

ИННОВАЦИОННЫЙ СПОСОБ ДОЗИРОВАНИЯ ЦИНКА В ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Европин С.В., Юрманов В.А., Григорович С.М., Гудков Н.Д., Шутько К.И.,
Юрманов Е.В. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Судя по количеству публикаций на международных научно-технических конференциях по химии теплоносителей атомных реакторов (серии Nuclear Plant Chemistry) за последние 20 лет одной из наиболее востребованных и эффективных на АЭС мира оказалась технология коррекционной обработки водных теплоносителей ядерных реакторов микродобавками цинка. При ее внедрении на более чем 100 энергоблоках АЭС мира получен ряд положительных эффектов: подавления процессов коррозии и коррозионного растрескивания под напряжением, минимизации накопления активированных продуктов коррозии, уменьшения дозозатрат на персонал, а также сокращения образования отходов и вредных выбросов в окружающую среду, обеспечивающих повышение их экологической безопасности.

Впервые эффект влияния повышенных до 0,04–0,2 мг/дм³ концентраций цинка в водном теплоносителе на коррозионные процессы и поведение радионуклидов коррозионного происхождения на радиационную обстановку у реакторного оборудования при стоянках выявлен в начальный период эксплуатации исследовательского кипящего корпусного реактора ВК-50 (1965 г.) в Научно-исследовательском институте атомных реакторов (НИИАР) в Димитровграде [1–3].

Вследствие процесса обесцинкования латунных трубок технологических конденсаторов, конденсатора турбины и подогревателя низкого давления (ПНД) в условиях ведения водно-химического режима (ВХР) с дозированием в воду гидразингидрата, разлагающегося с образованием аммиака, цинк коррозионного происхождения поступал в теплоноситель одноконтурной исследовательской ядерной установки (ИЯУ). После отказа от дозировки гидразингидрата и замены латунных конденсаторов концентрация цинка в теплоносителе значительно уменьшилась, но даже ее микроконцентрации на уровне 0,005–0,02 мг/дм³ приводили к снижению коррозии стального оборудования и трубопроводов, а также оказывали влияние на поведение ее продуктов. В частности, радиационная обстановка у реакторного оборудования ВК-50 даже при наличии поверхностей кобальтового сплава (стеллита) практически полностью определялась продуктом активации цинка – Zn-65 по сравнению с доминированием более опасных в радиационном отношении радионуклидов кобальта Co-60 и Co-58 на большинстве АЭС. На ИЯУ ВК-50 по сравнению с кипящими реакторами РБМК за единственным исключением не было отмечено коррозионного растрескивания сварных соединений циркуляционных трубопроводов, изготовленных из тех же хромоникелевых сталей, что обеспечило надежную эксплуатацию ВК-50 почти 60 лет.

На основании результатов материаловедческих исследований элементов реактора ВК-50 в течение его длительной эксплуатации при наличии микроконцентраций цинка в теплоносителе НИИАР рекомендовал дозировку микродобавок цинка в теплоносители реакторов, как с целью уменьшения накопления Co-60 в отложениях, так и защиты аустенитных сталей от коррозионного растрескивания.

В 1980-х годах массовое коррозионное растрескивание циркуляционных трубопроводов на зарубежных АЭС с кипящими реакторами BWR привело к необходимости их ремонта и замены, связанных с высокими дозозатратами на персонал вследствие накопления радионуклидов кобальта в отложениях в отличие от сравнительно благоприятной радиационной обстановки на старых АЭС с латунными конденсаторами (включая АЭС Grand Gulf Nuclear Station в США).

С учетом данного обстоятельства в 1985 году в США запатентована и быстро распространилась на АЭС с BWR мира технология дозирования цинка в теплоноситель GEZIP™, массовое применение которой втрое уменьшило радиационные поля при ремонтных стоянках и, соответственно, коллективные дозозатраты на персонал АЭС. Улучшение рабодобстановки объяснялось замещением радиационно опасных изотопов кобальта цинком в оксидных пленках на поверхностях трубопроводов АЭС, поскольку коэффициент радиационной опасности Co-60 вчетверо выше такового для Zn-65. Согласно расчетным оценкам исключение источника образования Zn-65 еще на 25 % снижает радиационные поля от реакторного оборудования, поэтому в США запатентован ряд способов дозирования в теплоноситель цинка, предварительно обедненного по изотопу Zn-64 [4–6]], основанных на:

- циркуляции теплоносителя через емкость с таблетированным оксидом цинка;
- введении суспензии или пасты оксида цинка;
- дозировании водных растворов ацетата цинка.

В связи с отсутствием на то время в мире промышленного производства препарата цинка со смещенным изотопным составом в 1990 г. корпорация Дженерал Электрик заказала поставки из СССР обедненного по изотопу Zn-64 цинка. С применением центрифужной конверсионной технологии в России организовано промышленное производство этой изотопной продукции ядерной чистоты с ежегодными поставками на экспорт до 1 т, обеспечившими потребности зарубежных АЭС.

После первых публикаций о дозировании цинка на АЭС США с реакторами BWR в начале 1990-х гг. НИКИЭТ совместно с ВНИПИЭТ, РНЦ «Курчатовский институт» и ВНИИАЭС выполнено расчетно-экспериментальное обоснование дозирования цинка в теплоноситель реакторов РБМК-1000, а также рассмотрены способы его дозирования [7–8]. Результаты испытаний в 1996 г. на Смоленской АЭС дозатора конструкции ВНИПИЭТ со спеченным таблетированным оксидом цинка выявили его недостатки для обеспечения равномерной дозирования цинка на мощных АЭС [9].

С 1994 г. начато массовое внедрение дозирования цинка в теплоноситель реакторов с водой под давлением PWR, при этом чтобы упростить дозирование плохо растворимого в воде оксида цинка он предварительно обрабатывался уксусной кислотой с переводом в хорошо растворимый ацетат цинка.

Широкому внедрению технологии дозирования цинка в теплоноситель PWR способствовало не только уменьшение радиационных полей, но также обнаруженное при этом снижение интенсивности скорости общей коррозии и подавление коррозионного растрескивания под напряжением сварных соединений из хромоникелевых сталей и никелевых сплавов в водной среде теплоносителя первых контуров, что имеет большое значение для зарубежных АЭС в связи с массовыми коррозионными повреждениями и вынужденными заменами парогенераторов по данной причине.

Кроме решения экологических проблем за счет микродозировки цинка в теплоноситель реакторов PWR удалось существенно снизить коррозионную повреждаемость теплообменных трубок парогенераторов со стороны первых контуров на АЭС данного типа, а также повысить надежность работы топлива за счет формирования на поверхностях циркониевых топливных оболочек тонкой цинксодержащей защитной пленки хромоникелевой шпинели [10].

Многолетний опыт АЭС с PWR показал, что микродозировки цинка в теплоноситель лишены негативных последствий в части поддержания высоких требований к качеству теплоносителя, обеспечивают надежную эксплуатацию оборудования первого контура и ядерного топлива, а также является экономичным и эффективным способом снижения дозовых нагрузок на персонал [11–12] благодаря улучшению радиационной обстановки у реакторного оборудования при стоянках.

Опыт ряда АЭС (например, на АЭС Томари в Японии с реакторами PWR) показал, что наибольшая эффективность дозирования цинка достигается в случае ее внедрения с самого начала эксплуатации энергоблоков, поскольку цинк-содержащая защитная оксидная пленка на стальных поверхностях первых контуров наиболее быстро (менее двух недель) формируется на неокисленных поверхностях первого контура на этапе их предпусковой пассивации или функционального опробования оборудования первого контура при рабочей температуре теплоносителя [12]. В случае начала дозирования цинка в последующий период эксплуатации энергоблока АЭС его внедрение в ранее сформированную оксидную пленку требует значительных затрат времени (до нескольких месяцев) для ее фазовой перестройки [13].

Если в специальном руководстве по безопасности МАГАТЭ №SSG-13 «Программа по водно-химическому режиму для атомных станций с водоохлаждаемыми реакторами» (2014) было рекомендовано введение в воду реакторов добавок цинка [14], то при пересмотре этого документа в 2022 г. в проекте руководства МАГАТЭ по безопасности «Программа водно-химического режима для ядерных энергетических установок с водяным охлаждением» (DS525) рекомендация о введении цинка в теплоноситель конкретизирована с его использованием непосредственно перед первым пуском энергоблока на этапе «горячего кондиционирования» с целью формирования на поверхностях защитного оксидного слоя, при этом отмечена необходимость четко документировать основания для отказа от применения цинка, если он не используется в этот период.

По опыту эксплуатации наиболее мощных энергетических реакторов PWR с поверхностным подкипанием теплоносителя повышенная дозировка цинка позволяет исключить или значительно ослабить проблемы возникновения аномалий аксиального оффсета и локального роста отложений продуктов коррозии в верхней части активной зоны. Однако в условиях длительной и повышенной дозировки цинка в виде ацетата проявились негативные последствия данного способа коррекционной обработки водного теплоносителя. Под воздействием реакторного излучения ацетат-ионы, как и другие загрязнения теплоносителя органической природы, подвержены разложению с образованием широкого спектра продуктов от метана до аморфных микрочастиц элементарного углерода с низкой теплопроводностью. Последние обладают склонностью к образованию отложений на топливных оболочках [15]. При этом даже очень тонкие субмикронные слои элементарного углерода на поверхностях ТВЭЛов могут обуславливать рост на них крупнокристаллических железооксидных отложений толщиной до 150 мкм, которые могут приводить к локальным перегревам топливных оболочек [16–17].

Возможность повышения доли углерода в отложениях на ТВЭлах до 15–20 % в условиях повышенного и длительного дозирования ацетата цинка на мощных реакторах PWR с риском их локального перегрева вызвало озабоченность изготовителей топлива, эксплуатирующих АЭС организаций и надзорных органов. В связи с этим вводились определенные ограничения к дозированию цинка на мощных PWR, что привело к снижению его эффективности [18–19].

В 2017–2018 годах на научно-технических конференциях Электроэнергетического научно-исследовательского института США при обсуждении проблем аксиального оффсета и аномального роста отложений продуктов коррозии в верхней части активных зон новых мощных энергоблоков PWR рекомендована повышенная дозировка цинка в теплоноситель, но не в форме его органических соединений, а в виде гидроксида или оксида высокой чистоты. Кроме того, в ФРГ и США запатентовано изобретение (DE № 1973936 и US № 6314153) по дозированию в воду первых контуров АЭС широкого спектра всевозможных водорастворимых соединений

цинка, включая амины, цинкаты и другие комплексы. Однако даже при низких концентрациях цинка до $0,02 \text{ мкг/дм}^3$ использование любых этих соединений может приводить к накоплению в первых контурах различных посторонних веществ с учетом воздействия на них облучения и повышенной температуры, что не согласуется с нормативными требованиями к высокой чистоте водных теплоносителей АЭС. При этом в зарубежных исследованиях не рассматривались способы модификации водных суспензий оксида цинка для возможности их дозирования в теплоноситель реакторов.

Для АЭС с ВВЭР эффективность применения дозировки цинка в теплоноситель первых контуров оценивалась ниже таковой по сравнению с PWR вследствие различий используемых конструкционных материалов, включая отсутствие использования кобальтовых сплавов – стеллитов, а также меньшей доли никеля (около 10 %) вместо (30–70 %) в материале трубных систем парогенераторов и циркуляционных трубопроводах.

В 2003–2006 годах. на реакторной петле RVS-4 исследовательского реактора LVR-15 Института ядерных исследований Чехии в г. Ржеж в модельных условиях первого контура АЭС с ВВЭР при полном соблюдении теплогидравлических параметров и использовании российских реакторных материалов проведены сравнительные испытания различных водно-химических режимов (ВХР) [20]:

- стандартный аммиачно-калиевый с борной кислотой;
- аммиачно-калиевый с борной кислотой и дозированием водорода;
- аммиачно-калиевый с борной кислотой и повышенной концентрацией аммиака;
- аммиачно-калиевый с борной кислотой и дозированием цинка.

Объективные результаты реакторные испытаний подтвердили не только безопасность дозирования цинка в теплоноситель ВВЭР, но и преимущество ВХР с дозированием цинка с концентрацией $5\text{--}10 \text{ мкг/дм}^3$ по сравнению с другими ВХР за счет минимизации интенсивности процессов коррозии и генерации радионуклидов коррозионного происхождения. Данные особенности оптимального ВХР обуславливают наилучшие ресурсные характеристики оборудования и трубопроводов первых контуров, формирования наиболее благоприятной радиационной обстановки у реакторного оборудования при стоянках, а также минимальные дозозатраты на персонал и сокращение количества вредных отходов и сбросов, которые в значительной степени определяют конкурентоспособность проектов АЭС в целом.

Дозировка цинка снижает рост отложений на ТВС в 1,5–2 раза в течение топливной кампании благодаря изменению структуры и состава отложений, что обеспечивает оптимизацию топливоиспользования.

Дозирование цинка на ряде французских АЭС с PWR [21], где для изготовления оболочек ТВЭЛов используется циркониевый сплав аналогичный применяемому для изготовления ТВС на всех АЭС с ВВЭР, показало отсутствие снижения надежности эксплуатации элементов активной зоны в условиях добавки цинка в теплоноситель.

Таким образом, рассмотренные выше результаты прецизионных испытаний ВХР с дозированием цинка могут быть использованы для его внедрения на Российских АЭС и, тем самым сократить затраты времени и средств на проведение реакторных испытаний.

В рамках программы Международного сотрудничества ТАСИС в 2008–2010 гг. на основе наибольшего в Европе опыта дозирования цинка в теплоноситель энергоблоков АЭС Германии Библис выполнена всесторонняя оценка эффективности использования данной технологии на примере серийного энергоблока №3 Запорожской АЭС с реактором ВВЭР-1000 [22]. Сравнительный анализ с учетом различий реакторных материалов Запорожской АЭС и АЭС Библис показал возможность применения данного

ВХР на энергоблоках АЭС с ВВЭР, как с технической стороны, так и с точки зрения безопасности влияния на ядерное топливо.

В проектах серийных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 с начала их эксплуатации использовались высокотемпературные механические фильтры с производительностью 400 м³/ч, которые обеспечивали эффективное выведение из первых контуров продуктов коррозии и других дисперсных частиц загрязнений. Из проектов АЭС-2006 и ВВЭР ТОИ с реакторами ВВЭР-1200 эти фильтры были исключены. Однако повышение мощности реакторов ВВЭР-1200 по сравнению с ВВЭР-1000 приводит к заметному подкипанию теплоносителя в активной зоне реактора и, тем самым к усилению интенсивности процессов коррозии и накоплению их продуктов, в том числе на оболочках ТВЭЛов.

В качестве компенсирующего мероприятия в 2011 г. Главным конструктором ВВЭР (ОКБ «Гидропресс») в нормы водно-химического режима первого контура АЭС с ВВЭР-1200 внесены требования по дозированию цинка в теплоноситель первого контура, как для ослабления интенсивности коррозионных процессов, так и минимизации накопления активированных продуктов коррозии [23], чтобы способствовать улучшению радиационной обстановки и минимизации коллективных дозозатрат на персонал.

На основании данного решения, согласованного Научным руководителем («Курчатовский институт»), генеральным проектировщиком АЭС с ВВЭР разработана технологическая схема узла дозирования цинка в теплоноситель первого контура, а также приняты компоновочные решения с выбором необходимого для этого дополнительного оборудования, трубопроводов и арматуры.

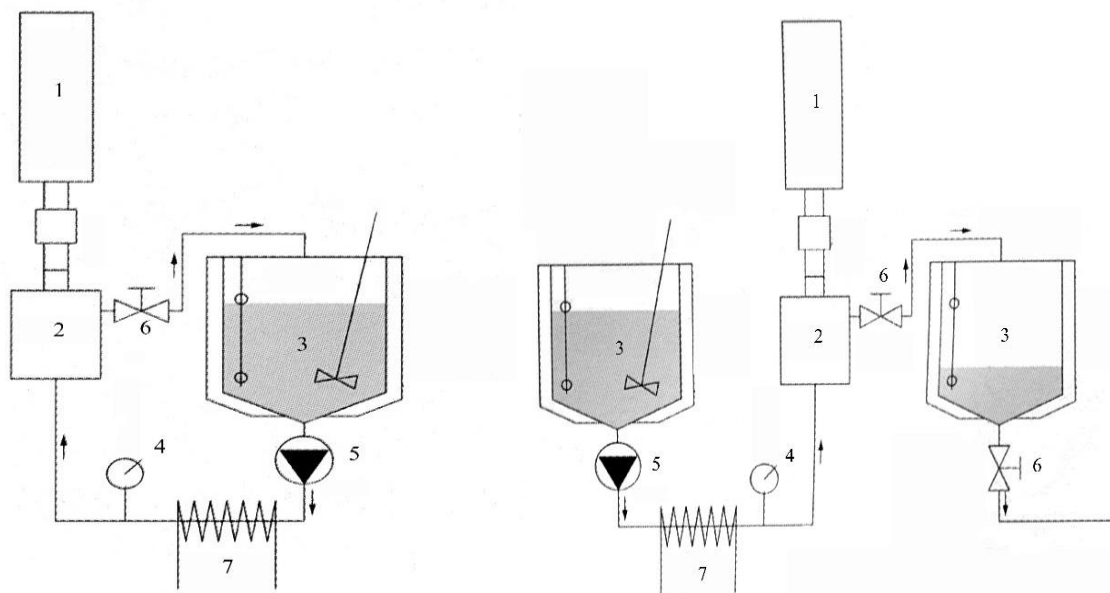
Для ряда проектов новых АЭС с реакторами ВВЭР (НВАЭС-2, КурАЭС-2, АЭС Аккую, ЛАЭС-2, Белорусская АЭС, АЭС Ханхикиви, АЭС Пакш-2, АЭС Эль-Дабаа) было предусмотрено дозирование цинка в теплоноситель первых контуров в виде его ацетата, однако оно до сих пор не реализовано, поскольку по мнению ряда специалистов отрасли дозирование ацетата цинка представляет определенные опасения с точки зрения надежной работы топлива из-за возможности локального перегрева оболочек ТВЭЛов под слоем углеродистых отложений на их оболочках. Рост углеродистых отложений на ТВЭЛАх зависит от длительности облучения ТВС в реакторе и концентрации ацетата цинка в теплоносителе, а кроме того следует учитывать возможность усиления генерации и массопереноса продуктов коррозии в условиях подкипания теплоносителя.

В случае применения дозировки ацетата цинка на мощных АЭС с ВВЭР следует учитывать возможность накопления углеродистых отложений на топливных оболочках подобно наблюдаемому на мощных реакторах PWR.

Для решения данной проблемы НИКИЭТ предлагается перспективный и безопасный способ организации ВХР первых контуров ядерных энергетических установок (ЯЭУ) с введением оксида цинка в водный теплоноситель в виде агрегативно-устойчивого коллоидного раствора (гидрозоля). Сжигание диэтилцинка в газовой среде не обеспечивает возможность приготовления коллоидного раствора оксида цинка. Экспериментальная отработка инновационного способа показала возможность достижения и сохранения в течение нескольких недель без коагуляции высоких концентраций оксида цинка до 2,7 г/дм³ в его коллоидном растворе, предназначенном для дозирования в водный теплоноситель. Повышение на четыре порядка растворимости оксида цинка обеспечивается особым способом приготовления его коллоидного раствора. Агрегативная устойчивость создаваемого коллоидного раствора обеспечивается измельчением исходных частиц и сепарацией наиболее крупных частиц оксида цинка для предотвращения их коагуляции или слипания [24], что подтверждается данными измерений дзета-потенциала коллоидного раствора.

Гранулометрический состав частиц исходного порошка оксида цинка обычно содержит конгломераты с размерами до 30 мкм. Обработка исходной водной суспензии в специальном измельчителе в течение 10 минут позволяет приготовить коллоидный раствор и уменьшить размер наиболее крупных частиц до субмикронного.

Схема установки для приготовления и дозирования коллоидного раствора оксида цинка представлена на рисунке в различных вариантах ее исполнения.



Варианты дозирования цинка в режимах рециркуляции (а) и протоке (б):

1 – измельчитель; 2 – проточная ячейка; 3 – резервуар; 4 – манометр;

5 – насос; 6 – регулирующий вентиль; 7 – система охлаждения

Подача коллоидного раствора оксида цинка осуществляется в систему подпитки первого контура охлаждения реактора. Ввод данного раствора в первый контур осуществляется с помощью специального насоса-дозатора непрерывно или периодически во время эксплуатации в зависимости от заданной концентрации цинка и текущих результатов ее измерения.

Технология приготовления гидрозоля оксида цинка может использоваться на любых водоохлаждаемых реакторных установках. В любом случае ее применение взамен использования ацетата цинка на АЭС с реакторами PWR, ВВЭР и других типов практически исключает риск негативных последствий поступления органики в первый контур, поскольку массовая доля общего углерода в ацетате цинка (около 38 %) по крайней мере на 3 порядка выше, чем в оксиде цинка.

Вводимый в водный теплоноситель цинк интенсивно сорбируется поверхностями первого контура, поэтому в течение первых суток дозирования он практически не обнаруживается аналитически в пробах теплоносителя.

На современных АЭС отсутствует проблема аналитических измерений микроконцентраций цинка в водных теплоносителях. К настоящему времени все отечественные и большинство зарубежных АЭС мира оснащены современными анализаторами, обеспечивающими измерение концентраций цинка в водных средах на уровне 1 мкг/л, в частности, атомно-абсорбционные или атомно-эмиссионные спектрометры. Кроме того, возможно применение масс-спектрометрии для прецизионных измерений концентрации цинка в водных средах. С этой же целью

НИКИЭТ использовал сравнительно недорогой и простой в использовании отечественный полярограф типа АВС-1.1.

В НИИАР при проведении реакторных испытаний в исследовательском реакторе МИР макетов ТВС «Квадрат» для шведской АЭС Рингхалс с реакторами PWR использован метод атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией пробы для прецизионных измерений микроконцентраций цинка в модельном теплоносителе [27].

По сравнению с другими способами повышения экологической безопасности АЭС разработанный инновационный способ дозирования коллоидного раствора оксида цинка является наименее затратным, учитывая наличие отечественного производства данной изотопной продукции, а также большое количество сооружаемых новых АЭС с ВВЭР в России и за рубежом.

Обработка теплоносителя цинком может исключить необходимость проведения контурных химических дезактиваций перед окончательным остановом энергоблоков АЭС и, тем самым значительно сократить количество жидких радиоактивных отходов.

Таким образом, созданная инновационная технология коррекционной обработки водного теплоносителя коллоидным раствором оксида цинка перспективна для применения не только на отечественных, но и зарубежных АЭС, особенно с сооружаемыми мощными реакторами, поскольку заказчики данных проектов неоднократно ставили вопрос о применении дозирования цинка. Таким образом, широкое внедрение данной инновационной технологии должно способствовать повышению конкурентоспособности новых АЭС с ВВЭР в мире.

Список литературы

1. Особенности водного режима АЭС ВК-50 / Забелин А.И., Гордиенко Н.И. и др. Симпозиум «Водные режимы водо-водяных реакторов, радиационный контроль теплоносителей и средства снижения радиационной опасности теплоносителей», ГДР, Гера, 10–16 ноября 1968 г.
2. Распределение отложений и активности в них на поверхностях оборудования и коммуникаций одноконтурной АЭС ВК-50. Сборник аннотаций научно-технической конференции стран – членов СЭВ «Атомная энергетика, топливные циклы, радиационное материаловедение». Мелекес, 1970. С.22.
3. Забелин А.И. Отложения на твэлах АЭС ВК-50. Атомная энергия. Т. 34. Вып. 2. Февраль 1973.
4. Marble O.W., Cowan R.L., Status of Zinc Injection at US BWRs – 1988, JAIF International conference on water chemistry in Nuclear Power Plants - Operational Experience and New Technology for management. April 1988, Tokyo, 19–22.
5. Руиз К.П., Блейес Д.М.. Минимизация отложений радиоактивных материалов в ядерных реакторах с водяным охлаждением. Патент США № 4756874 с приоритетом от 22.12.86.
6. Петерсон Д.Е. и др. Замедление процесса образования отложений радиоактивного кобальта в ядерных реакторах с водяным охлаждением. Патент США №4759900 с приоритетом от 27.08.86.
7. Белоус В.Н., Носков А.А., Степанов И.А. Водно-химический режим на АЭС с реакторами BWR при дозировании цинка. Атомная техника за рубежом. 1990. № 4.

8. Оптимизация способа дозирования цинка в теплоноситель РБМК и ВВЭР /Корнеев А.Е., Белоус В.Н., Юрманов В.А. и др. Сборник докладов специалистов ОАО «НИКИЭТ» (по итогам 2011 и 2012 гг.). М. ОАО «НИКИЭТ». 2014. 426 с. С. 367–374.
9. Перспективы дозирования цинка в теплоноситель отечественных атомных станций / В.А.Юрманов, В.Н. Белоус, А.Ф.Чабак и др. Труды 6 Международной научно-технической конференции концерна «Росэнергоатом» «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», М., 2008.
10. Effect of Zinc in BWR and PWR/VVER on Activity Build-up, IGSCC and Fuel Performance. Advanced Nuclear International. October 2010. Sweden. www.antinternational.com.
11. Beverskog B. “The Role of Zinc in LWRs,” International Conference: Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, San Francisco, CA, October 11–14, 2004.
12. Zinc injection implementation process at EDF: risk analysis, chemical specifications and operating procedures. A. Tigras, A. Stutzmann et al. NPC’2010” International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems – Quebec 3-7 October 2010.
13. Zinc injection during hot functional test in Tomari unit 3 / H.Hayakawa et al. NPC’2010” International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems – Quebec City. 3–7 October, 2010.
14. Руководство МАГАТЭ. по безопасности №SSG-13 «Программа по водно-химическому режиму (ВХР) для АЭС с водоохлаждаемыми реакторами». Вена. 2014. Chemistry program for water cooled nuclear power plants: specific safety guide. IAEA safety standards series. № SSG-13. STI/PUB/1469. Vienna. IAEA, 2010. 68 с.
15. Calvert Cliffs Units 1 and 2 Primary System Zinc Addition Engineering Evaluation. LTR-CDME-05-269 Revision 0. Westinghouse Electric Company LLC. May 2007/ TRIM Ref/ 2011/81894.
16. Rosenberg R.J., Terasvirta, Halin M. et al. Investigation of iron deposits on fuel assemblies of the Loviisa 2 WWER-440 reactor // “Water chemistry of nuclear reactor systems 7”. Proceedings of the British Nuclear Energy Society (BNES), Bournemouth, 13–17 Oct. BNES, London. P.27–33.
17. Формирование и удаление отложений в 1-м контуре АЭС с ВВЭР /В.Г. Крицкий, Ю.А. Родионов, И.Г. Березина и др. СПб. Береста. 2011.
18. Westinghouse PWR Zinc Addition Guidelines. PE-07-42 Revision 1. March 2009. TRIM Ref. 2011/93344.
19. Generic Design Assessment – New Civil Reactor Build. Step 4 Reactor Chemistry of the Westinghouse AP100 Reactor. Office for Nuclear Regulation. Assessment Report ONR-GDA-AR-11-008. 2011.
20. Primary Water Chemistry of VVERs: Loop Experiments with Hydrogen, Ammonia and Zinc / J.Kysela et al. Int. Conf. on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, 23–26.10.2006, Jeju, Korea.
21. Zinc injection implementation process at EDF: risk analysis, chemical specifications and operating procedures. A. Tigras, A. Stutzmann et al. NPC’10” International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems – Quebec City. 3–7 October 2010.
22. Программа TACIS 2008 ««Мягкая» помощь на площадке Запорожской АЭС/Украина». Сервисный контракт № 2007/132-885 «Оптимизация ВХР первого контура. Дозирование цинка в теплоноситель». Заключительный отчет. Август 2010.
23. Водно-химический режим первого контура для АЭС с ВВЭР-ТОИ /С.Н.Сусакин, С.И.Брыков, Н.В.Задонский и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. Выпуск 32. Реакторные установки. 2012. С. 76–81.

24. Перспективы дозирования цинка в теплоноситель реакторов российских проектов / С.В. Филимонов, Д.В. Тимофеев, В.А. Юрманов и др. Международная конференция по химической технологии АЭС, Квебек Сити, 3–7 октября 2010 года.
25. Состояние и перспективы производства цинка, обедненного изотопом Zn-64, для применения в атомной энергетике / С.В. Филимонов, Д.В. Тимофеев, В.А. Юрманов и др. 2 Международный форум «РОСНАНО» по нанотехнологиям «Rusnanotech'09». Москва, 6–8.10.2009, ЦВК «Экспоцентр».
26. Организация экспериментов по дозированию ионов цинка в водный теплоноситель первого контура ПУ реактора МИР /А.Л.Ижутов, О.Н.Владимирова и др. 8 Научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике» (Атомэнергоаналитика-2017). 29.05–02.06.2017. Г. Сосновый Бор Ленинградской области. Материалы конференции НИТИ. СПб.: ВВМ. 2017. 424 с.