

И. И. Адиканко, С. А. Дубенок

*Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов,
Минск, Беларусь, e-mail: Adikanko.Ivan@gmail.com, dsnega@list.ru*

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВОДОПОДГОТОВКИ НА ОБЪЕКТАХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ С ЦЕЛЮ СНИЖЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

В настоящее время основным источником водоснабжения на производственные нужды объектов теплоэнергетики Республики Беларусь являются поверхностные воды. Из-за высоких требований к показателю качества воды для нужд производства неотъемлемой частью основных производственных процессов на объектах теплоэнергетики становится водоподготовка. Водоподготовка, как совокупность процессов, на объектах теплоэнергетики может включать следующие этапы: предварительная очистка, умягчение, обессоливание, обеззараживание. Схемы водоподготовки, применяемые на объектах теплоэнергетики Республики Беларусь, разработаны в 60–70-х годах прошлого века, при этом, как показывает анализ исследований объектов теплоэнергетики, Российская Федерация активно производит модернизацию разработанных в СССР технологий и схем водоподготовки с переходом на более современные мембранные технологии. Для использования в условиях Республики Беларусь передовых научно-технических разработок в области водоподготовки объектов теплоэнергетики актуальным становится вопрос об анализе существующих методов, технологий и схем водоподготовки, а также разработка рекомендаций по их оптимизации с учетом экономических и экологических показателей с целью снижения воздействия объектов теплоэнергетики на окружающую среду и получения экономической выгоды от использования сточных вод водоподготовки в технологических процессах. В результате подготовлен эколого-экономический расчет-обоснование внедрения наилучших доступных технических методов.

Ключевые слова: водоподготовка, теплоэнергетика, умягчение, обессоливание, сточные воды

I. I. Adzikanka, S. A. Dubenok

*Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, Minsk, Belarus, e-mail: Adikanko.Ivan@gmail.com,
dsnega@list.ru*

OPTIMIZATION OF WATER TREATMENT TECHNOLOGIES ON THE OBJECTS OF HEAT POWER ENGINEERING TO REDUCE THE INFLUENCE ON WATER RESOURCES OF THE REPUBLIC OF BELARUS

At present, surface water is the main source of water supply for the production needs of thermal power facilities of the Republic of Belarus. Due to the high requirements to the water quality index for the needs of production of an integral part of the main production processes, water treatment facilities are becoming the objects of heat power engineering. Water treatment, as a set of processes, at the sites of heat power engineering can include the following stages: preliminary preparation, softening, desalination, disinfection. Water treatment schemes used at power facilities of the Republic of Belarus in the 60-70's. The Russian Federation actively implements the modernization of technologies and water treatment systems with transition to the more modern membrane technologies. In aims of the advanced scientific and technical developments in the field of thermal power facilities water treatment utilization in the Republic of Belarus, the problem of the existing methods, technologies and water treatment schemes analysis becomes actual as well as developing recommendations for their optimization, taking into account economic and environmental indicators, in order to reduce the impact of heat power facilities on environment and obtaining economic benefits from the use of wastewater treatment in the process. As a result, an environmental-economic calculation was prepared justifying the introduction of the best available technologies.

Keywords: water treatment, heat power engineering, softening, desalination, waste water

I. I. Адзіканка, С. А. Дубянок

*Цэнтральны навукова-даследчы інстытут комплекснага выкарыстання водных рэсурсаў, Мінск, Беларусь,
e-mail: Adikanko.Ivan@gmail.com, dsnega@list.ru*

АПТЫМІЗАЦЫЯ ТЭХНАЛОГІЙ ВОДАПАДРЫХОЎКІ НА АБ'ЕКТАХ ЦЕПЛАЭНЕРГЕТЫКІ З МЭТАЙ ЗНІЖЭННЯ ЎЗДЗЕЯННЯ НА ВОДНЫЯ РЭСУРСЫ РЭСПУБЛІКІ БЕЛАРУСЬ

У цяперашні час асноўнай крыніцай водазабеспячэння на вытворчыя патрэбы аб'ектаў цеплаэнергетыкі Рэспублікі Беларусь з'яўляюцца паверхневыя воды. З-за высокіх патрабаванняў да паказчыка якасці вады для патрэб вытворчасці неад'емнай часткай асноўных вытворчых працэсаў на аб'ектах цеплаэнергетыкі становіцца водападрыхтоўка. Водападрыхтоўка, як сукупнасць працэсаў, на аб'ектах цеплаэнергетыкі можа ўключаць наступныя этапы: папярэдняя ачыстка, змякчэнне, абясольванне, абеззаражванне. Схемы водападрыхтоўкі, якія прымяняюцца на аб'ектах цеплаэнергетыкі Рэспублікі Беларусь, распрацаваны ў 60–70-я гады мінулага стагоддзя, пры гэтым, як паказвае аналіз дасле-

даванняў аб'ектаў цеплаэнергетыкі, Расійская Федэрацыя актыўна праводзіць мадэрнізацыю распрацаваных у СССР тэхналогій і схем водападрыхтоўкі з пераходам на больш сучасныя мембранныя тэхналогіі. Для выкарыстання ва ўмовах Рэспублікі Беларусь перадавых навукова-тэхнічных распрацовак у галіне водападрыхтоўкі аб'ектаў цеплаэнергетыкі актуальным становіцца пытанне аб аналізе існуючых метадаў, тэхналогій і схем водападрыхтоўкі, а таксама распрацоўка рэкамендацый па іх аптымізацыі з улікам эканамічных і экалагічных паказчыкаў з мэтай зніжэння ўздзеяння аб'ектаў цеплаэнергетыкі на навакольнае асяроддзе і атрыманне эканамічнай выгады ад выкарыстання сцёкавых вод водападрыхтоўкі ў тэхналагічных працэсах. У выніку падрыхтаваны экалага-эканамічны разлік-абгрунтаванне ўкаранення найлепшых даступных тэхнічных метадаў.

Ключавыя словы: водападрыхтоўка, цеплаэнергетыка, змякчэнне, аб'ясольванне, сцёкавыя воды

Введение. В соответствии со статьей 3 Водного кодекса Республики Беларусь основными принципами охраны и использования вод являются: рациональное использование водных ресурсов, комплексное использование водных ресурсов и предупреждение загрязнения и засорения вод. Также в соответствии со статьями 37 и 42 Водного кодекса Республики Беларусь объекты теплоэнергетики как водопользователи, осуществляющие использование поверхностных водных объектов, обязаны рационально использовать воду, принимать меры по снижению потерь воды, внедрять системы оборотного и повторно-последовательного водоснабжения в целях снижения количества сбрасываемых сточных вод и уменьшения потребления воды [1].

В настоящее время основным источником водоснабжения на производственные нужды теплоэнергетики Республики Беларусь являются поверхностные водные объекты. Из-за высоких требований к показателю качества воды неотъемлемой частью основных производственных процессов на объектах теплоэнергетики становится водоподготовка. Водоподготовка требуется для питания паровых котлов, подпитки тепловых сетей и внедряется на объекты теплоэнергетики в целях обессоливания и умягчения исходной воды, является основным фактором загрязнения сточных вод. Сточные воды, образованные на различных этапах водоподготовки, могут быть загрязнены взвешенными веществами, кислотами, щелочами и солями. Воздействие на окружающую среду, оказываемое сточными водами, образовавшимися на различных этапах водоподготовки на объектах теплоэнергетики, зависит от множества факторов: объем обрабатываемой и качество исходной воды, вид применяемых технологий, использование реагентов.

Используемые технологии водоподготовки на крупных объектах теплоэнергетики, проектная мощность которых составляет 100 и более МВт, в соответствии с законодательством Республики Беларусь должны соответствовать наилучшим доступным техническим методам [2, 3]. В настоящее время на территории Республики Беларусь отсутствуют действующие нормативные правовые акты, регламентирующие наилучшие доступные технические методы в теплоэнергетике, в результате чего возникает вопрос об анализе существующих методов, применяемых в других странах. Цель исследования – используя анализ и сравнение используемых методов водоподготовки на объектах теплоэнергетики, провести оптимизацию технологий обращения с высокоминерализованными сточными водами водоподготовки на объектах теплоэнергетики Республики Беларусь.

Анализ методов. Наиболее часто применяемыми методами обессоливания воды на объектах теплоэнергетики Республики Беларусь являются: метод ионного обмена, мембранные технологии, термическая дистилляция. При этом каждый метод имеет как положительные, так и отрицательные стороны.

Метод ионного обмена характеризуется возможностью получения сверхчистой воды, обработанностью и надежностью, способностью работать при резко меняющихся параметрах питательной воды, минимальными капитальными и энергетическими затратами, меньшим расходом воды на собственные нужды (по сравнению с нанофильтрацией и обратным осмосом), минимальным объемом отходов; при этом к недостаткам метода можно отнести высокий расход агрессивных реагентов; эксплуатационные расходы, растущие пропорционально солесодержанию исходной воды, необходимость обработки регенератов и сложности с их последующей утилизацией.

Преимуществами термического метода являются минимальное количество применяемых реагентов и, как следствие, минимальный объем отходов, высокое качество получаемой воды, возможность использования избыточного тепла, удаление из воды растворенных газов. Однако стоит отметить, что при использовании данного метода возникает необходимость предварительной водоподготовки, а также большие капитальные и энергетические затраты.

Мембранные технологии характеризуются высоким качеством получаемой воды по механическим, биологическим и органическим загрязнениям, минимальным количеством реагентов, относительно низкими эксплуатационными затратами, отсутствием агрессивных реагентов и необходимости их последующей обработки. Однако при использовании этого метода существует ряд недостатков, свойственных термическому методу обессоливания.

Проведенный анализ зарубежного опыта указывает, что содержание минеральных солей в сточных водах объектов теплоэнергетики нормируется не всегда и не везде, а необходимость соответствующей очистки определяется прежде всего технико-экономическими показателями [4].

В области водоподготовки полностью безотходные технологии в настоящее время отсутствуют, при этом понятие «бессточные водоподготовительные установки» подразумевает отсутствие сточных вод и образование твердых отходов (шлам, сухие соли), которые могут быть либо товарным продуктом, либо отходом, поступающим на захоронение [5].

Как показывают результаты патентного поиска и анализа современных мировых тенденций в области водоподготовки, создание бессточных водоподготовительных установок в мире ведется по двум направлениям: усовершенствование схемы водоподготовки для максимального сокращения объемов сточных вод и переработка отходов (осадков) станций водоподготовки. Переработка отходов станций водоподготовки предусматривает повторное использование сточных вод после выделения из них твердых отходов для последующей переработки, складирования, захоронения или возможного использования.

Патентный поиск в области сокращения сброса сточных вод на станциях водоподготовки осуществлялся по трем направлениям: за счет снижения объемов используемых реагентов; за счет оптимизированных технологий водоподготовки; за счет оптимизированных технологий очистки сточных вод.

Поскольку законодательство Республики Беларусь идет по пути гармонизации с законодательством стран Европейского Союза (ЕС) и Российской Федерации (РФ) – патентный поиск по данным направлениям проводился в РБ, РФ, странах ЕС. Рассматривались исключительно действующие патенты, заявленные после 01.01.1980.

Результаты патентного поиска позволили сделать вывод о том, что наиболее глубоко вопрос сокращения сброса сточных вод от процессов водоподготовки изучен в странах ЕС, где зарегистрированы десятки тысяч патентов только по технологиям водоподготовки. Количество патентов, зарегистрированных в РФ и РБ, использование которых актуально для объектов теплоэнергетики, а также количество патентов, зарегистрированных в странах ЕС, использование которых направлено исключительно на объекты теплоэнергетики, представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Результаты патентного поиска в области сокращения сброса сточных вод на станциях водоподготовки

Объект патентного поиска	Снижение объемов используемых реагентов	Оптимизация технологий водоподготовки	Оптимизация технологий очистки сточных вод
Республика Беларусь	1	4	8
Российская Федерация	17	36	27
Европейский Союз	2	16	19

Данные патентного поиска демонстрируют, что в Республике Беларусь вопрос по снижению сброса сточных вод от объектов водоподготовки изучен мало, при этом наименее изученным направлением является сокращение за счет используемых реагентов.

Для того чтобы рассмотреть возможность повторного использования сточных вод водоподготовки необходимо определить, какие сточные воды образуются на различных стадиях водоподготовки, их химический состав и объемы образования. Ниже, на основе анализа данных, полученных в результате обследования объектов теплоэнергетики, приведены основные типы и объемы образующихся сточных вод водоподготовительных установок, содержащиеся в них загрязнения, а также способы их очистки, повторного использования и утилизации.

Результаты исследований

Сточные воды реагентного хозяйства. Данные сточные воды содержат примеси реагентов, применяемых на водоподготовительных установках (CaO , FeSO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, NaCl , H_2SO_4 , NaOH , CaCO_3). Несмотря на высокую концентрацию примесей, объем этих вод составляет 0,1–0,5 % от объема обработанной воды [6]. Целесообразно направлять их в циклические системы гидрозолоудаления с последующим использованием вод на производство тепло- и электроэнергии.

Продувочные воды осветлителей образуются ежедневно в объеме 1–3 % от объема обработанной воды и содержат до 2 % сухого шлама (CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$). Их необходимо направить в специальные уплотнители для увеличения концентрации сухого вещества в шламе до 5 % и более [7]. Осветленная вода с уплотнителей должна подаваться обратно в осветлители или на механические фильтры, а шлам – на фильтрпрессы.

Сточные воды после промывки механических зернистых фильтров образуются периодически; за одну промывку фильтра – 40–100 м³ при общем расходе 2–5 % от количества обрабатываемой воды [7]. Они загрязнены взвесью того же состава, что и продувочная вода осветлителей, но в меньшем количестве (500–1000 мг/л). Эти воды необходимо отстаивать (до содержания взвеси 50–100 мг/л) с последующей подачей на фильтры или в осветлители, а при невозможности отстаивания или при содержании взвеси после отстаивания более 100 мг/л – только в осветлителе.

Сточные воды после регенерации Na-, H-, H–Na-катионитных фильтров образуются в процессе удаления солей и включают два вида:

- отработанный раствор с содержанием регенерирующих реагентов NaCl , H_2SO_4 и вытесненных из катионита солей CaCl_2 , CaSO_4 , MgCl_2 и MgSO_4 . Их объем составляет 2–3 % от количества умягченной воды;
- отмывочные воды с содержанием тех же загрязнений, объемом 3–5 % от количества умягченной воды [7].

Для сокращения сброса сточных вод в советское время разработаны схемы с концентрированием отработанного регенерационного раствора Na-катионитовых фильтров методом электродиализа [8] и дистилляции [9]. Установка деминерализации обеспечивает возврат в систему водоснабжения завода обессоленной воды. Образующийся в результате обработки сточных вод шлам может использоваться в качестве материала для приготовления строительных растворов, а сконцентрированный раствор хлорида натрия – для нужд химводоочистки.

Основные затруднения при обработке сточных вод с помощью электродиализных аппаратов вызваны следующими причинами:

- высоким солесодержанием обрабатываемой воды и соответственно неизбежно высокой плотностью тока, что может явиться причиной прожогов мембран и прокладок при неравномерной работе ячеек и больших утечках тока;
- высоким содержанием в обрабатываемой воде органических примесей и соединений железа, что обуславливает отравление мембран и снижение эффективности работы аппарата;
- диффузией и электроосмотическими явлениями при высокой разности солесодержания в рассольных диллюатных камерах;
- возможностью образования на мембранах нерастворимых соединений.

В последние годы все большее внимание уделяется разработке и внедрению новых технологических процессов подготовки питательной воды с многократным использованием образующихся сточных вод. Это направление можно рассматривать как важнейшее в создании бессточной технологии водоподготовки на объектах теплоэнергетики. В настоящее время разработано большое количество вариантов таких схем [10]. Обязательным условием их реализации является первоначальное введение в цикл водоподготовки определенного количества солей натрия и их многократное использование, выведение из цикла кальция и магния в виде твердой фазы и удаление соединений натрия, поступающих с исходной водой и корректирующими реагентами.

Актуальность исследований в области сокращения использования реагентов на станциях водоподготовки состоит в постоянном ужесточении требований к качеству и количеству сброса сточных вод. Реагентное хозяйство служит для предварительной очистки исходной воды: в качестве основных реагентов используют известь, коагулянт (чаще всего сульфат двухвалентного железа), флокулянт, а также для регенерации ионообменных фильтров, где в качестве основных регенерационных растворов используется раствор серной кислоты.

В течение регенерации Na-катионитного фильтра первые порции отработанного регенерационного раствора содержат в основном соли жесткости, последние – преимущественно хлорид натрия. Использование для предварительной регенерации последних 50–60 % объема отработанного регенерационного раствора позволит снизить расход NaCl с 2,4–3,0 до 1,7 экв/экв, т.е. на 30–40 % [11]. Для двухступенчатых Na-катионитовых станций водоподготовок использование отработанного регенерационного раствора фильтров второй ступени для регенерации фильтров первой ступени сокращает сброс солей с установки на 10 % [11].

При прямоточном натрий-катионировании исходная вода, смешиваясь с отработанным раствором стадии регенерации, поступает в осветлитель, куда подаются растворы коагулянта, извести и соды. Вода из осветлителя собирается в бак осветленной воды и насосом подается на механический фильтр и далее на прямоточный натрий-катионитный фильтр. Данная схема отличается простотой и может внедряться на действующих установках, где применяются прямоточные фильтры. Она характеризуется относительно большим солесодержанием умягченной воды, обусловленным необходимостью подачи большего количества поваренной соли при прямотоке соответственно указанным кратностям, область применения данной схемы (из условия не превышения эквивалентного солесодержания обработанной воды над исходным) ограничивается щелочностью обрабатываемых вод не менее 3,4–4,4 мг~ экв/кг [12].

Противоточное ионирование позволяет достичь заданной глубины умягчения меньшими расходами соли, чем прямоточное. В странах ЕС применяются противоточные фильтры разнообразных сложных конструкций, которые позволяют снизить расход соли на 40–50 % по сравнению с прямоточными: со 180–200 до 102 г/г-экв (1,7 экв/экв) [13]. В РФ также налажено производство и с 1996 г. начата промышленная эксплуатация противоточных фильтров. Полученные результаты показали, что применение противоточных фильтров вместо параллельноточных позволяет в 3 раза сократить количество установленных фильтров, в 2,7 раза – объем загружаемых ионитов, в 2 раза – расход воды на собственные нужды и на 20–30 % расход реагентов [14]. Недостаток противоточного натрий-катионирования заключается в том, что остается неиспользованным верхний слой загрузки над средней дренажной системой. Указанных недостатков лишены двухпоточно-противоточные фильтры, являющиеся наиболее перспективными. Двухпоточно-противоточная конструкция ионитных фильтров отличается от противоточной изменением места расположения средней дренажной системы. В этой конструкции средний дренаж расположен примерно в середине слоя ионита.

Подача одного из потоков (регенерационный раствор или обрабатываемая вода) осуществляется одновременно сверху и снизу с отводом из средней дренажной системы, другой поток подводят в направлении сверху – вниз. Данная конструкция характеризуется отсутствием необходимости подачи блокирующего потока воды, увеличивающего объем отработавших регенерационных вод, полным использованием обменной емкости загрузки фильтра, увеличением примерно вдвое расхода фильтрата через фильтр при одной и той же скорости фильтрования в сравнении с предыдущими конструкциями, а также снижение опасности «заклеивания» щелей средней дренажной системы мелкими фракциями и устранением опасности оголения дренажной системы в процессе эксплуатации [12].

В практике водоподготовки принцип противотока часто реализуется на прямоточных фильтрах при соединении их в пары по различным ступенчатым-противоточным схемам, что также позволяет снизить расход соли на 30–40 % [15].

Известно много конструкций ионообменных фильтров непрерывного действия (ФНД), разработанных в Российской Федерации и странах ЕС. По данным опытно-промышленных испы-

таний, Na-катионирование воды в ФНД при использовании катионита КУ-2-8 позволяет снизить расход соли на 30–40 %, объем сточных вод – в 2–3 раза [16] по сравнению с установками периодического действия.

Однако разработанные в РФ конструкции ФНД основаны на движущемся слое ионита, обуславливающим повышенный износ последнего, сложность эксплуатации установки, и в практике промышленного водоснабжения получили весьма ограниченное применение [17].

Известен метод сокращения объема сточных вод ионитовых фильтров путем повышения концентрации регенерационного раствора. Как отмечается [18], этот метод весьма перспективен при необходимости переработки отработанного регенерационного раствора в товарные продукты. Однако в отношении к Na-катионитным фильтрам технология их регенерации не разработана.

В настоящее время с целью сокращения использования реагентов на станциях водоподготовки ионообменные установки заменяются на более современные мембранные [19]. Эта тенденция обусловлена как экономическими, так и эксплуатационными преимуществами новых технологий водоподготовки по отношению к традиционным. Концепция интегрированных мембранных технологий, в частности для энергетики, может включать в себя следующие мембранные установки или их комбинации: установки ультрафильтрации и нанофильтрации, обратного осмоса, мембранной дегазации, электродеионизации.

Внедрение мембранных технологий позволяет не только значительно сократить использование химических реагентов, потребление воды на собственные нужды и занимаемые площади под сооружениями водоподготовки, но повысить качество обессоленной воды и выйти на новый уровень управления процессом производства. Первым шагом на пути внедрения таких систем явилось использование установок обратного осмоса (УОО) на предприятиях энергетики для частичного обессоливания воды [20]. Эти установки заменили ранее существовавшие ионообменные фильтры первой ступени и позволили значительно (более чем в 20–40 раз) снизить потребление кислоты и щелочи для целей водоподготовки [21].

Мембраны обратного осмоса работают с давлением 0,5–8,0 МПа и задерживают ионы солей, в меньшей степени – неионные молекулы и очень малую долю растворенных газов. Для мембран обратного осмоса проход соли составляет 0,3–5 % для одновалентных ионов и 0,05–1 % для двухвалентных ионов. В настоящее время практически все модули для установок обратного осмоса изготавливаются в виде спиральных рулонных модулей. Пример спирального модуля приведен на рис. 1.

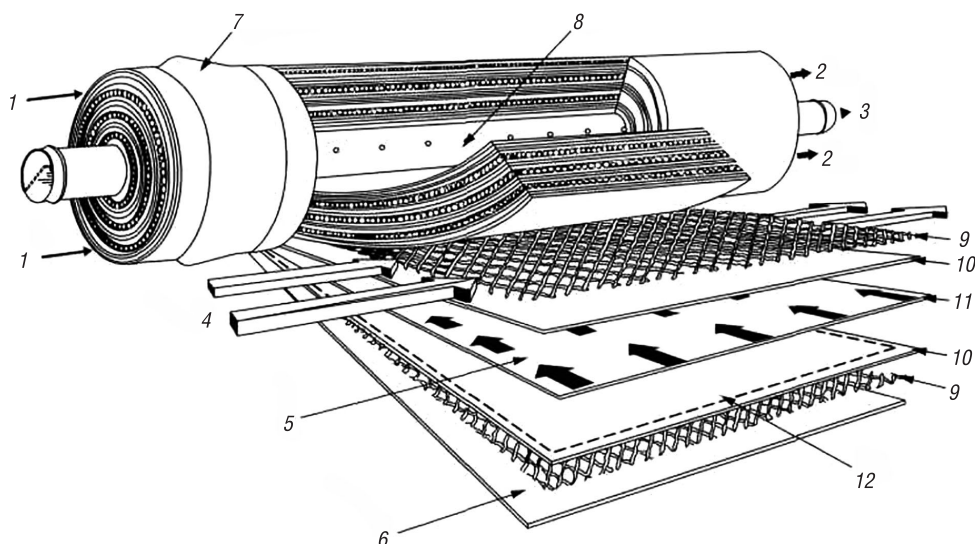


Рис. 1. Спиральный рулонный модуль [22]: 1 – поступление воды; 2 – выход концентрата; 3 – труба-коллектор пермеата; 4 – направление движения исходной воды; 5 – направление движения пермеата; 6 – защитный материал; 7 – герметичная прокладка между модулем и корпусом; 8 – отверстия коллектора пермеата; 9 – прокладка; 10 – мембрана; 11 – коллектор пермеата; 12 – линия спайки двух мембран

Диаметр элемента может варьироваться от 5 до 30 см. За счет изменения длины мембранная поверхность может составлять от 0,3 до 41 м² [22]. Несколько элементов устанавливают последовательно в едином цилиндрическом картере и присоединяют к трубке-коллектору с помощью соединителей, снабженных кольцеобразными прокладками, которые должны обеспечивать идеальную герметичность и выдерживать компрессионные нагрузки, вызванные падением напора при движении жидкости сквозь прокладки модулей.

Отрицательным аспектом использования мембран являются высокие требования к качеству и стабильности предварительной подготовки воды. Предварительная подготовка воды, применяемая сегодня на крупных объектах теплоэнергетики Республики Беларусь в виде следующего состава оборудования: осветлитель, механические фильтры, подходит не в полной мере, поскольку она больше зависит от показателей исходной воды и имеет меньшую надежность, чем ультрафильтрация.

Ультрафильтрация представляет собой процесс очистки под давлением с отделением твердых частиц от растворимых компонентов. Мембраны задерживают частицы размером 0,01 мкм и более, что способствует высокой степени очистки. В воде после ультрафильтрационных элементов полностью отсутствуют бактерии, вирусы, микроорганизмы, взвешенные вещества и коллоиды.

Как показал мировой опыт внедрения технологии ультрафильтрации в промышленности, использование ультрафильтрации перед обратным осмосом, помимо указанных ранее преимуществ, значительно снижает частоту химических моек установок обратного осмоса и значительно уменьшает себестоимость предварительной обработки воды [23]. Кроме того, ультрафильтрация, обладая высокой задерживающей способностью по микроорганизмам, позволяет весьма существенно снизить риски микробиологического загрязнения обратноосмотических мембран, а значит, эффективно бороться с проскоками эндотоксинов и бактерий в фильтрат установок обратного осмоса. Классическая схема модуля ультрафильтрации с внутренней поверхностью фильтрации представлена на рис. 2. Он содержит приблизительно 35 600 волокон с размером 0,9 мм, что составляет площадь фильтрации 125 м² [22].

Помимо использования мембран в «чистом» виде, в последние годы ведутся разработки по комбинированному использованию различных методов обессоливания с целью снижения расхода реагентов, особенно когда для технического процесса требуется глубокое обессоливание



Рис. 2 Модуль с полыми волокнами [22]

воды. Так, комбинированная схема, при которой первая стадия обессоливания осуществляется безреагентным методом – обратным осмосом, а глубокая доочистка – ионным обменом, позволяет сократить по сравнению с использованием одного метода ионного обмена расход реагентов и объем высокоминерализованных сточных вод примерно в 10 раз.

Комбинированная мембранно-ионообменная установка работает следующим образом: исходная вода после емкости разрыва струи с декарбонизатором подается на механический самопромывной фильтр, где происходит удаление загрязнений крупнее 100–400 мкм. Затем в воду вводятся реагенты, она выдерживается заданное время в буферной емкости, после чего поступает на модуль ультрафильтрации, в результате чего получают 85–90 % фильтрата и 10–15 % промывной воды, содержащей механические, органические и микробиологические загрязнения. Промывная вода сбрасывается в дренаж или направляется в осветлитель и на повторное использование. Фильтрат поступает на вход насоса высокого давления модуля обратного осмоса. В последнем происходит выделение из раствора основной массы солей, которые в виде концентрата сбрасываются. Частично обессоленный пермеат после декарбонизации подается для доочистки на вход ионообменной установки. Возможна установка второй ступени обратного осмоса, которая обеспечивает получения фильтрата с удельной электропроводностью на уровне 1 мкСм/см, что тем не менее не исключает необходимости дальнейшей доочистки.

Надежность данной схемы водоподготовки достаточно высокая, поскольку даже при возможных нарушениях работы системы обратного осмоса, узел доочистки обеспечит заданное качество воды. Вместе с тем сохраняется необходимость в использовании кислоты и щелочи, так что данная технология, хоть и в меньшей степени, имеет те же недостатки, что и традиционная.

Основным недостатком мембранных систем является достаточно низкий коэффициент использования исходной воды. Если в традиционной ионообменной схеме с коагуляцией и механической фильтрацией на выходе достигается производительность 85–90 % от расхода исходной воды, то для типичного сочетания ультрафильтрации и обратного осмоса этот показатель не превышает 60 %.

Комбинированные мембранно-ионообменные схемы, имеющие высокую степень экономической эффективности и надежности, являются оптимальным и рекомендуемым методом при реконструкции существующих водоподготовительных установок, где уже имеются ионообменные фильтры, кислотно-реагентное хозяйство и системы сбора и нейтрализации сточных вод. Количество концентрированных сточных вод и расход реагентов в этом случае до десяти раз меньше, чем при только ионообменной схеме.

С точки зрения обеспечения снижения расхода реагентов при высоком качестве обессоленной воды наибольшую эффективность имеют установки, состоящие исключительно из мембранных модулей различного назначения: ультра- и нанофильтрации, обратного осмоса, мембранной дегазации и электродеионизации [24].

Для сокращения объемов сточных вод кислотных промывок мембранных модулей в конструкции установки должна быть предусмотрена более эффективная и экономичная циркуляционная регенерация через мембранные элементы, позволяющая минимизировать объем регенерирующего раствора.

Сброс высокоминерализованных сточных вод оказывает негативное воздействие не только на флору и фауну водных объектов, но и на работу промышленных предприятий, расположенных ниже по течению. Увеличение минерализации воды приводит к повышению затрат на обработку воды и увеличению количества сточных вод [25].

Из существующих схем водоподготовки с применением ионитных материалов наибольшее распространение на территории Республики Беларусь и стран СНГ получили Na-катионирование. Метод умягчения воды на ионообменных фильтрах является основным на объектах теплоэнергетики и используется в 75 % [14]. Однако с рассматриваемых позиций применение Na-катионирования при относительной дешевизне поваренной соли связано с большим сбросом растворимых солей с химдоочистки, поскольку удельный расход NaCl на регенерацию в 2,5–3,5 раза превышает количество удаляемых катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} [26].

Сточные воды Na-катионитовых фильтров содержат хорошо растворимые соли: хлориды кальция, магния, натрия в концентрации 5–20 г/л, а их объем составляет 5–15 % от производительности установки [27]. При этом концентрация катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в сточных водах превышает их концентрацию в исходной воде.

Сброс сточных вод с повышенной минерализацией в местах интенсивного водопользования ставит предприятия в неравные условия водопользования, поскольку расположенные ниже по течению предприятия от источников сброса высокоминерализованных сточных вод должны затрачивать больше усилий для предварительной водоподготовки забираемой воды. Например, влияние качества исходной воды на количество и состав сточных вод на примере ТЭС ОАО «Мосэнерго». ТЭС ОАО «Мосэнерго» для технического водоснабжения используют преимущественно воду из Москвы-реки, ряда других водных объектов и частично из городского водопровода.

Подготовка питательной воды котлов осуществляется путем химического обессоливания исходной воды после коагуляции или коагуляции с известкованием, подпиточной воды теплосети – путем одноступенчатого натрий-катионирования воды, прошедшей осветление, коагуляцию или коагуляцию с известкованием. Регенерация натрий-катионитных фильтров производится рассолом.

В этих условиях качество обработанной воды, а также количество и состав сточных вод зависят от состава исходной воды. Результаты многолетнего анализа показывают, что при прохождении Москвы-реки в черте города происходит значительное ухудшение качества ее воды. Тепловые электростанции ТЭЦ-12, ТЭЦ-21 и ТЭЦ-22 расположены соответственно на входе реки в город, в ее средней части и на выходе из города. Проведенные анализы свидетельствуют о том, что техногенное воздействие тепловых электростанций на речную воду приводит к увеличению ее минерализации и содержания хлоридов более чем в 2 раза и, как следствие, к значительному повышению расхода реагентов на умягчение воды. При этом со сточными водами обессоливающих установок сбрасывается в 7–10 раз больше хлоридов, чем их поступило с исходной водой, что способствует повышенному расходу воды для их разбавления до нормируемого содержания.

В этих условиях перевод некоторых объектов теплоэнергетики, использующих в настоящее время для приготовления химобессоленной воды воду с пониженным солесодержанием из городского водопровода, на речную вызовет рост расхода реагентов и количества сбрасываемых солей, а также дополнительное ухудшение качества воды в Москве-реке. В наиболее сложных условиях находится ТЭЦ-26 (ее водозабор расположен вблизи ТЭЦ-22), которая вынуждена использовать наиболее загрязненную воду. В связи с этим вопрос о целесообразности перевода всех ТЭС на речную воду должен рассматриваться и решаться с учетом всего комплекса проблем.

Большое количество хлоридов натрия, кальция и магния сбрасывается с установок приготовления подпиточной воды теплосети, особенно при так называемых «сухих» регенерациях фильтров, когда катионит заливается концентрированным природным рассолом. При существующих ограничениях содержания хлоридов и сульфатов в сточных водах (300 и 100 мг/л соответственно) они перед сбросом разбавляются водами малой минерализации, в первую очередь продувочной водой системы оборотного охлаждения. Однако с ростом минерализации исходной воды может увеличиваться и расход разбавляющей воды, что приведет к повышению затрат на утилизацию сточных вод.

В связи с этим создание установок, работающих по без- или малоотходной технологии, является важной задачей. Это возможно при соблюдении следующих условий:

- уменьшении количества сбрасываемых солей до значений, близких к извлекаемому из обрабатываемой воды;
- снижении концентрации сбросных вод до уровня, сопоставимого с солесодержанием природной воды;
- однородности состава сбросных солей примесям природной воды.

Проведенный анализ объектов теплоэнергетики Республики Беларусь для разработки наилучших доступных технических методов позволил их классифицировать следующим образом:

- по виду деятельности в соответствии с ОКЭД-2016: снабжение электроэнергией, газом, паром, горячей водой, кондиционированным воздухом (секция Д ОКЭД-2016);

- по получению электроэнергии, пара и горячей воды проектной суммарной (тепловой и электрической) установленной мощностью: малые – мощностью до 30 МВт с агрегатами единичной мощностью до 10 МВт, средние – мощностью от 30 до 100 МВт, крупные – мощностью 100 МВт и более;

- по видам сжигания топлива: твердое, жидкое, газообразное, дисперсные системы.

На объектах теплоэнергетики могут применяться четыре этапа водоподготовки: предварительная подготовка, умягчение, обессоливание, обеззараживание.

В результате водоподготовки обрабатываемая вода разделяется на очищенную воду и концентрат (сточные воды). Воздействие сточных вод, образовавшихся в процессе водоподготовки, на окружающую среду возникает в результате их сброса напрямую в водные объекты или через сети городской хозяйственной канализации, в результате хранения на фильтруемых картах шламонакопителей.

Помимо концентрирования загрязняющих веществ, воздействие на качество сточных вод оказывается при внесении в процессе водоподготовки химических реагентов. За исключением фильтрации воды через механические фильтры все этапы водоподготовки производятся с использованием реагентов. В процессе известкования с коагуляцией реагенты добавляются в обрабатываемую воду с целью умягчения воды и объединения мелкодисперсных частиц.

Снизить объем используемых реагентов возможно путем использованием ступенчатой регенерации, при которой сначала производится регенерация фильтра второй ступени, а затем отработанный регенерационный раствор пропускается перед подачей свежего регенерационного раствора на первую ступень. Нейтрализацию регенерационных растворов Н-катионитовых фильтров целесообразно производить отработанным регенерационным раствором анионитовых фильтров, что позволит экономить объемы используемой щелочи.

Снизить объем используемых реагентов возможно также путем перехода к более передовым схемам и технологиям обессоливания. К передовым схемам водоподготовки будут относиться схемы с минимальными затратами воды и реагентов на собственные нужды. К передовым технологиям водоподготовки, которые рекомендованы в документах о наилучших доступных технических методах, но которые не получили должного развития в Республики Беларусь, можно отнести нанофильтрацию и обратный осмос (рис. 3–5).

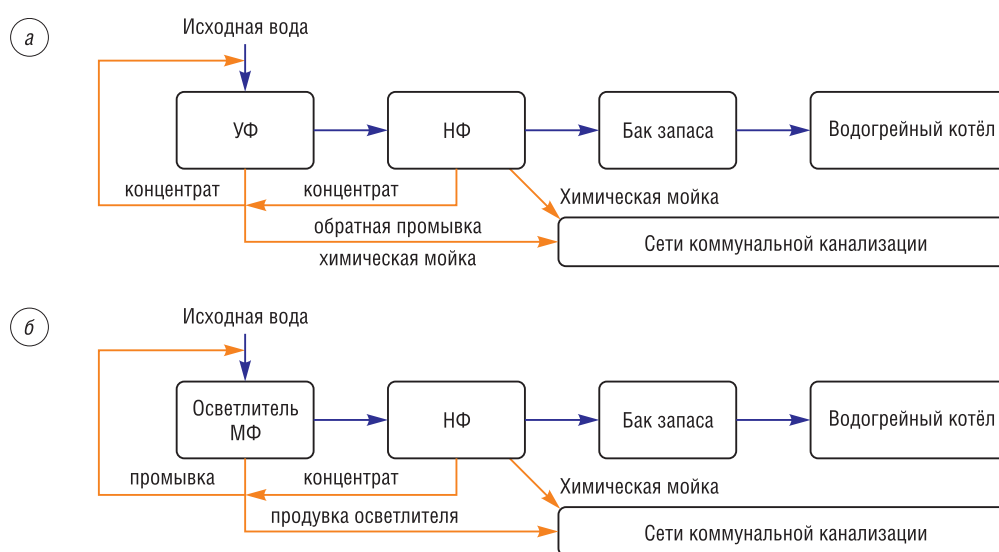


Рис. 3. Схемы установки для умягчения воды

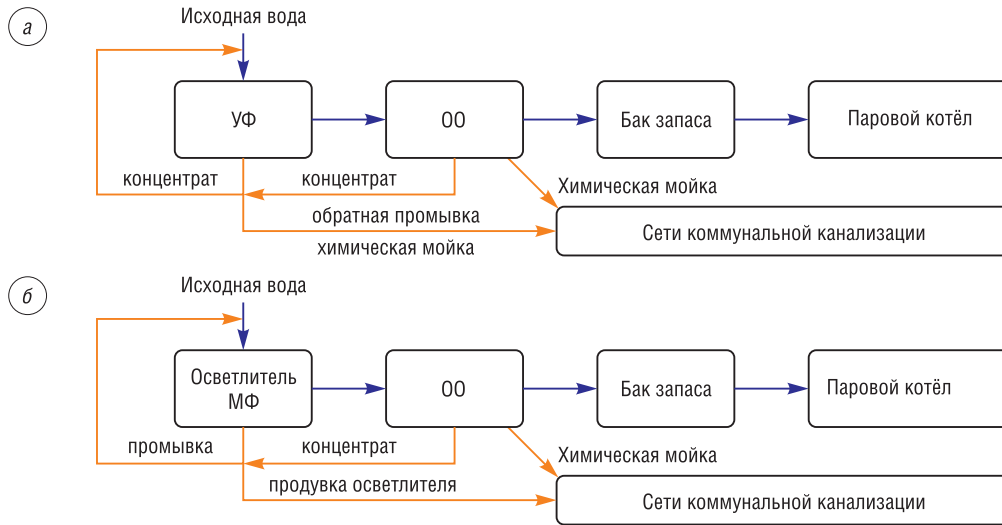


Рис. 4. Схемы установки для глубокого умягчения воды

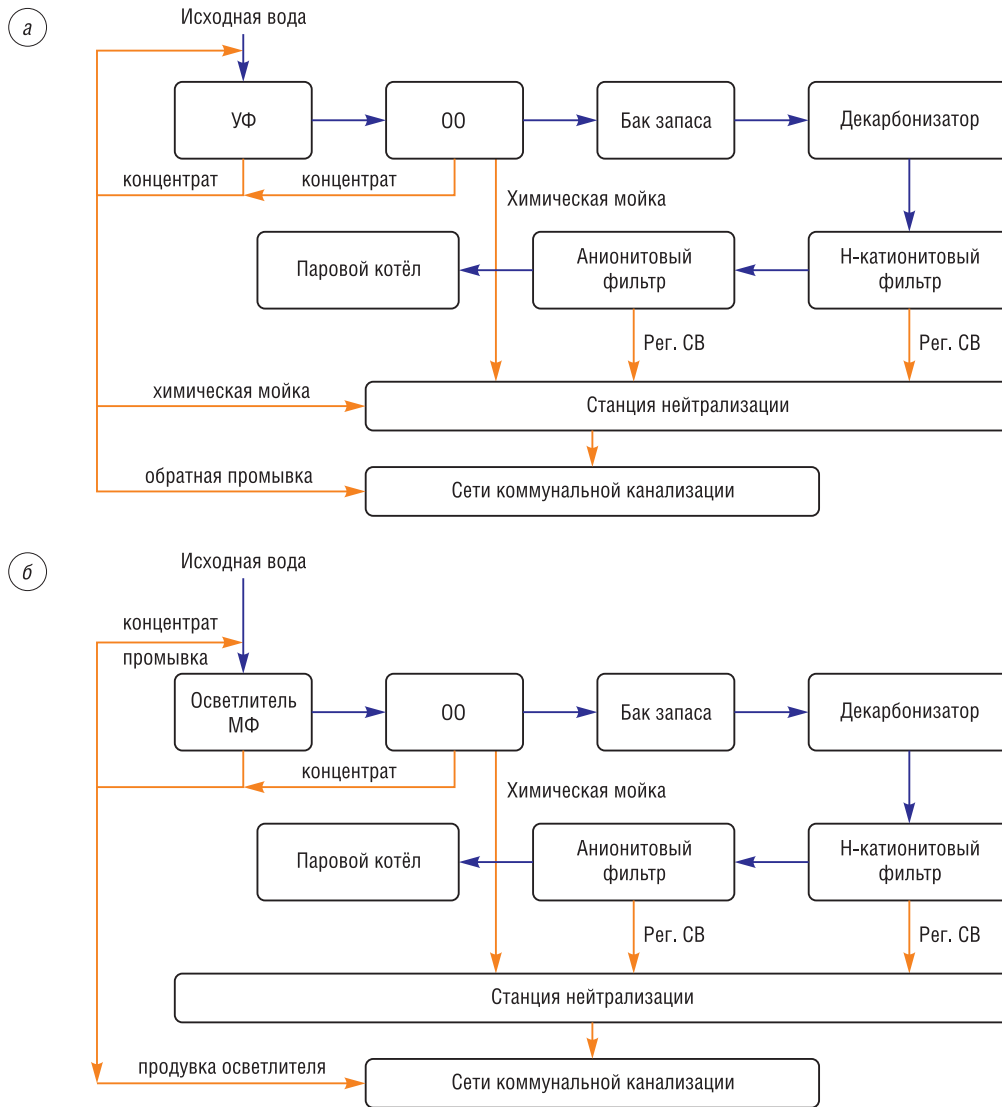


Рис. 5. Схемы установки для глубокого обессоливания вод

В рамках выполнения исследования рассмотрена возможность и экономическая целесообразность модернизации технологий водоподготовки на объектах теплоэнергетики Республики Беларусь различной мощности: районная котельная (РК) «Шабаны» и Лукомльская ГРЭС.

В качестве альтернативы существующей технологии водоподготовки для паровой котельной предлагается четыре следующих варианта:

- предварительная очистка на установке ультрафильтрации, установка обратного осмоса для умягчения и обессоливания;
- предварительная очистка на установке ультрафильтрации, установка нанофильтрации для умягчения с последующей доочисткой на существующих фильтрах Na-катионирования;
- предварительная очистка на осветлителе и механических фильтрах, установка обратного осмоса для умягчения и обессоливания;
- предварительная очистка на осветлителе и механических фильтрах, установка нанофильтрации для умягчения с последующей доочисткой на существующих фильтрах Na-катионирования.

В качестве альтернативы существующей технологии водоподготовки для ГРЭС предлагаются два следующих варианта:

- предварительная очистка на установке ультрафильтрации, установка нанофильтрации для умягчения, установка обратного осмоса для обессоливания, глубокое обессоливание на существующих катионитовых и анионитовых фильтрах;
- предварительная очистка на осветлителе и механических фильтрах, установка нанофильтрации для умягчения, установка обратного осмоса для обессоливания, глубокое обессоливание на существующих катионитовых и анионитовых фильтрах.

В рамках выполнения исследования рассмотрена возможность и экономическая целесообразность модернизации технологий водоподготовки на РК «Шабаны» и на Лукомльской ГРЭС. Водоподготовительная установка РК «Шабаны» предназначена для приготовления воды, идущей на восполнение потерь воды и пара в цикле котельной, для обеспечения паром потребителей; приготовления химически очищенной воды на восполнение потерь воды теплосети. Источником водоснабжения котельной является Чижовское водохранилище.

В настоящее время приготовление химически очищенной воды производится по следующей схеме: известкование с коагуляцией исходной воды сернокислым железом в осветлителях – фильтрования на механических фильтрах, Na-катионирование на I и II ступенях. Для повышения степени очистки воды в осветлителях, укрупнения хлопьев, усреднения их образования по проекту в осветлитель вводится флокулянт. Для подпитки теплосети химически очищенная вода поступает после первой ступени Na-катионирования, а для подпитки котлов – после второй. Проектная производительность установок: для подпитки теплосети – 165 м³/ч; для подпитки котлов (Na-катионитовые фильтры II ступени) – 130 м³/ч.

Предварительная очистка исходной воды осуществляется в осветлителе, где происходит частичное снижение жесткости, щелочности, снижение концентраций кремнекислоты и железа, взвешенных и органических веществ в исходной воде. Снижение названных показателей происходит в результате известкования и коагуляции исходной воды с помощью реагентов: известки и коагулянта сернокислого железа.

Непрерывная продувка осветлителей предназначена для удаления шлама и устанавливается в размере 2 % от производительности осветлителя, что в годовом разрезе составляет 726 468 м³. Следовательно, суммарный расход на непрерывную продувку осветлителей в годовом разрезе составляет:

$$W_{\text{осб}} = 0,02 \times 726\,468 = 14\,529,36 \text{ м}^3.$$

Данные сточные воды с влажностью осадка до 90 % в полном объеме отводятся на станцию уплотнения шлама, где на вакуум-фильтре БОУ-10-1,8 происходит уплотнение шлама, в результате 11 % сточной воды возвращается в технологический процесс.

$$W'_{\text{осб}} = 0,89 \times 14\,529,36 = 12\,931,13 \text{ м}^3.$$

Уплотненный шлам отводится на нефильтруемую карту шламоотвала.

Для удаления из воды хлопьев, скоагулированных коллоидных частиц, не осевших в осветлителях, применяется фильтрование через механические (осветлительные) фильтры, т.е. пропуск воды сверху вниз через слой зернистого материала.

На станции химической водоочистки установлены двухкамерные механические фильтры. В процессе осветления исходная вода поступает в каждую камеру фильтра сверху вниз. Рабочий цикл механического фильтра заканчивается при увеличении перепада давления на входе и выходе воды из фильтра больше 1 атм, или после пропуска воды в объеме, равном 16 000 м³. Промывка антрацита производится водой совместно со сжатым воздухом снизу вверх каждой камеры отдельно до осветления сбрасываемой промывочной воды. Данные сточные воды в полном объеме относятся к оборотному водоснабжению котельной.

На Na-катионитовых фильтрах происходит умягчение осветленной воды. В процессе фильтрования идет удаление из обрабатываемой воды катионов кальция и магния. Отключение фильтра на регенерацию производится при достижении жесткости граничного значения умягченной воды на выходе из фильтра.

Взрыхление фильтрующего материала производится перед регенерацией для улучшения возможности обработки его регенерационным раствором и удаления загрязнений. Регенерация катионита предназначена для удаления из катионита поглощенных им из воды катионов кальция и магния путем замены их на катионы натрия из регенерационного раствора (производится 10%-ным раствором для I ступени и 12%-ным раствором для II ступени).

Отмывка фильтра предназначена для удаления из фильтра регенерационного раствора и продуктов регенерации и получения умягченной воды необходимого качества. Исходные данные для расчета водопотребления на нужды водоподготовки на Na-катионитовых фильтрах I и II ступеней представлены в табл. 2.

Расход воды на регенерацию Na-катионитовых фильтров в годовом разрезе составляет:

$$W_{Na} = 11269,12 + 644,87 = 11913,99 \text{ м}^3.$$

Сточные воды, образующиеся в процессе регенерации Na-катионитовых фильтров, отводятся в сети хозяйственно-бытовой канализации и имеют высокую концентрацию хлорид-иона. С целью достижения допустимой концентрации, установленной предприятию на сбросе сточных вод в сети хозяйственно-фекальной канализации г. Минска, сточные воды подвергаются разбавлению. Концентрация хлорид-иона (Cl⁻) в сточных водах определяется по формуле:

$$C_{Cl} = (G_c \times 35,5 \times 1000) / (58,5 \times S_{Na}), \text{ мг/л},$$

где G_c – количество соли на регенерацию, кг; 35,5 – молекулярная масса Cl⁻, г/моль; 58,5 – молекулярная масса NaCl, г/моль; S_{Na} – объем сточных вод образовавшихся в процессе регенерации.

Т а б л и ц а 2. Исходные данные для расчета водопотребления на нужды водоподготовки на Na-катионитовых фильтрах I и II ступеней

Наименование показателей и операций		Назначение фильтра	
		Na-катионирование I ступени	Na-катионирование II ступени
Взрыхление	$q_{взр}$, м ³ /ч	100	100
	$t_{взр}$, мин	80	80
Регенерация	Количество соли, кг	2200	700
	$C_{р-ра}$, г/л	107,1	130
Отмывка	$q_{от}$, м ³ /ч	100	90
	$t_{от}$, мин	15	15
Суммарный расход воды на регенерацию фильтра, $V_{сум}$, м ³		178,87	161,21
Число регенераций в год		63	4
Объем водопотребления, м ³ /год		11269,12	644,87

Концентрация Cl^- для регенерации первой ступени:

$$C_{\text{Cl}} = (2200 \times 35,5 \times 1000) / (58,5 \times 178,87) = 7463,56 \text{ мг/л.}$$

Концентрация Cl^- для регенерации второй ступени:

$$C_{\text{Cl}} = (700 \times 35,5 \times 1000) / (58,5 \times 161,22) = 2634,86 \text{ мг/л.}$$

Количество технической воды, необходимой для разбавления высокоминерализованных сточных вод, определяется по формуле:

$$W_{\text{ТВ}} = S_{\text{Na}} \times (C_{\text{Cl}} - C_{\text{дк}}) / (C_{\text{дк}} - C_{\text{ТВ}}), \text{ м}^3,$$

где $C_{\text{дк}}$ – допустимая концентрация Cl^- , 450 мг/л; $C_{\text{дк}}$ – концентрация Cl^- в технической воде, 80 мг/л.

Количество технической воды, необходимой для разбавления высокоминерализованных сточных вод первой ступени, следующее:

$$W_{\text{ТВ I}} = 11269,12 \times (7463,56 - 450) / (450 - 80) = 213612,4 \text{ м}^3.$$

Количество технической воды, необходимой для разбавления высокоминерализованных сточных вод второй ступени:

$$W_{\text{ТВ II}} = 644,87 \times (2634,86 - 450) / (450 - 80) = 3807,98 \text{ м}^3.$$

Суммарный расход воды на разбавление высокоминерализованных сточных вод составляет:

$$W_{\text{разб}} = 213612,4 + 3807,98 = 217420,38 \text{ м}^3.$$

Суммарный расход воды на собственные нужды водоподготовки РК «Шабаны» равен:

$$W_{\text{ХВО}} = 12931,13 + 11913,99 + 217420,38 = 242265,5 \text{ м}^3.$$

Сточные воды, образующиеся на станции химической водоподготовки, отводятся в сети хозяйственно-бытовой канализации в полном объеме – 242265,5 м³.

При регенерации Na-катионитовых за анализируемый период израсходовано 141400 кг таблетированной соли. Стоимость 1 кг таблетированной соли для регенерации Na-катионитовых фильтров производства ОАО «Мозырьсоль» составляет 40 копеек. Суммарный расход денежных средств на закупку таблетированной соли при регенерации Na-катионитовых фильтров составляет:

$$D_{\text{рег}}^{\text{Na}} = 141400 \times 0,40 = 56560 \text{ руб./год.}$$

В осветлитель добавляется 0,5 мг коагулянта и 0,5 г флокулянта на 1 л обрабатываемой воды, 1 кг реагента (коагулянта и флокулянта) стоит 6 рублей 15 копеек. Суммарный расход денежных средств на закупку реагентов добавляемых в осветлитель составляет:

$$D_{\text{реаг}}^{\text{ос}} = 726468 \times 1 \times 6,15 / 1000 = 44678 \text{ руб./год.}$$

При регенерациях ионообменных фильтров происходит частичный вынос ионообменных смол, нормативный расход ионита составляет 10 %. На РК «Шабаны» в качестве ионообменной смолы используется КУ-2-8 (Na), стоимость 1 л составляет 2 рубля 76 копеек. На котельной установлено 5 фильтров с объемом загрузки 13,61 м³ и 2 фильтра с объемом загрузки 10,60 м³. Расход денежных средств на восполнение ионита составляет:

$$D_{\text{ио}} = (5 \times 13,61 + 2 \times 10,60) \times 2,76 \times 1000 = 246330 \text{ руб./год.}$$

I вариант модернизации (предварительная очистка на установке ультрафильтрации, установка обратного осмоса для умягчения и обессоливания). За анализируемый период (данные 2015 г.) на РК «Шабаны» подготовлено 701622,88 м³ умягченной воды. Собственные нужды установки обратного осмоса составляют 30 % от объема подаваемой на установку воды, объем воды, подаваемый на установку, составляет 912109,74 м³.

Образованный концентрат возвращается на установку ультрафильтрации. Собственные нужды установки ультрафильтрации составляют 10 % от объема подаваемой на установку воды, объем воды, подаваемый на установку, составляет 1003320,71 м³.

Химическая мойка осуществляется ежеквартально, суммарное количество химических моек для установки ультрафильтрации и обратного осмоса – 8 (раз). Для установки производительностью 165 м³/ч на одну химическую мойку расходуется 4125 кг 0,2%-ного раствора соляной кислоты и 4125 кг 0,2%-ного раствора гидроксида натрия. Для приготовления 4125 кг 0,2%-ного раствора соляной кислоты необходимо 289 кг соляной кислоты марки А (35 %) ГОСТ 857-95 и 3,836 м³ воды. Для приготовления 4125 кг 0,2%-ного раствора гидроксида натрия необходимо 8 кг каустической гранулированной соды и 4,117 м³ воды. Учитывая, что стоимость 1 кг каустической гранулированной соды составляет 3 рубля 50 копеек, а стоимость 1 кг соляной кислоты марки А (35 %) ГОСТ 857-95 составляет 38 копеек, расход денежных средств составит:

$$D_{\text{реар}} = 8 \times (289 \times 0,38 + 8 \times 3,5) = 1102,56 \text{ руб./год.}$$

Расход денежных средств на закупку и монтаж оборудования производительностью 165 м³/ч составит:

$$D_{\text{уст}} = 165 \times 1,1 \times (7000 + 8000) = 2722500 \text{ руб.}$$

Мембранные модули заменяются каждые два года, годовой расход денежных средств на замену мембранных модулей для установок 165 м³/ч составит:

$$D_{\text{мм}} = 165 \times (1050 + 1200) / 2 = 185625 \text{ руб./год.}$$

Расход воды на собственные нужды водоподготовки равен:

$$W_{\text{хво}} = 1003320,71 - 912109,74 + (3,836 + 4,117) \times 8 = 91274,6 \text{ м}^3.$$

Сточные воды, образующиеся на станции химической водоподготовки, отводятся в сети хозяйственно-бытовой канализации в полном объеме – 91274,6 м³. Аналогично производился расчет для II–IV вариантов. Данные расчета приведены в табл. 3.

Водоподготовка Лукомльской ГРЭС предназначена для восполнения потерь воды в цикле станции и в теплосети. Предварительная подготовка включает известкование с коагуляцией (сернокислое железо) в осветлителе, осветление известково-коагулированной воды на механических фильтрах.

Т а б л и ц а 3. Данные расчета при модернизации технологии водоподготовки

Применение технологий	Действующие технологии	Вариант I	Вариант II	Вариант III	Вариант IV
Объемы водопотребления и водоотведения, м ³	242 265,5	91 274,6	93 854,1	25 247,5	27 827,0
Годовой расход на расходуемые реагенты и комплектующие, BYN	347 568	246 359,6	221 609,6	157 632,7	192 514,7
Капитальные затраты на закупку и монтаж, BYN	–	2 722 500	2 359 500	1 452 000	1 089 000
Годовой расход на водоснабжение из сетей водоканала, BYN	193 812,40	211 236,28	206 937,46	181 837,86	183 901,45
Годовой расход на водоотведение в сети водоканала, BYN	145 359,30	158 427,21	155 203,10	136 378,38	137 926,09
Годовой расход на изъятие поверхностных вод, BYN	7267,97	7921,36	7760,15	6818,92	6896,30
Годовой расход на сброс сточных вод в водный объект, BYN	19 381,24	21 123,63	20 693,75	18 183,79	18 390,14
Коэффициент потребления воды на собственные нужды водоподготовки	0,35	0,14	0,13	0,04	0,04
Коэффициент расхода средств на эксплуатацию, BYN/м ³	0,98 ¹ / 0,53 ²	0,54 ¹ / 0,37 ²	0,50 ¹ / 0,33 ²	0,28 ¹ / 0,23 ²	0,33 ¹ / 0,28 ²
Окупаемость, лет	–	8,84 ¹ / 23,23 ²	7,07 ¹ / 16,58 ²	2,94 ¹ / 6,79 ²	2,39 ¹ / 6,10 ²

П р и м е ч а н и е. 1 – при водопользовании из сетей городского водопровода – рассчитан на объем подготовленной воды; 2 – при водопользовании из водного объекта – рассчитан на объем подготовленной воды.

Схема полного химического обессоливания предусматривает три ступени очистки воды: вода проходит последовательную обработку на Н-катионитовых и анионитовых фильтрах I ступени, декарбонизаторе, Н-катионитовых и анионитовых фильтрах II ступени и фильтрах смешанного действия. Проектная производительность установки – 350 м³/ч обессоленной воды, фактическая производительность – около 110 м³/ч. В 2017 г. на ГРЭС подготовлено 950 000 м³ воды.

Сточные воды, образованные в процессе предварительной подготовки при продувке осветлителя (2 %) и промывке механических фильтров на Лукомльской ГРЭС, используются повторно. Сточные воды, образованные в процессе регенерации ионообменных фильтров (12 %), после нейтрализации отводятся на шламоотвал, откуда после отстаивания попадают в р. Лукомку (при необходимости сточные воды разбавляются технической водой из Лукомского водохранилища).

Данные о количестве ионообменных фильтров, периодичности регенерации, расходе воды на собственные нужды ионообменных фильтров, марка ионообменных смол, нормативное значение выноса ионита, объем загрузки, расход реагентов, а также стоимость расходуемых материалов представлены в табл. 4.

Расчеты для двух вариантов модернизации технологии водоподготовки ГРЭС произведены аналогично расчетам для паровой котельной и представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 4. Данные по ионообменным фильтрам обессоливания Лукомльской ГРЭС

Наименование фильтра	Н-катионитовый фильтр первой ступени	Анионитовый фильтр первой ступени	Н-катионитовый фильтр второй ступени	Анионитовый фильтр второй ступени	Фильтр смешанного действия
Количество, шт.	5	5	1 2	3	3
Объем загрузки, м ³	16,96	14,14	10,6 10,6	10,6	1,88 3,14
Наименование ионита	КУ-2-8	А-845	КУ-2-8 С-100	АВ-17-8	КУ-2-8 АВ-17-8
Норма годового расхода ионита, %	10	15	10	10	10 15
Стоимость 1л ионита, BYN	2,76	14	2,76 5,60	4,69	2,76 4,69
Фильтроцикл	3500	14 000	120 000	40 000	210 000
Количество регенераций	271	68	8	24	4
Объем сточных вод, образовавшихся в процессе одной регенерации, м ³	88	330	120	85	110
Масса расходуемого реагента на 1 м ³ загрузки	50 кг 100 % H ₂ SO ₄	80 кг 100 % NaOH	200 кг 100 % H ₂ SO ₄	100 кг 100 % NaOH	120 кг 100 % H ₂ SO ₄ 100 кг 100 % NaOH
Стоимость 1 кг расходуемого реагента, BYN	0,25	2,75	0,25	2,75	0,25 2,75
Объем сточных ¹ вод, м ³	23 848	22 440	960	2040	Возвращаются в технологический процесс
Расход денежных средств на закупку ионита, BYN	23 404,8	148 470	14 797,6	14 914,2	8183,61
Расход денежных средств на закупку реагентов, BYN	1060	15 554	1590	8745	2759,7
Годовой расход ² на водоснабжение из сетей водоканала, BYN	19 078,40	17 952,00	768,00	1632,00	0,00
Годовой расход ² на водоотведение в сети водоканала, BYN	14 308,80	13 464,00	576,00	1224,00	0,00
Годовой расход ² на изъятие поверхностных вод, BYN	715,44	673,20	28,80	61,20	0,00
Годовой расход ² на сброс сточный вод в водный объект, BYN	1907,84	1795,20	76,80	163,20	0,00
Коэффициент потребления воды на собственные нужды	0,025	0,024	0,001	0,002	0,000
Коэффициент расхода денежных средств на эксплуатацию, BYN/м ³	0,026	0,173	0,017	0,025	0,012

П р и м е ч а н и е. 1 – без учета расхода воды на разбавление; 2 – без учета расхода воды на разбавление.

Т а б л и ц а 5. **Варианты модернизации технологии водоподготовки для крупного объекта теплоэнергетики**

Применение технологий	Действующие технологии	Вариант I	Вариант II
Объемы водопотребления и водоотведения, м ³	49 288	176 700,4	32 173,62
Годовой расход средств на расходимые реагенты и комплектующие, BYN	239 478,91	185 295,87	133 020,85
Капитальные затраты на закупку и монтаж, BYN	–	2 541 000	1 694 000
Годовой расход на водоснабжение из сетей водоканала, BYN	148 400	141 360,3	25 738,9
Годовой расход на водоотведение в сети водоканала, BYN	111 300	106 020,3	19 304,2
Годовой расход на изъятие поверхностных вод, BYN	5 565	5 301,0	965,2
Годовой расход на сброс сточный вод в водный объект, BYN	14 840	14 136,0	2 573,9
Коэффициент потребления воды на собственные нужды водоподготовки	0,20	0,19	0,03
Коэффициент ¹ расхода средств на эксплуатацию, BYN/м ³	0,53	0,46	0,40
Коэффициент ² расхода средств на эксплуатацию, BYN/м ³	0,27	0,22	0,16
Окупаемость, лет	–	38,21 ¹ / 46,07 ²	5,28 ¹ / 13,74 ²

П р и м е ч а н и е. 1 – при водопользовании из сетей городского водопровода – рассчитан на объем подготовленной воды; 2 – при водопользовании из водного объекта – рассчитан на объем подготовленной воды.

По данным государственной статистической отчетности по форме 1-вода (Минприроды) «Отчет об использовании воды» за 2017 г. предприятием сброшено в р. Лукомка 185 500 м³ сточных вод. Следовательно, на разбавление было использовано 136 212 м³ технической воды. Данные о действующих технологиях представлены с учетом разбавления сточных вод.

При внедрении предлагаемых решений потребление воды на собственные нужды водоподготовки на РК «Шабаны» снизится в 8,75 раза, а на Лукомльской ГРЭС – в 6,67 раза.

Сравнительный анализ данных расчета модернизации технологии водоподготовки для котельных позволяет сделать следующие выводы о модернизации технологий водоподготовки на паровых котельных:

- внедрение любого из предложенных вариантов приведет к снижению потребления воды на собственные нужды водоподготовки, это связано с уменьшения объема водопотребления на разбавление высокоминерализованных сточных вод, образованных при регенерации ионообменных фильтров;

- внедрение любого из предложенных вариантов приведет к снижению расхода денежных средств на закупку расходных материалов (реагенты, ионообменные смолы, мембранные модули);

- наименьшее потребление воды на собственные нужды водоподготовки достигается при использовании существующей технологии предварительной подготовки;

- наименьшие расходы денежных средств на закупку расходных материалов достигаются при внедрении технологии обратного осмоса;

- наименьшие капитальные затраты на закупку и монтаж оборудования наблюдаются при внедрении нанофильтрационной установки;

- наибольшие капитальные затраты будут при использовании утрафильтрационной установки для предварительной подготовки и обратноосмотической установки для умягчения воды;

- наименьший срок окупаемости затраченных средств достигается при внедрении нанофильтрационной установки в технологический цикл водоподготовки, это обусловлено наилучшим соотношением капитальных затрат и коэффициента расхода средств на эксплуатацию.

Сравнительный анализ данных расчета модернизации технологии водоподготовки позволяет сделать следующие выводы о модернизации технологий водоподготовки на крупных объектах теплоэнергетики:

- внедрение любого из предложенных вариантов приведет к снижению потребления воды на собственные нужды водоподготовки, это связано с уменьшения объема водопотребления на разбавление высокоминерализованных сточных вод, образованных при регенерации ионообменных фильтров;

- внедрение любого из предложенных вариантов приведет к снижению расхода денежных средств на закупку расходных материалов;
- наименьшее потребление воды на собственные нужды водоподготовки, а также наименьшие капитальные затраты и расходы денежных средств на закупку расходных материалов достигается при использовании существующей технологии предварительной подготовки;
- наибольшие капитальные затраты будут при использовании ультрафильтрационной установки для предварительной подготовки;
- наименьший срок окупаемости затраченных средств достигается при внедрении нанофильтрационной и обратноосмотической установок в технологический цикл водоподготовки для крупных объектов теплоэнергетики, потребляющих воду из сетей городского водопровода.

Поскольку при использовании предлагаемых технологий и схем водоподготовки значение коэффициента потребления воды на собственные нужды и коэффициента расхода денежных средств на эксплуатацию ниже, чем при использовании существующих технологий, то предлагаемые технологии и схемы могут рассматриваться и при строительстве новых объектов теплоэнергетики.

Для оценки воздействия на окружающую среду сточных вод, образовавшихся на действующих установках водоподготовки, объектов теплоэнергетики Республики Беларусь проанализированы данные государственной статистической отчетности по форме 1-вода (Минприроды) «Отчет об использовании воды» за 2016 г.

Всего по отрасли теплоэнергетики за 2016 г. отчиталось 38 водопользователей, в том числе: 5 водопользователей в Брестской области; 7 водопользователей в Витебской области; 6 водопользователей в Гомельской области; 4 водопользователя в Гродненской области; 5 водопользователей в Минской области; 4 водопользователя в г. Минске; 7 водопользователей в Могилевской области.

Было обследовано 18 объектов теплоэнергетики Республики Беларусь, усредненный коэффициент потребления воды на собственные нужды для существующих технологий водоподготовки составляет 0,20. По расчетам, произведенным выше, установлено, что после модернизации технологий и схем водоподготовки коэффициент потребления воды на собственные нужды достигает значения 0,03.

По данным государственной статистической отчетности за 2016 г. объектами теплоэнергетики изъято, добыто и получено 122 008 380 м³ воды. Учитывая коэффициенты потребления воды на собственные нужды, представленные выше, можно сделать вывод, что на действующих установках водоподготовки рассмотренных объектов образовалось и сброшено 24 401 676 м³ сточных вод, а при внедрении предлагаемых технологий и схем водоподготовки объем водоотведения можно снизить до 3 660 251 м³ (на 85 %).

Основные привносимые в процессе водоподготовки загрязняющие вещества – сульфат-ион и хлорид-ион. На объектах теплоэнергетики сточные воды образуются при продувке и промывке котлов, а также при промывках, продувках, регенерации оборудования водоподготовки. По данным государственной статистической отчетности за 2016 г. объектами теплоэнергетики сброшено 306 536 кг сульфат-иона и 263 849 кг хлорид-иона.

Высокоминерализованные сточные воды, образовавшиеся в процессе реагентной регенерации H-катионитовых и анионитовых фильтров на объектах теплоэнергетики, обязательно подаются на станцию нейтрализации, а после процесса нейтрализации разбавляются преимущественно водой от охлаждения оборудования и отводятся в сети городской хозяйственной канализации или на соответствующую карту шламонакопителя, после отстаивания на которой сбрасываются в водные объекты. Высокоминерализованные сточные воды, образовавшиеся в процессе реагентной регенерации Na-катионитовых фильтров на объектах теплоэнергетики малой мощности, могут отводиться без нейтрализации в сети коммунальной канализации. Из вышеуказанного следует, что наибольшее влияние на водные объекты Республики Беларусь из общего процесса водоподготовки будет оказывать процесс регенерации ионообменных смол ионообменных фильтров. При применении ионообменных фильтров (Na-катионитные,

Н-катионитовые и анионитовые фильтры) для умягчения или обессоливания воды в результате регенерации их загрузок существенно увеличивается содержание сульфат-иона и хлорид-иона в составе сточных вод. В процессе регенерации Na-катионитовых фильтров в среднем образуется 100–150 м³ при этом концентрация хлорид-иона достигает 30 000 мг/л.

В процессе регенерации Н-катионитовых фильтров первой ступени образуется 120–200 м³ сточных вод, анионитовых фильтров первой ступени – 200–330 м³ сточных вод. В процессе регенерации Н-катионитовых фильтров и анионитовых фильтров второй ступени суммарно образуется 100–180 м³ сточных вод. Сточные воды, образовавшиеся в процессе регенерации Н-катионитовых и анионитовых фильтров первой и второй ступени, смешиваются между собой в баке-нейтрализаторе в результате чего итоговая средняя концентрация сточных вод достигает следующих значений: сульфат-ион – 4000 мг/л, хлорид-ион – 450 мг/л. При химической мойке мембранных модулей образуется около 5 м³ сточных вод на каждые 100 м³ производительности установки, а концентрация сульфатов составит 125–200 мг/л (значение может отличаться в зависимости от качества исходной воды). Расчет массы загрязняющих веществ был произведен для РК «Шабаны» и Лукомльской ГРЭС.

Анализируя данные проведенного расчета можно сделать следующие выводы:

- при использовании существующих технологий водоподготовки на РК «Шабаны» сбрасывается 85 806,9 кг хлорид-иона;
- при внедрении варианта 4 для модернизации РК «Шабаны» в результате химических моек и регенерации ионообменных фильтров будет сброшено 1705,5 кг хлорид-иона;
- при внедрении варианта 3 для модернизации РК «Шабаны» в результате химических моек будет сброшено 12,72 кг хлорид-иона;
- при использовании существующих технологий водоподготовки на Лукомльской ГРЭС сбрасывается 3686,75 кг сульфат-иона;
- при внедрении варианта 2 для модернизации Лукомльской ГРЭС в результате химических моек и регенерации ионообменных фильтров будет сброшено 221,27 кг сульфат-иона и 687,5 кг хлорид-иона.

Еще одним способом экономии реагентов на действующих установках водоподготовки является использование метода регенерации «цепочкой». Использование нейтрализованных высокоминерализованных сточных вод от установки обессоливания для регенерации Na-катионитовых фильтров на одной из ТЭЦ Республики Беларусь позволяет практически полностью отказаться от приготовления регенерационного раствора NaCl и сократить концентрацию хлоридов более чем в 60 раз.

Учитывая, что коэффициент потребления воды на собственные нужды достигает значения 0,03, а усредненный коэффициент потребления воды на собственные нужды для существующих технологий водоподготовки принят 0,20 (данные анализа 18 объектов теплоэнергетики) объем водопользования при внедрении наилучших доступных технических методов сократится в 6,67 раза (за счет повторного использования). Таким образом, плата за водопользование на объектах теплоэнергетики после модернизации всех объектов составит 1 679 259 рублей, а годовая экономия составит 9 521 401 рубль. Данными о добычи, изъятии, получения воды, а также платы за водопользование представлены в табл. 6.

По результатам расчетов экономической эффективности установлено, что наиболее короткий срок окупаемости соответствует использованию существующей предварительной подготовки, поэтому расходами денежных средств на закупку коагулянта и флокулянта пренебрегали. Помимо флокулянта и коагулянта на РК «Шабаны», для регенерации ионообменных смол закупается таблетированная соль. По данным расчета на закупку необходимого количества таблетированной соли израсходовано 56 560 рублей. При внедрении 3 варианта модернизации потребуются закупка реагентов для химической мойки, расчетный расход денежных средств составляет 551 рубль. При внедрении 4 варианта модернизации потребуются закупка реагентов для химической мойки, а также таблетированная соль для регенерации Na-катионитовых фильтров, расчетный расход денежных средств составляет 1671 рубль.

Т а б л и ц а 6. Данные о плате за водопользование за 2016 г.

Регион	Брестская область	Витебская область	Гомельская область	Гродненская область
Добыто, тыс. м ³	855,12	48,58	14,53	80,00
Изъято, тыс. м ³	2263,61	61839,16	2284,75	0,00
Получено, тыс. м ³	987,08	2164,98	8113,63	4322,99
Передано без использования, тыс. м ³	410,92	18722,00	1589,28	130,50
Передано после использования, тыс. м ³	141,51	1652,40	1591,44	399,39
Сброшено в водотоки, тыс. м ³	0,00	30868,22	9,97	0,00
Сброшено в водоемы, тыс. м ³	275,34	3,84	0,00	0,00
Отведено на поля фильтрации, накопители, тыс. м ³	143,85	134,61	7,00	440,88
Сумма экологического налога, BYN	41919,10	1523491,16	1497,60	44088,00
Сумма налога на добычу/изъятие, BYN	86773,38	1296749,40	67188,90	2400,00
Сумма выплат по тарифам за получение воды из сетей водоснабжения, BYN	128389,60	336918,40	1053440,00	670798,40
Сумма выплат по тарифам за отведение сточных вод в сети канализации, BYN	16981,56	198288,00	190972,80	47926,80
Добыто, тыс. м ³	878,52	1060,39	2,40	2939,54
Изъято, тыс. м ³	3442,21	1695,83	84,43	71609,98
Получено, тыс. м ³	2437,95	22672,73	6759,50	47458,86
Передано без использования, тыс. м ³	441,89	5147,38	614,78	27056,75
Передано после использования, тыс. м ³	1025,27	5429,19	2364,78	12603,98
Сброшено в водотоки, тыс. м ³	751,69	476,60	0,00	1238,26
Сброшено в водоемы, тыс. м ³	0,00	0,00	0,00	279,18
Отведено на поля фильтрации, накопители, тыс. м ³	8,94	0,00	8,63	743,91
Сумма экологического налога, BYN	61029,04	38128,00	863,00	1711015,90
Сумма налога на добычу/изъятие, BYN	129151,47	82686,60	72,00	1665021,75
Сумма выплат по тарифам за получение воды из сетей водоснабжения, BYN	321878,72	2804056,00	996664,00	6312145,12
Сумма выплат по тарифам за отведение сточных вод в сети канализации, BYN	123032,16	651502,80	283773,60	1512477,72

На Лукомльской ГРЭС для регенерации ионообменных фильтров закупается серная кислота и каустическая гранулированная сода. По данным расчета на закупку необходимого количества реагентов для регенерации существующих ионообменных фильтров израсходовано 29709 рублей. При внедрении 2 варианта модернизации потребуются закупка реагентов для химической мойки и регенерации ионообменных фильтров, расчетный расход денежных средств составляет 3863 рубля.

Эколого-экономический расчет внедрения предлагаемых схем водоподготовки, проведенный для РК «Шабаны» и Лукомльской ГРЭС, а также анализ условий водопользования, включая процессы водоподготовки, на 18 обследованных объектах теплоэнергетики страны позволил получить следующие результаты и провести предварительную оценку оптимизации водопользования на объектах теплоэнергетики Республики Беларусь:

– снижение объемов водопользования на собственные нужды водоподготовки для котельных в 8,75 раза, для крупных объектов теплоэнергетики – в 6,67 раза, что позволит сократить объем водопользования на 20,5 млн м³ в год (85 % от объемов использования воды на собственные нужды водоподготовки);

– сокращение платы за водопользование на объектах теплоэнергетики после модернизации всех объектов Республики Беларусь приведет к ежегодной экономии средств предприятий в размере более 9,5 млн рублей;

– сокращение расхода реагентов, что позволит снизить затраты на их закупку для котельных в 33,8 раза, для крупных объектов теплоэнергетики – в 7,7 раза.

Выводы

1. Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что объекты теплоэнергетики являются источниками интенсивного воздействия на водные ресурсы за счет значительных объемов водопользования. При сбросе сточных вод в окружающую среду объекты теплоэнергетики привносят значительное количество минеральных загрязнений, основная масса которых образуется в процессе водоподготовки. При этом в Республике Беларусь проблема сокращения сброса сточных вод от водоподготовки изучена слабо, а вопрос снижения объемов используемых реагентов практически не исследован.

2. По результатам исследований систематизированы международные подходы к определению наилучших доступных технических методов для топливосжигающих установок и предложены принципиальные схемы водоподготовки для объектов теплоэнергетики, позволяющие сократить сброс высокоминерализованных сточных вод.

3. Внедрение наилучших доступных технических методов водоподготовки на объектах теплоэнергетики Республики Беларусь позволит снизить воздействие на водные ресурсы и сократить удельные затраты на водоподготовку: снизить годовые объемы водопользования на собственные нужды водоподготовки для котельных в 8,75 раза, для крупных объектов теплоэнергетики – в 6,67 раза; снизить суммарную массу сброса хлорид- и сульфат-ионов в составе сточных вод в 50 раз для котельных и 4 раза для крупных объектов теплоэнергетики; сократить расход реагентов, что позволит снизить затраты на их закупку для котельных в 33,8 раза, для крупных объектов теплоэнергетики – в 7,7 раза.

Список использованных источников

1. Водный кодекс Республики Беларусь от 30 апреля 2014 № 149-3. URL: <http://kodeksy.by/vodnyy-kodeks>. – Дата обращения: 06.08.2018.
2. Указ Президента Республики Беларусь от 17 ноября 2011 г. № 528 О комплексных природоохранных разрешениях с изм. от 9 марта 2016 г. URL: <http://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P31100528>. – Дата обращения: 06.03.2018.
3. Комплекс по предотвращению и контролю загрязнений. Справочный документ по наилучшим доступным техническим методам для крупных топливосжигающих установок, июль 2006 г. URL: http://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1132&etkstructure_id=1872. – Дата обращения: 06.03.2018.
4. Мартынова, О.И. Проблемы и некоторые пути экологического совершенствования водопользования на тепловых электростанциях / О.И. Мартынова, А.С. Седлов, Б.С. Федосеев // Теплоэнергетика. – 1995. – № 2. – С. 2–8.
5. Мамет, А.П. Технология переработки стоков водоподготовительных установок ТЭС / А.П. Мамет, Е.Б. Юрчевский. – М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1990.
6. Мамет, А.П. К вопросу о создании «бессточных» электрических станций / А.П. Мамет, Е.Б. Юрчевский // Теплоэнергетика. – 1981. – № 4. – С. 59–60.
7. Водоснабжение, водоподготовка и очистка сточных вод. Цикл лекций для студентов спец. «Промышленная теплоэнергетика» URL: <http://stringer46.narod.ru/WPAdvertisement>. – Дата обращения: 06.03.2018.
8. Высоцкий, С.П. Применение экологически чистых схем подготовки воды на ТЭС / С.П. Высоцкий // Теплоэнергетика. – 1981. – № 7. – С. 57–60.
9. Использование электродиализных аппаратов для обработки регенерационных стоков водоподготовительных установок / А.Я. Ялова [и др.] // Теплоэнергетика. – 1986. – № 2. – С. 46–50.
10. Джалилов, М.Ф. Некоторые аспекты повышения эффективности химического обессоливания воды и разработки схемы бессточной водоподготовительной установки / М.Ф. Джалилов, А.М. Кулиев, Э.А. Сафиев // Промышленная энергетика. – 1991. – № 11. – С. 34–36.
11. Ибрагимов, Г.Ш. Совершенствование технологии регенерации катионитовых фильтров с сокращением регенерационных стоков / Г.Ш. Ибрагимов, А.В. Мамочкин // Энергетик. – 197. – № 1. – С. 15–16.
12. Технические указания по схемам умягчения воды с утилизацией засоленных стоков водоподготовительной установки. – М., 1983.
13. Jackson, E. W. Make-up treatment counter current regeneration / E. W. Jackson, J. H. Smith. – Effluent and Water Treat J. – 1978. – Vol. 18, № 3. – С. 131–135.
14. Юрчевский, Е.Б. Современное отечественное водоподготовительное оборудование для обессоливания и умягчения воды на ТЭС / Е.Б. Юрчевский // Теплоэнергетика. – 2002. – № 3. – С. 62–65.
15. Водоподготовка. Процессы и аппараты; под ред. О.И. Мартыновой. – М.: Атомиздат, 1980. – 352 с.
16. Никитин, И.В. Малоотходная технология ионообменного умягчения воды в аппаратах с подвижным слоем катионита / И.В. Никитин, И.В. Старостина, С.Е. Талтыкин // Теплоэнергетика. – 1996. – № 8. – С. 63–64.
17. Исследование и внедрение процессов непрерывного ионирования с неподвижным слоем ионита с целью уменьшения расходов реагентов и количества стоков: Отчет о НИР (промеж.) / Ставропольский политехнический институт – № ГР 01870006285. – Ставрополь, 1988. – 71 с.
18. Когановский, А.М. Адсорбция и ионный обмен в процессах водо подготовки и очистки сточных вод / А.М. Когановский. – Киев: Наук. думка, 1983. – 240 с.
19. Water Desalination Report. – 22 January, 2007. – Vol. 43, № 3.

20. Обратный осмос и ионный обмен: Какая технология победит в водоподготовке XXI века / А. Г. Первов [и др.] // Экология производства. Энергетика. – 2006. – № 1(2). – С. 1–5.
21. Использование метода обратного для водоподготовки в энергетике / А. Н. Самодуров [и др.] // Теплоэнергетика. – 2006. – № 6. – С. 26–30.
22. Технический справочник по обработке воды: в 2 т.: пер. с фр. – СПб.: Новый журнал, 2007. – 1696 с.
23. Водоподготовка: Справ. / под ред. С. Е. Беликова. – М.: Аква-Терм, 2007 – 240 с.
24. Авдеев, А. А. Водоподготовительные установки АЭС – современные технические решения на основе интегрированных мембранных технологий / А. А. Авдеев // Атомкон. – 2010. – № 1. – 44 с.
25. Промышленное освоение и унификация малоотходной технологии термохимического умягчения и обессоливания воды / А. С. Седлов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2001. – № 8. – С. 28–32.
26. Лепилин, Р. С. Малоотходная технология подготовки воды для теплосетей с применением ионитных материалов / Р. С. Лепилин, Н. П. Субботина // Промышленная энергетика. – 1993. – № 5. – С. 33–34.
27. Жульков, Н. И. Бессточная технология подготовки подпиточной воды теплосети применительно к условиям атомной станции теплоснабжения (АСТ) / Н. И. Жульков, В. С. Петин, Г. Н. Маркина // Создание замкнутых систем водопользования, очистка и переработка сточных вод электростанций. – Челябинск, 1984. – С. 17–27.

Поступила 02.10.2018