали, составляет 1,3 и 0,7 тыс. м² соответственно. Высокодисперсные продукты коррозии и вещества, находящиеся в коллоидном и растворенном состоянии, разносятся водой КМПЦ по поверхности основного контура циркуляции. Около 10-15% ПК удаляется системой очистки продувочной воды, часть ПК остается взвешенными в циркуляционной воде. В переходных режимах работы блока, особенно в процессах разогрева и расхолаживания реакторной установки, на определенный период времени смыв продуктов коррозии превалирует над осаждением. Существуют данные, согласно которым переходные режимы ответственны не менее чем за 50%-ный вклад в интенсивность излучения поверхностей КМПЦ за длительный срок [1].

В 80-е годы в ЭНИН им. Г.М. Кржижановского был установлен эффект пассивации углеродистой стали защитной окисной пленкой магнетита в потоке чистой кислородсодержащей воды [2, 3]. При дозировании кислорода в глубокообессоленную воду до концентрации 0,1-0,2 мг/кг и более на поверхности углеродистой стали при рабочей температуре образуются устойчивые оксидные пленки продуктов взаимодействия металлов с кислородом. В случае возникновения тончайшей оксидной пленки прекращается проникновение коррозионного агента к следующим слоям металла, т.е. металл защищается от агрессивного воздействия окружающей среды. На основе эффекта пассивации углеродистой стали в потоке обессоленной воды было предложено применение на АЭС с РБМК-1000 нейтрального кислородного водного режима (НКВР) с дозированием газообразного кислорода в конденсатный тракт [2, 3].

Вопрос о целесообразности дозирования кислорода в конденсатно-питательный тракт энергоблоков АЭС с РБМК обсуждается более 20 лет. До сих пор существуют разные оценки эффективности дозирования кислорода в конденсатный и питательный тракты блоков АЭС с РБМК. По данным В.В. Герасимова и его последователей [4], при уменьшении поступления продуктов коррозии в реактор при дозировании кислорода в конденсатный тракт возможный максимальный положительный эффект может составить 5%. Это означает, что мощность дозы возле оборудования КМПЦ снизится ориентировочно на 5%. При дозировании кислорода не только в конденсатный, но и в питательный тракт уменьшение поступления продуктов коррозии в воду КМПЦ оценивается менее 20% общего количества продуктов коррозии.

Имеет место другая предположительная оценка эффективности дозирования кислорода в конденсатный и конденсатно-питательный тракты. В [5] эффект пассивации металла защитной пленкой при кислородном режиме в КТ энергоблока оценивается в 68%, а при дозировании в КПТ – в 100%.

С целью уменьшения выноса продуктов коррозии углеродистой стали конденсатного тракта в поток теплоносителя КМПЦ на Курской АЭС осуществлялось опытно-промышленное дозирование газообразного кислорода в КТ энергоблока № 3.

В НТЦ ЯРБ проведена экспертиза материалов, отражающих результаты опытно-промышленного ведения НКВР конденсатного тракта энергоблока № 3 Курской АЭС.

Влияние НКВР конденсатного тракта на коррозионное состояние циркониевых сплавов и аустенитных сталей активной зоны

В 1998-2001 гг. при участии и научной поддержке ФГУП "ЭНИЦ", ВНИИАЭС и НИКИЭТ осуществлялось опытно-промышленное дозирование газообразного кислорода в КТ энергоблока № 3 до концентрации $0,2 \text{ мг/дм}^3$. Поддержание заданной концентрации кислорода обеспечивалось оперативным персоналом посредством регулирования расхода газообразного кислорода в турбинный конденсат. Деаэраторы обеспечивали при проведении НКВР нормируемые значения концентрации кислорода в питательной воде.

Согласно полученным данным, уменьшение концентрации железа в питательной воде на энергоблоке № 3 по результатам опытно-промышленной эксплуатации оценено величиной не более $0,4\text{--}0,5 \text{ мкг/кг}$ [6, 7]. Ориентировочно уменьшение выноса ПК железа в КМПЦ за кампанию энергоблока может составить около $25\text{--}30 \text{ кг}$ при общем количестве продуктов коррозии железа, накопленных в КМПЦ за годы эксплуатации, порядка нескольких сотен килограммов. При обосновании безопасности [8] ведения НКВР сотрудниками ФГУП "ЭНИЦ" было высказано предположение, согласно которому в процессе опробования НКВР конденсатного тракта дозирование кислорода может способствовать смыву ранее накопленных продуктов коррозии в теплоноситель и изменению фазового состава продуктов коррозии. В этом случае в воде КМПЦ при дозировании кислорода должно было отмечаться устойчивое повышение концентрации ПК железа. Таких данных в отчетных материалах по результатам опытно-промышленного дозирования кислорода в КТ тракт энергоблока № 3 не получено [6, 7]. Кроме того, следует учитывать, что дозирование кислорода производилось только в конденсатный тракт, а в питательной воде концентрация кислорода оставалась неизменной по сравнению с бескоррекционным режимом. Это обстоятельство также опровергает предположение о возможных изменениях форм продуктов коррозии железа (перехода магнетита в гематит) в составе оксидного слоя отложений. Таким образом, опытно-промышленное дозирование кислорода в КТ энергоблока № 3 не подтвердило предположения о смыве ранее накопленных продуктов коррозии в КМПЦ.

Во время опробования НКВР на энергоблоке № 3 была проведена оценка влияния дозирования кислорода на образование радиоактивных отложений и изменение мощности доз гамма-излучения в помещениях и у оборудования основного технологического контура.

Недостаточная чувствительность и точность штатных аналитических методик, применяемых для измерения концентрации продуктов коррозии железа в теплоносителе энергоблока № 3, не позволили корректно оценить интенсивность массопереноса ПК по основному технологическому контуру. Поэтому радиохимические методы измерения удельной активности проб теплоносителя использовались в качестве индикаторов процесса переноса радиоактивных ПК в КМПЦ. При оценке результатов проведения НКВР были использованы результаты радиометрических измерений в помещениях и у оборудования КМПЦ энергоблока №3 АЭС при проведении планово-предупредительного ремонта (ППР) 1997–2001 гг. и данные о составе и активности отложений в контуре КМПЦ [6, 7].

Эффективность внедрения НКВР количественно оценивалась по результатам мощности дозы гамма-излучения в реперных (или контрольных) точках. Реперные точки располагались на основании выявленных закономерностей формирования дозовых полей. Мощность дозы гамма-излучения в контрольных точках измерялась во время стоянок реактора для проведения ППР до и после начала испытаний НКВР. Фиксировалась продолжительность стоянки реактора после останова до начала радиометрических измерений. Кроме того, регистрировались все технологические операции в КМПЦ, которые могли влиять на распределение по контуру мигрирующих "горячих" точек.

За время эксплуатации энергоблока при нейтрально-бескоррекционном режиме за 19 лет в КМПЦ накоплено значительное количество шлама и отложений продуктов коррозии. В [8] утверждается, что дозирование газообразного кислорода приведет к снижению мощности доз в помещениях оборудования и трубопроводов КМПЦ из-за уменьшения поступления продуктов коррозии железа в реактор с потоком питательной воды. Отраженные в [6, 7] выводы не являются бесспорными: они получены без учета и анализа следующих факторов, приведенных ниже.

В 1999 г. замеры производились на энергоблоке № 3 в период текущего ремонта. Во время останова энергоблока на ППР в июле 1999 г. выполнена безреагентная высокотемпературная промывка. С момента останова блока была дважды проведена холодная опрессовка. Ко времени снятия картограмм трижды включался главный циркуляционный насос ГЦН-11 для промывки калачей нижних водных коммуникаций. Из анализа представленных данных в [6,7] следует, что одним из основных факторов, влияющих на радиационную обстановку в ряде помещений, является проведение (или непроведение) высокотемпературной безреагентной промывки или локальных промывок отдельных участков контура.

Отсутствие одинаковых условий последовательности проведения технологических операций не позволяет выделить степень влияния дозирования кислорода на фоне проведения технологических операций: холодная опрессовка, промывка дренажей ГЦН, промывка водоуравнительных трубопроводов барабана-сепаратора (ВУТ БС), промывка тупиковых зон раздаточного группового коллектора (РГК), безреагентная высокотемпературная промывка. При этом необходимо учитывать, что суммарная активность ПК в отложениях на поверхности оборудования, особенно в активной зоне, во много раз выше суммарной активности ПК в теплоносителе. Факторы, вызывающие небольшие срывы пленок отложений ПК, могут существенно изменить удельную активность ПК в теплоносителе. Содержание железа в теплоносителе при работе АЭС на постоянной мощности меняется незначительно, тогда как удельная активность может меняться в достаточно широких пределах [9,10].

Результаты радиометрического контроля отложений на внутренней поверхности участков контура КМПЦ показали, что основной вклад в мощность дозы гамма-излучения во всех точках контура, за исключением тупиковых ВУТ, приходится на Со-60 (50% и более). На участках ВУТ мощность дозы определяется радионуклидами Nb-95 и Zr-95. По данным [11], при длительной работе реактора активность Со-60 может достигать 90% от общей активности отложений. В то же время на продукты активации железа приходится не более 10–30 %. Со-60 образуется за счет активации стабильного изотопа Со-59, который поступает в реакторную воду из конструкционных материалов контура КМПЦ и КПТ. Объем поступления Со-59 в теплоноситель зависит от его содержания в конструкционных материалах, площади поверхности, омываемой теплоносителем, и скорости коррозионного выноса из этих материалов [11].

Для реакторов РБМК-1000 максимальное поступление Со-59 возможно с поверхностей трубных пучков подогревателей низкого давления и головок деаэраторов, изготовленных из нержавеющей стали 08Х18Н10Т с содержанием Со-59 0,07–0,09%. Общая поверхность стали 08Х18Н10Т в КПТ составляет около 18500 м². Для сравнения: содержание кобальта в углеродистых сталях (ст. 20) в 3–5 раз ниже, и их поверхность составляет около 2000 м². В [7] рост радионуклида Со-60 по линейному закону в воде КМПЦ в течение 7 месяцев устойчивого ведения НКВР рассматривается как фазовая перестройка определяющего фоновую активность внутреннего оксидного слоя ранее накопленных отложений. Повышение концентрации Со-60 в воде КМПЦ может быть связано с увеличением выноса Со-59 из стали 08Х18Н10Т конденсатного тракта в присутствии повышенных концентраций кислорода. Эти факторы объясняют отсутствие снижения уровней мощности доз, на участках оборудования КМПЦ после начала ведения НКВР конденсатного тракта энергоблока № 3. Во время проведения ППР 2000 и 2001 гг. в ряде помещений энергоблока № 3, связанных с оборудованием КМПЦ, наблюдалось возрастание средней мощности доз. В помещениях 305/1 и 403/2 зарегистрировано улучшение радиационной обстановки по сравнению с 1997 г. [7]. Как констатируется в работе [6], увеличение мощности доз в контрольных точках опускных трубопроводов и БС могло произойти из-за изменения последовательности выполнения этапов промывок. При ППР 2001 г. не проводились промывка ВУТ БС и безреагентная высокотемпературная промывка, а промывка тупиковых зон РГК выполнялась выборочно. Анализ полученных на энергоблоке № 3 Курской АЭС данных показал, что однозначного снижения мощности доз в помещениях оборудования и трубопроводов КМПЦ в результате ведения НКВР конденсатного тракта не произошло.

Основные результаты, полученные в ходе внедрения НКВР конденсатного тракта энергоблока №3 Курской АЭС:

- Дозирование кислорода в конденсатный тракт реактора РБМК в количестве до 200 мкг/кг уменьшает скорость коррозии углеродистых сталей поверхностей конденсатного тракта и вынос оксидов железа, однако это не приводит к снижению концентрации основного дозообразующего радионуклида Со-60 в теплоносителе КМПЦ.
- Предположение авторов работы [8] о фазовой перестройке внутреннего оксидного слоя отложений КМПЦ в результате ведения НКВР в конденсатном тракте не подтверждено эксплуатационными данными химического контроля.
- Утверждение авторов работ [6,7], согласно которому дозирование кислорода в конденсатный тракт энергоблока, эксплуатирующегося в течение почти 20 лет и имеющего значительное количество отложений, улучшает радиационную обстановку, не подтверждено эксплуатационными данными.
- В присутствии повышенных концентраций кислорода в конденсатном тракте энергоблока № 3 наблюдается увеличение выноса из аустенитной стали 08Х18Н10Т Со-60, являющегося одним из основных дозообразующих нуклидов.
- Концентрация продуктов коррозии железа в питательной воде энергоблока №3 в течение 1998–2001 гг. в соответствии с Годовыми отчетами по оценке состояния безопасности при эксплуатации энергоблоков Курской АЭС находилась на уровне концентраций ПК железа энергоблоков № 1, 2, 4, где дозирование кислорода не проводилось, и составляла 4–6 мкг/дм³.
- Дозируемый в конденсат кислород практически полностью должен удаляться в деаэраторах питательной воды, поэтому НКВР в конденсатном тракте не должен оказывать негативного влияния на условия эксплуатации циркониевых сплавов активной зоны и аустенитной стали трубопроводов КМПЦ.
- Анализ результатов ведения НКВР конденсатного тракта энергоблока №3 Курской АЭС в соответствии с представленными материалами не выявил негативного влияния на безопасность эксплуатации энергоблока.

Влияние НКВР питательного тракта на коррозионное состояние циркониевых сплавов и аустенитных сталей активной зоны

Концерном "Росэнергоатом" и ФГУП "ЭНИЦ" было предложено рассмотреть вопрос о возможности дозирования кислорода также и в питательный тракт энергоблока Курской АЭС с РБМК-1000. Трубопроводы питательного тракта изготовлены из углеродистой стали, кислородная пассивация их поверхности может уменьшить поступление продуктов коррозии в КМПЦ с потоком питательной воды.

С целью оценки влияния повышения концентрации кислорода в питательной воде на изменение его концентрации в КМПЦ и снижение выноса количества продуктов коррозии из питательного тракта

предлагалось провести на одном из действующих энергоблоков с РБМК-1000 соответствующие промышленные испытания с увеличением концентрации кислорода в питательной воде до 60 мг/дм³.

Главный критерий безопасности применения НКВР – недопустимость повышения концентрации кислорода в реакторной воде при дозировании кислорода в питательную воду. Увеличение концентрации кислорода в воде КМПЦ при проведении НКВР питательного тракта прогнозируется расчетами [12]. Повышение концентрации кислорода увеличивает вероятность развития межкристаллитной коррозии под напряжением сенсibilизированных зон сварных соединений аустенитных трубопроводов и приводит к повышению скорости коррозии сплавов циркония. Коррозионное поведение циркониевых сплавов технологических каналов реактора значительно отличается от коррозионных процессов, свойственных аустенитным сталям. Для циркониевых сплавов характерны сплошная и локальная виды коррозионных процессов. Снижение концентрации кислорода в питательной воде уменьшает интенсивность радиолитического, следовательно, концентрацию кислорода в воде циркуляционного контура, что повышает стойкость оболочек твэлов технологических каналов и других элементов активной зоны, изготовленных из сплавов циркония [4].

Как показали многочисленные исследования отечественных и зарубежных специалистов, основным видом дефектов в сварных соединениях хромоникелевых аустенитных сталей являются трещиноподобные дефекты, развивающиеся по механизму межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением. Появление и последующее развитие коррозионных дефектов в околошовной зоне сварных стыков по существующим представлениям – это следствие одновременного воздействия нескольких факторов. Один из этих факторов – воздействие коррозионной среды (теплоноситель, содержащий растворенный кислород, хлорид-ионы, фторид-ионы) [13,14]. Проведение материаловедческих исследований выявило влияние содержания кислорода на скорость образования трещин и инкубационный период, предшествующий коррозионному повреждению [15,16].

В результате проведенной сотрудниками НТЦ ЯРБ экспертизы, материалов по обоснованию безопасности эксплуатации энергоблоков № 3 и 4 Курской АЭС в связи с предполагаемым внедрением промышленного дозирования газообразного кислорода в питательную воду выявлены выше описанные факторы, препятствующие внедрению указанного ВХР.

Преимущества дозирования кислорода в питательный тракт, выраженные в незначительном уменьшении поступления ПК железа в реактор, нивелируются ухудшением условий эксплуатации аустенитной стали КМПЦ и циркониевых сплавов, ведущих к снижению ресурса их работы в составе КМПЦ.

Опыт ведения вводно-химического режима АЭС с реакторами BWR

Шведские специалисты первыми ввели дозирование кислорода в воду КПТ одноконтурных АЭС для пассивации внутренних поверхностей и снижения тем самым вносимых в реактор с потоком питательной воды продуктов коррозии, что преследовало цель улучшения радиационной обстановки у оборудования КМПЦ. При этом наблюдались случаи межкристаллитного коррозионного растрескивания нержавеющей стали, что заставило вернуться к бескоррекционному режиму [17]. Одновременно выполнялись работы по определению влияния концентрации кислорода на межкристаллитное коррозионное растрескивание аустенитной стали под напряжением. На американских АЭС с BWR этот вид коррозии к тому времени уже проявился. Было установлено, что предотвращения МКРПН можно добиться при поддержании коррозионного потенциала на уровне -300 мВ, что соответствует концентрации кислорода не более 10 мг/кг. На АЭС Оскарсхамн-1 проведено опытно-промышленное дозирование водорода в контур реактора для снижения электрохимического потенциала. В результате концентрация кислорода была снижена до минимальной, обеспечивающей целостность оксидной пленки [17].

На большинстве западных АЭС с корпусными кипящими реакторами в качестве меры, направленной на предотвращение развития МКРПН, реализован в течение более 15 лет водородный ВХР [14,18]. Для решения проблемы растрескивания под напряжением сварных соединений аустенитных трубопроводов корпорация США "Дженерал Электрик" рекомендует ВХР с дозированием водорода в питательную воду. Основной принцип реализации водородного ВХР заключается в смещении потенциала стали в более пассивную область (менее -230 мВ относительно нормального водородного электрода) [18,19].

В Швеции и США основным показателем, характеризующим расположенность сварных соединений аустенитных сталей к возникновению МКРПН, считают величину электрохимического потенциала коррозии (ЭХП). При дозировании водорода в питательную воду электрохимический потенциал стали смещается в пассивную область (менее -230 мВ относительно нормального водородного электрода).

Для увеличения эффективности водородного режима на АЭС с BWR в США и Швеции применяется технология добавки комплексов благородных металлов NobleChemTM в теплоноситель, например, Na₂Pt(OH)₆. Во время пуска блока при температуре 140–150 °С в теплоноситель добавляют растворенный комплекс благородных металлов. При повышении температуры комплексы разрушаются и благородные металлы осаждаются на поверхности внутри реактора. Образование слоя благородных металлов на стальных поверхностях снижает величину электрохимического потенциала до уровня благородных металлов. Необходимое количество водорода для достижения достаточно низкого электрохимического потенциала очень мало [18,19].

Соотношение концентрации водорода к суммарной концентрации окислителей (кислород и перекись водорода) характеризует возможность протекания МКРПН. Необходимое значение электрохимического коррозионного потенциала достигается при отношении:

$$M = H_2/(O_2 + 1/2 H_2O_2), M > 2.$$

Соотношение концентрации водорода и окислителей поддерживают на уровне более 2. При этом соотношении, по мнению западных специалистов, не будет наблюдаться рост трещин аустенитных трубопроводов. Отмечается, что переизбыток водорода тоже вреден.

Согласно экспериментальным исследованиям немецких специалистов, скорость развития коррозионных процессов в аустенитной стали в теплоносителе высокой чистоты с удельной электропроводимостью менее 0,07 мкСм/см не зависит в значительной степени от смещения электрохимического коррозионного потенциала в пределах +100 мВ. Наличие сульфатов в теплоносителе уменьшает инкубационный период возникновения трещины в трубопроводе по механизму МКРПН. Время инкубационного периода находится в зависимости от множества факторов. Концентрация сульфатов и хлоридов влияет на рост трещин. По опыту эксплуатации западных АЭС, если содержание меди в реакторной воде больше, чем 6 мкг/кг, то необходимо дозировать водород в значительно большем количестве [18].

В качестве основных направлений совершенствования водородного ВХР японских АЭС с ВВР исследуется дозирование благородных металлов и подщелачивание. Для осаждения на внутренних поверхностях трубопроводов достаточного количества благородных металлов в застойных зонах к платине и родию добавляется небольшое количество палладия, стимулирующего процесс осаждения. Осаждение на поверхностях благородных металлов обеспечивает резкое снижение ЭХП [13].

Выводы

Экспертиза материалов по результатам опытно-промышленного ведения НКВР конденсатного тракта энергоблока № 3 Курской АЭС, а также информация в открытой печати по данному вопросу показали следующее:

- НКВР конденсатного тракта не оказывает негативного влияния на безопасность эксплуатации энергоблоков с РБМК-1000.
- Ведение НКВР конденсатного тракта с целью снижения мощностей доз ионизирующего излучения на энергоблоках, эксплуатирующихся более 10–15 лет, малоперспективно.
- Положительные результаты применения НКВР конденсатного тракта можно ожидать для вновь вводимых энергоблоков АЭС с РБМК-1000, где снижение мощности доз от оборудования КМПЦ произойдет за счет снижения выноса продуктов коррозии в реактор.
- Ведение НКВР питательного тракта энергоблоков АЭС с РБМК не обеспечивает условий безопасной эксплуатации вследствие увеличения вероятности возникновения МКРПН сварных соединений аустенитных трубопроводов КМПЦ и повышения скорости коррозии сплавов циркония активной зоны реактора.

Литература

1. Барбашинов И.М. Техничко-экономические показатели систем очистки теплоносителя реактора РБМК/Сборник статей "Атомные электрические станции", М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Ананьев Е.П., Кружилин Г.Н. Физические основы нейтрально-кислородного водного режима/Атомная энергия. Том 49. Вып. 1. 1980.
3. Ананьев Е.П., Андреева А.Б. и др. Эффективность применения нейтрально-кислородного водно-химического режима при эксплуатации АЭС с кипящим корпусным реактором/Атомная энергия. Том 52. Вып. 1. 1982.
4. Герасимов В.В., Громова А.И. и др. К вопросу о целесообразности дозировки кислорода в КПП АЭС с РБМК-1000/Атомная энергия. Том 59. Вып 6. 1985.
5. Кружилин Г.И., Дубровский И.С. Существует ли вопрос о целесообразности применения нейтрально-кислородного водного режима на АЭС?/Атомная энергия. Том 65. Вып. 4. 1988.
6. Внедрение нейтрально-кислородного водного режима на Курской АЭС. Техническая справка. Утверждена директором ЭНИЦ В.Н. Блинковым.
7. Проведение работ после останова энергоблока № 3 Курской АЭС на ППР-99. Реализация программы контроля радиационной обстановки в период ППР-99. Обработка и анализ полученных данных. ЭНИЦ ВНИИАЭС. Техническая справка. Электрогорск. 1999.
8. Техническое обоснование промышленного дозирования газообразного кислорода в конденсатные тракты энергоблоков Курской АЭС, утвержденное Главным конструктором НИКИЭТ Ю.М. Черкашовым, первым заместителем директора ЭНИЦ ВНИИАЭС В.А. Гашенко, генеральным директором ГП ВНИИАЭС А.А. Абагяном.
9. В.А. Юрманов, В.А. Мамет, В.Ф. Тяпков и др. Дисперсионный анализ продуктов коррозии в теплоносителе одноконтурной АЭС/Сборник статей "Атомные электрические станции". Вып.10. Под редакцией Л.М. Воронина. М.: Атомиздат. 1998.
10. Богданов Н.И., Борунова А.В., Заболотных В.Л. и др. Продукты коррозии в контуре многократной принудительной циркуляции АЭС с РБМК/Сборник статей. Вып.10. Под редакцией Л. М. Воронина. М.: Атомиздат. 1998.
11. Поведение изотопов кобальта в водном теплоносителе кипящих реакторов. Труды ВНИПИЭТ. 1988.

12. Кабакчи С.А. Изменение стационарной концентрации кислорода в реакторной воде РБМК-1000 при вариации концентрации кислорода в питательной воде/Атомная энергия. Том 84. Вып. 3. 1998.

13. Денисова Л.Г. Межкристаллитное коррозионное растрескивание сварных соединений аустенитных трубопроводов Ду300 КМПЦ блоков с РБМК. Влияние водно-химического режима. № ДНП-4-146-700/2000.

14. Материалы Внебюджетной программы МАГАТЭ по предотвращению межкристаллитного коррозионного растрескивания сварных соединений аустенитных трубопроводов на АЭС с РБМК группы РГ-4 (химия и дезактивация). Заключительный отчет. 2002.

15. Третья международная конференция "Безопасность трубопроводов". Крицкий В.Г., Буторин С.Л., Березина И.Г., Стяжкин П.С., Малов М.Ю., Захаржевский Ю.О., Ковалев С.М., Петров А.Н., Тишков В.М. Оценка влияния и значимости химических и механических факторов на коррозионное растрескивание трубопроводов Ду300 АЭС с реакторами РБМК-1000. 1999.

16. Белоус В.Н., Зейнгарник А.Н., Шувалов В.А., Аржаев А.И. Особенности ведения водно-химического режима на энергоблоках АЭС с реакторами РБМК и его возможное влияние на повреждение по механизму межкристаллитного коррозионного растрескивания/"Растрескивание в аустенитных трубопроводах АЭС под влиянием окружающей среды". Региональное совещание МАГАТЭ. Славутич, Украина, 1998.

17. Мартынова О.И. Проблемы водно-химического режима АЭС и пути их решения/Атомная техника за рубежом, №12, 1985.

18. Юрманов В.А. Обзор. Материалы 8-й Международной конференции по водно-химическим режимам АЭС, проведенной Ядерным обществом Великобритании в Бонмуте 22–26.10.2000 г.

19. Electrochemical Corrosion Potential Monitoring in Boiling Water Reactors. R.L. Cowan, California USA Presented at 1998 Japan International Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, Water Chemistry 98, October 13–16 1998. Kashiwazaki Japan.