

УДК 621.039.56

ОПТИМИЗАЦИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА АЭС

М.Г. Токмачев, Г.В. Токмачев

Программа ведения водно-химического режима (ВХР) является необходимой для безопасной эксплуатации АЭС. Она обеспечивает целостность, надежность и готовность оборудования, важного для безопасности АЭС. Совершенствование ВХР минимизирует вредное воздействие химических примесей и коррозии на структуры, системы и оборудование АЭС, а также снижает накопление радионуклидов, дозовую нагрузку на персонал и возможный выход химических и радиоактивных материалов в окружающую среду [1].

Важность поддержания требуемого ВХР продемонстрировал сравнительно недавно (20 августа 2008 г.) произошедший инцидент на первом энергоблоке АЭС Saint Lucie (США), который, как сообщает Комиссия по ядерному регулированию США (NRC), был остановлен из-за протечек в системе конденсата, вызванных нарушением ВХР в парогенераторе, связанным со слишком высоким содержанием хлоридов в питательной воде [2].

МАГАТЭ выпустило стандарт по безопасности [1], который касается различных аспектов совершенствования химических технологий на АЭС со всеми типами реакторов с водным теплоносителем, включая ВВЭР и РБМК.

В отношении ВХР первого контура АЭС с реакторами PWR и ВВЭР стандарт содержит следующие положения:

- необходимо непрерывно измерять концентрации растворенного ^{10}B и борной кислоты в теплоносителе первого контура и, если возможно, оценивать их для контроля реактивности активной зоны;

- следует вводить или выводить щелочные соединения, чтобы поддерживать оптимальное значение pH для текущей температуры в любой момент времени (на АЭС с PWR обычно используется гидроксид лития, на АЭС с ВВЭР — гидроксид калия). Целью поддержания pH на оптимальном уровне является:

- уменьшение скорости коррозии конструктивных материалов, переноса продуктов коррозии и дозовых нагрузок;

- защита конструктивных материалов от коррозионного растрескивания под напряжением;

- предотвращение коррозии оболочек твэлов;

- предупреждение изменений мощности, вызванных шламовыми отложениями;

- следует поддерживать на оптимальном уровне концентрацию водорода для подавления образования окислительных продуктов радиолиза и сохранения электрохимического потенциала на достаточно низком уровне, чтобы предотвратить коррозионное растрескивание нержавеющей стали под напряжением. Кроме того, следует дегазировать подпиточную воду первого контура и удалять растворенный кислород, если его концентрация превышает допустимые значения;

- необходимо поддерживать ниже установленных пределов коррозионную активность теплоносителя для подавления коррозии конструктивных материалов первого контура. В этой связи наибольшее внимание должно уделяться концентрациям водорода, хлоридов, фторидов и, возможно, сульфатов;

- следует сводить к минимуму концентрации низкорастворимых химических соединений, которые могут создавать отложения на поверхностях оболочек твэлов, вызывая рост температуры и потенциальный отказ оболочек. К ним относятся соединения кальция, магния и алюминия, диоксид кремния, ионы которого могут образовывать цеолит, а также органические соединения;

- процедуры пуска и останова блока должны быть оптимизированы для контроля выхода продуктов коррозии и их удаления, с использованием систем спецводоочистки, и для минимизации любого риска межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением.

ВХР второго контура регламентируется следующими нормами:

- второй контур следует эксплуатировать с применением только летучих щелочных реагентов, таких, как аммиак и/или амины (например, морфолин, этаноламин, диметиламин). При не-

обходимости должен добавляться восстановитель;

- особое внимание необходимо уделять целостности различных частей второго контура, которые могут быть подвержены коррозионно-эрозионному воздействию. Для этого эксплуатирующая организация должна обеспечить выполнение программы периодических инспекций;

- концентрации аммиака и/или аминов и восстановителя должны быть такими, чтобы требуемые значения pH поддерживались в различных сегментах второго контура. Установленные значения pH должны быть:

- такими, чтобы минимизировать или предотвратить коррозионно-эрозионный износ углеродистых сталей и обеспечить минимальную концентрацию продуктов коррозии в питательной воде, которые вызывают отложения в парогенераторе;

- сочетаемыми с эффективными системами очистки и конструкционными материалами второго контура;

- такими, чтобы планируемые выходы жидких и твердых отходов в окружающую среду были минимальными;

- размер течи из первого контура через трубки парогенераторов должен строго контролироваться в установленных пределах и быть минимальным;

- содержание вредных примесей (натрий, хлориды, сульфаты, свинец, медь) в парогенераторах необходимо сводить к минимуму и контролировать, в частности, должны быть установлены требования к продувке парогенераторов по содержанию примесей;

- должна быть выполнена оценка влияния ВХР на целостность парогенератора. Основными средствами такой оценки являются:

- неразрушающий контроль трубок парогенераторов;

- оценка эффекта вымывания солей из парогенератора (hide-out return) при остановках блока на перегрузку, которая выполняется при, как минимум, некоторых из них;

- расчетные программы или любые другие методы оценки химических характеристик жидкости, содержащейся в трещинах, или отложений на теплообменных поверхностях парогенераторов в процессе эксплуатации;

- методы, используемые для контроля примесей в котловой воде, должны быть достаточно эффективными для поддержания параметров продувки парогенераторов в рамках установленных пределов;

- при необходимости должна осуществляться химическая промывка парогенераторов для удаления отложений, активизирующих коррозию.

Для ВХР АЭС с реакторами РБМК сформулированы следующие рекомендации:

- следует применять нейтральный ВХР без использования кислот и щелочей. Должна применяться хорошо очищенная питательная вода и эффективные системы очистки конденсата и теплоносителя реактора;

- ВХР РБМК должен обеспечивать:

- минимальный уровень отложений на теплообменных поверхностях и трубах;

- минимальную коррозию и коррозионно-эрозионный износ конструкционных материалов паро-водяных коммуникаций;

- высококачественный насыщенный пар, не образующий капли в проточных частях турбин;

- параметры ВХР, в частности концентрации растворенных водорода и кислорода, необходимо поддерживать в установленных пределах. Для уменьшения риска коррозии концентрация кислорода должна быть минимальной;

- для сокращения содержания ^{95}Zr и других радиоактивных продуктов коррозии в отложениях на поверхностях контур многократной принудительной циркуляции должен промываться сразу после останова блока. Промывка может проводиться как без специальных реагентов, так и с использованием комбинированной процедуры.

Из-за повышения требований к персоналу и сокращения его численности на АЭС США эффективное управление ВХР становится особенно актуальным. Сокращение обусловлено как экономическими проблемами, так и старением персонала. Институт энергетических исследований (Electric Power Research Institute — EPRI) (США) разработал программу оптимизации ВХР [3, 4]. Стоимость реализации программы в 2010 и 2011 гг. составляет 3,9 млн долл. и 4 млн долл. соответственно. В рамках ее выполнения на основе результатов НИР и опыта эксплуатации АЭС разрабатываются и пересматриваются руководства по ВХР, а также средства по его оптимизации. Пересмотру подлежат руководства по ВХР первого и второго контуров АЭС с реакторами PWR и BWR. Кроме того, планируется разработка руководства для новых АЭС, а именно, для реактора AP-1000 фирмы Westinghouse и усовершенствованного ABWR компании Toshiba. В них будут учтены отличия от существующих АЭС и уделено особое внимание режимам пуска и горячей обкатки. Ниже рассмотре-

ны некоторые из задач, относящихся в основном к реакторам типа PWR и решаемых в ходе работ по программе.

Для оптимизации ВХР EPRI разработал программное обеспечение ChemWorks Tools, которое является системой, осуществляющей мониторинг ВХР в режиме реального времени, поддержку персонала химических цехов при выполнении рутинных химических анализов, определение ранних индикаторов неблагоприятного протекания ВХР и сигнализацию о возникших проблемах. Программа использует сложную математическую модель и библиотеку стандартных ситуаций. В 2010 г. выпущена версия 4.0 этого программного средства, которое включает модуль MULTEQ для высокотемпературных вычислений и интегрированный с ним вычислительный блок для анализа вымывания солей из парогенератора при останове блока (hide-out return), модуль для расчета pH первого контура, включая низкотемпературные расчеты, модули расчета и анализа ВХР в период останова реактора, блок расчета течи из первого контура во второй и модуль оценки скорости роста трещин для реакторов BWR.

Отложения на трубках парогенераторов не только ухудшают теплопередачу, но и ведут к теплогидравлической нестабильности и создают застойные зоны, где продукты коррозии провоцируют коррозионное растрескивание. В качестве перспективной технологии для уменьшения отложений на теплообменных поверхностях парогенераторов рассматривается применение диспергаторов. На основе результатов предыдущей опытной эксплуатации ожидается, что их использование при работе на мощности уменьшит отложения на 50%.

В течение ряда лет EPRI активно пропагандирует эффективность введения цинка в теплоноситель первого контура для подавления коррозионного растрескивания под напряжением (с точки зрения как возникновения, так и скорости роста трещин). В настоящее время организован активный обмен опытом между эксплуатационным персоналом разных АЭС.

Организация ведения ВХР второго контура АЭС с реакторами типа PWR является одной из задач, рассмотренных в программе EPRI. Основная цель — снижение интенсивности переноса продуктов коррозии и отложения их на теплообменных поверхностях парогенераторов, что приводит к подшламовой коррозии и коррозионному растрескиванию под напряжением. Для этого предусмотрена оптимизация pH второго контура путем оценки баланса массы продуктов коррозии для каждой конкретной АЭС и

определения концентрации и типа аминов. Этой информацией АЭС активно обмениваются между собой. Аналогичный обмен организован в отношении использования ионообменных смол и фильтров в первом и втором контурах реакторов PWR. Для этого создана группа пользователей, аналогичная работающей уже более 10 лет группе по BWR.

Как утверждается в [5], ядерная отрасль является достаточно консервативным сектором промышленности в плане внедрения новых систем обработки и высококачественной очистки воды. В настоящее время доминируют апробированные, но дорогостоящие технологии использования ионообменных смол, выпаривания или одноразовой фильтрации (once-through filtration). В то же время в других отраслях, например фармацевтике и электронике, в последние десятилетия активно внедряются новые и усовершенствованные технологии. В [5] констатируется, что аналогичная тенденция появилась и в ядерной области при усовершенствовании легководных реакторов. Это позволяет модернизированным действующим АЭС быть более конкурентоспособными с экономической и экологической точек зрения.

На АЭС Ringhals в Швеции в течение нескольких лет исследовали новые технологии, связанные с ведением ВХР в пилотном и полномасштабном вариантах. Примерами таких технологий являются транспорт газа через мембраны (gas transfer membrane) для отказа от использования гидразина в замкнутых системах охлаждения и для уменьшения выделения летучего изотопа ^{41}Ar , электро-деионизационная система для повторного использования продувочной воды парогенератора и очистки жидких радиоактивных отходов, электрохимический ионный обмен для разделения бора и лития, наночистка для очистки радиоактивных водных отходов и электрохимическое окисление для уменьшения органических соединений в жидких концентратах [5].

Актуальной проблемой является влияние повышения мощности энергоблоков на ВХР АЭС [6]. Рост мощности ведет к увеличению энерговыделения в реакторе и расхода теплоносителя через активную зону. В свою очередь, изменение параметров реакторной установки влияет на ВХР как из-за увеличения радиолитической воды, так и из-за сокращения времени пребывания ее в активной зоне. Большинство публикаций по этой проблеме относится к кипящим реакторам, но существует и тенденция повышения мощности АЭС с легководными реакторами.

Стратегия повышения номинальной мощности сейчас реализуется, в частности, на трех энергоблоках в Тайване [7]. Один из практических путей повышения мощности — увеличение плотности энерговыделения в реакторе с незначительным повышением расхода теплоносителя (не более 5%), чтобы избежать замены ГЦН. Соответственно, увеличиваются дозовые нагрузки от нейтронного и гамма-излучения в теплоносителе реактора. Концентрация продуктов радиолиза и значения потенциала электро-химической коррозии в теплоносителе контура реактора сильно изменяются.

При использовании, например, водородной стратегии для уменьшения коррозии выбор оптимального режима дозирования водорода осложняется недостатком экспериментальных данных. Так как очень трудно получить такие данные непосредственно в различных частях реального реактора, то для реактора типа BWR/6 было проведено математическое моделирование с различными концентрациями водорода в питательной воде (от 0 до 2 мг/кг) и значениями мощности (от 100 до 120% номинальной) [5, 6]. Для оценки эффективности и определения оптимальной водородной стратегии расчеты выполняли по программе DEMACE. Эта расчетная программа применялась для моделирования влияния различных уровней мощности при использовании обычной или водородной стратегий на окислительно-восстановительный процесс и потенциал электрохимической коррозии в реакторном контуре. Расчеты показали, эти параметры при увеличении мощности изменяются немонотонно, в частности, при мощностях, равных

104% и 114% номинальной происходит скачок потенциала электрохимической коррозии. Установлено, что влияние подъема мощности на ВХР существенно различается в различных местах реактора и, как ожидается, отличается у разных энергоблоков из-за различной степени радиолиза и физических размеров установок.

Список литературы

1. Chemistry Programme for Water Cooled Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide No SSG-13, IAEA, Vienna, 2011 г.
2. Florida Power and Light Company: Unit 1 Shutdown Due to out of Specification Steam Generator Water Chemistry. — Preliminary Notification Report PNO-II-08-010, 08/20/2008. NRC, США. http://adamswebsearch2.nrc.gov/idmws/doccontent.dll?library=PU_ADAMS^PBNTAD01&ID=082340118.
3. Electric Power Research Institute. 2010 Portfolio. Water Chemistry — Program 41.09.03.
4. Electric Power Research Institute. 2011 Portfolio. Water Chemistry — Program 41.09.03.
5. B. Bengtsson, P. Svanberg, U. Bothin, G. Svanberd, and A. Velin. Experience with Water Treatment Applications at Ringhals. — PowerPlant Chemistry, 2009, 11 (1).
6. T.-K. Yeh, M.-Y. Wang. The Impact of Power Uprate on the Corrosion Mitigation Effectiveness of Hydrogen Water Chemistry in Boiling Water Reactors. — Nuclear Science and Engineering, 2008, v. 160, No 1, p. 98—107.
7. T.-K. Yeh, M.-Y. Wang, C.F. Chu and C. Chang. Predicted Effect of Power Uprating on the Water Chemistry of Commercial Boiling Water Reactors. — PowerPlant Chemistry, 2009, 11(4).

Ключевые слова

Атомная станция, эксплуатация, водно-химический режим, конструкционные материалы, коррозия.

Урановое производство в 2010 г.

По данным МАГАТЭ, мировое производство урана в 2010 г. составило 55 000 т, увеличившись на 8% по сравнению с 2009 г. и на 20% по сравнению с 2008 г.

93% добычи урана в мире определяется семью странами: Австралией, Канадой, Казахстаном, Намибией, Нигером, Россией, Узбекистаном и США, причем первыми тремя обеспечивается более 60% его производства.

В Казахстане урановое производство в 2009 г. увеличилось на 70% по сравнению с предыдущим годом, а производство прошлого года выросло еще на 30%.

Впечатляющий результат достигнут в небольшой восточно-африканской стране Малави, где урановое производство выросло в прошлом

году примерно в 13 раз (от 100 т в 2009 г. до 1270 т в 2010 г.).

Российский производитель — урановый холдинг АРМЗ — резко наращивает добычу урана, в том числе за счет международной экспансии.

В 2009 г. АРМЗ увеличил добычу на 25% по сравнению с 2008 г. — до ~4600 т, а по итогам 2010 г. еще на 12% — до 5200 т.

При этом производство урана в мире не покрывает потребности действующего реакторного парка, обеспечивая его немногим более чем на 80%.

*Материал подготовила И.В. Гагаринская
Новости. Ядерная энергия, человек,
окружающая среда. РНЦ «Курчатовский
институт», февраль 2011 г.*