

## ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

### РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ДЛЯ МЕМБРАННЫХ ОБЕССОЛИВАЮЩИХ УСТАНОВОК

© 2021 г. Е. Б. Юрчевский<sup>а</sup>, \*, В. В. Солодяников<sup>б</sup>, \*\*

<sup>а</sup>АО ОКБ “Гидропресс”, ул. Орджоникидзе, д. 21, г. Подольск, Московская обл., 142103 Россия

<sup>б</sup>ООО “СВТ-Инжиниринг”, Революционная ул., д. 70, г. Самара, 443080 Россия

\*e-mail: [aquachim@yandex.ru](mailto:aquachim@yandex.ru)

\*\*e-mail: [vvsvt@yandex.ru](mailto:vvsvt@yandex.ru)

Поступила в редакцию 18.08.2020 г.

После доработки 09.09.2020 г.

Принята к публикации 23.09.2020 г.

Предложены апробированные в эксплуатационных условиях технологии утилизации сточных вод предочистки, концентрата обратноосмотической установки и установки финишной очистки обессоленной воды. Показано, что применение этих технологий эффективно при решении вопросов ресурсосбережения. Для предвключенной ультрафильтрационной установки рассматриваемое техническое решение обеспечивает возврат 82–88% объема сточных вод в фильтрат. Концентрат обратноосмотической установки предлагается направлять на Н-катионитный фильтр, загруженный слабокислотным катионитом. Фильтр включен в замкнутый контур многократного использования регенерационных растворов, где в кристаллизаторе осуществляется извлечение из пересыщенного регенерационного раствора сульфата кальция. Фильтрат Н-катионитного фильтра разделяется на два потока, один из которых смешивается с фильтратом установки ультрафильтрации, а другой выводится из технологической схемы обессоливающей установки и используется как подпиточная вода систем охлаждения, водо- и теплоснабжения или отводится в природную среду. Для оценки эффективности предложенных авторами технических решений использованы специально разработанные математические модели отдельных процессов. Показано, что предложенная схема утилизации сточных вод мембранной обессоливающей установки на 91.8–99.0% обеспечивает эффективность использования природной воды гидрокарбонатного класса и сульфатной группы, охватывающей подавляющее большинство поверхностных источников пресной воды. Применение для утилизации концентрата обратноосмотической установки контура многократного использования регенерационного раствора позволяет вернуть в основной цикл значительную часть концентрата и выделить из него сульфат кальция в форме товарного продукта. Проведенные расчеты показали также, что для исходной воды гидрокарбонатного класса и магниевой группы применение предложенной технологии утилизации концентрата нецелесообразно. Схемы утилизации сточных вод по предложенной технологии могут быть практически реализованы с использованием стандартного оборудования и апробированных в производственных условиях технических решений.

*Ключевые слова:* мембранные технологии водоподготовки, обратноосмотическое обессоливание воды, концентрат, ресурсосбережение в водоподготовке, утилизация стоков, подпиточная вода для теплосети, вода питьевая

**DOI:** 10.1134/S004036362105012X

Дефицит пресной воды и деградация качества ее поверхностных источников — это один из наиболее серьезных рисков, с которым сталкивается мир на всех уровнях: социальном, экономическом, политическом и экологическом. Хотя Россия относится к странам мира, располагающим наибольшими пресноводными ресурсами, проблема сохранения и улучшения качества и количества пресной воды для нынешнего и будущего поколений актуальна и для нашей страны. Уже сегодня в некоторых районах России дефицит чистой воды становится весьма острой проблемой,

поэтому утверждена Водная стратегия РФ на период до 2020 г. [1]. Одна из важнейших поставленных в ней задач — повышение качества воды в водных объектах, восстановление водных экосистем и рекреационного потенциала водных объектов путем сокращения антропогенного воздействия на водные объекты и их водосборные территории.

Современные тепловые, парогазовые и атомные электрические станции являются одними из крупнейших водопользователей. Огромные объемы воды потребляют энергетические установки

для охлаждения, производства добавочной и подпиточной воды энергоблоков, причем значительная ее часть (около 30%) уходит в безвозвратные потери. Так, для работы ТЭС мощностью 1 млн кВт необходимо 1.0–1.6 км<sup>3</sup> воды в год, а для работы АЭС той же мощности – от 1.6 до 3 км<sup>3</sup>. Нижние границы этих интервалов соответствуют самому передовому техническому уровню [2].

Существенную роль в уменьшении потребности электростанции в исходной воде и повышении ее экологической чистоты играет совершенствование как технологического оборудования электростанции, так и схем водоподготовительных установок. Важным этапом в модернизации водоподготовительной техники стало освоение в конце прошлого века обратноосмотической технологии обессоливания воды. Предложены и апробированы интегральные мембранные технологии водоподготовки [3]. Опыт длительной эксплуатации обратноосмотических установок показал, что их применение обеспечивает глубокое удаление из обрабатываемой воды взвешенных, коллоидных и растворенных примесей при минимальном использовании химических реагентов [4].

Как правило, новая технология имеет неоспоримые преимущества перед традиционными ионообменной и термической технологиями водоподготовки и позволяет улучшить экологические характеристики электростанций. Однако существенным недостатком баромембранных обессоливающих установок остаются большие объемы сбрасываемых вод на всех этапах обработки воды.

В настоящей статье даются рекомендации по утилизации сточных вод, образующихся при применении мембранных технологий на всех этапах обработки природной воды из поверхностных водоемов, в целях сбережения водных ресурсов. Важным ресурсосберегающим эффектом предлагаемых технических решений будет сокращение объемов водопотребления благодаря повторному использованию части сбрасываемых сточных вод в основном цикле водоподготовительной установки (ВПУ), а также выделение из сточных вод части растворенных в них солей в виде товарных продуктов. В работе для сопоставления традиционной и предлагаемой технологий применен оценочный индекс, утвержденный Минприроды России для расчета баланса водохозяйственных объектов и представляющий собой отношение объема сбросов загрязненной воды к объему исходной воды [5]. Для водоподготовительной установки этот индекс можно представить в виде

$$K_{\text{в}} = 1 - \frac{\sum d_j}{D_{\text{и}}}, \quad (1)$$

где  $\sum d_j$  – часовой расход стоков ВПУ;  $d_j$  – часовой расход стока  $j$ -й ступени ВПУ;  $D_{\text{и}}$  – часовой

расход воды (исходной), поступающей на установку.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА

В качестве примера рассмотрена эффективность водопотребления обратноосмотической обессоливающей установки с предочисткой, состоящей из дисковых фильтров и ультрафильтрационной установки, а также с финишной очисткой воды с использованием фильтров смешанного действия (см. рисунок). По этой схеме из исходной воды последовательно удаляются:

мелкие механические примеси на дисковых самопромывных (или других механических) фильтрах 1 с рейтингом фильтрации 150–200 мкм;

крупнодисперсные и коллоидные примеси на установке ультрафильтрации 4;

примеси, находящиеся в диссоциированном состоянии, на установке обратного осмоса (УОО) 5.

На установках финишной доочистки 6 осуществляется полная деионизация обрабатываемой воды.

Объемные часовые расходы потоков, отводимых за пределы установки, со всех ступеней ВПУ включают в себя:

$d_{\text{д.ф}}$  – промывочные воды дисковых самопромывных фильтров;

$d_{\text{у.ф}}$  – отмывочные воды ступени ультрафильтрации;

$D_{\text{к}}$  – концентрат ступени обратного осмоса.

Для сокращения объемов стоков и более эффективного сбережения водных ресурсов на стадии предварительной очистки рекомендовано проводить обработку стоков в отстойнике. Промывочная вода самопромывных фильтров 1 и отмывочные воды установки ультрафильтрации 4 поступают в сборник-усреднитель 7 и затем проходят осветление в отстойнике 8 с взвешенным слоем осадка. После удаления шлама вода направляется на доочистку в механический фильтр 9. Затем осветленная вода попадает в поток фильтрата ультрафильтрационной установки. Продувка отстойника (удаленная часть воды, содержащей шлам, из нижней части аппарата) отводится в шламонакопитель 10 для захоронения шлама и восполнения потерь схемы шламоудаления. Перед ультрафильтрацией с использованием насоса-дозатора 3 проводят дозировку необходимых реагентов для коагуляции. Утилизация сточных вод стадии предварительной очистки воды с использованием отстойника 8 и механического фильтра 9 позволяет снизить расход воды на собственные нужды предварительной очистки до 0.5% и менее от объема воды, поступающего на установку [6].

Для уменьшения объема сбрасываемого в окружающую среду концентрата обратноосмо-

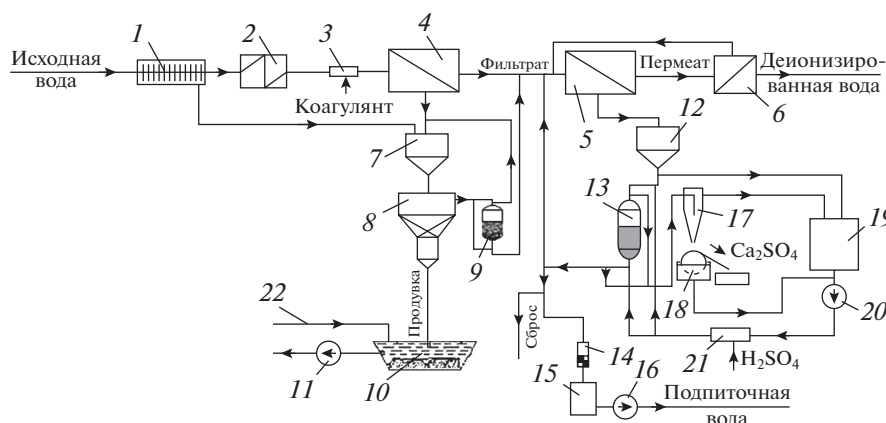


Схема обратноосмотической обессоливающей установки с переработкой стоков в отстойнике и на Н-катионитном фильтре.

1 – дисковый фильтр; 2 – подогреватель; 3 – дозаторы реагентов для коагуляции; 4 – установка ультрафильтрации (УУФ); 5 – установка обратного осмоса; 6 – установка финишной доочистки; 7 – емкость для стоков УУФ; 8 – отстойник; 9 – механический фильтр; 10 – шламо- или шлаконакопитель; 11 – насос осветленной воды; 12 – емкость для концентрата УОО; 13 – Н-катионитный фильтр; 14 – декарбонизатор; 15 – емкость для декарбонизированной воды; 16 – насос декарбонизированной воды; 17 – кристаллизатор гипса; 18 – фильтр обезвоживания гипса; 19 – емкость для осветленной воды; 20 – перекачивающий насос; 21 – дозатор серной кислоты; 22 – возврат циркулирующей воды со шламо- или шлаконакопителя

тической установки рекомендовано умягчение его на Н-катионитном фильтре 13, загруженном катионитом слабой кислотности с карбоксильными функциональными группами  $\text{COOH}$ . Фильтр включен в замкнутый контур многократного использования регенерационных растворов (КМИР). Извлечение двухводного сульфата кальция (гипса) осуществляется из пересыщенного регенерационного раствора сульфата кальция в кристаллизаторе 17, в котором находится образовавшийся ранее осадок гипса, который служит “затравкой” для образования кристаллов и способствует ускорению этого процесса [7]. Сформировавшиеся кристаллы гипса выводятся из кристаллизатора с непрерывной продувкой на фильтр для обезвоживания гипса 18. Полученный обезвоженный осадок подвергается термообработке при  $160^\circ\text{C}$  для получения гипсового вяжущего вещества товарного качества.

В замкнутом контуре регенерации Н-катионитного фильтра 13 расход серной кислоты на регенерацию всегда равен стехиометрическому. Другая важная особенность состоит в том, что в отработавшие регенерационные растворы при регенерации фильтра раствором серной кислоты поступают кальций и сульфат-ионы в количествах, эквивалентных расходу серной кислоты на регенерацию. Используя особенности карбоксильного катионита, режим работы Н-катионитного фильтра выбирают таким, чтобы в процессе рабочей части фильтроцикла из концентрата извлекался кальций, в результате чего с образованием угольной кислоты будет снижаться гидрокарбонатная щелочность, а также уменьшаться минерализация концентрата и содержание малорастворимых солей.

Поток фильтрата Н-катионитного фильтра разделяется на две части, одна из них смешивается с фильтратом установки ультрафильтрации. Угольная кислота, полученная при Н-катионировании, используется для раскисления фильтрата установки ультрафильтрации, уменьшения концентрации гидрокарбонатов и рН. В результате снижается вероятность образования карбонатных отложений. Другая часть потока фильтрата выводится из технологической схемы обессоливающей установки и используется как подпиточная вода систем охлаждения, водо- и теплоснабжения или отводится в природную среду. При необходимости требуемое качество подпиточной воды обеспечивается заданием нужного значения конверсии в обратноосмотической установке. Для удаления свободной углекислоты и снижения коррозионной активности концентрата эта часть потока проходит через декарбонизатор 14. После декарбонизации поток поступает в бак декарбонизированной воды 15, из которого с помощью насоса 16 направляется для подпитки систем охлаждения, водо- и теплоснабжения. Основные элементы описанной технологической схемы прошли апробацию в производственных условиях на водоподготовительной установке подпитки теплосети с открытым разбором горячей воды Самарской ТЭЦ [7].

## МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Для отработавших стоков финишной доочистки 6 (электродеионизация) характерны небольшой их расход (менее 3% производительности ВПУ), невысокое потребление химических реагентов и более низкое, чем в фильтрате установки

ультрафильтрации, солесодержание. Эти стоки без какой-либо переработки направляются в поток исходной воды ступени обратного осмоса.

Для оценки эффективности ресурсосбережения предложенных технических решений были проведены сравнительные расчеты, в которых использовались специально разработанные математические модели: состава минеральных веществ, водного раствора установки ультрафильтрации, химического состава фильтрата и концентрата установки обратного осмоса, фильтрата с катионитом слабой кислотности, смещения потоков и др. Математические модели верифицированы в производственных условиях [8, 9].

Компоненты минерализации концентрата установки обратного осмоса рассчитывали по формуле

$$C_{ki} = \frac{C_i^n (1 - 0.01\gamma_i R)}{1 - 0.01R},$$

где  $C_i^n$  – концентрация  $i$ -го вещества в исходной воде, мг-экв/дм<sup>3</sup>;  $\gamma_i$  – коэффициент распределения  $i$ -го вещества между исходной водой и пермеатом;  $R$  – степень конверсии, %.

Коэффициент распределения  $\gamma_i$  рассчитывали по концентрации растворенного вещества [10].

Склонность к образованию отложений на обратноосмотических мембранах определяли по двум показателям: индексу Ланжелье  $IL$  и произведению растворимости сульфата кальция  $Pr'_{CaSO_4}$ . Следует пояснить, что часто используемая для расчета обратноосмотических установок программа ROSA (Reverse Osmosis System Analyses) ориентирована на образование, в первую очередь, карбонатных отложений и предназначена для условий, характеризующихся высокими концентрациями сульфатов, и дает завышенные значения степени конверсии.

Степень конверсии рассчитывали путем итераций до постоянного значения  $R$  и концентраций малорастворимых веществ, исключая образование отложений, по индексу Ланжелье  $IL < 0.2$  и соотношению произведений активности и растворимости сульфата кальция  $Pa'_{CaSO_4} < Pr'_{CaSO_4}$ . Считается, что при этих условиях на мембранах не будут образовываться отложения [10].

Эффективность использования воды при совместной работе ступеней ультрафильтрации и обратного осмоса определяли по формуле (1).

Эффективность использования воды для всей обессоливающей установки со стадиями предочистки и обессоливания воды рассчитывали для утилизации стоков предочистки и концентрата обратноосмотической установки без учета использо-

вания части концентрата для подпитки теплосети по формуле

$$K_{ВПУ} = \left[ 1 - \frac{d_{пр} + (1 - k_2) D_k}{D_{и}} \right] \times 100\%,$$

где  $d_{пр}$  – расход продувочной воды отстойника  $\delta$ , м<sup>3</sup>/ч;  $k_2$  – коэффициент повторного использования концентрата, который равен доле фильтрата (концентрата) Н-катионитного фильтрата, возвращаемого в поток исходной воды установки обратного осмоса, м<sup>3</sup>/ч;  $D_k$  – расход концентрата УОО, м<sup>3</sup>/ч;  $D_{и}$  – расход исходной воды на ВПУ до применения повторного использования стоков. Значения  $k_2$  в расчетах заданы произвольно для демонстрационной возможности предлагаемой технологической схемы утилизации концентрата обратноосмотической установки.

Коэффициент использования воды при полном использовании стока установки обратного осмоса в качестве подпиточной воды вычислялся по формуле

$$K_{под} = \left( 1 - \frac{d_{пр}}{D_{и}} \right) \times 100\%.$$

Возможности утилизации стоков обессоливающей установки номинальной производительностью  $D_{ном} = 100$  м<sup>3</sup>/ч по описанной схеме (см. рисунок) оценены расчетным методом. Расчеты выполнены для исходных водоисточников: река Волга, имеющая площадь бассейна 1.26 млн км<sup>2</sup>, и река Дон с площадью бассейна 0.422 млн км<sup>2</sup>. Суммарная площадь бассейнов рек Волга и Дон примерно равна половине площади европейской части России (3.5 млн км<sup>2</sup>). Также расчеты выполнены для реки Нева, играющей важную роль в экономике Северо-Западного района России. Показатели качества воды названных водоисточников представлены в табл. 1.

По классификации О.А. Алекина [11], воды из водоисточников река Волга (Саратов, Ярославль) и река Нева (Санкт-Петербург) относятся к гидрокарбонатному классу и сульфатной группе, река Дон (Задонск) – к гидрокарбонатному классу и магниевой группе. Выбранные водоисточники охватывают все пресноводные реки и водоемы по классам (по преобладающим анионам) и группам (по преобладающим катионам). Подавляющее большинство пресных вод России относится к гидрокарбонатному классу и кальциевой группе.

В качестве базовой принята схема, изображенная на рисунке (без узлов переработки стоков), в которой сточные воды самопромывных фильтров 1, ступени ультрафильтрации 4 и концентрат

Таблица 1. Качество воды

Место взятия пробы, река	Компонент соледержания, мг-экв/дм <sup>3</sup>						Содержание, мг/дм <sup>3</sup>			
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	солей	оксидов железа Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	взвешенных веществ	органических и минеральных веществ
Волга, г. Саратов	3.09	1.09	1.67	2.39	2.50	0.96	413.4	0.9	350.1	3.7
Волга, г. Ярославль	1.72	0.75	0.13	1.95	0.48	0.16	202.3	—	8.7	0.8
Нева, Санкт-Петербург	0.45	0.10	0.12	0.43	0.12	0.11	55.0	—	5.9	0.3
Дон, г. Задонск	2.69	2.42	0.85	4.81	1.00	0.14	449.6	—	—	—

Примечание. Прочерки означают отсутствие данных по этим компонентам загрязнений природной воды. Эти загрязнения практически полностью задерживаются предочисткой и не влияют на результаты выполненных расчетов.

ступени обратного осмоса 5 сбрасываются в окружающую среду.

При оценке эффективности утилизации стоков предварительной очистки с использованием осветления в отстойнике  $\delta$  и возврата осветленной воды в поток фильтрата ступени ультрафильтрации принято, что продувка отстойника  $\delta$  равна 3% расхода промывочных вод дисковых фильтров и отмывочных вод установки ультрафильтрации.

В расчетах КМИР приняты следующие значения коэффициента повторного использования концентрата ступени обратного осмоса  $k_2$ : 0, 0.5, 0.8, 0.9. Для каждого выбранного значения коэффициента  $k_2$  были выполнены два варианта расчета. В первом варианте (базовом) конверсию рассчитывали, исходя из необходимости предотвращения сульфатных отложений на мембранах. Во втором варианте конверсию определяли на основе предельно допустимых значений жесткости Ж и карбонатного индекса  $I_k$  для подпиточной воды, соответствующих подогреву в котлах до температуры 141–150°C и составлявших 7 г-экв/м<sup>3</sup> и 0.5 (мг-экв/м<sup>3</sup>)<sup>2</sup> соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

По первому варианту (базовому) все сточные воды обессоливающей установки, в том числе промывочные воды дисковых фильтров, отмывочные воды ультрафильтрационной установки и концентрат обратноосмотической установки отводятся в окружающую среду со следующими показателями:

Расчетная степень конверсии  $R$ , % .....47

Коэффициент использования  
воды  $K_{ВПУ}$ , % .....42.2

Расход исходной воды на ВПУ  $D_{и}$ , м<sup>3</sup>/ч .....250.8

Жесткость концентрата Ж, мг-экв/дм<sup>3</sup> .....7.85

Индекс карбонатный  $I_k$ , (мг-экв/дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup> .....23.1

Аналогичные расчеты были выполнены для всех принятых водоисточников и других выбранных значений  $k_2$ . Полученные результаты расчетов основных технологических характеристик анализируемых водоподготовительных установок представлены в табл. 2.

Анализ этих данных показывает, что для водоисточников гидрокарбонатного класса и кальциевой группы предложенная технологическая схема переработки стоков предочистки и концентрата обратноосмотической установки во всех вариантах обеспечивает значительное повышение эффективности потребления исходной воды. Так, для водоисточника река Волга (Саратов) эффективность водоиспользования возрастает с 35% в базовом варианте до 91.4–96.3% при различных значениях коэффициента возврата концентрата. Для водоисточника река Волга (Ярославль) эффективность водоиспользования возрастает от 54.4% в базовом варианте до 91.8–98.9% при реализации предложенной технологии. Для водоисточника река Нева (Санкт-Петербург) и без того высокую эффективность водоиспользования 88.1% можно увеличить до 98.8–99.0%.

Важным фактором, оказывающим значительное влияние на технико-экономические показатели водоподготовительной установки, является конверсия. Из табл. 2 следует, что для перечисленных водоисточников обработка концентрата на Н-катионитном фильтре и возврат его в основной контур обеспечивают существенный рост конверсии при доле возврата концентрата 0.5.

Таблица 2. Характеристики водоподготовительных установок

Показатель	Место взятия пробы (река, город)	Базовый вариант	Доля вторично использованного концентрата $k_2$						
			0.0	0.5	0.5	0.8	0.8	0.9	0.9
Степень конверсии $R$ , %	Волга, Саратов	47.00	47.00	71.00	50.00	67.00	25.00	54.00	17.00
	Волга, Ярославль	61.00	61.00	77.00	77.00	82.00	63.00	85.00	46.00
	Дон, Задонск	10.00	10.00	52.00	33.00	39.00	15.00	41.00	5.00
	Нева, Санкт-Петербург	95.00	95.00	95.00	85.00	95.00	71.00	92.00	53.00
Жесткость стока Ж, мг-экв/дм <sup>3</sup>	Волга, Саратов	7.85	4.08	12.24	6.60	23.04	6.12	25.47	6.63
	Волга, Ярославль	6.80	2.20	6.12	6.12	17.35	6.90	37.76	6.94
	Дон, Задонск	5.68	2.75	7.64	4.94	13.86	4.16	19.81	3.78
	Нева, Санкт-Петербург	10.84	11.98	15.28	5.26	35.81	5.30	42.32	4.64
Карбонатный индекс стока $I_k$ , (мг-экв) <sup>2</sup>	Волга, Саратов	23.11	0.40	1.20	0.60	2.20	0.80	2.50	0.70
	Волга, Ярославль	18.70	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.40	0.10
	Дон, Задонск	15.04	0.10	0.40	0.70	24.70	0.50	14.50	0.70
	Нева, Санкт-Петербург	28.20	1.20	2.30	0.80	5.40	0.80	6.30	0.70
Расход исходной воды на ВПУ $D_{и}$ , м <sup>3</sup> /ч	Волга, Саратов	250.00	222.30	125.90	156.80	114.80	167.20	113.40	155.50
	Волга, Ярославль	193.00	171.30	120.10	120.10	109.10	116.80	106.40	116.80
	Дон, Задонск	1170.10	1044.80	152.70	210.60	137.20	222.90	119.60	303.00
	Нева, Санкт-Петербург	124.40	110.00	107.30	113.70	105.60	113.10	105.40	113.80
Сток ступени предва- рительной очистки воды $d_{пр}$ , м <sup>3</sup> /ч	Волга, Саратов	28.20	0.80	0.40	0.50	0.40	0.60	0.40	0.50
	Волга, Ярославль	22.00	0.60	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
	Дон, Задонск	127.50	3.40	0.50	0.70	0.50	0.80	0.40	1.00
	Нева, Санкт-Петербург	14.60	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Расход концентрата обратного осмоса $D_k$ , м <sup>3</sup> /ч	Волга, Саратов	116.30	116.30	42.10	103.10	50.80	309.30	87.80	503.30
	Волга, Ярославль	65.90	65.90	30.80	30.80	22.60	60.50	18.20	121.00
	Дон, Задонск	927.80	927.80	95.20	209.30	161.20	584.20	148.40	1958.80
	Нева, Санкт-Петербург	5.40	5.40	5.40	18.20	5.40	42.10	9.00	91.40
Эффективность водо- использования ВПУ $K_{ВПУ}$ , %	Волга, Саратов	35.00	53.20	91.40	79.20	95.80	61.90	96.30	79.70
	Волга, Ярославль	54.40	65.50	91.80	91.80	97.50	93.50	98.90	93.50
	Дон, Задонск	9.80	20.40	95.90	91.00	97.20	89.90	98.70	83.20
	Нева, Санкт-Петербург	88.10	95.30	97.50	92.40	98.80	92.90	99.00	92.30
Коэффициент исполь- зования воды ВПУ с учетом направления стока на подпитку $K_{под}$ , %	Волга, Саратов	—	99.70	—	99.80	—	99.60	—	99.80
	Волга, Ярославль	—	99.70	—	99.80	—	99.80	—	99.80
	Дон, Задонск	—	99.70	—	99.90	—	99.90	—	99.90
	Нева, Санкт-Петербург	—	99.70	—	99.70	—	99.70	—	99.70
Масса получаемого гипса, т/год	Волга, Саратов	329.90	329.90	192.20	236.20	175.40	106.30	174.10	235.30
	Волга, Ярославль	201.60	201.60	145.80	145.80	133.80	142.60	130.80	143.10
	Дон, Задонск	2050.00	2050.00	301.80	405.80	186.30	395.10	224.10	722.30
	Нева, Санкт-Петербург	11.50	11.50	11.60	12.40	11.60	11.30	11.60	11.00
Масса удаляемых примесей, кг/ч	Волга, Саратов	91.90	81.70	46.20	57.60	42.20	70.40	41.70	57.10
	Волга, Ярославль	9.20	8.20	5.70	5.70	5.20	5.60	5.10	5.60
	Дон, Задонск	21.70	19.40	2.80	3.90	2.50	4.10	2.20	5.60
	Нева, Санкт-Петербург	3.30	2.90	2.90	3.00	2.80	3.00	2.80	3.00

Примечание. Прочерки означают, что концентрат не может использоваться в качестве подпиточной воды из-за высоких значений жесткости и карбонатного индекса.

В табл. 2 результаты расчетов для водоисточника река Дон (Задонск) с исходной водой гидрокарбонатного класса и магниевой группы значительно отличаются от результатов расчетов для других водоисточников и указывают как на низкую конверсию во всем диапазоне повторного использования концентрата, так и на высокую жесткость фильтрата. Это обусловлено большой концентрацией магния в водоисточнике. Для подобных вод применение предложенной технологии утилизации концентрата нецелесообразно и необходимы разработка иного способа получения соединений магния в качестве сырьевого материала и демагнизация концентрата ступени обратного осмоса.

Вклад первого этапа утилизации сточных вод остается неизменным и составляет 3% расхода промывочных вод дисковых фильтров и отмывочных вод установки ультрафильтрации, что позволяет вернуть в основной цикл 97% объема стоков этой стадии водоподготовительной установки. Вклад второго этапа утилизации концентрата обратноосмотической установки зависит от коэффициента возврата концентрата в основной цикл  $k_2$ .

Для практической реализации предложенной технологической схемы водосбережения природной воды целесообразно использовать апробированное отечественное оборудование. Расчет срока окупаемости предлагаемых инноваций в значительной мере зависит от производительности установки и стоимости сброса отдельных компонентов сточных вод с учетом местных условий и должен выполняться для каждого конкретного объекта.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенная схема утилизации сточных вод мембранной обессоливающей установки позволяет достичь уровня эффективности использования природной воды гидрокарбонатного класса и кальциевой группы 91,4–99,0%. Для рассмотренных водоисточников обработка концентрата обратноосмотической установки на Н-катионитном фильтре и возврат его в основной контур обеспечивают существенный рост степени конверсии.

2. Применение для утилизации концентрата обратноосмотической установки Н-катионирования в составе контура многократного использования регенерационного раствора позволяет выделить из концентрата сульфат кальция в форме товарного продукта.

3. Схемы утилизации сточных вод по предложенной технологии могут быть практически реализованы с использованием стандартного оборудова-

ования и апробированных в производственных условиях технических решений.

4. Для вод магниевого класса применение предложенной технологии утилизации концентрата нецелесообразно. Необходимы разработка иного способа получения соединений магния в качестве сырьевого материала и демагнизация концентрата ступени обратного осмоса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г.** Утв. распоряжением Правительства РФ № 1235-р от 27.08.2009.
2. **Данилов-Данильян В.И.** Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России / Ин-т устойчивого развития; Центр экологической политики России. М.: ООО "Типография ЛЕВКО", 2009.
3. **Пантелеев А.А., Очков В.Ф., Гавриленко С.С.** Схемно-технологические решения водоподготовительных установок на базе интегрированных мембранных технологий для парогазовых ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 4 (90). С. 11–16.
4. **Опыт освоения новых технологий обработки воды на ТЭС / Б.М. Ларин, А.Н. Коротков, М.Ю. Опарин, А.Б. Ларин** // Теплоэнергетика. 2010. № 8.
5. **Методика** расчета водохозяйственных балансов водных объектов. Утв. приказом М-ва природных ресурсов РФ № 314 от 30.11.2007.
6. **Юрчевский Е.Б., Солодянников В.В.** Сточные воды мембранных обессоливающих установок и их утилизация. Ультрафильтрация // Энергосбережение и водоподготовка. 2017. № 2 (106). С. 3–13.
7. **Юрчевский Е.Б., Солодянников В.В.** Расчетно-экспериментальное обоснование схем утилизации концентрата, образующегося в цикле обратноосмотических обессоливающих установок // Теплоэнергетика. 2018. № 7. С. 92–98. <https://doi.org/10.1134/S0040363618070093>
8. **Разработка** и верификация программы расчета качества фильтрата обратноосмотических установок, предназначенной для использования в математических моделях водоподготовительных установок, включающих обратноосмотическое обессоливание / Е.Б. Юрчевский, В.В. Солодянников, М.А. Пичугина, Ю.В. Солодянникова // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. № 2 (118). С. 3–8.
9. **Юрчевский Е.Б., Солодянников В.В.** Описание математической модели процесса деминерализации воды с применением мембранных технологий и узлом утилизации концентрата // Энергосбережение и водоподготовка. 2020. № 1 (123). С. 55–62.
10. **Лурье Ю.Ю.** Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1989.
11. **Алекин О.А.** Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1953.

## Resource-Saving Solutions for Membrane-Demineralization Plants

**E. B. Yurchevskii<sup>a, \*</sup> and V. V. Solodyannikov<sup>b, \*\*</sup>**

<sup>a</sup> *АО ОКБ Hidropress, Podolsk, Moscow oblast, 142103 Russia*

<sup>b</sup> *ООО SVT Engineering, Samara, 443080 Russia*

*\*e-mail: aquachim@yandex.ru*

*\*\*e-mail: vvsvt@yandex.ru*

**Abstract**—Technologies for recycling effluent waters from pretreatment, reverse-osmosis plant concentrate, and demineralized water from a polishing plant that have been approbated under field conditions are proposed. It is shown that the application of these technologies is efficient in solving resource-saving problems. For the topping ultrafiltration plant, the use of the considered technical solution makes it possible to return 82–88% of the effluent water volume to the permeate. Reverse-osmosis plant concentrate is suggested to be forwarded to an H-cation exchange filter charged with a weak-acid cation exchange resin. The filter is incorporated into a closed loop for multiple use of regeneration solutions that contains a crystallizer in which calcium sulfate is extracted from a supersaturated regeneration solution. The permeate from the H-cation exchange filter is divided into two flows. One of these flows is mixed with the ultrafiltration plant permeate, and the other is removed from the demineralization plant process circuit and is used as makeup water for cooling systems or water supply and heat-supply systems or is removed into the environment. For estimating the efficiency of the proposed technical solutions, specially developed mathematical models of individual processes were used. It is shown that it is possible by applying the proposed scheme for recycling the effluent water from a membrane demineralization plant to achieve 91.8–99.0% efficiency of using natural water relating to the hydrocarbonate class and sulfate group, which encompasses the overwhelming majority of surface fresh water sources. By applying the regeneration solution multiple usage loop for recycling the reverse-osmosis plant concentrate, it is possible to return a significant part of the concentrate into the main cycle and to extract commercial-grade calcium sulfate from the concentrate. It was also shown from the accomplished calculations that the application of the proposed concentrate recycling technology is inexpedient for source water belonging to the hydrocarbonate class and magnesium group. The schemes for recycling effluent water according to the proposed technology can be practically implemented by using standard equipment and technical solutions approbated under field conditions.

**Keywords:** membrane water-treatment technologies, reverse-osmosis water demineralization, concentrate, resource saving in water treatment, effluent recycling, heat network makeup water, drinking water