

*Наведені результати розрахунків фізико-хімічних показників продувної води по етапах обробки. Обґрунтований принцип побудови безстічних схем виробництва води різної якості для живлення циклів АЕС з продувних вод оборотних систем охолодження шляхом поділу масово-сольового потоку продувної води на два, кожен з яких за своїм складом відповідає нормативам, які висуваються до живильної води циклів станції*

*Ключові слова: оборотна система охолодження, рециркуляція, циркуляційна вода, продувна вода, концентрування, іонний обмін*

*Приведены результаты расчетов физико-химических показателей продувочной воды по этапам обработки. Обоснован принцип построения бессточных схем производства воды различного качества для питания циклов АЭС из продувочных вод оборотных систем охлаждения путем разделения массово-солевого потока продувочной воды на два, каждый из которых по своему составу соответствует нормативам, предъявляемым к питательной воде циклов станции*

*Ключевые слова: оборотная система охлаждения, рециркуляция, циркуляционная вода, продувочная вода, концентрирование, ионный обмен*

# ОБОСНОВАНИЕ СХЕМ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ПРОДУВОЧНОЙ ВОДЫ БЕССТОЧНЫХ ОБОРОТНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ АЭС

**В. А. Кишневский**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: twf.onpu@gmail

**В. В. Чиченин**

Кандидат технических наук, доцент\*

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

**И. Д. Шуляк**

Кандидат технических наук,

старший преподаватель\*

E-mail: Irina\_Shulyak@ukr.net

\*Кафедра технологии воды и топлива

Одесский национальный

политехнический университет

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

## 1. Введение

Для обеспечения эффективного водно-химического режима оборотной системы охлаждения применяются различные методы регулирования соледержания добавочной и циркуляционных вод, обеспечивающих отсутствие коррозии и накипеобразования в циркуляционном контуре в процессе упаривания. К ним относятся: регулирования качества добавочной воды путем известкования [1, 2] ингибирования [3, 4], методы водообмена циркуляционной воды [5, 6].

Количество продувочной воды даже при подпитке оборотных систем охлаждения (ОСО) известкованной водой достигает 300 т/ч для блока 1000 МВт, что приводит к значительным сбросам тепловых и солевых загрязнений в окружающую среду. В настоящее время нет нормативной документации по выбору эффективного водно-химического режима (ВХР) ОСО, в результате чего недовыработка электроэнергии на некоторых АЭС Украины по причине неудовлетворительной работы конденсаторов турбин достигает 16...18 МВт·ч. Поэтому вопрос разработки экологически безопасных эффективных ВХР ОСО является актуальным.

Для уменьшения количества продувочных вод необходимо разработать новый эффективный ВХР ОСО с умягчением циркуляционной воды рециркуляцией на осветлителе. Регулирование же величины коррозионно активных анионов сильных кислот (АСК) в циркуляционной воде, при этом, снижается путем продувки на гибридной ВПУ для производства добавочной воды парогенераторов (ПГ), тепловых сетей и систем технологического водоснабжения ответственных потребителей (СТВОП).

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Эффективность ВХР ОСО в значительной степени зависит от качества добавочной речной воды, соледержания и температура которой изменяется в течение года. Для уменьшения величины щелочности, ГДП, органических веществ и др. примесей применяется известкование воды при ее природной температуре. При этом качество известкования в летние месяцы в два-три раза выше, по сравнению с зимним временем.

Для сглаживания этих рисков применяется метод термостабилизации части циркуляционной воды. При этом происходит очистка циркуляционной воды от ГДП и снижение щелочности, а также экономия более чем на 40 % добавочной воды.

В работе [7] предложен метод подачи части циркуляционной воды для коррекции состава примесей системы охлаждения АЭС. В последнее время опубликован комплекс исследований влияния ингиби-

торов коррозии на предупреждения или коррозии снижения коррозии энергооборудования ОСО [8, 9] в циркуляционной воде с повышенной концентрацией концентрации анионов сильных кислот (АСК). Во всех исследованиях предложена продувка для регулирования критической АСК в циркуляционной воде, которая достигает до 180 мг/дм<sup>3</sup> на блок 1000 МВт [10].

Поэтому является актуальным исследование ВХР ОСО и системы водоподготовки всей станции в комплексе, с целью рационального использования продувочных вод после их кондиционирования в других системах АЭС т. е. создания бессточных энергообъектов.

### 3. Цели и задачи исследований

Целью работы является выбор оптимальной технологической схемы гибридной ВПУ для производства из продувочной воды ОСО добавочной воды различного качества используемой в циклах станции.

Для достижения этой цели необходимо решение следующих задач:

- разработать методики расчета комплексного использования методов осаждения, ионообменных и мембранных технологий в схемах ГВПУ;
- исследовать возможное использование различных схем гибридных ВПУ для переработки продувочных вод ОСО различного качества;
- разработать принципы предварительной подготовки солевого потока продувочной воды перед установкой обратного осмоса, который предполагает разделение массово-солевого потока продувочной воды ОСО в процессе обработки на мембранах на два, каждый из которых со своим содержанием отвечает нормативам питательной воды различных циклов станции;
- разработать метод выбора величины восстановления ОО и прогнозирования результатов обработки воды на ГВПУ на основе диаграммы солевого состава воды по этапам обработки.

### 4. Методы и результаты расчета различных гибридных схем ВПУ

В работе рассмотрены несколько гибридных схем водоподготовительных установок (ВПУ) с использованием методов осаждения, ионного обмена, мехфильтрации, обратного осмоса (рис. 1, а-г), и предложен принцип предподготовки солевого состава воды перед установкой обратного осмоса (УОО), который предусматривает раздел массово-солевого потока продувочной воды ОСО.

Контроль и прогнозирование результатов обработки осуществлялся усовершенствованной гипотетической диаграмме солевого состава по этапам обработки.

Ниже приведены результаты расчетов гибридных схем (рис. 1) для переработки продувочных вод оборотной системы охлаждения конденсаторов с целью подготовки добавочной воды для систем АЭС. Расчет мембранных технологий производился с помощью программы ROSA [8], технологии ионного обмена и пресмягчения рассчитывались по методикам, изложенным в [9, 10]. Исходной водой для всех схем служила продувочная вода ОСО после известкования либо

содо-известкования и фильтрации на двухслойных механических фильтрах с СС=810 мг/дм<sup>3</sup>, температурой, t=25 °С, расходом Q=100 м<sup>3</sup>/ч. Результаты расчета состава воды по этапам обработки для указанных гибридных схем приведены в табл. 1.

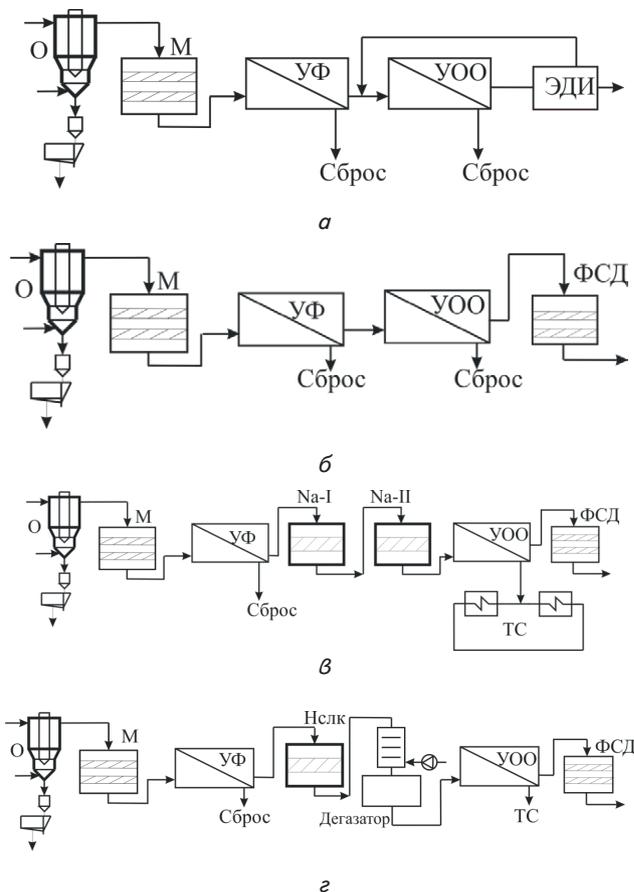


Рис. 1. Гибридные технологические схемы обработки продувочной воды ОСО с отбором после включенного осветлителя: а – схема с УОО и ЕДИ; б – схема с УОО и ФСД; в – схема с предвключенным натрий-катионитовым фильтром УОО и ФСД; г – схема с предвключенным СлКК фильтром УОО и ФСД

Таблица 1  
Сводная таблица основных показателей гибридных ВПУ, использующей известкованную воду

Показатель	Ед. изм.	Прод. вода ОСО	Схе-ма а	Схе-ма б	Схема в		Схема г	
			кон-центрат	кон-центрат	филь-траг Na <sup>+</sup> кат	кон-центрат	филь-траг HCl-кат	кон-центрат
Ca <sup>2+</sup>	мг-экв/дм <sup>3</sup>	3,86	12,8	12,25	0,01	0,05	0,49	2,4
Mg <sup>2+</sup>	мг-экв/дм <sup>3</sup>	3,47	11,5	11,03	0,01	0,05	3,47	17,3
HCO <sub>3</sub>	мг-экв/дм <sup>3</sup>	3,47	11,3	10,86	3,47	40,0	0,1	0,84
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	мг-экв/дм <sup>3</sup>	3,09	10,3	9,81	3,09	15,3	3,1	15,4
Cl <sup>-</sup>	мг-экв/дм <sup>3</sup>	1,93	6,4	6,13	1,93	9,5	1,9	9,6
æ	мксм/см	691		1736	809	4929	489,8	1792
I <sub>к</sub>	(мг-экв/дм <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>	13,4	145	133	0,03	2,0	0,05	2,0
Q	м <sup>3</sup> /ч	80	24	22	77,6	15,52	78,4	17,28

Солесодержание пермеата после его финишной очистки на EDI и ФСД в схемах *a...z* соответствует  $\chi \approx 0,06$  мкСм/см.

В рассмотренных схемах использована технология двух-стадийного обратного осмоса. Восстановление УОО в схемах *a* и *b* составило 70 %. Качество пермеата УОО соответствует регламентированному составу исходной воды для последующей обработке на электро-деионизационной установке и ФСД:  $\text{pH} = 6...9$ ,  $\text{Ж}_0 \leq 0,5$  мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{CO}_2 \leq 5$  мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{a} \leq 20$  мкСм/см.

### 5. Анализ возможности использования гибридных схемы ВПУ для обработки продувочных вод ОСО

Для схемы *a* выход пермеата составляет 70 % или 56 м<sup>3</sup>/ч. Выход потока концентрата EDI, который составляет 30 % от входящего, направляется на рециркуляцию (на вход УОО). При расчете использовались мембраны SW30HRLE-440i фирмы DOW (модуль EDI-210) [11]. Качество воды после EDI соответствует нормам питательной воды парогенератора (ПГ) АЭС. Качество концентрата УОО для схемы *a* по величине жесткости не позволяет использовать его в циклах станций.

Основными солевыми стоками схемы *b*, являются концентрат УОО и регенерационные растворы после ФСД. Так как ФСД регенерируются реагентами с 20-кратным избытком, после раздельной регенерации ионитов целесообразно использовать повторно: щелочи в осветлителе для повышения pH; а кислые стоки с  $\text{pH} = 4$  для подкисления циркуляционной воды в ОСО. Качество концентрата УОО, также как и в схеме 1, не позволяет использовать его в циклах станций. Однако изменение солевого состава концентрата в сторону уменьшения ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$  соответствующий величине карбонатного индекса, равного  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Ca}^{2+} \leq 4$  (мг-экв/дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup>, открывает возможность использовать полученный концентрат с скорректированным составом в тепловых сетях закрытого типа. Коррекция состава концентрата возможна за счет умягчения воды, подаваемой на УОО.

Снижение жесткости концентрата УОО с целью его дальнейшего использования целесообразно проводить путем предварительного умягчения продувочных вод ОСО на ионообменных смолах: натрий-катионированием или катионированием на слабокислотном фильтре. В качестве отклика на выбор указанного технологического процесса предопределяется соответствие качества концентрата УОО нормам подпиточной воды тепловых сетей по карбонатному индексу  $\text{I}_K \leq 0,5...4,0$  (мг-экв/дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup>.

На рис. 1, *z* приведена схема гибридной ВПУ с предварительным умягчением воды перед УОО на слабокислотном фильтре. Обязательным условием эффективного умягчения на СЛКК является соотношение  $\text{Ж}_{\text{общ}} < \text{Щ}_{\text{об}}$  в обрабатываемой воде. В процессе Н-катионирования удаляются ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  (до  $\text{Ж}_{\text{ост}} = 0,1...0,2$  мг-экв/дм<sup>3</sup>), также стехиометрически разрушается бикарбонатная щелочность с переходом ее в молекулярную форму  $\text{CO}_2$ , удаляемую методом декарбонизации. Умягченная вода в этой схеме имеет слабокислую реакцию ( $\text{pH} = 4,5...5,0$ ), что исключает ее подкисление перед УОО. Величина восстановления на УОО в этой схеме увеличивается до 75 % при качестве

пермеата  $\chi \approx 3...6$  мкСм/см, а фильтрат ФСД соответствует  $\chi \approx 0,06$  мкСм/см.

При использовании схемы с предварительным умягчением исходной воды на Na-катионитовых фильтрах жесткость фильтрата  $\text{Ж}_0 \approx 30$  мг-экв/дм<sup>3</sup>, а ионы  $\text{HCO}_3^-$  проходят фильтр транзитом и удаляются на УОО. Таким образом, возможность использования концентрата УОО в тепловых сетях регламентируется величиной  $\text{HCO}_3^-$ .

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 1., показывает, что пермеат УОО после финишной обработки на EDI и ФСД соответствует качеству подпиточной воды ПГ, а солесодержание концентратов, получаемые в схемах *v* и *g*, соответствует нормам качества питательной воды для тепловых сетей. Концентраты УОО в схемах *a* и *b* значительно – в десятки раз превышают нормативные показатели добавочной воды для тепловых сетей.

### 6. Использование гипотетических диаграмм физико-химического состава воды после аппаратов для управления технологического процесса обессоливания

Для систематизации расчетного материала и создания целостной картины технологического процесса кондиционирования воды на гибридной ВПУ изложенный материал трансформирован в гипотетические диаграммы изменения состава воды в процессе ее обработки после аппаратов для схем, представленных на рис. 1.

На диаграмме рис. 2, 3 графически показано изменение в физико-химическом составе обрабатываемой воды в процессе ее умягчения методами известкования и содо-известкования, соответственно. В известкованной воде концентрация ионов кальция уменьшилось на величину  $\Delta \text{HCO}_3^-$ , в а содо-известкованной воде за счет замещения ионов кальция ионами натрия остаточная концентрация кальция в обработанной воде равна  $0,05...0,1$  мг-экв/дм<sup>3</sup>,  $\text{HCO}_3^- \approx 0,7$  мг-экв/дм<sup>3</sup>. Концентрации ионов сульфатов и хлоридов неизменны.

Изменение химического состава воды по этапам обработки в технологической схеме гибридной ВПУ представлено с помощью усовершенствованной диаграммы изменения гипотетического состава воды по этапам обработки. Из диаграммы рис. 2 видно, что в процессе умягчения методом известкования концентрация кальция уменьшилась на величину  $\Delta \text{HCO}_3^- = 6$  мг-экв/дм<sup>3</sup>,  $\text{CO}_2 = 0$ ,  $\text{pH}$  умягченной воды равен 10,0.

После установки обратного осмоса качество пермеата  $\chi = 0,1$  мкСм/см, а солесодержание концентрата увеличилось примерно в 4 раза. Соответственно увеличились концентрации ионов кальция, магния, натрия, сульфатов, хлоридов. Концентрации ионов кальция и бикарбонат-иона, а также показатель карбонатного индекса – произведения концентраций этих ионов, которые определяют возможность использования концентрата в качестве добавочной воды для питания тепловых сетей – позиции 1 и 2 на рис. 6, *a*, *b* показывают неприемлемость использования концентрата для этой цели. Величина карбонатного индекса для всех вод превышает нормативный показатель  $\text{I}_K$  для тепловых сетей закрытого типа от 3-х и до 10-ти более раз.

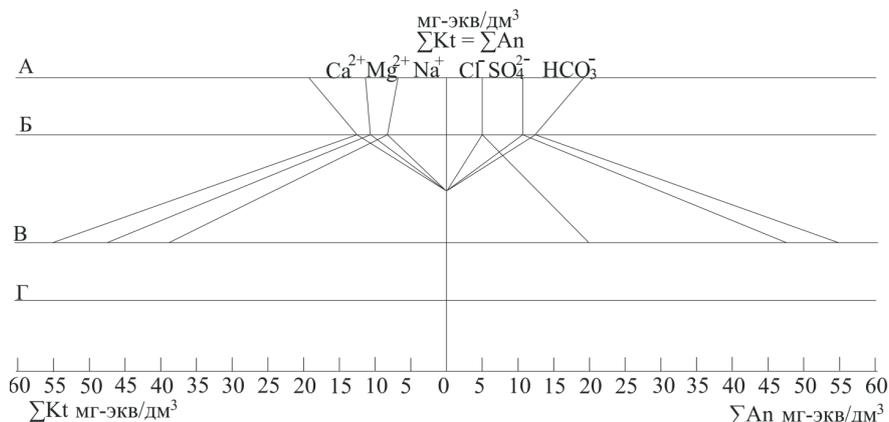


Рис. 2. Диаграмма изменения физико-химических показателей обрабатываемой воды при известковании продувки: А – качество исходной воды; Б – качество известкованной воды после осветлителя; В – качество пермеата и концентрата при восстановлении УОО 75 %; Г – качество пермеата после финишной очистки

Изменение качества концентрата демонстрируется в точке пересечения горизонтальной линии В, характерной для величины восстановления  $K_{\phi}$  с наклонной линией равной концентрации отдельного ионов.

Из диаграммы можно визуально определить, что уменьшение величины  $K_{\phi}$  сопровождается улучшением качества концентрата при соответствующем увеличении ее объема. В то же время объем пермеата соответственно уменьшается, однако качество его при этом практически не меняется.

Этот фактор, свойственный установкам обратноосмотического разделения на мембранах, позволяет разработать гибкую систему регулирования объемов и солевого содержания концентрата и пермеата, подаваемых для дальнейшего использования в качестве добавочной воды для систем АЭС. Это фактор нами использован при разработке принципа разделения массово-солевого потока продувочной воды ОСО в процессе тангенциального фильтрования на обратноосмотической мембране на два, каждый из которых по своему составу соответствует нормативам, предъявляемым к подпиточной воде циклов станции.

При промышленном внедрении процесса рационального использования продувочной воды ОСО РАЭС возникают проблемы, связанные с наличием в обрабатываемой воде ингибиторов отложений. В результате концентрирования ингибиторов в процессе упаривания циркуляционной воды концентрация ингибитора в продувочной воде достигает 2...4 мг/дм³, что резко снижает эффективность процессов содово-известкования продувочной воды. В частности, установлено, что остаточная концентрация ионов кальция в умягченной воде с повышенным содержанием ингибитора при содово-известковании при-

мерно равна – 1,8...2 мг-экв/дм³, а  $\text{HCO}_3^-$  – 1,1...2 мг-экв/дм³.

Рассчитанный по этим данным физико-химический состав концентрата УОО и карбонатный индекс удовлетворяет нормируемым показателям добавочной воды для тепловых сетей. Использование содово-известкованной, умягченной, содержащей ингибитор отложений Асимер 1000 продувочной воды КОСО для комбинированной подготовки питательной воды ПГ с ( $\chi \approx 0,3$  мкСм/см) и солевого содержанием концентрата, соответствующим нормам для питания тепловых сетей  $I_K \leq 4$  ((мг-экв/дм³)²) невозможно исходя из гипотетической диаграммы, даже при  $K_{\phi} \leq 50\%$  для схем а и б на рис. 1. При увеличении коэффициента восстановления до 75% содержание концентрата увеличится, и соответственно карбонатный индекс  $I_K$  будет превышать нормируемую величину в десятки раз.

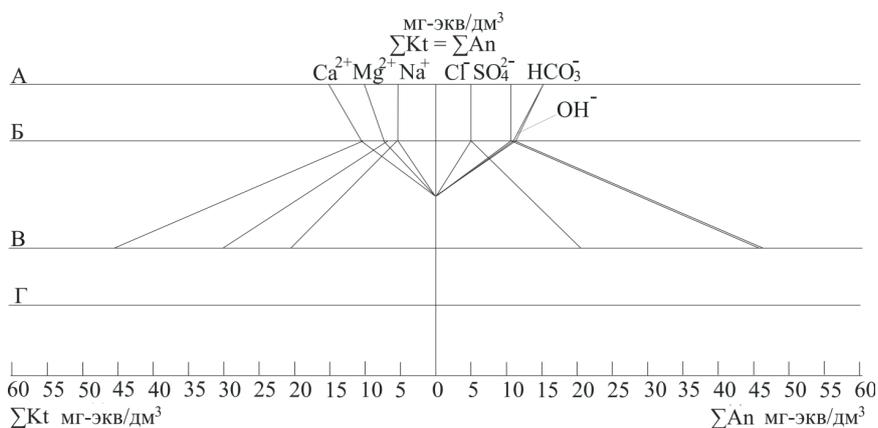


Рис. 3. Диаграмма изменения физико-химических показателей обрабатываемой воды при содово-известковании продувки: А – качество исходной воды; Б – качество содово-известкованной воды после осветлителя; В – качество пермеата и концентрата при восстановлении УОО 75 %; Г – качество пермеата после финишной очистки

Доумягчение содово-известкованной воды на схемах с применением слабокислотного катионирования и натрий-катионирования перед УОО позволяет расширить возможности технологии разделения массово-солевого потока продувочной воды ОСО в процессе тангенциального фильтрования на обратноосмотической мембране на два, каждый из которых по своему составу соответствует нормативам, предъявляемым к подпиточной воде циклов станции.

На рис. 4, 5 представлена диаграмма изменения физико-химических показателей продувочной воды, содержащей ингибитор, для схемы с умягчением на слабокислотном катионите и для схемы с умягчением на натрий-катионите перед УОО, соответственно.

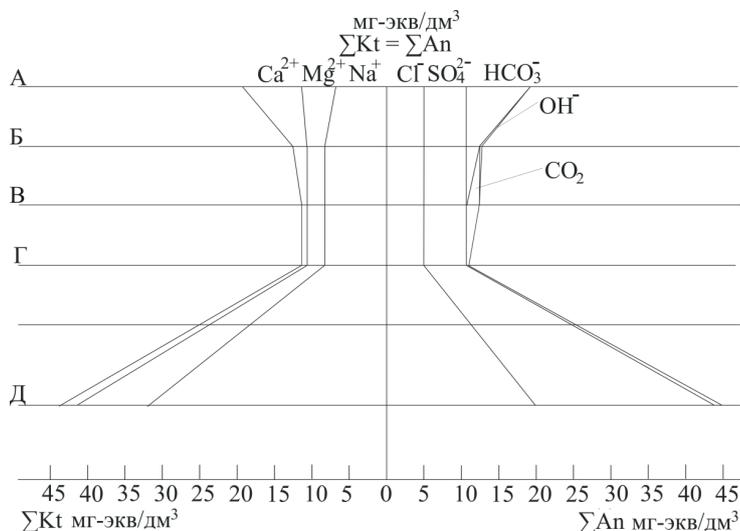


Рис. 4. Диаграмма изменения физико-химических показателей воды для схемы 6 при содо-известковой обработке продувки ОСО, содержащей ингибитор отложений на слабокислотном катионитовом фильтре: А — качество исходной воды; Б — качество содо-известкованной воды после осветлителя; В — качество фильтрата слабокислотного катионитового фильтра; Г — качество фильтрата слабокислотного катионитового фильтра после декарбонизатора; Д — качество пермеата и концентрата при восстановлении УОО 75 %; Е — качество пермеата после финишной очистки

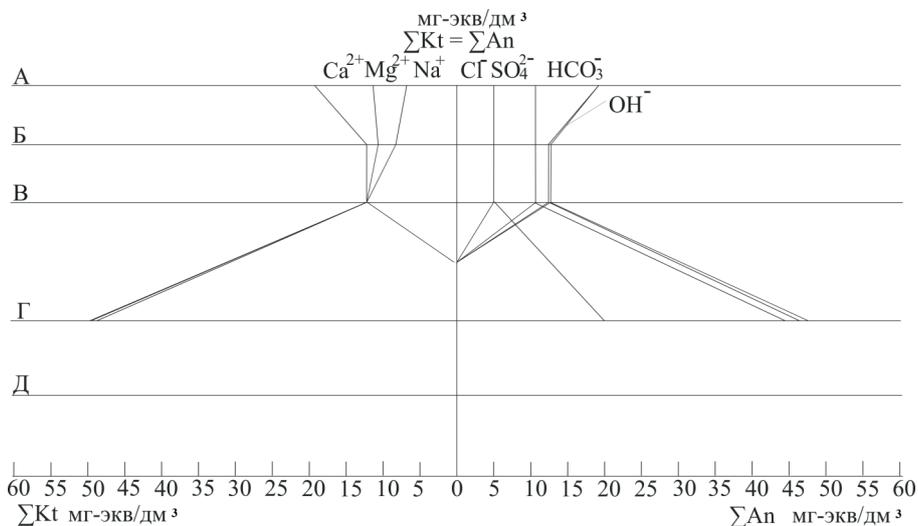


Рис. 5. Диаграмма изменения физико-химических показателей воды для схемы 2 при содо-известковой обработке продувки ОСО, содержащей ингибитор отложений на натрий катионитовом фильтре: А — качество исходной воды; Б — качество содо-известкованной вод после осветлителя; В — качество фильтрата натрий-катионитового фильтра; Г — качество пермеата и концентрата при восстановлении УОО 75 %; Д — качество пермеата после финишной очистки

Показано, что в процессе ионного обмена на слабокислотном катионите концентрация  $Ca^{2+}$  уменьшается до величины  $0,6 \text{ мг-экв/дм}^3$ , ионы  $OH^-$  нейтрализуются ионами  $H^+$ , а ионы  $HCO_3^-$  согласно уравнению диссоциации углекислоты превращаются в  $CO_2$ . Солеосодержание концентрата после обработки на УОО при  $K_f=75\%$  равно  $Ca^{2+}=2,36 \text{ мг-экв/дм}^3$ ,

$HCO_3^- = 0,4 \text{ мг-экв/дм}^3$  и  $I_k=0,9 \text{ (мг-экв/дм}^3)^2$  соответственно (рис. 6, б, колонка 3). А солесодержание пермеата соответствует  $\chi=3,7 \text{ мксм/см}$ , и после обработки на ФСД не превышает  $0,06 \text{ мксм/см}$ . Таким образом, при подаче фильтрата слабокислотного катионита возможна эксплуатация УОО при величинах восстановления  $75\text{...}80\%$  с обеспечением заданного качества пермеата и концентрата. Широкий диапазон рабочих величин восстановления УОО от  $20$  до  $80\%$  позволяет изменять соотношение объемов и солесодержания пермеата и концентрата в зависимости от текущей производственной необходимости.

Изменение солесодержания содо-известкованной воды в процессе натрий-катионирования показано на гипотетической диаграмме рис. 5. Фильтрат натрий-катионитового фильтра характеризуется  $Ж_0=30 \text{ мкг-экв/дм}^3$ , что обеспечивает низкую жесткость концентрата УОО и соответственно невысокие значения карбонатного индекса.

Солесодержание концентрата при коэффициенте восстановления  $75\%$  в процессе обратноосмотической обработки характеризуется величиной жесткости  $0,1 \text{ мг-экв/дм}^3$  и щелочности  $+HCO_3^- + CO_3^{2-} = 6,7 \text{ мг-экв/дм}^3$ .

Фильтрат Na-катионитовых фильтров характеризуется  $Ж_0=30 \text{ мкг-экв/дм}^3$ , что обеспечивает соответствие качества концентрата УОО нормам подпиточной воды теплосети с учетом концентрирования в УОО. Карбонатный индекс концентрата  $I_k$  для этой схемы (рис. 5) соответственно примет значение  $0,65 \text{ (мг-экв/дм}^3)^2$ , что не превышает норм качества добавочной воды для сетевых подогревателей.

Количество и качество концентрата в схемах а и б без умягчения не позволяют его рационально использовать в схемах станции. Эти потоки концентратов также невозможно использовать в схеме отверждения продувочной воды осветлителя с дальнейшим использованием фугата в качестве добавочной воды КОСО из-за большого массового количества вносимых с водой ионов

$Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , ради которых рассчитывалась схема обработки продувки циркуляционных вод.

Схемы в и г позволяют использовать как пермеат, так и концентрат в циклах станции, а использованный источник регенерационный раствор кислоты из-за его незначительного объема (около  $3\%$  от производства ВПУ и менее  $0,003\%$  от добавочной воды

ОСО) можно сбрасывать в установки отверждения продувки осветлителя.

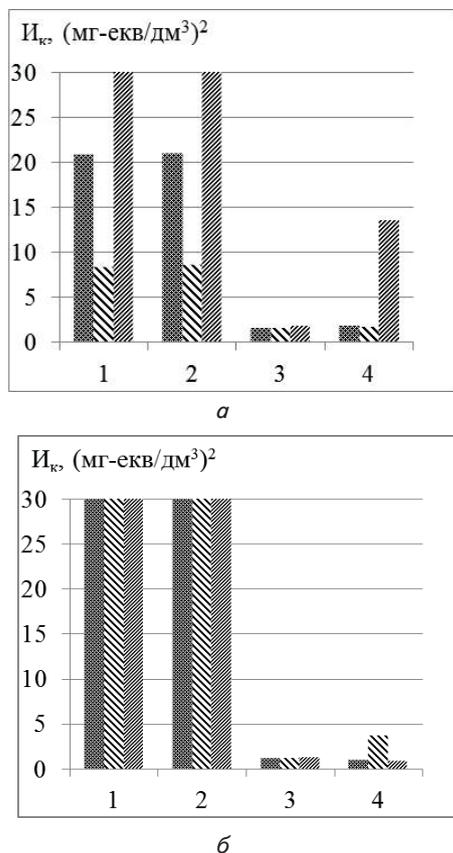


Рис. 6. Значения карбонатного индекса концентрата УОО при  $K_{\phi}=75\%$  в зависимости от схемы обработки 1, 2, 3, 4, представленных на рис. 1, для вод рек Стырь – I, Ю. Буг – II, Днестр – III: а – продувочная вода без ингибитора после известкования; б – содержащая ингибитор продувочная вода после содово-известкования

В то же время, в схеме г количество истощенных регенерационных растворов после натрий-катионитовых фильтров (около 5 %, и массовая концентрация хлоридов) может значительно повлиять на общую концентрацию АСК в циркуляционной воде с соответствующим увеличением объемов продувки, подаваемой на гибридную ВПУ.

## 7. Выводы

Разработана комплексная гибридная схема кондиционирования циркуляционной воды оборотной системы охлаждения АЭС путем ее рециркуляции на встроенном осветлителе и перевода продувочной воды на ГВПУ без сбросов в окружающую среду

Разработаны методики расчета комплексного использования методов осаждения, ионообменных и мембранных технологий в схемах ГВПУ и исследована возможное использование различных схем гибридных ВПУ для переработки продувочных вод ОСО различного качества;

Предложен принципы предварительной подготовки соленосодержащей продувочной воды перед установ-

кой обратного осмоса, который предполагает разделение массово-солевого потока продувочной воды ОСО в процессе обработки на мембранах на два, каждый из которых со своим соленосодержанием отвечает нормативам питательной воды различных циклов станции.

Предложена методика выбора величины восстановления ОСО с использованием диаграмм солевого состава воды по этапам обработки, на основании которых возможно прогнозирование результатов обработки воды на ГВПУ.

## Литература

1. Кишневский, В. А. Применение гибридных водоподготовительных установок при обработке продувочных вод оборотных систем охлаждения [Текст] / В. А. Кишневский, Е. В. Кишневский, О. М. Малиновский, И. Д. Шуляк // Вода и водоочистные технологии. Научно-технические вестн. – 2011. – № 2 (4). – С. 53–58.
2. Walker, M. E. Economic impact of condenser fouling in existing thermo electric power plants [Text] / M. E. Walker, I. Safari, R. B. Therogowda // Energy. – 2012. – Vol. 44, Issue 1. – P. 429–437. doi: 10.1016/j.energy.2012.06.010.
3. Walker, M. E. Utilization of municipal wastewater for cooling in thermoelectric power plants: Evaluation of the combined cost of makeup water treatment and increased condenser fouling [Text] / M. E. Walker, R. B. Therogowda, I. Safari, J. Abbasian, H. Arastoopour, D. A. Dzombak et. al. // Energy. – 2013. – Vol. 60. – P. 139–147. doi: 10.1016/j.energy.2013.07.066.
4. Khamis, I. Trends and challenges toward efficient water management in nuclear power plants [Text] / I. Khamis, K.C. Kavvadias // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – Vol. 248. – P. 48–54. doi: 10.1016/j.nucengdes.2012.03.039.
5. Van Limpt, B. Water and chemical savings in cooling towers by using membrane capacitive deionization [Text] / B. van Limpt, A. van der Wal // Desalination. – 2014. – Vol. 342. – P. 148–155. doi: 10.1016/j.desal.2013.12.022.
6. Yu, X. Experimental evaluation on concentrating cooling tower blowdown water by direct contact membrane distillation [Text] / X. Yu, H. Yang, H. Lei, A. Shapiro // Desalination. – 2013. – Vol. 323. – P. 134–141. doi: 10.1016/j.desal.2013.01.029.
7. Кишневский, В. А. Математическая модель оборотных систем охлаждения с рециркуляцией части продувок на предвключенный осветлитель [Текст] / В. А. Кишневский, В. В. Чиченин, В. Г. Ахромеев. // Тр. Одес. поли-техн. ун-та. – 2013. – Вып. 3 (42). – С. 76–80.
8. Zhang, J. Pilot test of UF pretreatment prior to RO for cooling tower blowdown reuse of power plant [Text] / J. Zhang, H. Zeng, C. Ye, L. Chen, X. Yan // Desalination. – 2008. – Vol. 222, Issues 1–3. – P. 9–16. doi: 10.1016/j.desal.2007.01.123.
9. Zhang, J. Pilot testing of outside-in MF and UF modules used for cooling tower blowdown pretreatment of power

- plants [Text] / J. Zhang, L. Chen, H. Zeng, X. Yan, X. Song, H. Yang, C. Ye // Desalination. – 2007. – Vol. 214, Issues 1–3. – P. 287–298. doi: 10.1016/j.desal.2006.12.004.
10. Frick, J. M. Evaluation of pretreatments for a blowdown stream to feed a filtration system with discarded reverse osmosis membranes [Text] / J. M. Frick, L. A. Féris, I. C. Tessaro // Desalination. – 2014. – Vol. 341. – P. 126–134. doi: 10.1016/j.desal.2014.02.033.
11. Zeng, H. Comparison of an ultrafiltration membrane fed with raw seawater, coagulated seawater and cooling tower blowdown [Text] / H. Zeng, J. Zhang, C. Ye // Desalination. – 2009. – Vol. 244, Issues 1–3. – P. 199–207. doi: 10.1016/j.desal.2008.04.044.

*У статті розглянута сутність R/S-методу для аналізу часових рядів. Визначені основні положення за розрахунками фрактального показника Херста й аналізу його характеру для різних умов складових часового ряду. На основі розрахунку й оцінки показника Херста для часового ряду витрат палива тепловозами запропонована організація моніторингу технічного стану й створений метод для розрахунку залишкового ресурсу паливної апаратури*

*Ключові слова: аналіз, відхилення, залежність, інтервал, метод, показник, розмах, фрактал, часовий ряд*

*В статье рассмотрена сущность R/S-метода для анализа временных рядов. Определены основные положения по расчету фрактального показателя Херста и анализа его характера для различных условий составляющих временного ряда. На основе расчета и оценки показателя Херста для временного ряда расхода топлива тепловозами предложена организация мониторинга технического состояния и создан метод для расчета остаточного ресурса топливной аппаратуры*

*Ключевые слова: анализ, отклонение, зависимость, интервал, метод, показатель, размах, фрактал, временной ряд*

УДК 629.424.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.29353

## АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ Й ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ ТЕПЛОВОЗА З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ХЕРСТА

**В. І. Дробаха**

Кандидат технічних наук,  
начальник виробничого управління  
Департамент локомотивного  
господарства Укрзалізниці  
вул. Тверська, 5, м. Київ, Україна, 03680  
E-mail: UZ@uz.gov.ua

**О. Д. Трихліб**

Начальник відділу  
Відділ «Нормування  
паливно-енергетичних ресурсів»  
Служба локомотивного  
господарства Південної залізниці  
вул. Червоноармійська, 7, м. Харків, Україна, 61052  
E-mail: toplivo.pz@mail.ru

### 1. Вступ

Організація експлуатаційної роботи локомотивного парку відіграє першорядну роль у показниках його ефективності. Полігон поїзної й маневрової роботи тепловозів, особливості профілю колії та характер навантаження, що реалізується силовими установками, частка гарячих простоїв і ступінь залучення в пасажирському русі, швидкості руху і їхнього обмеження – все це приводить до того, що питомі витрати дизельного палива тепловозів однієї серії, працюючих у різних регіонах експлуатації, а також їх технічний стан значно відрізняються. У процесі експлуатації тепловоза поступово відбувається погіршення його технічного стану. Процес зношування й розрегулювання спостерігається по всіх основних вузлах й системах дизеля. Результатом такого погіршення технічного стану є не тільки зниження надійності роботи, але й збільшення витрат палива. У результаті досліджень проведених у локомотивних депо Південної залізниці й ряді підприємств промислового залізничного транс-

порту виявлено, що технічний стан 70 % локомотивів, що перебувають в експлуатації, не відповідає вимогам нормативно-технічної документації.

Використання системи контролю БІС-РМ, значне розширення її інформаційних можливостей, дозволяє не тільки одержувати точні й об'єктивні показники паливовикористання, але й здійснювати аналіз технічного стану тепловоза. Зафіксовані системою контролю показники, здійснювані з упорядкованої періодичністю, можуть бути подані у вигляді тимчасового ряду й підвладні відповідній математико-статистичному аналізу для виявлення їхньої структури й прогнозування.

Останні роки ознаменувалися зростаючим інтересом до пошуку моделей нелінійної поведінки часових рядів. Це пояснюється тим, що нелінійні моделі можуть уловлювати дуже складні процеси, на основі теорії хаосу. Найбільш адекватним математичним апаратом для дослідження динаміки й структури таких рядів є фрактальний аналіз, особливе значення якого полягає в тому, що він здатний урахувати поведжен-