

7. Колесниченко, Н. В. Использование бака-аккумулятора для регулирования нагрузок мини-ТЭЦ [Текст] / Н. В. Колесниченко, М. Ю. Водолазская // Наукові праці Донецького національного технічного університету . – 2011. – № 10(180). – С. 67–72.
8. Чайковская, Е. Е. Оптимизация энергетических систем на уровне принятия решений [Текст] / Е. Е. Чайковская // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 7. – С. 169–173.
9. Чайковська, Е. Є. Інтегрована технологічна система виробництва біогазу [Текст] / Е. Є. Чайковська // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4, № 8 (64). – С. 31–34.
10. Чайковська, Е. Є. Підтримка акумулювання на рівні прийняття рішень [Текст] / Е. Є. Чайковська // Вісник НТУ "ХП". Серія " Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування ". – 2013. – № 14 (988). – С. 127–133.

У роботі наведено аналіз застосовуваних індексів стабільності використовуваних для контролю водно-хімічних режимів оборотних систем охолодження ТЕС та АЕС. Досліджено спектр контрольованих показників циркуляційної і додаткової води при довгостроковій експлуатації різних водно-хімічних режимів на масштабних моделях і промислового об'єкті з оціночним контролем ефективності ведення ВХР по товщині відкладень на теплообмінній поверхні конденсаторів і інтенсивності корозії на контрольних зразках

Ключові слова: індекси стабільності, хімічний контроль, водно-хімічний режим, оборотна система охолодження, швидкість відкладень

В работе приведен анализ применяемых индексов стабильности используемых для контроля водно-химических режимов оборотных систем охлаждения ТЭС и АЭС. Исследованы контролируемые показатели циркуляционной и добавочной воды при долгосрочной эксплуатации различных водно-химических режимов на масштабных моделях и промышленных объектах с оценочным контролем эффективности ведения ВХР по толщине отложений на теплообменной поверхности конденсаторов и интенсивности коррозии на контрольных образцах

Ключевые слова: индексы стабильности, химический контроль, водно-химический режим, оборотная система охлаждения, скорость отложений

УДК 621.187.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ХИМКОНТРОЛЯ ВОДНО- ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОБОРОТНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В. А. Кишнеvский

Доктор технических наук, профессор*

E-mail: twf.onpu@gmail.com

В. В. Чиченин

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: ch-v-v@yandex.ru

*Кафедра технологии воды и топлива

Одесский национальный

политехнический университет

пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

1. Введение

На действующих АЭС с реакторами ВВЭР сложилась крайне неблагоприятная ситуация вызванная неэффективными водно-химическими режимами (ВХР) оборотных систем охлаждения (ОСО). Устаревшие нормативные документы по ведению ВХР ОСО и химическому контролю за процессами приводит к серьёзным проблемам в этой области [1, 2].

Даже невысокие значения бикарбонатной щелочности в охлаждающей воде (1...1,5 мг-экв/дм³) сопровождаются отложениями на ТПК слоя карбонатных солей толщиной 0,3...0,5 мм/год, что более чем в три раза снижает коэффициент теплопередачи и на 15 % увеличивает гидравлическое сопротивление. В свою очередь, рост отложений на ТПК сопровождается ро-

стом давления в конденсаторе. Увеличение давления в конденсаторе на 1 кПа снижает мощность энергоблока на 1,2...1,5 % [3].

Неплотности конденсаторов приводят к неконтролируемому присосам охлаждающей воды во второй контур с непрогнозируемыми отложениями на теплообменных поверхностях парогенераторов, что влечет за собой необходимость не реже одного раза в 2...4 года проводить трехэтапные отмывки парогенераторов, стоимость которых составляет приблизительно 1 млн. грн. [4].

В связи со значительным количеством заглушенных неплотных трубок конденсаторов стоит вопрос о замене конденсаторов АЭС Украины, не выработавших проектный ресурс.

Применяемые в настоящее время ВХР ОСО не в состоянии предотвратить указанные проблемы [5–7].

В нормативных документах отсутствуют научно-обоснованные данные, позволяющие разработать ВХР ОСО с долгосрочным прогнозом возможных отложений на ТПК и обеспечивающие надежную эксплуатацию конденсаторов; используются устаревшие подходы к коррекционной обработке процессов кристаллизации труднорастворимых солей на ТПК. В действующих нормативных документах используются устаревшие подходы к обоснованию применяемых методов химического контроля за ведением ВХР.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Применяемые в настоящее время методы кондиционирования добавочной воды заключаются в умягчении воды методом содо-известкования, при этом в обработанной воде снижается концентрация ГДП, коллоидных и органических веществ, щелочность и жесткость бикарбонатная, а концентрация сульфатов и хлоридов остается без изменения.

Концентрация деполяризаторов коррозии в циркуляционной воде регулируется только путем водообмена. Концентрация коррозионно-активных газов CO_2 и O_2 в циркуляционной воде ОСО находятся в равновесии с атмосферой, что свойственно этим системам. Исходя из этого, вопросы коррозионной безопасности энергетического оборудования в системе в основном решаются в процессе проектировании путем подбора коррозионно-стойких материалов [8].

Основные нарушения тепломассообмена в конденсаторе и нарушения целостности конденсатора происходят из-за отложений на теплообменной поверхности конденсатора, которые в основном состоят из продуктов коррозии и трудно-растворимых солей.

ВХР ОСО представляет собой комплекс мероприятий, обеспечивающий нормальную гидродинамику циркуляционной воды по всем элементам оборотной системы охлаждения при отсутствии отложений, поддержание заданного физико-химического состава циркуляционной воды в течение всей кампании для обеспечения надежного теплообмена на теплообменных поверхностях конденсатора.

Оценка отложений и коррозионного состояния оборудования в различных участках теплообменных аппаратов осуществляется методами химического контроля.

Для ведения эффективного ВХР за счет водообмена и регулирования качества добавочной воды определяется коэффициент упаривания циркуляционной воды, а также дозирование ингибиторов отложений и коррозии, с учетом доли рециркуляционной циркуляционной воды через включенные в систему осветлители или механические фильтры.

Некоторые авторы для предупреждения отложений предлагают оребрение труб и изготовление труб из гидрофобных материалов [9, 10].

Многофункциональная зависимость эффективности ведения ВХР при слабонормируемом качестве добавочной воды по солевому составу и ненормируемом по агрессивным газам приводит к неопределенности при выборе показателей химического контроля за состоянием оборудования и величиной отложений.

Такое положение привело к тому, что многие исследователи разработали различные индексы контроля за эффективностью ВХР ОСО, применяемые, как правило, для отдельно взятого региона со свойственным ему составом воды и природными условиями [11].

Для определения стабильности циркуляционной воды в оборотных системах охлаждения АЭС и ТЭС в настоящее время применяются следующие индексы контроля:

$$\Delta_{K_y-\psi} = K_y - \psi,$$

где $K_y = \frac{Cl_{\text{ц}}^-}{Cl_{\text{доб}}^-}$; $Cl_{\text{ц}}^-$, $Cl_{\text{доб}}^-$ – концентрации хлорид-ионов в циркуляционной и добавочной воде, соответственно, мг/дм³; $\psi = \frac{Ж_{\text{о}}^{\text{ц}}}{Ж_{\text{о}}^{\text{доб}}}$ – индекс дефицита кальция,

$Ж_{\text{о}}^{\text{ц}}$, $Ж_{\text{о}}^{\text{доб}}$ – жесткость циркуляционной и добавочной воды, соответственно, мг-экв/дм³,

Ланжелье (I_L),

$$I_L = p\text{H}^{\text{ф}} - p\text{H}^{\text{р}},$$

где $p\text{H}^{\text{ф}}$, $p\text{H}^{\text{р}}$ – фактическая и равновесная величины водородного показателя системы;

Ризнера (I_r) представляет собой компиляцию $p\text{H}$ равновесного и индекса Ланжелье, поэтому редко применим;

$$I_r = p\text{H}^{\text{р}} - I_L,$$

$$\text{Индекс } \Delta_{\text{Ca-щ}} = [\text{Ca}^{2+}] - [\text{Щ}_{\text{о}}],$$

где $[\text{Ca}^{2+}]$ – концентрация кальция в циркуляционной воде, мг-экв/дм³; $[\text{Щ}_{\text{о}}]$ – щелочность общая в циркуляционной воде, мг-экв/дм³.

$$\text{Индекс } \Delta_{\text{щ}} = \frac{\text{Щ}_{\text{доб}}}{\text{Щ}_{\text{ц}}} - \frac{1}{K_y},$$

где $\text{Щ}_{\text{доб}}$, $\text{Щ}_{\text{ц}}$ – общая щелочность добавочной и циркуляционной воды, соответственно, мг-экв/дм³.

Все вышеизложенные контрольные показатели и индексы основаны на теоретической предпосылке, что при достижении пересыщения циркуляционной воды по карбонату кальция возможно выделение кристаллов CaCO_3 , которые затем могут откладываться на теплообменных поверхностях нагрева конденсаторов. В действительности растворы CaCO_3 весьма склонны к пересыщению (в десятки раз) и находятся в этом состоянии длительное время [12]. Кроме того, на замедление процесса кристаллизации CaCO_3 достаточно сильно влияют органические и силикатные коллоиды, всегда содержащиеся в природных водах, а также ингибиторы отложений и материал теплообменных труб.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является определение минимально необходимого количества надежно измеряемых кон-

тролируемых величин (показателей) качества добавочной и циркуляционной воды, которые характеризуют процессы отложений на ТПК и коррозии.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- определить минимально достаточный перечень измеряемых показателей добавочной и циркуляционной воды для оперативного химического контроля обеспечения эффективного ВХР с прогнозируемыми результатами;

- исследовать изменение контролируемых показателей добавочной и циркуляционной воды при долгосрочной эксплуатации различных водно-химических режимов на масштабных моделях и промышленных объектах с оценочным контролем эффективности ведения ВХР по толщине отложений на ТПК и интенсивности коррозии на контрольных образцах;

- определить оценочные показатели оперативного химконтроля интенсивности отложений на ТПК в зависимости от основных показателей циркуляционной воды и типа водно-химического режима;

- определить зависимость интенсивности коррозии от общей концентрации анионов сильных кислот в циркуляционной воде.

4. Лабораторные исследования показателей химконтроля

Лабораторные исследования проводились на экспериментальной установке – масштабной модели оборотной системы охлаждения. Характеристики масштабной модели ОСО позволяют воспроизводить и поддерживать режимы и условия испытаний в заданных диапазонах параметров с требуемой точностью и стабильностью в течение установленного времени [13].

Исследования проводились при различных коэффициентах упаривания: $K_y=3,5...4,0$ и $K_y=5,5...6,0$.

Исследование сорбции CO_2 из атмосферы, а также изменение солесодержания циркуляционной воды в процессе ее аэрации и упаривания осуществлялось контролем за величинами: величиной $pH^Ф$, щелочности по метилоранжу $Щ_{мо}$, щелочности по фенолфталеину $Щ_{фл}$, общей жесткости $Ж_о$, кальциевой жесткости $Ж_{Ca}$, концентрацией хлора Cl^- , концентрацией сульфат-иона SO_4^{2-} , концентрацией грубодисперсных примесей. Контроль за процессами коррозии осуществлялся измерением концентрации железа и меди в циркуляционной воде.

Скорость отложений $CaCO_3$ определялась в конце эксперимента на контрольных образцах по формуле [13]:

$|j_{отл}|^{OCO} = A \cdot |Ж_{Ca}|$, а интенсивность коррозии $мг/м^2 \cdot ч$ на контрольных вставках из исследуемых материалов за единицу времени. Интенсивность коррозии образцов из МНЖ не превышала $0,08$ мм/год при суммарной концентрации хлоридов и сульфатов 500 мг/дм³.

На основании полученных данных проводилась оценка индексов стабильности карбонатной системы в циркуляционной воде при различных K_y .

На рис. 1, 2 приведены результаты исследования изменения индексов стабильности циркуляционной воды при различных величинах коэффициента упаривания при ведении акрилового ВХР.

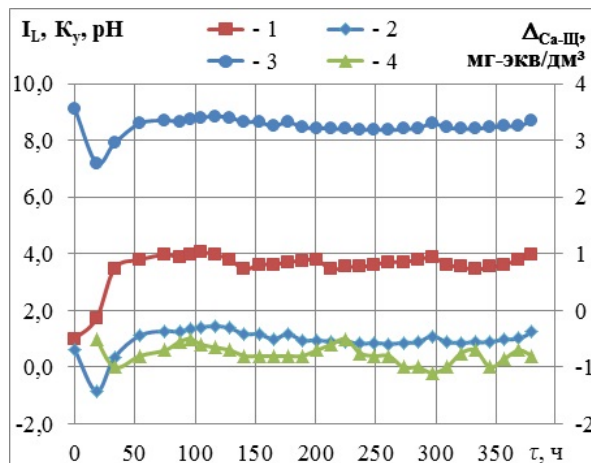


Рис. 1. Изменение индексов в процессе проведения эксперимента при $K_y=3,5...4$: 1 – K_y ; 2 – I_L ; 3 – $pH^Ф$; 4 – $\Delta_{Ca-Щ}$

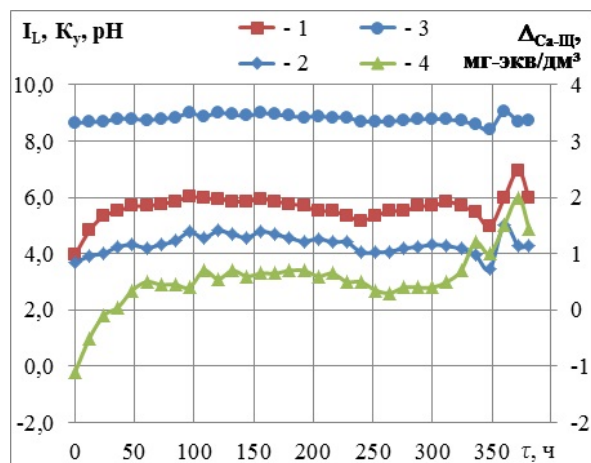


Рис. 2. Изменение индексов в процессе проведения эксперимента при $K_y=5,5...6$: 1 – K_y ; 2 – I_L ; 3 – $pH^Ф$; 4 – $\Delta_{Ca-Щ}$

На начальном этапе исследований (до 50 часов) качество циркуляционной воды мало отличается от качества добавочной. В процессе упаривания циркуляционной воды до заданного значения коэффициента упаривания стехиометрически изменяется ее физико-химический состав, измеряемые величины pH и др., которые влияют на зависящие от них индексы стабильности циркуляционной воды контура.

При установившемся K_y циркуляционной воды = $3,5...4,0$ (рис. 1) величина pH циркуляционной воды равнялась $8,3...8,5$, а равновесное значение величины pH_p соответственно равно $7,2...7,8$. Разница значений $pH^Ф$ и pH_p положительна, что характеризует нестабильное состояние карбонатной системы по индексу Ланжелье, равному ≈ 1 , и возможность образования кристаллов $CaCO_3$.

Расчетное значение $\Delta_{Ca-Щ}$ в тех же опытах принимало отрицательное значение, что согласно определению этого индекса характеризует стабильную карбонатную систему, не склонную к выделению кристаллов $CaCO_3$.

При K_y циркуляционной воды = $5,5...6,0$ (рис. 2) величина $pH^Ф$ циркуляционной воды равнялась $8,3...8,5$,

а равновесное значение величины pH^P соответственно равно 7,2...7,8. Разница значений pH^F и pH^P также положительна, что характеризует нестабильное состояние карбонатной системы по индексу Ланжелье и возможность образования кристаллов $CaCO_3$.

Значение индекса $\Delta_{Ca-щ} > 0$ характеризует нестабильное состояние карбонатной системы при $K_y = 5,5$ в отличие от системы с $K_y = 3,5...4,0$.

В результате этапов исследований в течение 350...390 ч показано, что при поддержании заданных значений K_y циркуляционной воды, качестве добавочной воды и ее ингибировании основные контролируемые параметры ВХР системы практически оставались без видимых изменений.

На контролируемые показатели оказывают влияние кратность упаривания и качество добавочной воды. Поддержание стабильных значений этих величин зависит от значений K_y .

Судя по величинам интенсивности отложений на теплообменных поверхностях с ВХР без ингибирования и с ингибированием, эффективность ведения этих режимов отличается на 85 % и более при различных K_y и дозах ингибиторов [13].

Однако рассмотренные оперативные результаты экспериментальных значений индексов стабильности при различных коэффициентах упаривания не дают никаких оснований для прогнозирования полученной эффективности ведения ВХР.

По оперативным значениям физико-химических показателей циркуляционной воды в процессе упаривания можно судить только о состоянии ее пересыщения по труднорастворимым солям. Об эффективности ВХР в целом можно судить только по интегральному (накопительному) показателю – удельному отложению труднорастворимых солей на теплообменных поверхностях конденсатора. Ведение ВХР с различными качествами добавочной воды, необработанной и известкованной, с дозированием ингибитора отложений предполагает пересыщение солей по $CaCO_3$ и выделение их кристаллов в толще воды. Поэтому те или иные индексы стабильности воды могут использоваться только для оценки пересыщения раствора [14].

Таким образом, значения эмпирических индексов стабильности и их изменения во времени не могут использоваться для оценки количества и скорости выпадения $CaCO_3$ из раствора, и тем более скорости отложений на теплообменных поверхностях, что довольно часто применяется на практике.

5. Опытнo-промышленная апробация химического контроля ВХР

Опытнo-промышленная апробация химического контроля ВХР проводилась на Ровенской АЭС в течение кампании 2009...2010 гг. с дозированием в добавочную воду ингибитора ACUMER-1000 при качестве добавочной воды в летний период $Щ_0 = 0,8...1,3$ мг-экв/дм³, в зимний – 1,8...2,0 мг-экв/дм³ и коэффициенте упаривания = 4,5...5,5 (при рекомендованных на основе лабораторных экспериментов значениях щелочности добавочной воды = 0,8 мг-экв/дм³ и K_y 3,0...3,4). Исследование эффективности водно-хи-

мического режима проводилось по описанной ранее методике лабораторных исследований.

При ведении акрилового режима без ввода минеральной кислоты в добавочную воду с июля месяца даже при высоких температурах циркуляционной воды (рис. 4) ВХР характеризуется стабильностью контролируемых показателей K_y и ψ , что предполагает отсутствие выпадения из раствора $CaCO_3$. Этот тезис подтверждается сравнением с измеренной величиной $\Delta_{K_y-\psi}$ и $\Delta_{Ca-щ}$ (рис. 3, 5) при тех же K_y .

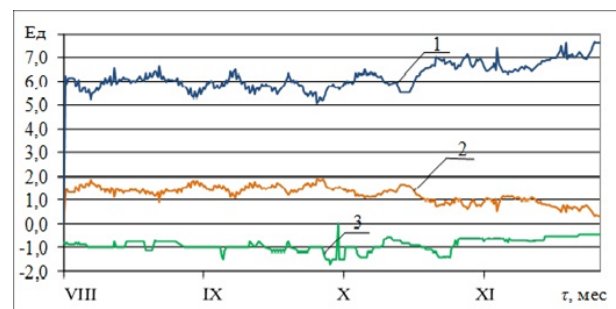


Рис. 3. Изменение индексов стабильности циркуляционной воды блока № 4 в 2009...2010 г.г.: 1 – I_T ; 2 – I_L ; 3 – $\Delta_{Ca-щ}$

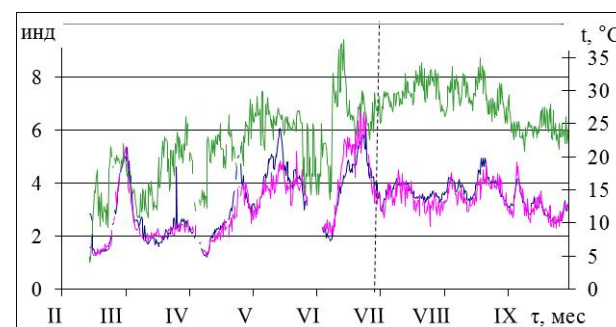


Рис. 4. Изменение коэффициентов упаривания циркуляционной воды энергоблока №4: 1 – t , 2 – K_y , 3 – ψ

Величины индекса $\Delta_{Ca-щ}$ в течение исследуемого периода (рис. 3) принимали отрицательные значения, что характеризует циркуляционную воду системы как стабильную при всех способах коррекционной обработки.

Индексы и $K_y-\psi$ (рис. 5) и $\Delta_{щ}$ в исследуемый период находились на уровне 0, что также характеризует систему как стабильную.

Весь период опытного ведения ВХР с дозированием ингибитора ACUMER -1000 без введения минеральной кислоты значения индексов I_L и I_T принимали стабильные величины, характеризующие циркуляционную воду системы как неустойчивую и склонную к кристаллообразованию (рис. 3, 5).

При ведении ВХР с вводом минеральной кислоты в добавочную воду расчетные величины I_T принимали непрогнозируемые значения, характеризующие циркуляционную воду как агрессивную, склонную к растворению $CaCO_3$, в то же время величины I_L характеризовали циркуляционную воду как стабильную.

При дозировании минеральной кислоты в систему величина pH^P уже не является свободной и не реагирует на возмущения, создаваемые изменением концентрации более слабой угольной кислоты при колебании

температуры циркуляционной воды. Таким образом, применение индексов стабильности I_r , I_L , выведенных из уравнений углекислотного равновесия, не могут быть использованы для характеристики циркуляционной воды с вводом минеральных кислот.

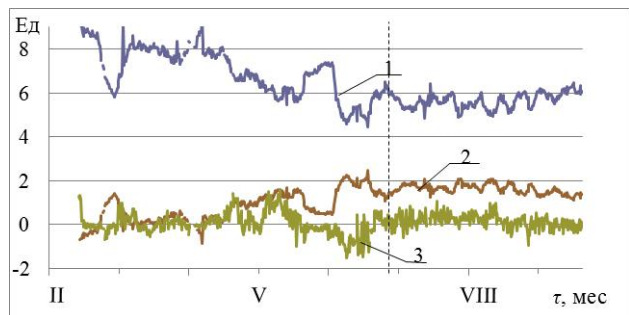


Рис. 5. Индексы стабильности ВХР циркуляционной системы энергоблока №4 в 2010 г.: 1 – I_r , 2 – I_L , 3 – $\Delta_{K_y-\psi}$

Динамика ежемесячного изменения водородного показателя pH добавочной и циркуляционной вод в период исследования с дозированием минеральной кислоты и ОЭДФК, а также опытно-промышленная апробация ВХР с применением ACUMER 1000 представлена на рис. 6.

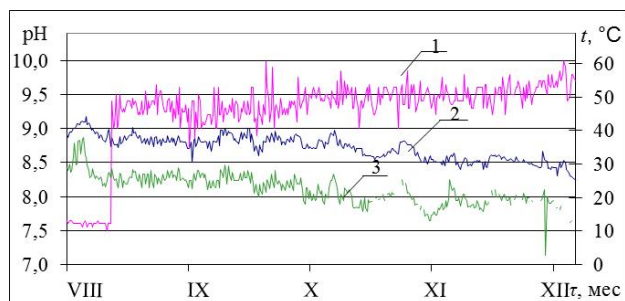


Рис. 6. Динамика изменения водородного показателя pH добавочной и циркуляционной воды энергоблока №4 в период обработки ингибитором ACUMER-1000, 2009 г.: 1 – pH добавочной воды; 2 – pH циркуляционной воды; 3 – температура циркуляционной воды

Добавочная вода характеризуется как слабозабуферная карбонатная система. Подпитка оборотной системы охлаждения добавочной водой такого качества с использованием углекислоты, сорбированной из атмосферы, позволяет стабилизировать величину pH циркуляционной воды на уровне 8,8...9,2.

При подпитке ОСО слабозабуферной известкованной водой с нестабильными показателями величины pH=9,5...10,0 значения pH циркуляционной воды даже в летние месяцы при температуре выше 30 °C

имеют тенденцию к снижению и не превышают значения $pH=8,8\pm 0,2$, а при температуре циркуляционной воды 25 °C принимают значения $pH=8,6\pm 0,2$. В зимнее время pH добавочной воды за счет избытка доз извести возрастает до $pH=9,6...9,8$. Откликом на улучшение ее качества является снижение pH циркуляционной воды до $pH=8,5$, характеризующее стабильное углекислотное равновесие без выделения $CaCO_3$. Снижение избыточной гидратной щелочности добавочной воды объясняется сорбцией углекислоты из атмосферы в процессе ее аэрации в градирне.

6. Выводы

1. При ведении акрилового водно-химического режима без ввода минеральной кислоты в добавочную воду даже при высоких температурах циркуляционной воды ВХР характеризуется стабильностью контролируемых показателей K_y , ψ , $\Delta_{K_y-\psi}$, $\Delta_{Ca-щ}$, что предполагает отсутствие выпадения из раствора $CaCO_3$.

2. Величины индекса $\Delta_{Ca-щ}$ в течение исследуемого периода принимали отрицательные значения, а $K_y-\psi$ и $\Delta_{щ}$ в исследуемый период находились на уровне 0, что характеризует циркуляционную воду системы как стабильную при коррекционной обработке; значения индексов коррелируют с массой отложений $CaCO_3$ на ТПК. Эти величины могут использоваться в качестве контролируемых величин для накопления результатов с последующим переводом в нормируемые величины.

3. Наиболее эффективным контролем за стабильностью системы при заданном K_y , на наш взгляд, являются индексы $\Delta_{Ca-щ}$, $\Delta_{щ}$, $K_y-\psi$ и $pH^Ф$, значения которых легко оцениваются по результатам физико-химического анализа циркуляционной воды без учета общего солевого содержания. Для определения значений индексов I_r и I_L , кроме физико-химического анализа циркуляционной воды и солевого содержания необходимо для каждого случая рассчитывать значение $pH^Ф$. В наших исследованиях значения индексов I_r и I_L характеризовались непрогнозируемыми результатами и на наш взгляд они неприменимы для контроля ВХР с дозированием минеральных кислот.

В результате осмотра конденсаторов блока после кампании на ТПК выявлены рыхлые карбонатно-силикатные кальциевые отложения, которые легко удаляются с поверхности установкой Hammelmann. Сравнительный анализ актов состояния конденсаторов турбины в 2008...2009 гг. показал, что состояние конденсаторов не изменилось. Исходя из этого, можно заключить, что за время ведения акрилового ВХР и предложенного химконтроля масса отложений на теплообменных поверхностях не изменилась, что говорит о высокой эффективности предложенных показателей контроля.

Литература

1. Список 25 лучших энергоблоков мира по совокупному коэффициенту использования установленной мощности [Электронный ресурс] / Inside WANO. – 2001. – Т. 9, № 2. – Режим доступа : www.wano.info/publications
2. Водно – химический режим АЭС [Текст] : сб. тезисов докладов на восьмой междунауч.-практ. конф. / Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях. – Электрогорск : ОАО «ЭНИЦ», 2012. – 72 с.
3. Бродов, Ю. М. Конденсационные установки паровых турбин [Текст] / Ю. М. Бродов, Р. З. Савельев. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

4. Кишневский, В. А. Химическая очистка энергетического оборудования от медных отложений [Текст] / В. А. Кишневский, Ю. П. Буравчук, А. А. Силютин // Труды Одесск. политехн. ун-та. – 2001. – 1 (13). – С. 53–56.
5. Методические указания по прогнозированию химического состава и накипеобразующих свойств охлаждающей воды электростанций РД 34.37.307– 87 [Текст] / Союзтехэнерго, Москва, 1989. – 40 с.
6. Методические указания по предотвращению образования минеральных и органических отложений в конденсаторах турбин и их очистке [Текст] / РД 34.22.501 – 87 М. СПО Союзтехэнерго, 1989. – 80 с.
7. Руководящие указания по стабилизационной обработке охлаждающей воды в оборотных системах охлаждения с градиентами оксиэтилендифосфоновой кислотой [Текст] / Руководящий документ Минэнерго СССР. – РД 34.22.503-80. Офиц. изд. – М.: СПО Союзтехэнерго: Минэнерго СССР, 1981. – 20 с.
8. Karabelas, A. J. Scale formation in tubular heat exchangers – research priorities [Text] / A. J. Karabelas // Intern. J. Thermal Sciences. – 2002. – Vol. 41, Issue 7. – P. 682–692. doi:10.1016/s1290-0729(02)01363-7
9. Antony, A. Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review [Text] / A. Antony, J. H. Low, S. Gray, A. E. Childress, P. Le-Clech, G. Leslie // Journal of Membrane Science. – 2011. – Vol. 383, Issue 1-2. – P. 1–16.
10. Li, W. Modeling cooling tower fouling in helical-rib tubes based on Von-Karman analogy [Text] / W. Li, G. Li // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53, Issue 13–14. – P. 2715–2721. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.034
11. Al-Rawajfeh, A. E. Scaling in multiple-effect distillers: the role of CO₂ release [Text] / A. E. Al-Rawajfeh, H. Glade, J. Ulrich // Desalination. – 2005. – Vol. 182, Issue 1-3. – P. 209–219. doi:10.1016/j.desal.2005.04.013
12. Hasson, D. Scale Control in Saline and Wastewater Desalination [Text] / D. Hasson, D. R. Semiat // Isr. J. Chem. – 2006. – Vol. 46, Issue 1. – P. 97–104. doi:10.1560/bm6m-01uj-cnp2-w0e3
13. Кишневский, В. А. Исследование процессов карбонатных отложений на теплообменных поверхностях конденсаторов [Текст] / В. А. Кишневский, В. В. Чиченин // Восточно-Европейский Журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 3, № 8 (69). – С. 52–58. doi: 10.15587/1729-4061.2014.25191
14. Технический справочник по обработке воды : в 2т. [Текст] / под ред. М. И. Алексеев, В. Г. Иванов, А. М. Курганов и др.; уполн. ред. компании «Дегремон» Г. Н. Герасимов; пер. с фр. – ООО «Новый журнал», ООО «Лингва Франка Тим». – СПб.: Новый журнал, 2007. – 1389 с.