

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕМБРАНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЭС

Н.Д. ЧИЧИРОВА, А.А. ЧИЧИРОВ, Т.Ф. ВАФИН, А.И. ЛЯПИН, А.Г. ФИЛИМОНОВ

Казанский государственный энергетический университет

*Рассмотрен опыт эксплуатации водоподготовительных установок с использованием электромембранных модулей на отечественных ТЭС.*

*На примере конкретной ТЭС обоснована целесообразность использования электромембранных модулей для утилизации высокоминерализованных отходов водоподготовки.*

*Ключевые слова: ТЭС, электромембранный модуль, обессоливание, концентрирование.*

Основными проблемами при подготовке воды для восполнения потерь в технологических циклах промышленных предприятий являются защита окружающей среды от сброса засоленных стоков, снижение затрат на обессоливание за счет сокращения расхода реагентов, автоматизации процессов подготовки воды и уменьшения потребления ионообменных смол.

Минимизация сбросов сточных вод требует повышения коэффициента водооборота, создания малоотходных и безотходных схем водоснабжения. Это должно быть реализовано не только путем усовершенствования многих существующих технико-экономических решений по обработке воды различного состава, необходим также учет экономического влияния примесей технологических потоков, используемых реагентов и конкретные экономическая и социологическая оценки ущерба, причиняемого окружающей среде в результате сбросов [1].

Реализация данной концепции возможна по двум направлениям.

Первое направление основано на разработке и внедрении экономичных и экологически совершенных технологий подготовки добавочной воды. В этом аспекте разработка эффективных технологических схем водоподготовки с сохранением базисного оборудования является наиболее перспективным направлением, отвечающим поставленным требованиям, в особенности там, где речь идет о расширении и реконструкции функционирующих установок.

Второе направление связано с разработкой и внедрением технологий максимально полной утилизации образующихся жидких отходов с получением и повторным использованием в производственном цикле исходных химических реагентов.

Наиболее перспективными являются мембранные, в том числе электромембранные технологии обработки воды, позволяющие исключить сбросы солей и уменьшить потребление воды на собственные нужды водоподготовительных установок.

Результатом внедрения разработок с использованием электромембранных технологий является перспектива создания замкнутых производственных циклов при минимизации производственных отходов, сокращение удельного потребления природных ресурсов и энергии.

Существует несколько основных направлений использования электромембранных технологий [2,3], при реализации каждого из которых применяются аппараты и установки в той или иной мере отличающиеся конструктивно:

ED – электромембранные модули, в которых анод выполнен из нерастворимого материала (например, из платинированного титана), а катод – из обычного металла (например, нержавеющей стали). Данные модули имеют ограниченное применение, так как в них не предусмотрен реверс электрических и гидравлических потоков.

EDR – наиболее распространенная конструкция электромембранных модулей, в которых совмещен реверс полярности и гидравлических потоков. Данная конфигурация оптимальна для деминерализации, поскольку за счет реверса удается минимизировать отложение солей на мембранах. Данные модули используются для опреснения слабоминерализованных вод в целях получения питьевой воды, глубокого обессоливания воды безреагентным методом (водоподготовка для ТЭЦ, котельных и бойлеров).

EDA – система асимметричного электродиализа. Архитектура в целом идентична EDR. Однако за счет особенностей перераспределения потоков внутри аппарата при реверсе качество диализата и рассола различно: в рабочем режиме оно выше, чем в режиме «промывка». Именно поэтому электродиализные аппараты этого типа называются асимметричными и используются для обессоливания молочной сыворотки и облагораживания вин и фруктовых соков в пищевой промышленности, очистки растворов от неорганических веществ в химической и фармакологической промышленности.

EDI – процесс электродеионизации. Возможны различные конструкции аппаратов. Основное отличие состоит в том, что ячейки между мембранами заполнены ионообменным материалом (смолами или волокном). EDI чаще используют для финишной очистки воды, например, в теплоэнергетике или для получения «сверхчистой» воды для радиоэлектронной промышленности.

EDB – электродиализ с биполярными мембранами. Получил широкое распространение для разложения солей, получения высококонцентрированных растворов электролитов и производства кислот и щелочей из растворов соответствующих солей.

DD(E) – диффузный диализ. Специфический процесс, основанный на использовании аппаратов с мембранами одного типа (например, анионообменными). Применяют для селективного выделения кислоты из «грязных» кислых растворов, содержащих, наряду с кислотой, значительное количество ионов цветных металлов, разделения каучуко-латексных смесей, очистки промышленных растворов и сточных вод.

VCE – блочно-камерный электродиализ. Технология основана на формальном использовании воды в качестве мембраны. Поток обрабатываемой воды протекает между мембранами и постоянно обедняется солями (деминерализуется), а концентрат, находящийся внутри мембран, обогащается солями. В данном процессе прокладки и коллекторы растворов не используются. Применяют для выделения соли из океанской воды. Основные достоинства – практически 100 %-е использование поверхности мембран, простота и низкая стоимость пакета.

BALC – процесс основан на комбинации нейтральных и ионообменных мембран. Используют для регенерации химикатов из сульфатных варочных щелоков.

На наш взгляд целесообразно рассматривать электромембранные технологии в качестве альтернативы традиционной ионообменной технологии водоподготовки на тепловых электрических станциях ввиду целого ряда преимуществ.

Основными критериями эффективности электромембранных технологий являются:

- фактическое ресурсосбережение, экономия материалов, реагентов, электроэнергии, а также трудозатрат;
- предотвращение ущерба от загрязнения окружающей среды;
- эффект, связанный с предотвращением безвозвратных потерь ценных компонентов, содержащихся в обрабатываемой воде, а также в сточных водах водоподготовительных установок.

Использование электромембранных технологий позволяет без затрат теплоты, при незначительном расходе электроэнергии, химических реагентов и низкой металлоемкости конструкций дополнительно сконцентрировать жидкие отходы с последующей утилизацией как продуктов обессоливания, так и продуктов концентрирования.

На рис.1 показаны примеры реализации электромембранных технологий на отечественных ТЭС.

Развитие электромембранных технологий в нашей стране началось в 70-х годах, а в 90-е годы в СССР начато промышленное освоение электродиализных аппаратов АЭ-25, серийно выпускаемых ПО «Союзэнергоавтоматика» для нужд энергетики.

Электродиализные аппараты АЭ-25 состояли из двух модулей производительностью 12,5 т/ч, каждый модуль имел вертикальную ось электрического поля и собирался из 150 пар катионитных и анионитных мембран.

Для установления оптимальных режимов эксплуатации в 1981-1982 гг. были проведены опытно-промышленные испытания электродиализной установки АЭ-25 на Безымянской ТЭЦ [4]. Производительность установки составила 100 т/ч. Электромембранная установка являлась последней ступенью подготовки воды для подпитки котлов давлением 4,0 МПа. Питание аппаратов осуществлялось умягченной водой, предварительно прошедшей известкование и коагуляцию в осветлителях, механическую фильтрацию и две ступени Na-катионирования.

Оценка экономичности работы аппарата производилась путем подсчета удельных расходов электроэнергии на выработку 1 тонны воды и на перенос 1 г-экв солей. Первый показатель позволяет сопоставить работу аппарата при разных расходах и разных солесодержаниях исходной воды при прочих равных условиях, второй – дать интегральную оценку экономичности обработки в любом режиме эксплуатации аппарата.

Сопоставление полученных данных позволяет считать наиболее рентабельным режим эксплуатации электродиализного аппарата АЭ-25 на воде с солесодержанием 200-500 мг/л при следующих параметрах: производительность 10 т/ч; напряжение на ячейку 2-2,5 В; критическая плотность тока 10-12 А/м<sup>2</sup>; температура обрабатываемой воды 27-30 °С; степень концентрации рассола 4-5.

При этом степень обессоливания составляет 40-43 %, расход электроэнергии на обработку 1 тонны воды 0,25 кВт·ч, а на удаление 1 г-экв солей 0,09 кВт·ч.

Обессоливающая электромембранная установка Кисловодской ТЭЦ производительностью 25 м<sup>3</sup>/ч включала в себя два модуля, баки исходной воды, дилюата и рассола ёмкостью 15 м<sup>3</sup> каждый, перекачивающие насосы [5].

Исходная вода, прошедшая сульфугольные механические фильтры, в которых улавливались взвешенные вещества, подавалась в камеры обессоливания и концентрирования. Пройдя камеры обессоливания, частично-обессоленная вода

(дильуат) поступала на химводоочистку для дальнейшего умягчения в Na-катионитных фильтрах, а концентрат (рассол) сбрасывался в канализацию, тем самым осуществлялась продувка рассольного контура.



Рис.1. Опыт освоения электродиализных технологий отечественными ТЭС

Испытания всей установки и каждого модуля в отдельности проводились в диапазоне гидравлических нагрузок 25-100 % от номинальной и величине подводимого напряжения 0,06-3,16 В на ячейку.

На основании результатов испытаний обессоливающей электродиализной установки на Кисловодской ТЭЦ сделан вывод о том, что её использование позволяет получать степень обессоливания 28-30 % при расчетной гидравлической нагрузке 25 м<sup>3</sup>/ч. При снижении нагрузки на 75 % степень обессоливания растений составляет 50 %.

Удельный расход электроэнергии на обработку  $1 \text{ м}^3$  воды составил  $0,013-0,26 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ , а на перенос  $1 \text{ г-экв}$  солей –  $0,02-0,09 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ .

В 1989 году была внедрена электромембранная установка на химводоочистке Кемеровской ГРЭС [6].

Вода на установку отбиралась перед декарбонизатором после Н-катионитных фильтров 1 ступени. В схеме были предусмотрены предварительная, перед подачей на ЭДУ, декарбонизация воды и сбор её в баке декарбонизированной воды. Из него вода подавалась двумя автономными насосами в отдельные тракты рассола и дилюата.

Вода, прошедшая электродиализную обработку, сливалась в соответствующие промежуточные ёмкости и оттуда подавалась насосом дилюата в технологическую схему, а насосом рассола - на рециркуляцию в рассольный тракт.

К ноябрю 1989 года установка проработала 1000 часов непрерывно с солесъёмом 45-55 %.

На Зуевской экспериментальной ТЭЦ ВТИ [7,8] в течение двух с половиной лет в базовой эксплуатации находилась электромембранная установка УЭО-50-4/12,5.

Установка была включена в линию Na-катионированной воды, направляемой в схему подпитки котлов электростанции. Такое включение позволяло снизить солесодержание умягченной воды, а следовательно, и продувку котлов, а также получать растворы солей, которые использовались при регенерации Na-катионитных фильтров.

В течение одного года эксплуатировалась установка УЭО-50-4/12,5 первого выпуска, а затем модернизированная установка этого же типа ЭОУ-2-Р21К.

В установку подавалась вода, прошедшая стадии механической фильтрации, двухступенчатого Na-катионирования и тонкой очистки в патронном фильтре с элементами, имеющими размер пор 5-10 мкм.

Частично обессоленная вода подавалась в котло-турбинный цех, а концентрат использовался при регенерации Na-катионитных фильтров.

Степень обессоливания достигала 50-58 % при напряжении 750 В и производительности  $35 \text{ м}^3/\text{ч}$ . При напряжении 500-600 В средняя степень обессоливания составляла 40-45 %. Выход концентрата не превышал  $0,36 \text{ м}^3/\text{ч}$ , а его солесодержание достигало 90-100 г/л (в отдельных опытах – 110 г/л). Удельный расход электроэнергии составлял  $0,33-0,18 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{г-экв}$  удаляемых солей. Среднее значение удельного потока ионов через мембраны равнялось  $0,7-0,9 \text{ г-экв}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ , выход по току находился в диапазоне 65-90 %.

В 1970 году разработан рабочий проект головной опытно-промышленной электромембранной установки суммарной производительностью  $250 \text{ м}^3/\text{ч}$  для Новочеркасской ГРЭС [4,9]. Технологическая схема установки включала коагуляцию воды сернокислым алюминием в осветлителях, фильтрацию в слое нерегенерируемого сульфогля, частичное обессоливание воды методом электродиализа в одну ступень и трехступенчатое химическое обессоливание. Включением электромембранных аппаратов в комбинированную схему обессоливания Новочеркасской ГРЭС на осветленной или Na-катионированной воде, как показали расчеты, можно достичь сокращения потребления серной кислоты на 1000 т в год, едкого натра – на 600 т в год по сравнению с обессоливанием только на ионитах.

Комбинированная схема водоподготовки с электромембранными аппаратами АЭ-25 (производительность  $320 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) запроектирована МО АТЭП для Южной ТЭЦ Мосэнерго [10]. Приведенные затраты при комбинированной схеме меньше, чем при обычном ионном обмене. Кроме того, сброс отработанных соленых вод сократился на 188 тыс.  $\text{м}^3/\text{год}$ . Экономия серной кислоты составила 735 т/год, едкого натра –

450 т/год, извести – 300 т/год. Водопотребление из реки Москвы уменьшилось с 4200 до 1372 тыс. м<sup>3</sup>/год.

На ТЭЦ-25 Мосэнерго электромембранные аппараты запроектированы для концентрирования слабых растворов поваренной соли, образующихся при новой технологии, от 1,0 до 10,0 %. Это позволило уменьшить расход привозной поваренной соли и снизить водопотребление.

В ходе эксплуатации электромембранных модулей на Уфимской ТЭЦ-2 использовалась Na-катионированная вода с солесодержанием 250-300 мг/л [11]. Экспериментально установлено, что при напряжении 300 В и расходе Na-катионированной воды 13,8 т/ч за восемь часов непрерывной работы одного модуля можно обессолить 6 м<sup>3</sup> воды от солесодержания 1350 до 10 мг/л. Сила тока в цепи модуля снижается при этом с 17-18 до 0,2-0,5 А. Расход электроэнергии на обессоливание составляет в среднем 0,078 кВт·ч/г-экв (2 кВт·ч/м<sup>3</sup>). При расходе обессоливаемой воды 3,67 т/ч и напряжении 300 В снизить солесодержание воды в баке до 12,5 мг/л удастся только за 16 часов работы модуля. Причем выработка этой воды составляет около 3 м<sup>3</sup>. Снижение напряжения до 150 В при расходе обессоливаемой воды 13,8 т/ч позволило только через 12 часов непрерывной работы получить в баке воду с солесодержанием менее 10 мг/л. Расход электроэнергии составил в среднем 0,06 кВт·ч/г-экв (1,8 кВт·ч/м<sup>3</sup>).

Приведенные выше примеры позволяют сделать вывод о возможности использования электромембранных технологий в схемах ВПУ ТЭС. Следует отметить, что уровень исследовательских работ в Советском Союзе был чрезвычайно высок, однако все исследования не выходили из стадии лабораторных или опытно-промышленных испытаний, в то время как за рубежом уровень промышленного освоения электромембранных технологий был достаточно высок.

После начала перестройки работы в этом направлении вообще были прекращены, и в настоящее время, в сравнении с Японией и США, в области электромембранной технологии в России наблюдается примерно 20-летнее отставание.

Одними из самых перспективных технологий в мире для получения воды со стабильным удельным сопротивлением менее 10 МОм·см в настоящее время являются системы ультрафильтрация-обратный осмос-электродеионизация (UF-RO-EDI) [12-14].

В 2010 году технология водоподготовки, базирующаяся на применении электродеионизационных модулей, была реализована на Ноябрьской ПГЭ [15]. Для подпитки современного энергогенерирующего оборудования парогазовой электростанции в Ноябрьске требовалась вода высокого качества с удельной электрической проводимостью не более 0,3 мкСм/см, содержанием кремниевой кислоты не более 15 мкг/л, соединений меди не более 2 мкг/л, соединений железа (с учетом пусковых периодов) не более 10 мкг/л. Самым оптимальным вариантом стало применение интегрированной мембранной технологии. Была разработана схема, сочетающая установки ультрафильтрации, обратного осмоса и электродеионизации [15]. В ней исходная вода подается на установку ультрафильтрации, где проходит очистку от взвешенных и коллоидных веществ и, частично, органики. Далее вода подается на установку обратного осмоса, где проходит ее очистка от растворенных солей и остатков органических соединений. После этого вода проходит доочистку на установке электродеионизации.

Данная система стала первой реализацией интегрированной мембранной технологии в отечественной энергетике. Она успешно эксплуатируется на энергообъекте с июня 2010 г. и позволяет получать высокоочищенную воду со значением удельной электропроводности 0,06 мкСм/см.

Внедрение оборудования для электродеионизации воды на Новочеркасской ГРЭС [15] позволило получать стабильно высокое качество глубокообессоленной воды с электропроводностью 0,09 мкСм/см, повысить уровень автоматизации технологических процессов, повысить надежность работы системы в целом, значительно сократить потребление минеральных кислот и щелочей, прогнозируемо уменьшить затраты на ремонт и обслуживание оборудования, исключить образование высокоминерализованных сточных вод.

Реализованная технологическая схема является оптимальной по затратам на расходные материалы, обслуживание и эксплуатацию системы получения высокочистой воды, нежели схема обессоливания с использованием ионообменных фильтров, применение которых характеризуется большими затратами на ведение реагентного хозяйства, необходимостью выделения дополнительных площадей под склады реагентов и дополнительный персонал для обслуживания реагентного хозяйства.

В сентябре 2010 года состоялся запуск системы водоподготовки на базе модулей электродеионизации на Путиловской ТЭЦ [15].

В отечественной энергетике это одна из первых и крупнейших систем ВПУ на основе интегрированных мембранных технологий. Применение данной схемы позволяет получать глубокодеминерализованную воду стабильно высокого качества и одновременно значительно снизить расход реагентов и сократить эксплуатационные затраты на производство 1 м<sup>3</sup> очищенной воды в 2-5 раз.

Специалистами «НПК Медиана-Фильтр» разработан проект для ВПУ Адлерской ТЭЦ [15].

Конструкция водоподготовительной установки разработана согласно техническим требованиям для подготовки подпиточной воды котлов, подпитки теплосети, а также подготовки воды для увлажнения охлаждающего воздуха в «сухих» градирнях.

Расчет технологической схемы производился из расчета подготовки глубоко обессоленной воды – 15 м<sup>3</sup>/ч, на подпитку закрытой теплосети – 50 м<sup>3</sup>/ч, частично обессоленной воды для нужд градирен – 80 м<sup>3</sup>/ч.

По схеме исходная вода с расходом 93 м<sup>3</sup>/ч поступает на блок дисковых самопромывных фильтров, на которых происходит очистка от крупных взвешенных частиц размером более 400 мкм, с целью защиты последующего технологического оборудования. Пройдя грубую очистку, вода подается на установку ультрафильтрации, на которой происходит удаление взвешенных веществ, дезинфекция (удаление 99,99% бактерий и вирусов), осветление воды (снижение мутности и цветности воды), очистка от железа и марганца, удаление коллоидного кремния и органических веществ, ультратонкая очистка воды.

Осветленная вода с установки ультрафильтрации поступает в накопительные ёмкости, из которых с помощью насосной станции подается на первую ступень двухступенчатой установки обратного осмоса, предназначенную для обессоливания воды.

Частично обессоленная вода после первой ступени обратного осмоса поступает в накопительный бак со встроенным эжекторным декарбонизатором, и с помощью насосной станции подается на вторую ступень обратного осмоса, с целью более глубокого обессоливания и соблюдения требований, предъявляемых к воде, подаваемой на установку электродеионизации. Далее пермеат поступает на установку электродеионизации, на которой происходит финишное удаление растворенных солей до требуемых показателей. Исходная вода разделяется на два потока и в процентном соотношении 10:90 направляется на модули электродеионизации. Поток,

соответствующий 10 % производительности установки, предназначен для непрерывной промывки камер концентрата. Концентрат собирается в сборном резервуаре и непрерывно возвращается на повторное использование и обессоливается на блоках обратного осмоса первичного обессоливания, что снижает расход воды на собственные нужды и потребление исходной воды. Установка проста в эксплуатации и обеспечивает производительность 15 м<sup>3</sup>/ч при электропроводности менее 0,2 мкСм/см. После установки электродеионизации вода поступает в накопительные ёмкости, из которых с помощью насосной станции подается в технологический цикл.

Схема подготовки добавочной воды с использованием электродеионизации реализована также на Краснодарской ТЭЦ (Лукойл-Кубаньэнерго) [15]. Номинальная производительность по обессоленной воде – 16,5 м<sup>3</sup>/ч. На установке обессоливания в качестве исходной воды используется вода поверхностного источника – реки Кубань (напорные циркуляционные системы технического водоснабжения). После установки обратного осмоса второй ступени пермеат с каждой установки обратного осмоса подаётся на свою установку электродеионизации для доочистки пермеата до требуемых норм качества обессоленной воды. Получаемый фильтрат с установки электродеионизации направляется в бак запаса конденсата, концентрат поступает в бак пермеата для повторного использования.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что схемы получения обессоленной воды с использованием электромембранных модулей хорошо зарекомендовали себя в условиях отечественных ТЭС и в полной мере могут рассматриваться как альтернатива ионообменным технологиям.

Аппараты для электродеионизации производят многие компании мира, а рынок электромембранных технологий неуклонно растёт, тем более что срок окупаемости установок минимален. Только за счет отказа от использования стандартных химических реагентов: едкого натра и кислоты, используемых для регенерации ионообменных смол, удастся окупить установку за год или чуть более.

Мы считаем, что существенного экологического и экономического эффектов в условиях ТЭС возможно добиться за счет внедрения электромембранных модулей в схемы переработки стоков водоподготовительных установок [16-19].

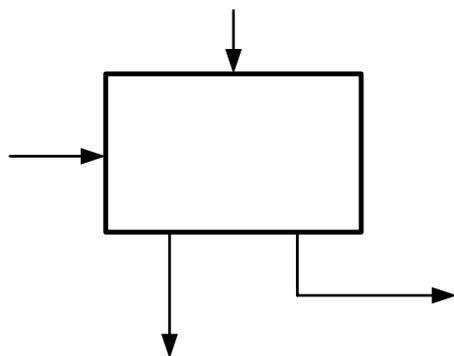
Подтверждением вышесказанного является технико-экономическая оценка эффективности реализованной нами технологической схемы утилизации высокоминерализованных сточных вод установки термического обессоливания Казанской ТЭЦ-3 [20-23].

Казанская ТЭЦ-3 – самая мощная станция Казанского энергорайона. В течение ряда лет на станции осуществлялось поэтапное внедрение современных технологий, направленных на снижение себестоимости обессоленной воды, сокращение потребления исходной воды, химических реагентов и создание замкнутого цикла водопотребления с полным исключением стоков [24,25].

На завершающем этапе модернизации нами разработан ряд схем [26], включающих в качестве основного элемента электромембранные модули, позволяющие выделить ценные компоненты, содержащиеся в продувочной воде испарителей, с последующим их возвратом в производственный цикл станции.

С учетом анализа капитальных и эксплуатационных затрат для промышленной реализации выбрана технологическая схема, позволяющая получать в результате электромембранной переработки продувочной воды испарителей чистые умягченный и щелочной растворы. Первый используется для подпитки теплосети, второй – для регенерации анионитовых фильтров I ступени [27,28].

На рис. 2. показана структура потоков в процессе электромембранной переработки продувочной воды испарителей с использованием результатов расчета материального баланса Казанской ТЭЦ-3 [29].



**Обессоленная вода**  
 **$G_{ОВ}=0,1$  т/ч**

Рис. 2. Структура потоков в процессе электромембранной переработки продувочной воды испарителей

В результате обработки 1 тонны продувочной воды с общим солесодержанием 30 кг/т образуется  $G_{Щ} = 0,05$  тонны щелочного раствора,  $G_{Д} = 1,05$  тонн чистого солевого раствора. На вход установки подается  $G_{ОВ}=0,1$  тонны обессоленной воды.

Количество неиспользованной продувки составляет около 30 т/сут зимой и около 7,2 т/сут летом. В течение года количество неиспользованной продувки составляет около  $G_{П}=6800$  т/год.

Себестоимость химически очищенной воды ( $C_{ХОЧВ}$ ), расходуемой на подпитку тепловой сети, составляет 21,09 руб/т. Себестоимость обессоленной воды ( $C_{ОВ}$ ) составляет 41,41 руб/т. Расчет себестоимости воды выполнен с использованием данных калькуляции расходов на производство химически очищенной и химически обессоленной воды Казанской ТЭЦ-3 за 2010 г.

Экономическая эффективность технологического процесса извлечения щелочи из продувочной воды испарительной установки обусловлена возможностью замещения части щелочного раствора, используемого для регенерации анионитовых фильтров. Стоимость замещаемого щелочного раствора рассчитана исходя из стоимости технической щелочи (46% раствор) и составляет  $C_{Щ}=4410,5$  руб/т. Для реализации процесса затрачивается  $G_{э/э}=13$  кВт·ч электроэнергии.

За 2011 год удельный расход топлива на отпуск электрической энергии по Казанской ТЭЦ-3 составил  $b_{э/э}=309,7$  г/кВт·ч. Стоимость 1 тонны условного топлива составила  $C_T=2686$  рублей. Топливная составляющая себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии, руб/кВт·ч

$$C_{Тэ} = b_{э/э} \cdot C_T \cdot 10^{-6} = 309,7 \cdot 2686 \cdot 10^{-6} = 0,832.$$

Экономическая эффективность использования электромембранной установки за счет извлечения в процессе переработки продувочной воды испарительной установки чистого щелочного и умягченного солевого раствора с возвратом их в цикл станции, руб,

**Продувочная вода**  
**испарителей**  
 **$G_{П}=1$  т/ч**

**ЭМУ**

**Щелочной**  
**раствор,**  
 **$G_{Щ}=0,05$  т/ч**

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= G_{\text{п}} \cdot (G_{\text{щ}} \cdot C_{\text{щ}} + G_{\text{с}} \cdot C_{\text{хочв}} - G_{\text{ов}} \cdot C_{\text{ов}} - G_{\text{э/э}} \cdot C_{\text{тс}}) = \\ &= 6800 \cdot (0,05 \cdot 4410,5 + 1,05 \cdot 21,09 - 0,1 \cdot 41,41 - 13 \cdot 0,832) = 1548445. \end{aligned}$$

Дополнительный экономический эффект образуется за счет полного исключения сброса загрязняющих веществ, содержащихся в продувочной воде испарителей. Сбросы загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты, подземные водные объекты и на водосборные площадки относятся к видам негативного воздействия на окружающую среду (п. 2 ст. 16 Федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»). Негативное воздействие на окружающую среду является платным. Формы платы определяются Законом об охране окружающей среды и иными федеральными законами.

Плата за сбросы загрязняющих веществ в водные объекты подразделяется на плату:

- в пределах установленных нормативов сбросов;
- в пределах установленных лимитов сбросов;
- за сверхлимитные сбросы (за превышение установленных нормативов сбросов или установленных лимитов сбросов, а также за сбросы при отсутствии разрешительной документации).

В случае отсутствия у природопользователя оформленного в установленном порядке разрешения на сброс вся масса загрязняющих веществ учитывается как сверхлимитная, и плата за загрязнение окружающей природной среды в таких случаях определяется путем умножения соответствующих ставок платы за загрязнение в пределах установленных лимитов на пятикратный повышающий коэффициент. Соответствующие нормативы платы за загрязнение окружающей среды определены Постановлением Правительства Российской Федерации от 12.06.2003 № 344 (в редакции постановления Правительства 01.07.2005 № 410). Фактическая масса годовых сбросов загрязняющих веществ указывается водопользователем в ежегодной государственной статистической отчетности по форме № 2-ТП, составленной на основании обработки журналов первичной отчетности.

Объём сброса сточных вод с Казанской ТЭЦ-3 в 2010 году составил 1469 тыс. м<sup>3</sup>. Суммарная плата по всем загрязняющим веществам в 2010 году составила  $P_{2010} = 30566$  рублей. В таблице представлены данные по концентрации загрязняющих веществ, входящих в состав продувочной воды испарительной установки.

Таблица

Концентрации загрязняющих веществ в продувочной воде испарителей

№ п/п	Наименование загрязняющего вещества	Концентрация загрязняющего вещества $C_{з.в.}, \text{т/м}^3$
1	Взвешенные вещества	0,00011
2	Железо	0,000013
3	Нитраты	0,0002
4	Сульфаты	0,0155
5	Хлориды	0,0032

Значительная часть рассчитанной экономической эффективности образуется за счет снижения платы за сверхлимитный сброс загрязняющих веществ, составляющей 4898 рублей.

Таким образом, общая экономическая эффективность использования электромембранной установки для утилизации избытка продувочной воды испарителей образуется за счет извлечения в процессе её переработки ценных продуктов,

возвращаемых в цикл станции, а также за счет исключения сброса входящих в её состав загрязняющих веществ, руб,

$$\Theta = \Theta_1 + \Theta_2 = 1548445 + 5054 = 1553499.$$

Следует также отметить, что составляющая экономической эффективности за счет сокращения сбросов будет увеличиваться. Минприроды России разработало проект постановления Правительства РФ «Об утверждении Порядка исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду». Проект Постановления разработан во исполнение статьи 16 Федерального закона «Об охране окружающей среды» и доработан по замечаниям и предложениям, поступившим по итогам его рассмотрения в заинтересованных федеральных органах исполнительной власти и органах исполнительной власти субъектов Российской Федерации.

Проектом предлагается утверждение порядка исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду взамен действующего в настоящее время порядка определения платы и ее предельных размеров за загрязнение окружающей природной среды, размещение отходов и другие виды вредного воздействия, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 632 от 28.08.1992 г. Предусматривается, что нормативы платы за выбросы и сбросы устанавливаются по каждому загрязняющему веществу; за размещение отходов – по классам опасности отходов; за иные виды негативного воздействия – по уровням негативного воздействия на окружающую среду. Предполагается, что исчисление платы за выбросы, сбросы загрязняющих веществ, иные виды негативного воздействия на окружающую среду в пределах установленных нормативов допустимого воздействия осуществляется путем умножения соответствующих нормативов платы на объем негативного воздействия с применением коэффициентов, учитывающих экологические факторы. При превышении нормативов допустимого воздействия плата исчисляется с применением поэтапно вводимых повышающих коэффициентов:

- 5-кратного до 31.12.2011;
- 25-кратного с 01.01.2012 по 31.12.2015;
- 100-кратного – с 01.01.2016.

Введение повышающих коэффициентов связано с обеспечением сопоставимости размеров негативного воздействия сверх допустимых нормативов с затратами, необходимыми для предотвращения такого воздействия (очистка загрязненных сточных вод, выбросов в атмосферный воздух и т.д.). Поэтапное введение этих коэффициентов производится с целью предоставления предприятиям возможности строительства очистных сооружений и принятия других мер по сокращению негативного воздействия на окружающую среду. В настоящее время проект постановления находится на согласовании в подведомственных федеральных органах государственной власти, Министерстве финансов Российской Федерации, Министерстве экономического развития Российской Федерации и Министерстве здравоохранения и социального развития Российской Федерации. Предлагаемые проектом решения соответствуют основным направлениям деятельности Правительства Российской Федерации на период до 2012 года в части формирования новых экологических стандартов жизни и внедрения механизмов экономического стимулирования предприятий, применяющих экологически чистые технологии.

Таким образом, на примере Казанской ТЭЦ-3 обоснована экологическая и экономическая эффективность использования электромембранных технологий в схемах переработки жидких отходов водоподготовительных установок ТЭС. Разработанные нами схемы могут быть использованы как при строительстве новых станций, так и при модернизации существующих.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт № 14.В37.21.0658) в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» за 2012-2013 годы.*

### **Summary**

*The experience of the operation of water treatment plants using electromembrane-modules was summarised in domestic thermal power plants.*

*The expedience of electromembranic module's using in the waste water treating was grounded for concrete TPS.*

**Keywords:** *Thermal Power Station (TPS), electromembrane module, demineralisation, concentration.*

### **Литература**

1. Высоцкий С.П. Снижение затрат и сокращение стоков при обессоливании воды // Электрические станции. 1987. №5. С.20-23.
2. Пилат Б.В. Основы электродиализа. М.: Аваллон, 2004. 456 с.
3. Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т. Электродиализ природных и сточных вод. М.: АСВ, 2001. 119 с.
4. Ялова А.Я., Зак И.Г., Сычева Л.А. Опыт-промышленные испытания электродиализных аппаратов АЭ-25 // Теплоэнергетика. 1983. №4. С.51-53.
5. Рязечкин В.Я., Привалов Н.А. Испытание электродиализной установки АЭ-25 в промышленных условиях // Энергетик. 1982. №1. С.30-31.
6. Блогерман М. К. Вдовенко В. В., Марченко С. В., Голубец В. С. Опыт внедрения электродиализной установки // Энергетик. 1990. №10. С.28.
7. Парыкин В.С., Власова С. А., Городнев М.С. и др. Опыт-промышленные испытания электродиализной установки ЭОУ-2-Р21К в схеме обессоливания Na-катионированной воды // Энергетик. 1992. №6. С.13-14.
8. Парыкин В.С., Власова С.А., Павловский Э.П. Боброва Е.А. Опыт длительной эксплуатации электродиализной установки // Электрические станции. 1990. №9. С.87-89.
9. Смагин В.Н., Зачинский Г.А., Дробот Г.К. и др. Электродиализные установки производительностью 50 м<sup>3</sup>/ч для ТЭС и АЭС // Электрические станции. 1981. №11. С.25-27.
10. Смагин В.Н., Маринов Р.А., Дробот Г.К. и др. Опыт проектирования, наладки и эксплуатации электродиализной установки для обессоливания воды на ТЭС // Теплоэнергетика. 1983. №7. С.16-19.
11. Высоцкий С.П., Парыкин В.С., Власова С.А. Об использовании серийных электродиализных установок УЭО-50-4/12,5 для концентрирования сбросов обессоливающих установок // Теплоэнергетика. 1983. №9. С.58-60.
12. Чичирова Н.Д., Власов С.М. Баромембранные технологии в энергетике. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2011. 282с.
13. Официальный сайт ООО «Воронеж-аква» / <http://www.voronezh-aqua.ru>.
14. Официальный сайт ООО «Гидротех Инжиниринг» / <http://www.hydrotech.ru>.
15. Официальный сайт НПК «Медиана-фильтр» / <http://www.mediana-filter.ru>.
16. Вафин Т.Ф., Королёв А.Г. Реализация малоотходных технологических процессов и бессточных систем водоснабжения с применением электромембранных технологий // Материалы докладов аспирантско-магистерского семинара посвященного, Дню Энергетика. Казань: КГЭУ, 2010.
17. Вафин Т.Ф., Королёв А.Г. Ресурсосберегающая технология переработки промышленных стоков на базе электромембранных модулей // Материалы докладов XVII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва: МЭИ, 2011. Т.3. С.156-157.
18. Вафин Т.Ф., Королёв А.Г., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А. Внедрение электромембранной технологии для очистки стоков Казанской ТЭЦ-3 // Материалы докладов VII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН В.Е. Алемасова. Казань, 2010. С. 434-436.
19. Вафин Т.Ф., Королёв А.Г. Электродиализная технология переработки сточных вод ТЭС // Материалы докладов IV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». Казань: КГЭУ, 2009. Т.2. С. 153-154.

20. Вафин Т.Ф., Королёв А.Г., Ляпин А.И. Электродиализная технология разделения продувочной воды на ТЭЦ // Материалы докладов XV Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Бернардосовские чтения). Иваново: ИГЭУ, 2009. Т.1. С.205.

21. Вафин Т.Ф., Королёв А.Г., Ляпин А.И. Электродиализ продувочной воды испарительной установки на Казанской ТЭЦ-3 // Материалы докладов аспирантско-магистерского семинара посвященного Дню Энергетика. Казань: КГЭУ, 2008.

22. Вафин Т.Ф., Королёв А.Г. Применение электродиализа для переработки сточных вод // Материалы докладов Международной молодежной научной конференции «XVIII Туполевские чтения». Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2010. Т.2. С.230-231.

23. Вафин Т.Ф., Королёв А.Г. Технология переработки сточных вод ТЭС с применением электродиализа // Материалы докладов Международной научной конференции «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики и пути их решения». Саратов: СГТУ, 2010.

24. Королёв А.Г. Ресурсосберегающие технологии утилизации продувочных вод испарителей на базе электродиализной установки с возвратом щелочи в цикл станции // Материалы докладов III Всероссийского конкурса молодых специалистов инженерингового профиля в области энергетики. С. Дивноморское, Краснодарский край, 2009. С.61-71.

25. Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Ляпин А.И., Королёв А.Г., Вафин Т.Ф. Разработка и создание ТЭС с высокими экологическими показателями // Труды Академэнерго. 2010. №1. С. 34-44.

26. Вафин Т.Ф., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Закиров И.А. Технологические схемы утилизации стоков водоподготовительных испарительных установок с использованием электромембранных аппаратов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012. №1-2. С. 182-186.

27. Вафин Т.Ф., Королёв А.Г. Утилизация стоков испарительной установки с возвратом щелочи в цикл станции // Материалы докладов XVI Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва: МЭИ, 2010. Т.3. С.152-153.

28. Вафин Т.Ф., Королёв А.Г. Электродиализная установка для утилизации сточных вод ВПУ ТЭС и генерации щелочи // Материалы докладов V Международной молодежной научной конференции «Тинчуриные чтения». Казань: КГЭУ, 2010. Т.2. С.167-168.

29. Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Королёв А.Г., Вафин Т.Ф. Экологическая и экономическая эффективность внедрения ресурсосберегающих технологий на тепловых электрических станциях // Труды Академэнерго. 2010. №3. С. 65-71.

*Потупила в редакцию*

*18 октября 2012 г.*

**Чичирова Наталья Дмитриевна** – д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой «Тепловые электрические станции» (ТЭС), директор института теплоэнергетики Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8 (843) 519-42-12. E-mail: ndchichirova@mail.ru.

**Чичиров Андрей Александрович** – д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой химии Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8 (843) 253-17-16. E-mail: rinpin3@yandex.ru.

**Вафин Тимур Филаритович** – аспирант кафедры «Тепловые электрические станции» (ТЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8-917-3967844. E-mail: timy\_85@mail.ru.

**Ляпин Александр Игоревич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловые электрические станции» (ТЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(927)4181785. E-mail: lyarin81@mail.ru.

**Филимонов Артём Геннадьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Тепловые электрические станции» (ТЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8 (843) 5194252