ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБА ДОЗИРОВАНИЯ ЦИНКА В ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ РБМК И ВВЭР

Корнеев А.Е., Европин С.В., Иванов А.Д., Белоус В.Н., Юрманов В.А., Григорович С.М., Юрманов Е.В. (ОАО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

1. Введение

С 1980-х г. на кипящих реакторах типа BWR и 1990-х г. на значительной части реакторов с водой под давлением PWR используются микродобавки цинка в теплоноситель контуров циркуляции с целью подавления процессов коррозии, растрескивания, накопления радионуклидов кобальта, сокращения количества проводимых дезактиваций и, тем самым, радиоактивных отходов [1-8].

Эффект дозирования цинка обусловлен его внедрением в защитную пленку с замещением других шпинелеобразующих элементов, включая кобальт, и формированием термодинамически самой устойчивой цинковой шпинели – франклинита [9], вследствие чего прекращается дальнейшая генерация радиоизотопов кобальта и наблюдается их интенсивный вынос из ранее сформированных отложений в поток теплоносителя, откуда они выводятся штатными фильтрами очистки.

Специалистами ОАО «НИКИЭТ» и других организаций отрасли были представлены возможные перспективы широкого применения изотопной продукции Росатома на отечественных АЭС с целью повышения технического уровня их эксплуатации и конкурентоспособности на мировом рынке [1-8, 10-11]. Ряд перспективных разработок Росатома находил применение и дальнейшее развитие лишь на зарубежных АЭС, способствуя коммерческой привлекательности последних. При этом заслуживает упоминания отечественная разработка системы высокотемпературной фильтрации (ВТФ) теплоносителя, внедрение которой в 1990-х г. на энергоблоках ВВЭР-1000 обеспечило беспрецедентно низкие уровни радиоактивной загрязненности оборудования, радиационных полей и дозозатрат персонала. Исключение систем ВТФ из новых проектов ВВЭР вместо их доработки, как на ряде зарубежных АЭС с ВВЭР-1000, привело к необходимости поиска альтернативных методов снижения образования радиоактивных продуктов и устранения последствий их накопления [12-13].

На западных проектах АЭС не используются ВТФ, поэтому эти проблемы в основном решались за счет совершенствования водно-химического режима (ВХР), в частности благодаря использованию российских изотопных технологий, включая применение обедненного по изотопу Zn^{64} цинка и изотопно чистого гидроксида лития (Li^7OH). В 1990-х г. впервые в мире в России организовано промышленное производство обедненного цинка исключительно на экспорт для дозирования в теплоноситель реакторов зарубежных АЭС [1-3, 6, 14]. Для подщелачивания теплоносителя значительной части реакторов PWR используется производимый Росатомом гидроксид лития (Li^7OH) [10-11]. Внедрение данной изотопной продукции на АЭС российских проектов могло бы повысить технический уровень их эксплуатации и коммерческую привлекательность на мировом рынке [1-8, 10-11, 14-17].

Настоящий доклад посвящен разработке ОАО «НИКИЭТ» инновационной технологии коррекционной обработки теплоносителей отечественных АЭС обедненным цинком [18].

2. Актуальность внедрения дозирования обедненного цинка на российских АЭС

Как показал опыт Игналинской АЭС, проведение жестких контурных дезактиваций может привести к серьезным радиационным авариям [19]. В связи с этим ОАО «НИКИЭТ» предложена обработка основного технологического контура обедненным цинком при подготовке энергоблоков РБМК к выводу из эксплуатации [5], что позволит не только минимизировать дозозатраты персонала и количество отходов, но и в перспективе полностью отказаться от применения контурных дезактиваций.

Исключение из проектов новых АЭС с ВВЭР систем ВТФ, а также возникновение локального подкипания теплоносителя в реакторах ВВЭР повышенной мощности усилит процессы накопления в первых контурах радиоактивных продуктов коррозии. В качестве негативных последствий этого следует учитывать усиление роста отложений на ТВС и ухудшение радиационной обстановки в стояночных режимах, а также рост дозовых нагрузок на персонал [12]. Применение химических дезактиваций оборудования первого контура в качестве контрмеры приводит к снижению энерговыработки вследствие вынужденных простоев и образованию большого количества высокоактивных отходов. В качестве наиболее рационального способа решения рассматриваемой проблемы в новых проектах ВВЭР предусмотрено принципиальное решение о дозировании цинка [20-21].

На современном этапе развития отечественной атомной энергетики актуальность внедрения дозирования обедненного цинка обусловлена следующими причинами:

- ввод в эксплуатацию новых энергоблоков;
- необходимость подготовки к выводу из эксплуатации энергоблоков, где эта технология позволит минимизировать образование отходов и исключить риск коррозионных повреждений;
- необходимость повышения конкурентоспособности и экологической привлекательности новых проектов ВВЭР, учитывая заинтересованность зарубежных заказчиков во внедрении данной технологии.

Как показывает международный опыт, например, АЭС Томари-3 в Японии или Ангра-2 в Бразилии, наиболее эффективна обработка первых контуров добавками обедненного цинка ещё в период проведения пуско-наладочных работ [22-23].

3. Оценка применимости зарубежного опыта дозирования цинка

За рубежом запатентованы различные способы дозирования цинка [24-25], а практически используются оксид цинка на BWR и ацетат на PWR. При дозировании цинка на отечественных АЭС потенциальные проблемы могут возникнуть только в случае дозировании суспензии малорастворимого оксида цинка на АЭС с РБМК в связи с возможностью осаждения в застойных зонах крупных частиц, а также при введении ацетата цинка в условиях ВВЭР в связи с возможностью коксования органики на ТВС.

Использование для дозирования растворимых неорганических цинковых солей (хлоридов, нитратов, сульфатов и др.) не допустимо из-за их коррозионной агрессивности и жесткого ограничения в теплоносителе согласно нормам водно-химического режима (ВХР) первых контуров АЭС с ВВЭР с РБМК [26].

Впервые дозирование раствора ацетата цинка в первый контур PWR опробовано на энергоблоке №2 АЭС Фарли в США в 1993 г., а при последующих послереакторных исследованиях ТВС отмечено потемнение поверхности оболочек твэлов, что могло быть связано с образованием углеродистых отложений из-за передозировки ацетата цинка [27-29]. На то время отсутствовали жесткие нормативные ограничения органических примесей в теплоносителе PWR, что позволило американским

кампаниям распространить этот патентованный способ дозирования цинка на АЭС мира благодаря положительным эффектам, российским поставкам реагента, простоте конструкции дозатора (рисунок 1 [30]) по сравнению с громоздкими дозаторами суспензии оксида цинка. Во избежание передозировок ацетата введен ряд ограничений.

В серии нормативных документов МАГАТЭ по безопасности в 2011 г. выпущена «Программа по ВХР АЭС с водоохлаждаемыми реакторами» (SSG-13) [31], с учетом рекомендаций которой эксплуатирующими АЭС организациями пересмотрена действующая документация по организации ВХР на АЭС. В 2012-2013 г. при пересмотре норм ВХР РБМК-1000 и ВВЭР-1000 впервые в практике отечественных АЭС в нормы ВХР введены требования по измерению и ограничению концентрации общего органического углерода (ООУ), который отражает интегральное содержание всех органических веществ. Необходимость диагностического контроля ООУ обусловлена негативными последствиями поступления органических загрязнений в водный теплоноситель реакторов для работоспособности ТВС.



Рисунок 1. Устройство для дозирования растворимых солей цинка

Вследствие низкой радиационной и термической стойкости поступающие в реакторы органические вещества (продукты деструкции ионитов, оксалаты, ацетаты и др.), представляет потенциальную опасность из-за их коксования на поверхностях ТВС с локальным перегревом и разгерметизацией оболочек твэлов. Спектр химических продуктов радиолиза и термолиза органических веществ широк, а их соотношение определяется окислительно-восстановительными свойствами теплоносителя.

В условиях нейтрального ВХР реакторов BWR и РБМК в составе продуктов радиолиза органических примесей присутствуют летучие органические кислоты, которые выносятся с паром. Это обуславливает подкисление потоков сепарата и конденсата, что интенсифицирует эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ) углеродистых трубопроводов и неплакированных элементов оборудования, включая корпуса подогревателей низкого давления (ПНД) [33], а также дроссельно-регулирующие клапаны (ДРК). Нештатный отбор проб и химический анализ в начальный период эксплуатации энергоблоков РБМК-1000 выявил подкисление этих водных сред [34], но отсутствие в то время прецизионных анализаторов не позволило выявить причину.

С целью определения причин повышенной коррозионной агрессивности потоков теплоносителя и роста отложений на ТВС к настоящему времени АЭС с РБМК-1000 и ВВЭР оснащены анализаторами ООУ взамен или кроме измерений концентрации масел, которые отражали лишь небольшую часть органических загрязнений [35].

Данные измерений содержания ООУ в теплоносителе оказались на 1-2 порядка выше минеральных примесей (железо, хлориды, сульфаты, нитраты, натрий и др.). С целью устранения негативных последствий присутствия органических загрязнений в первых контурах реализуются мероприятия по устранению источников их поступления, таких как загрязнения добавочной воды, продукты деструкции ионитов, оставшиеся после дезактиваций, пассиваций и консерваций органические ингибиторы коррозии и др. В данных условиях является нежелательным введение в теплоноситель ацетата цинка или других органических корректирующих реагентов из-за повышения концентрации ООУ.

В условиях теплоносителя PWR и ВВЭР при радиолизе органических веществ, к которым относится и ацетат, в основном образуются метан и элементарный углерод. Первый накапливается в компенсаторе давления, а второй осаждается на поверхностях контура циркуляции, в первую очередь, на оболочках твэлов, что представляет потенциальную опасность для их локального перегрева и разгерметизации, учитывая низкую теплопроводность углерода [27-29, 35-43]. Анализ результатов послереакторных исследований ТВС ряда энергетических реакторов показал возможность локального перегрева оболочек твэлов из-за коксования на их поверхностях органических примесей теплоносителя. При проведении послереакторных исследований поврежденных ТВС энергоблока № 2 АЭС Ловииса на поверхности твэлов и дистанционирующих решеток был обнаружен тонкий подслой углерода, который являлся центром кристаллизации мощных магнетитных отложений, что в итоге привело к массовому перегреву оболочек твэлов [33]. Негативные последствия заброса органических веществ, связанные с образованием углеродистых отложений на ТВС, имели место на ряде АЭС с ВВЭР, включая Южноукраинскую, Кольскую, Нововоронежскую, Ловииса, Пакш, Богунице [12, 27-29, 35-43].

В связи с отмеченным выше поведением органических загрязнений в первых контурах АЭС с ВВЭР предложенное ОКБ «Гидропресс» и Курчатовского института о дозировании цинка в виде его ацетата в теплоноситель новых АЭС с ВВЭР [19-20] представляет определенный риск для надежной работы топлива. Дозирование ацетата цинка повысит содержания ООУ в теплоносителе, что не согласуется с рекомендациями МАГАТЭ [31] и согласованными ОАО «ТВЭЛ», ОКБ «Гидропресс» и ОАО «НИКИЭТ» ограничениями ООУ в нормах ВХР ВВЭР-1000 и РБМК-1000.

Представленный выше анализ выявил недостатки зарубежных способов дозирования цинка, в частности, дозирование цинка в форме его ацетата является крайне нежелательным с точки зрения обеспечения надежной работы топлива, что необходимо учитывать при выборе способа дозирования цинка в теплоноситель ВВЭР.

4. Разработка инновационного способа дозирования цинка

Специалистами НИКИЭТ в 1990-х г. выполнено расчетно-экспериментальное обоснование дозирования обедненного цинка на АЭС с РБМК на основе анализа особенностей их конструкции и организации ВХР. Результаты стендовых испытаний подтвердили значимый ингибирующий эффект микродобавок оксида цинка в водный теплоноситель для коррозии отечественных сталей и циркониевых сплавов [1-8, 43-45]. Испытания в 1996 г. на Смоленской АЭС дозатора с отбором части потока конденсата и его пропусканием через емкость с гранулированным оксидом цинка выявили недостатки традиционного для зарубежных АЭС способа дозировки цинка. Спекание порошка оксида цинка для приготовления гранул с высокой пористостью и общей массой около 1 т связано со значительными затратами. Образование на выходе из дозатора взвеси с большим разбросом по размерам частиц оксида цинка усложняет

равномерное поступление цинка ко всей поверхности контура циркуляции теплоносителя [1] и сохраняет риск их скопления в застойных зонах.

Другие патентованные в США способы дозирования цинка [24-25] также оказались нетехнологичными в условиях российских АЭС по различным причинам.

После утраты мировой монополии на производство и снижения цены обедненного цинка с В/О «Изотоп», ЭХЗ и ФГУП «РФ ЯЦ ВНИИЭФ» проявили коммерческий интерес к поставкам обедненного цинка отечественного производства на АЭС с ВВЭР и РБМК. Для реализации данного предложения [1-8] необходимы обоснованный выбор реагента [46] и оптимизация режима дозирования. Для обеспечения возможности применения обедненного цинка отечественного производства потребовалась разработка технических условий на соответствующую изотопную продукцию, поскольку её экспортные поставки для зарубежных АЭС осуществлялись согласно сертификатам Заказчиков.

В связи с введением в нормах ВХР РБМК-1000 и ВВЭР ограничений концентрации ООУ дозирование цинка в форме ацетата цинка неприемлемо. Согласно результатам испытаний дозатора на Смоленской АЭС дозирование суспензии оксида цинка также нежелательно, учитывая такие особенности основного технологического контура энергоблока РБМК, как разветвленная схема, большие площади обрабатываемой поверхности, количество отложений, наличие зон вялой циркуляции.

Учитывая недостатки всех известных ранее способов дозирования цинка, ОАО «НИКИЭТ» разработана инновационная и потенциально безопасная технология дозирования цинка [18, 47]. Взамен применявшихся ранее суспензии оксида или истинного раствора ацетата новая технология предусматривает дозирование цинка в виде агрегативно-устойчивого коллоидного раствора оксида цинка, что исключает нежелательное поступление в реактор органических веществ и риск образования отложений на ТВС, а также согласуется с рекомендациями МАГАТЭ [31] и действующими нормами ВХР реакторов ВВЭР и РБМК.

Производство обедненного оксида цинка включает центрифугирование диэтилцинка с последующим сжиганием или переводом в водную суспензию оксида, причем особенности этих процессов у отечественных и зарубежных производителей обуславливают различия гранулометрического состава и других характеристик порошка оксида [2, 6, 14], оказывающих влияние на его коллоидообразование. С учетом данного обстоятельства ОАО «НИКИЭТ» получены образцы порошка обедненного оксида цинка производства ЭХЗ и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и проведено исследование процесса их коллоидообразования в модельных средах теплоносителя АЭС с использованием специальной экспериментальной техники и методик кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» МИСиС, а также ООО «Функциональные наноматериалы». При этом отработан оригинальный способ создания коллоидного раствора оксида цинка с концентрациями на два порядка выше растворимости его порошка, что вполне достаточно для приготовления рабочего раствора в условиях АЭС. Концентрационные пределы агрегативной устойчивости коллоидной системы определены по результатам измерения дзета-потенциалов. Верхний диапазон варьирования размера исходных частиц оксида цинка составлял 30 мкм, в то время как после обработки по разрабатываемой технологии размер коллоидных частиц не превышал 1 мкм.

Схема установки для дозирования цинка представлена на рисунке 2. Исходная вода через вентиль V1 подается в резервуар Vol1, где её объем контролируется датчиком уровня LD. При включенной мешалке ML навеска оксида цинка помещается в резервуар Vol1 и перемешивается до получения гомогенной суспензии. При закрытых

вентилях V1 и V3 суспензия с помощью насоса P1 циркулирует через проточный диспергатор CC, где измельчаются частицы оксида цинка. Охлаждаемый системой охлаждения CS поток суспензии через ячейку регулируется вентилем V2, а давление в системе контролируется манометром M1. После достижения требуемой дисперсности в резервуаре Vol1 образующийся неустойчивый концентрированный гидрозоль оксида цинка при закрытом вентиле V2 подается через диспергатор CC и вентиль V3 в камеру смесителя-сепаратора MS, где разбавляется потоком обессоленной воды, поступающей через вентиль V4. Соотношение потоков через V4 и V3 задается требуемым коэффициентом разбавления. Камера MS работает в вихревом режиме циклона. Поток разбавляющей воды совместно с гидрозолем подается в камеру тангенциально. Оставшиеся после диспергирования крупные частицы оксида цинка под воздействием центробежной силы отбрасываются на вертикальную стенку камеры, оседают и удаляются через дренажный вентиль V5. Разбавленный устойчивый гидрозоль подается в накопительный резервуар Vol2, откуда он через вентиль V6 по необходимости подается насосом P2 в место дозирования. Давление на выходе насоса контролируется манометром M2. Установка для дозирования цинка компактна и монтируется из серийно изготавливаемых узлов. Предлагаемый способ дозирования позволяет с заданной скоростью вводить в теплоноситель требуемое количество цинка.

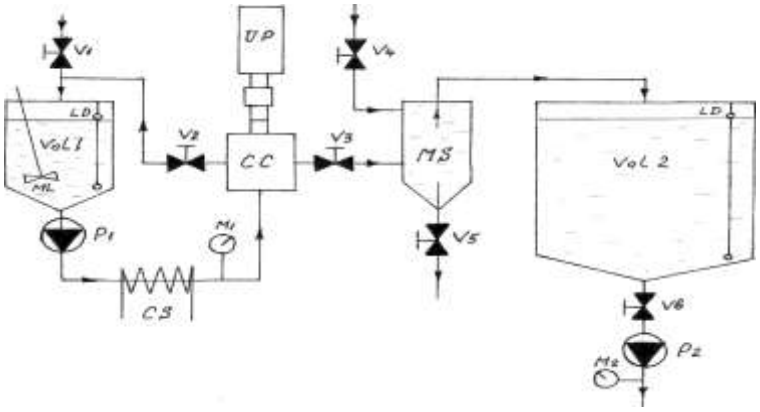


Рис. 2. Принципиальная схема дозирования цинка

Получаемый коллоидный раствор в течение нескольких суток может сохраняться в рабочей емкости дозатора без выпадения твердой фазы. При введении коллоидного раствора оксида цинка в первый контур или линию подпитки он разбавляется до концентрации 5-10 мкг/дм^3, что на полтора порядка величины ниже растворимости оксида цинка, поэтому он быстро гидролизуется с переходом в ионную форму. Присутствие борной кислоты, гидроксидов щелочных металлов и аммиака в теплоносителе ВВЭР способствует переходу цинка в ионную или комплексную форму, что исключает возможность образования частиц твердой фазы на топливных оболочках и других поверхностях первого контура. В связи с отсутствием применения борафлекса на отечественных реакторных установках концентрация кремнекислоты в теплоносителе РБМК и ВВЭР во много раз ниже растворимости силиката цинка, поэтому внедрение дозирования цинка на отечественных АЭС не требует дополнительного ограничения кремния в теплоносителе [27, 48].

Разработанная ОАО «НИКИЭТ» безопасная технология дозирования обедненного цинка может применяться на любых водоохлаждаемых реакторах, поскольку исключает поступление органических и других вредных загрязнений в теплоноситель, характеризуется простотой реализации и исключает образование взвесей или отложений.

5. Разработка технических требований и условий на обедненный цинк

С целью применения на российских АЭС обедненного цинка ядерного класса чистоты, производимого предприятиями Госкорпорации «Росатом», потребовалась разработка соответствующих технических условий (ТУ), учитывающих специфику ВХР и другие особенности АЭС с ВВЭР и РБМК. Согласно инвестиционному проекту ЭХЗ разрабатывает ТУ на производство обедненного по изотопу ^{64}Zn порошка оксида цинка для использования на АЭС российских проектов [49]. При этом использованы разработанные ОАО «НИКИЭТ» с учетом проектных особенностей российских АЭС технические требования к качеству обедненного оксида цинка [50], которые разработаны с учетом передового опыта предприятий Росатома и не уступают по характеристикам качеству аналогичной изотопной продукции зарубежных производителей. Эти требования включают характеристики гранулометрического и изотопного состава (^{64}Zn), удельной поверхности и влагосодержания, а также ограничение возможных вредных примесей (активаторов коррозии, поглотителей нейтронов, активирующихся с образованием радиационно-опасных изотопов и т.п.) с учетом их нормирования в водных теплоносителях АЭС. Требования к чистоте порошка обедненного оксида цинка определены с учетом накопленного опыта его производства в ЭХЗ, а также исходя из ограничения нормами ВХР содержания примесей в водном теплоносителе реакторов РБМК-1000 и ВВЭР. Введение оксида цинка ядерной чистоты исключает повышение в теплоносителе концентраций всех контролируемых в теплоносителях ВВЭР и РБМК вредных загрязнений, включая концентрацию ООУ. Это не могло быть обеспечено в случае дозирования ацетата цинка, в котором доля органических веществ на 3 порядка выше, чем в оксиде. При разработке технических требований к порошку обедненного оксида цинка учитывалась возможность приготовления устойчивого коллоидного раствора.

6. Заключение

Дозирование обедненного цинка в теплоноситель энергоблоков РБМК-1000 на заключительном этапе эксплуатации [4-6] обеспечит их подготовку к выводу из эксплуатации (ВЭ) без образования огромного количества требующих переработки высокоактивных жидких отходов за счет заблаговременного выведения ранее накопленных в контуре радиоактивных продуктов. Благодаря этому может быть исключена необходимость проведения жестких контурных химических дезактиваций, существенно снижены дозозатраты персонала, а также исключен риск коррозионных повреждений и радиационных аварий [4-5, 19]. Применение разработанной ОАО «НИКИЭТ» инновационной технологии [18, 47] обеспечит эффективность и экономичность дозирования цинка. Согласно оценкам ОАО «НИКИЭТ» ежегодные потребности цинка на каждом из 11 энергоблоках РБМК-1000 могут составить 20-30 кг. Как правило, на зарубежных АЭС перед началом дозирования цинка проводились контурные дезактивации, что позволяло снизить расход реагента. Однако решение о дозировании цинка на АЭС с РБМК-1000 до настоящего времени не принято.

Выполненные ОАО «НИКИЭТ» наработки по технологии дозирования цинка могут быть использованы и на других типах ЯЭУ с учетом особенностей их конструкции и специфики ВХР.

В частности, возможность применения дозирования цинка целесообразно рассмотреть при подготовке к ВЭ энергоблоков 1-4 Билибинской АТЭЦ.

На российском кипящем корпусном реакторе ВК-50 накоплен опыт эксплуатации с повышенной концентрацией цинка в теплоносителе вследствие его коррозионного выноса из латунных трубных систем конденсаторов (до их замены) и

теплообменников. По сравнению с реакторами BWR и РБМК за полувековой срок эксплуатации ВК-50 не было столь серьезных проблем с повреждаемостью сварных соединений циркуляционных трубопроводов из аустенитных сталей по причине их коррозионного растрескивания, что связывается с особенностью ВХР. Данное обстоятельство использовано при продлении срока службы и позволило рекомендовать дозирование цинка на других отечественных кипящих реакторах. Присутствие цинка в теплоносителе ВК-50 является важнейшим фактором формирования радиационной обстановки. Если в начальный период эксплуатации при повышенной концентрации цинка в теплоносителе (~0,05 мг/дм^3) природного изотопного состава радиационная обстановка на ~95% определялась изотопом Zn^{64} [51], то после замены трубных систем конденсаторов на изготовленные из медного сплава МНЖ-5-1 и снижения концентрации цинка до ~0,01 мг/дм^3 вклад изотопа Zn^{65} в радиационные поля уменьшился до ~70% [52-53]. Данный факт показывает, что и на других отечественных АЭС дозирование обедненного цинка обеспечит существенное снижение радиационных полей за счет его внедрения в оксидные плёнки, учитывая применения однотипных конструкционных материалов.

В настоящее время в мире эксплуатируются или сооружаются более 100 энергоблоков ВВЭР различных поколений, где дозирование обедненного цинка, особенно на новых энергоблоках с проведения пуско-наладочных работ, повысит их конкурентоспособность благодаря сокращению количества отходов, повышению надежности работы оборудования и топлива, улучшению радиационной обстановки, а также уменьшению дозовых нагрузок на персонал. Следует отметить, что дозирование цинка на новых мощных реакторах PWR способствовало устранению проблемы аномалии аксиального офсета за счет изменения структуры и уменьшения роста борированных отложений в верхней части активной зоны в условиях усиленного подкипания теплоносителя [12, 27].

Основные аспекты внедрения дозирования цинка на АЭС с ВВЭР рассмотрены в недавней монографии ведущих химиков-атомщиков мира [27].

Предварительная проработка технологии дозирования цинка выполнена для ряда зарубежных АЭС с ВВЭР (Украина, Чехия, Словакия, Китай и др). В частности, по результатам петлевых реакторных испытаний различных ВХР для реакторов ВВЭР в Институте ядерных исследований Чехии предусмотрено опытно промышленное опробование наиболее перспективного ВХР с дозированием цинка на одном из энергоблоков Чехии или Словакии [54].

В рамках программы ТАСИС при технической поддержке АЭС Германии проработана технология опытно-промышленного опробования дозирования цинка на энергоблоке №3 Запорожской АЭС (Украина) [8, 55]. На основании результатов сравнительного анализа особенностей проектов и режимов эксплуатации, радиационной обстановки и дозозатрат персонала, ВХР и конструкционных материалов ТВС и элементов первого контура АЭС с ВВЭР и PWR обоснована технико-экономическая целесообразность и принято концептуальное решение о внедрении дозирования обедненного цинка, которое было направлено на согласование поставщика топлива в ОАО «ТВЭЛ».

Экспериментальные исследования проводятся по обоснованию внедрения дозирования цинка на китайских АЭС, включая энергоблоки ВВЭР-1000 [56].

Согласно предварительным оценкам ежегодные потребности в обедненном цинке на каждом энергоблоке ВВЭР могут составить 2-3 кг без учета предпусковой обработки. Вводимый в первый контур цинк интенсивно поглощается оксидными пленками на поверхностях ТВС, оборудования и трубопроводов первого контура, поэтому измеренные концентрации цинка подвержены значительным флуктуациям и

обычно ниже расчетных. В связи с этим указанный в нормах ВХР первого контура проекта ВВЭР-ТОИ диапазон концентрации цинка теплоносителе в (5-7 мкг/дм^3) [20-21] целесообразно использовать при расчете режима дозировки или в качестве диапазона ожидаемых значений, а не в качестве диапазона допустимых значений.

ОАО «НИКИЭТ» предлагает реализовать программу опытно-промышленного опробования дозирования цинка на пилотных энергоблоках российских АЭС в условиях организации расширенного эксплуатационного контроля с целью последующего анализа для использования результатов на однотипных энергоблоках.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ОАО «ТВЭЛ» (А.Н.Андрианов, А.И.Рыдаев), ОАО «ПО «Электрохимический завод» (С.В.Филимонов, С.М.Зырянов, Д.В.Тимофеев), МИСиС (Д.В.Кузнецов) и ООО «Функциональные наноматериалы» (Д.В.Лысов).

Список литературы

1. В.А.Юрманов, Е.А.Иванов Е.А., А.Ф.Чабак и др. Перспективы дозирования цинка в теплоноситель отечественных АЭС. 6 МНТК «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». 21-23.05.2008. Концерн «Росэнергоатом С. 397-402.

2. Филимонов С.В., Тимофеев Д.В., Юрманов В.А. и др. Перспективы дозирования цинка в теплоноситель реакторов российских проектов. Сборник научных трудов Севастопольского национального университета ядерной энергетики и промышленности. Т.1 (37). 2011. С. 63-72. Севастополь. 2011. 268 с.

3. Юрманов В.А., Корнеев А.Е., Юрманов Е.В. и др. Применение обедненного по изотопу ^{64}Zn цинка для обработки теплоносителя ядерных реакторов Первая международная бизнес–конференция производителей, поставщиков и потребителей изотопной продукции, 1-2 октября 2012 г., г. Москва.

4. Перспективы совершенствования водно-химического режима энергоблоков с реакторами РБМК-1000 /С.В.Европин, В.А.Юрманов и др. Труды 8 Международной научно-технической конференции ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва, 2012. С.274-278.

5. Перспективы применения обработки первого контура цинком при подготовке энергоблоков РБМК к выводу из эксплуатации /А.А.Петров, С.В.Европин, В.А.Юрманов и др. Труды 8 Международной научно-технической конференции ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва, 2012. С.444-448.

6. S.V.Filimonov, D.V.Timofeyev, V.A.Yurmanov et al. Prospects for zinc injection into reactor coolant of Russian projects. International Conference for NPP Chemical Technology (NPC-2010), Quebec City, 03-07 October, 2010.

7. Юрманов В.А. Усовершенствования водно-химических режимов на АЭС (по материалам МНТК Ядерного общества Франции, Париж, 24-27.09.2012). 8 МНТК ОКБ «Гидропресс» «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». 21-24.05.13, г. Подольск.

8. Юрманов В.А., Белоус В.Н., Юрманов Е.В., Турбаевский В.В. и др. Технико-экономическая оценка мероприятий по снижению дозозатрат на примере внедрения дозировки цинка. Труды 7 МНТК ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва, 2010.

9. C.C.Lin. A Review of Corrosion Product Transport on Fuel Cladding Surfaces / Intern. Conf. on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, 23-26.10.2006, Jeju, Korea.

10. Об использовании изотопно-чистого лития-7 в ВВЭР - основе отечественной атомной энергетики / Белозёров И.М., Семёнов А.А., Юрманов В.А. и др. 6

Всероссийское научно-практическое совещание с международным участием «Литий России», Новосибирск, 24-26.05.2011. Изд. Сибирского отделения РАН.

11. Белозёров И.М., Крицкий В.Г., Семёнов А.А. и др. О корректировке водно-химического режима первого контура реакторов ВВЭР. 7 МНТК «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Москва, 26-27.05.2010. ОАО «Концерн Росэнергоатом». Тезисы докладов. С.358-361.

12. Особенности массопереноса и формирования отложений в активной зоне АЭС с ВВЭР без высокотемпературных фильтров /В.Г.Крицкий, Ю.А.Родионов, И.Г.Березина, А.В.Гаврилов. 8 МНТК ОКБ «Гидропресс» «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». 21-24.05.13, г. Подольск, Россия.

13. В.А.Юрманов, И.Ю.Добровольская, С.В.Щелик. Опыт эксплуатации и усовершенствования высокотемпературной фильтрации на АЭС с ВВЭР. 5 НТС "Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике». ФГУП "НИТИ имени А.А.Александрова", г. Сосновый Бор, 22-24.09.2009. Сб. докладов. СПб.: ВВМ. 2009. 500 с. С. 121-125.

14. Филимонов С.В., Скорынин Г.М., Гилев А.Н., Тимофеев Д.В.. Состояние и перспективы производства цинка, обедненного изотопом ^{64}Zn, для применения в атомной энергетике. Труды научно-технической конференции «Сибирь атомная: XXI век». Северск. 09-12.12.09. Изд. СГТА. 2009. 178 с. с.44-50.

15. В.А.Юрманов, Н.Б.Повалишин, А.В.Архипенко. Разработка нормативной документации по водно-химическому режиму первого контура АЭС с ВВЭР. V МНТС «Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике» . ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», 22-24.09.2009.

16. Рекомендации 8 МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 28-31.05.13. Утв. 16.06.2013 В.Г.Асмоловым, Первым заместителем Генерального директора ОАО «Концерн Росэнергоатом».

17. Оптимизация водно-химического режима первого контура на украинских АЭС с реакторами ВВЭР /В.С. Краснорyцкий, В.М. Грицина, А.В.Архипенко и др. Труды 8 МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 28-31.05.13.

18. Патент ОАО «НИКИЭТ» на изобретение «Способ организации водно-химического режима теплоносителя на энергетических установках» (авторы: А.Е.Корнеев, А.Д.Иванов, С.В.Европин, В.А.Юрманов, В.Н.Белоус, Е.В.Юрманов, С.М.Григорович). Государственный реестр изобретений РФ №2490733 от 20.08.2013.

19. Авария на Игналинской АЭС в Литве могла произойти из-за экономии на персонале. Информационное сообщение агентства REGNUM от 09.11.2010.

20. Primary water chemistry for NPP with VVER-TOI /Susakin S.N. et al. Intern. Conf. SFEN “Nuclear Power Chemistry-2012” (NPC-2012). 23-28.09.2012. Paris.

21. Водно-химический режим первого контура для АЭС с ВВЭР-ТОИ /Сусакин С.Н., Брыков С.И., Задонский Н.В., Быстрова О.С. 8 МНТК ОАО «Концерн «Росэнергоатом» «Водно-химический режим АЭС». Москва, 23-25.10.2012.

22. B.Stellwag et al. Operational Experience with Zinc Injection at Angra 2. Intern. Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, 23-26.10.2006, Jeju, Korea.

23. Hitoshi Hayakawa et al. Zinc injection during hot functional test (HFT) in Tomari unit 3. Intern. Conf. for NPP Chemical Technology, Quebec City, 03-07 October, 2010.

24. Патент США №4759900 от 26.07.88. Д.Е.Петерсон и др. Замедление отложения радиоактивного кобальта в ядерных реакторах с водяным охлаждением.

25. Патент США №4756874 от 12.07.88. К.П.Руиз, Д.М.Блейес. Минимизация отложений радиоактивных материалов в ядерных реакторах с водяным охлаждением.

26. В.Ф.Тяпков и др. Направления совершенствования водно-химических режимов АЭС России. 8 МНТК ОАО «Концерн «Росэнергоатом» «Водно-химический режим АЭС». Москва, 23-25.10.2012.

27. Effect of zinc in BWR and PWR/VVER on activity build-up, IGSCC and fuel performance. Advanced Nuclear Technology International Europe AB. ANT Intern. 2010.

28. Chen J. Structural Investigations of the Spinel Phase Formed in Fuel CRUD Before and After Zinc Injection, Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems, Chimie 2002, April 22-26, Avignon, France, 2002.

29. Review of fuel failures in water cooled reactors. IAEA Nuclear Energy Series No NF-T-2.1. IAEA, Vienna, 2010.

30. Д.Мак-Элрэт. Снижение мощности дозы. Inside WANO. Том XIV. №2. 2006. С.12-13.

31. 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.

32. Юрманов В.А., Белоус В.Н., Бараненко В.И. О рациональном выборе конструкционных материалов для изготовления оборудования и трубопроводов АЭС. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. Выпуск 14. Прочность оборудования и трубопроводов. М. ОАО «НИКИЭТ». 2010. С.139-147.

33. Мамет В.А., В.А.Юрманов и др. Поведение газовых и органических примесей в теплоносителе АЭС с РБМК. Теплоэнергетика. 1982. №7. С.14-17.

34. Щедрин М.Г., Галанин А.В., Степанова Т.М. Результаты исследования поступления органического углерода в теплоноситель 1 и 2 контуров энергоблоков №3-4 НВАЭС. МНТС руководителей химических подразделений АЭС Украины и России "Совершенствование химических технологий на АЭС с ВВЭР", Киев, 11–13.04.2006.

35. Rosenberg et al. Investigation of iron deposits on fuel assemblies of the Loviisa 2 WWER-440 reactor. International Conference “Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 7”, Bournemouth, 13-17 October 1996. BNES, London. Proc. P.27-33.

36. В.Г.Крицкий, Ю.А.Родионов, И.Г.Березина, А.В.Гаврилов и др. Формирование и удаление отложений в 1-ом контуре АЭС с ВВЭР. СПб. Береста. 2011. 308 с.

37. O.Grezdo, M.Viliam. Resin intrusion into the primary circuit of NPP Jaslovske Bohunice V-l. Proceedings of 15th AER symposium on VVER nuclear physics. 2005.

38. I.Nemes. Hydraulic anomaly and its management on Paks NPP VVER-440 Units in 2002-2003. Int. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Albena, Bulgaria, Sept. 23 – Oct. 3. 2003.

39. Бредихин В.Я., Москвин Л.Н. Влияние продуктов деструкции ионитов на водный режим АЭС. 1 МНТК по водно-химическим режимам теплоносителей АЭС. СПб.: ВНИПИЭТ, 1980. Т. 2.С. 30-37.

40. Бредихин В.Я., Бубнев В.П. Углеродосодержащие отложения на оборудовании ВВЭР. В кн.: Теплогидравлические и физико-химические процессы переноса примесей в теплоносителях. Обнинск: ГЦН РФ ФЭИ. 1995. С. 50–51.

41. Bibilashvili Y.K. et al. WWER fuel operation under normal conditions and analysis of damage causes. IAEA TCM on Fuel Failure in Normal Operations of Water Reactors: Experience, Mechanism and Management. Dimitrovgrad. 1992. IAEA-TECDOC-709. P. 26-38.

42. V.A.Yurmanov et al. Topical study on IRS Events Involving Corrosion, Erosion and Sedimentation of their Products: IRS Lessons. IAEA-J4-CS-12/97. Proc. Consultant Meeting. Vienna. April. 1996.

43. V.A.Yurmanov et al. Topical study on IRS Events Involving Foreign Material Intrusions in Reactor System. IAEA-J4-CS-13/97. Proc. Consultant Meeting. Vienna. 14-18 April. 1997.

44. Водно-химический режим на АЭС с реакторами BWR при дозировании цинка /Белоус В.Н., Носков А.А., Степанов И.А. Атомная техника за рубежом. 1990. №4.

45. В.Н.Белоус, А.А.Носков и др. Повышение экологической безопасности кипящих реакторов РБМК путем инжекции цинка // Труды конгресса ассоциации коррозионистов ВАКОР «Защита-92» 6-11.09.1992. Том 4. С.106-108.

46. С.В.Европин, В.А.Юрманов, С.М.Григорович и др. Выбор корректирующей добавки для обработки теплоносителя РБМК-1000. 6 НТС «Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике» (Атомэнергоаналитика-2011). 13-15.09.2011, г. Сосновый Бор. Сборник докладов. СПб: ВВМ, 2011. 404 с. С.137-139.

47. А.Е.Корнеев, Е.В.Юрманов, С.В.Европин и др. Оптимизация способа дозирования цинка в теплоноситель РБМК и ВВЭР. Годовой отчет НИКИЭТ-2012: Сборник статей. ОАО «НИКИЭТ». 2012.

48. Status Report on Estimation of Solubility for Zinc Silicates in PWR Primary Coolant. EPRI, Palo Alto, CA: 1999. 114135.

49. С.Исаченко. Цинк претендует на инновации. Страна Росатом. №32 (160). Сентябрь 2014. С.8.

50. С.В.Европин, Е.В.Юрманов, В.А.Юрманов, К.И.Шутько. Разработка технических требований к качеству оксида цинка для дозирования в водный теплоноситель АЭС. Годовой отчет НИКИЭТ-2014: Сборник статей. ОАО «НИКИЭТ». В печати.

51. H.W.Rich, M.Lips, G.Meier. 27 Cycles of Primary Water Chemistry at Gösgen Nuclear Power Plant .International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Jeju Island, Republic of Korea, 23-26 October, 2006

52. Забелин А.И., Гордиенко Н.И. и др. Особенности водного режима АЭС ВК-50. Симпозиум «Водные режимы водо-водяных реакторов, радиационный контроль теплоносителей и средства снижения радиационной опасности теплоносителей», ГДР, Гера, 10-16 ноября 1968 г.

53. А.С.Курский. Методы комплексного решения проблем радиационной безопасности и водородной взрывозащиты корпусных кипящих реакторов с естественной циркуляцией теплоносителя. Автореф. докт. техн. Наук. М. 2014. ОАО «ГНЦ – НИИАР».

54. J.Kysela et al. Primary Water Chemistry of VVERs: Loop Experiments with Hydrogen, Ammonia and Zinc. Int. Conf. on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, 23-26.10.06, Korea.

55. I.Dobrovol'skaya, G.Holz. TACIS 2006 Program "Improvement of Primary Water Chemistry Regime: Zinc Dosing to Coolant". Final Report. August 2010.

56. Shi Xiuqiang, Zhu Jun, Xu Xuelian. Zinc Addition and its Challenge in Chinese NPP. Technical Meeting on Water Chemistry and Clad Corrosion/Deposition including Fuel Failures. 22-24 November 2010, Kiev, Ukraine.