

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Обзорная статья

УДК 628.16

doi: 10.31774/2658-7890-2022-4-4-84-100

Обзор методов и технологий опреснения воды для целей питьевого водоснабжения

Виктория Федоровна Талалаева

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация, Vika-Silchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2541-204X>

Аннотация. Цель: обзор существующих технологий и методов опреснения морской воды для целей питьевого водоснабжения. **Обсуждение.** На основе современных методов исследований с использованием статистических данных, обзора отечественной и зарубежной литературы был проведен обзор методов и технологий опреснения и обессоливания высокоминерализованных природных вод. Использование морской воды в хозяйственно-бытовых целях невозможно ввиду высокого содержания минеральных веществ, однако после опреснения такую воду можно использовать в питьевых целях. Выбор технологий и методов опреснения прежде всего обусловлен качеством исходной воды, а также требованиями к качеству обработанной воды, производительностью установки и технико-экономическими расчетами. Для целей питьевого водоснабжения наиболее эффективным и экономически выгодным является метод опреснения воды с использованием технологий обратного осмоса, применяемый как для морских, так и для подземных вод с высокой минерализацией. Технология обратного осмоса имеет значительные преимущества перед методом термического опреснения, особенно когда применяется к небольшим установкам небольших систем питьевого водоснабжения. Применение обратноосмотических установок позволит значительно повысить производительность в виде выхода питьевой воды на ватт потребляемой электроэнергии. **Выводы.** Внедрение современных технологий, внимательное отношение к водопотреблению играют значительную роль в сохранении водного баланса в разных странах. Наиболее экономически выгодным и эффективным является метод опреснения морской воды на обратноосмотических установках. Несмотря на то, что установки опреснения и обессоливания воды весьма дорогостоящи, сохранение природных вод является на сегодняшний день приоритетным.

Ключевые слова: дефицит водных ресурсов, метод, водоснабжение, технология, опреснение

Для цитирования: Талалаева В. Ф. Обзор методов и технологий опреснения воды для целей питьевого водоснабжения // Экология и водное хозяйство. 2022. Т. 4, № 4. С. 84–100. <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-4-84-100>.

WATER SUPPLY, SEWERAGE SYSTEM, CONSTRUCTION SYSTEMS OF WATER RESOURCES CONSERVATION

Review article

Review of water desalination methods and technologies for drinking water supply

Viktoria F. Talalaeva

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation, Vika-Silchenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2541-204X>



Abstract. Purpose: review of existing technologies and methods of seawater desalination for drinking water supply. **Discussion.** Based on modern research methods using statistical data and a review of domestic and foreign literature, a review of methods and technologies for desalination and desalination of highly mineralized natural waters was carried out. The use of sea water for domestic purposes is impossible due to the high content of minerals, however, after desalination, such water can be used for drinking. The choice of technologies and methods of desalination is primarily determined by the quality of source water, as well as the requirements for the quality of treated water, plant productivity and technical and economic calculations. For the drinking water supply purposes, the most efficient and cost-effective method is desalination using reverse osmosis technology, used for both sea and groundwater with high salinity. Reverse osmosis technology has significant advantages over thermal desalination, especially when applied to small-scale plants of small domestic water supply systems. The use of reverse osmosis plants will significantly increase productivity of drinking water output per watt of electricity consumed. **Conclusions.** The introduction of modern technologies and careful attention to water consumption play a significant role in maintaining water balance in different countries. The most cost-effective and efficient method is seawater desalination using reverse osmosis plants. Despite the fact that water desalination and desalination plants are very expensive, the conservation of natural waters is a priority nowadays.

Keywords: water resources scarcity, method, water supply, technology, desalination

For citation: Talalaeva V. F. Review of water desalination methods and technologies for drinking water supply. *Ecology and Water Management*. 2022;4(4):84–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-4-84-100>.

Введение. Наиболее важным человеческим ресурсом является вода, обеспечивающая важнейшие функции – питьевое потребление, удовлетворение санитарно-гигиенических потребностей, продовольственное, промышленное, энергетическое производство и др. Увеличение численности населения и промышленности, экологические и антропогенные факторы приводят к всемирному дефициту воды.

Проблема недостатка водных ресурсов является одной из глобальных во всем мире. Поверхность Земли на 70,8 % покрыта водой, но лишь 2,5 % ее составляет пресная. Природные водные ресурсы возобновляемы, но при этом ограничены и очень уязвимы к внешним воздействиям.

Согласно статистическим данным, практически 1/5 часть населения мира проживает в районах с малой водообеспеченностью. Около 60 % территорий имеют ограниченный доступ к пресной воде, что вызывает проблемы с промышленностью, коммунально-бытовым и сельским хозяйством [1–5].

По прогнозам Организации Объединенных Наций (ООН), к 2030 г.

порядка 3,9 млрд чел. будут испытывать водный стресс, а к 2050 г. это число достигнет 2/3 численности мирового населения. Однако наряду с проблемой дефицита воды стоит проблема ее качества. Особенно это касается густонаселенных районов и территорий крупных промышленных предприятий и сельскохозяйственных комплексов [1, 2].

Вопросы, возникающие в процессе подготовки природных вод, широко представлены в работах М. Г. Журбы, С. Н. Линевича, Л. Н. Фесенко, И. Г. Ушаковой, А. С. Копылова и многих других специалистов [6–8].

Поскольку во многих засушливых областях мало пресноводных водоемов, возникают проблемы не только с водоснабжением населения, но и с поливом почвы. Их можно было бы решить благодаря возможности использовать для этих целей опресненную морскую воду. На Земле присутствуют значительные запасы такой воды, но из-за высокого содержания солей ее невозможно применять для хозяйственных нужд. Многие государства, в т. ч. и Россия, ищут пути опреснения соленых водных источников, что помогло бы справиться с проблемами засухи в областях, расположенных вблизи морских вод.

Технологии опреснения морских вод для использования в питьевых и промышленных целях детально рассмотрены О. В. Мосиным, М. М. Агамалиевым, И. В. Николенко, Р. Х. Хамизовым и др. [9–11].

Целью работы являлся обзор существующих технологий и методов опреснения морской воды для целей питьевого водоснабжения.

Обсуждение. Запасы воды на Земле огромны, однако это преимущественно соленая вода Мирового океана. Распределение мировых водных ресурсов представлено в виде диаграммы на рисунке 1 [12].

Неравномерность распределения водных ресурсов наблюдается по континентам, странам и климатическим поясам. Данные о распределении водных ресурсов по континентам и странам представлены в таблицах 1, 2.

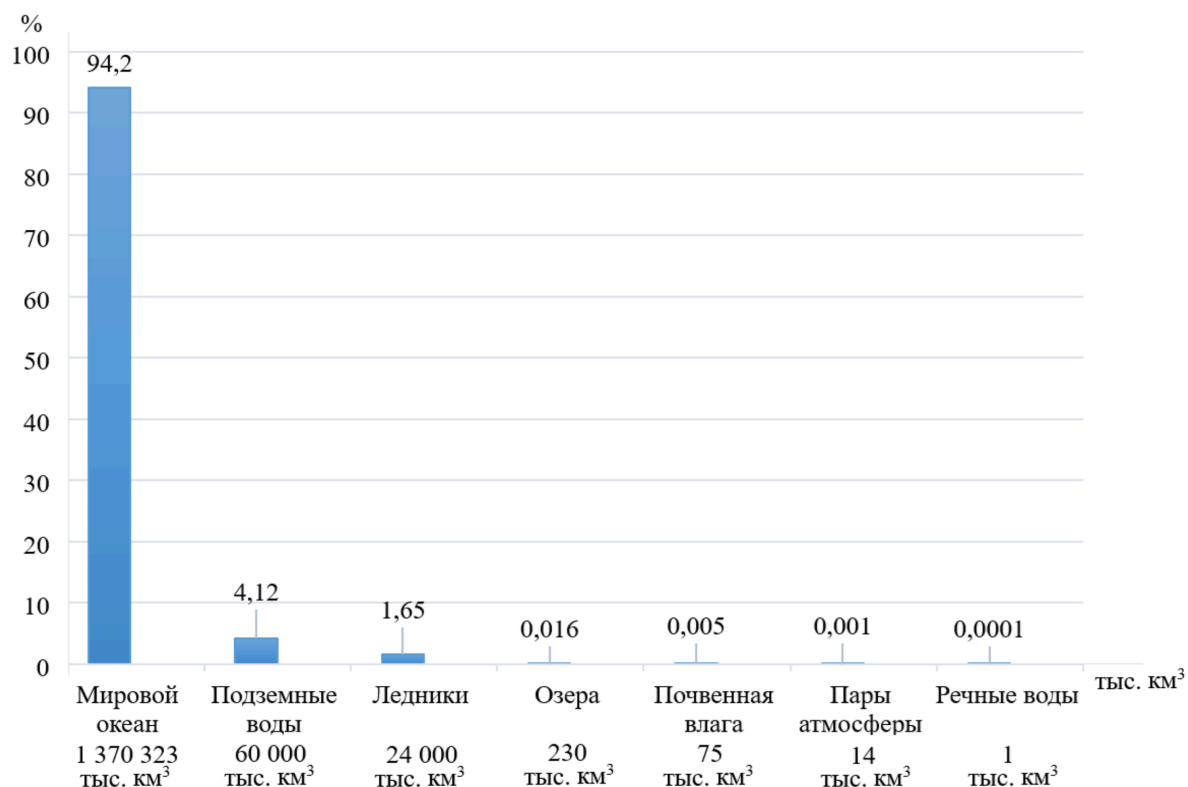


Рисунок 1 – Диаграмма распределения мировых водных ресурсов

Figure 1 – Diagram of world water resources distribution

Таблица 1 – Континентальный объем водных ресурсов [3]

Table 1 – Continental volume of water resources [3]

Континент	Водообеспеченность, м³/год на 1 км²	Возобновляемые ресурсы (речной сток)	
		км³/год	%
Южная Америка	654000	11800	26,4
Азия	332000	14400	32,3
Европа	306000	3210	7,2
Австралия и Океания	267000	2400	5,4
Северная Америка	239000	8200	18,4
Африка	153000	4600	10,3

Таблица 2 – Мировые ресурсы пресной воды [3, 13]

Table 2 – World fresh water resources [3, 13]

Страна	Ресурс пресной воды в среднем на душу населения, м³	Страна	Ресурс пресной воды в среднем на душу населения, м³	Страна	Ресурс пресной воды в среднем на душу населения, м³
1	2	3	4	5	6
Бразилия	30680	Греция	5246	Иран	1943
Россия	299441	Казахстан	5041	Польша	1404
Норвегия	83735	Вьетнам	4513	Республика Корея	1357

Продолжение таблицы 2
Table 2 continued

1	2	3	4	5	6
Чили	56042	Беларусь	3745	Германия	1297
Финляндия	20466	Португалия	3618	Индия	1185
Индонезия	13220	Таиланд	3386	Украина	1096
Ирландия	12045	Япония	3371	Бангладеш	761
Грузия	11315	Турция	3210	Узбекистан	625
Таджикистан	10469	Италия	3170	Венгрия	594
США	9628	Болгария	2706	Пакистан	350
Словакия	9524	Испания	2605	Молдова	236
Киргизия	9105	Велико-британия	2422	Туркмения	206
Австрия	6729	Румыния	1951	Израиль	150
Среднемировой показатель					5418,3

Недостаток пресной воды особо остро ощущается в промышленно развитых странах. Например, в Японии и США объемы потребляемой воды на бытовые нужды, промышленность и сельское хозяйство существенно превышают имеющиеся ресурсы. Также в Израиле и Кувейте запасы пресной воды не соответствуют их потреблению, помимо этого, данные страны ограничены уровнем атмосферных осадков. Страны Средней Азии (Казахстан, Туркмения), а также Кавказ и юго-восточная часть России обладают значительными минерально-сырьевыми ресурсами, но пресноводные источники этих территорий находятся в дефиците [3, 13].

Запасы водных ресурсов на территории России, большая часть которых сосредоточена в озерах (26,5 тыс. км³) и подземных (28,0 тыс. км³) водах, составляют в целом 88,9 тыс. км³/год, возобновляемые водные ресурсы, оцениваемые объемом годового стока рек, составляют 10 % мирового речного стока (второе место после Бразилии). Суммарные возобновляемые ресурсы пресных вод России оцениваются в размере 10803 км³/год [13].

Объем используемого речного стока не превышает 2 %, потребление воды из пресных поверхностных водоисточников составляет около 65 %, из подземных – менее 32 %, морской воды используется лишь около 5 %. Годовой водозабор составляет примерно 60–65 км³, из них более 50 % на-

правлено на промышленность, около 20 % – на хозяйственно-бытовые нужды, 13 % – на водопотребление в сельском хозяйстве и около 6 % – на прочие нужды [3, 13].

Использование морской воды в хозяйственно-бытовых целях невозможно ввиду высокого содержания минеральных веществ, для выведения которых из организма требуется больше воды, чем выпитое ее количество. Однако после опреснения такую воду можно использовать в питьевых целях.

Применение современных технологий и методов опреснения воды позволит решить проблемы недостатка водных ресурсов. Улучшения качества питьевой воды невозможно достичь с использованием только традиционных технологий, основанных на реагентной обработке с последующим отстаиванием и фильтрованием. Также и опресненную воду нельзя считать чистой, так как в ней сохраняются различные компоненты, от плотности которых зависит область ее применения [6, 14].

Выбор установки для опреснения зависит от исходного содержания солей в воде, назначения и необходимого объема, а также от требуемых показателей воды после опреснения. Для различных целей водопотребления значение солесодержания различно. Так, например, для питьевой воды согласно СанПиН 2.1.4.1074-01¹ предельная концентрация (ПДК) солей (минерализация) составляет 1000 мг/л, под ней понимается масса сухих солей в граммах на 1 кг вещества. Концентрация солей в единице объема жидкости может существенно колебаться в зависимости от моря. Например, Черное, Каспийское и Азовское моря характеризуются как слабосоленые. Средний показатель солёности Мирового океана составляет 35 г/кг. Кроме хлорида натрия (NaCl) – поваренной соли, морская вода содержит ряд других хими-

¹Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий: СанПиН 2.1.3684-21: введ. в действие с 01.03.21. М.: Центрмг, 2022. 92 с.

ческих элементов (более 50), некоторые из них представлены в виде минералов и микроэлементов [15].

Выбор метода опреснения прежде всего обусловлен качеством исходной воды, а также требованиями к качеству обработанной воды, производительностью установки и технико-экономическими расчетами [16].

Помимо этого, необходимо учитывать экономическую эффективность выбора установки и возможную необходимость дополнительной обработки воды по таким показателям, как мутность, цветность, запах, pH, жесткость, сухой остаток, содержание ионов, радиоактивное и бактериальное загрязнение и т. д.

Далее рассмотрим методы и технологии опреснения воды для питьевых целей, а также приведем их краткий анализ. Существующие методы опреснения воды представлены на рисунке 2.

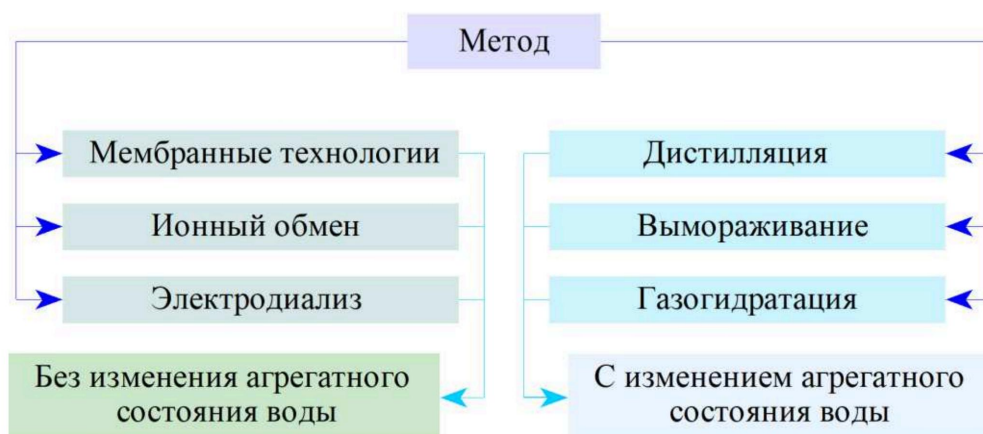


Рисунок 2 – Классификация методов опреснения вод

Figure 2 – Classification of water desalination methods

Мембранные технологии включают в себя процессы макрофльтрации, ультрафльтрации, нанофльтрации и обратного осмоса. Макрофльтрационные мембраны позволяют задерживать мелкие взвеси и коллоидные частицы. Ультрафльтрационные мембраны удаляют крупные органические молекулы, вирусы и бактерии, коллоидные частицы, растворенные соли не задерживаются. Нанофльтрационные мембраны задерживают органические соединения (с молекулярной массой выше 300 г/моль), в зависимости

от структуры мембраны пропускают от 15 до 90 % солей. Обратноосмотические мембраны имеют самые мелкие поры, позволяющие задерживать бактерии и вирусы, органические и около 98 % всех растворенных веществ, а также большую часть растворенных солей [7, 15, 17].

Принцип мембранных процессов состоит в пропуске исходной воды под давлением через полупроницаемую мембрану, в результате чего исходная вода делится на очищенную воду (фильтрат) и сконцентрированный раствор (концентрат).

Основными преимуществами мембранных технологий являются: высокая эффективность очистки воды, низкие затраты на электроэнергию, экологическая безопасность, простота в эксплуатации, длительный срок службы (при правильной и своевременной промывке мембран). К недостаткам можно отнести высокую стоимость оборудования, его эксплуатации, обслуживания и ремонта, а также большой расход электроэнергии.

Технология обратного осмоса для опреснения морской воды заключается в том, что вода под давлением проходит через мельчайшие фильтры, в результате этого содержание солей становится очень низким. Степень очищения и производительность мембраны зависят от таких факторов, как количество соли в исходном сырье, солевой состав, температура и давление. На рисунке 3 представлена технологическая схема очистки воды с использованием мембранных технологий.

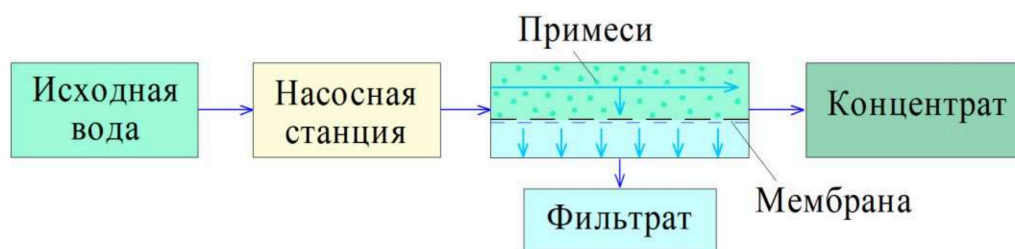


Рисунок 3 – Технологическая схема очистки воды с применением мембранных технологий

Figure 3 – Technological scheme of water treatment using membrane technologies

Преимуществами обратного осмоса являются: высокий показатель степени очистки воды (около 99 %), малое электропотребление, экономия на реагентах, отходы, получаемые в процессе водоподготовки, не требуют дополнительной очистки. Основной недостаток – высокая стоимость мембранных фильтров. Помимо этого, мембраны обратного осмоса чувствительны ко многим загрязняющим веществам, для эффективности работы системы требуется предварительная водоподготовка [7, 14].

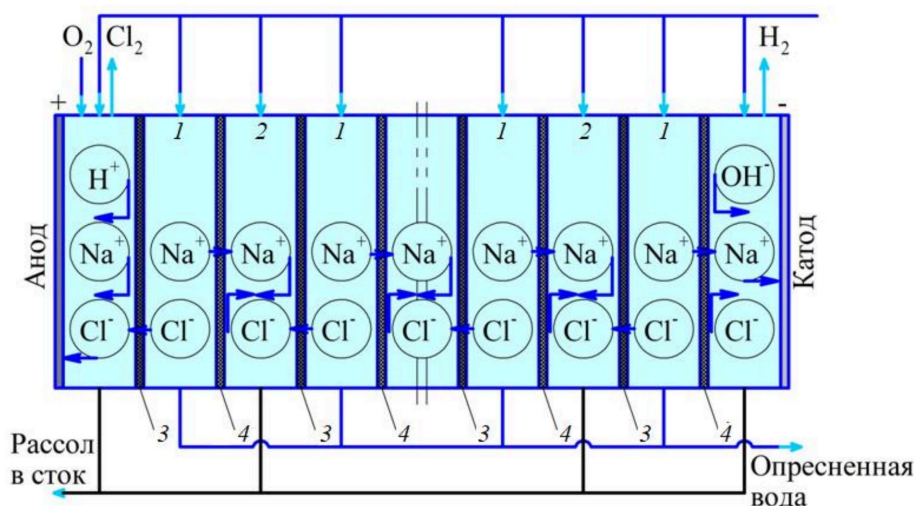
Метод подготовки воды с использованием ионообменных фильтров основан на применении ионообменных смол (ионитов) для обессоливания воды. В данной технологии может использоваться один фильтр со смолой смешанного действия либо два фильтра, стоящих поочередно, со смолами в форме H^+ и OH^- . При использовании ионообменных фильтров ионообменная смола задерживает все ионы и насыщается ими. Управление фильтрами осуществляется с помощью контрольных блоков, регулирующих процесс эксплуатации и регенерации [10].

Полная замена смолы в установках с одним фильтром необходима после снижения эффективности ее работы, когда в худшую сторону изменяются показатели воды. Для варианта с двумя фильтрами после насыщения анионами и катионами осуществляется их регенерация с помощью реагентов: на фильтр H^+ подается кислотный раствор, на фильтр OH^- – щелочной раствор. Преимуществом обработки воды на ионообменных фильтрах является доведение воды до высокого качества, а также стоимость ионообменных систем, которая в несколько раз уступает системам обратного осмоса и электродиализа. Основной недостаток данного метода заключается в том, что промывные воды загрязняют окружающую среду, помимо этого, требуются существенные затраты на реагенты и утилизацию стока после регенерации фильтров.

Известен также метод электродеионизации, являющийся эффективной технологией мембранного обессоливания воды, основанной на пропуске по-

тока через электрическое поле. Установка электродеионизации состоит из трех модулей: блок для очищенной воды и два блока для рассола. Под действием электрического тока растворенные в воде вещества перемещаются к полюсам и задерживаются на мембранах. Отрицательно заряженные ионы идут к аноду, а положительно заряженные – к катоду. Подготовленная таким методом вода имеет достаточную степень очистки для использования в медицине и микроэлектронике. Метод электродеионизации больших объемов воды является достаточно энергозатратным, что препятствует его широкому применению [10, 16].

Электродиализ – метод, при котором водный поток пропускают через камеру с электродами, в результате чего катионы и анионы распределяются на соответствующих электродах (рисунок 4). Катионитовые мембраны проницаемы в электрическом поле для катионов, но непроницаемы для анионов, а анионитовые мембраны проницаемы для анионов, но непроницаемы для катионов, в опреснительных камерах происходит селективное разделение определенных типов ионов солей [9].



1 – камера опресняемой воды; 2 – камера рассола;
3 – анионитовая мембрана; 4 – катионитовая мембрана

1 – desalinated water chamber; 2 – brine chamber;
3 – anion exchange membrane; 4 – cation exchange membrane

Рисунок 4 – Схема установки электродиализного опреснителя
Figure 4 – Installation scheme of an electrodesalination plant

Достоинство данного способа опреснения морской воды – использование химически и термически стойких мембран, позволяющих осуществлять очистку при высокой температуре. Недостаток – эффективность только при небольших объемах воды и невысоком содержании солей.

Наиболее популярна технология дистилляции (обычная или многостадийная), основанная на свойствах воды закипать при высоких температурах и образовывать пар. Путем дистилляционной обработки морских вод получают большую часть пресных ресурсов. Метод используется без применения химических веществ, а выделяемая в процессе работы тепловая энергия может быть использована для различных целей. Основная часть затрат при осуществлении любого варианта процесса дистилляции морской воды связана с большими потребностями в тепловой энергии. Помимо этого, в процессе обработки дистиллированная вода лишается минеральных веществ, не обладает необходимыми кислотностью и жесткостью, что делает ее непригодной для питьевого водоснабжения, применение ее возможно лишь в промышленных целях.

Газогидратный метод основывается на способности углеродных газов при определенном давлении и температуре создавать с участием воды соединения клатратного типа (газогидраты). Соленую воду замораживают, затем обрабатывают газом, вследствие чего формируются кристаллы, которые отделяют от рассола, промывают, плавят, и в итоге получают чистую пресную воду [16].

Для опреснения морской воды используется самое разное оборудование, в т. ч. опреснители, работающие на солнечной энергии. В них заливается вода, которая под воздействием солнечного тепла превращается в пар, конденсируется на стенках корпуса и затем оседает в нижней части прибора. В южных регионах активно используют солнечные опреснители, в которых происходит нагрев и испарение морской воды. Существует и противо-

положный способ, при котором соленую воду замораживают, а затем отделяют от нее пресную, поскольку она замерзает быстрее [18, 19].

Для целей питьевого водоснабжения наиболее эффективным и экономически выгодным является метод опреснения воды с использованием технологий обратного осмоса, применяемый как для морских, так и для подземных вод с высокой минерализацией. В отличие от обычных обратноосмотических установок, работающих при давлении до 20 атм., в опреснителях обратного осмоса для морской воды создается давление до 25–60 атм. Мембраны производят из волокнистого полиамида или ацетата целлюлозы. Для продления срока службы мембран используют ингибиторы осадкообразования, проводится периодическая химическая промывка [14].

Работа обратноосмотических систем является автоматической, с более длительным временем безотказной работы и сокращением времени простоя при обслуживании, что обеспечивает более высокую производительность и надежность по сравнению с существующими установками очистки воды. Технология обратного осмоса имеет значительные преимущества перед методами термического опреснения, особенно когда применяется к небольшим установкам небольших систем питьевого водоснабжения. Использование обратноосмотических установок позволит значительно повысить производительность в виде выхода питьевой воды на ватт потребляемой электроэнергии. Обратный осмос – технология, обеспечивающая сочетание высокой производительности, энергоэффективности и сравнительно низкой стоимости [20].

Любое техническое решение опреснения воды связано с проблемой утилизации образующегося в процессе водоподготовки концентрата (рассола). Концентрат имеет уровень солености в 1,6–2 раза больше, чем у исходной (морской) воды, помимо этого, в его составе находятся различные химические вещества высокой концентрации, такие как гипохлорит натрия,

хлорид железа, хлорид алюминия, гидросульфит натрия, серная, соляная кислоты и другие соединения, а также продукты их распада. Высокая минерализация концентрата, превышающая допустимые уровни, не позволяет проводить биологическую очистку сточных вод на очистных сооружениях.

Проблему обработки и дальнейшей утилизации побочных продуктов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду, возможно решить, применяя технологии извлечения солей, металлов и других продуктов из полученного концентрата. Извлечение ресурсов из опреснительного рассола позволяет минимизировать вредное воздействие на окружающую среду, а также снизить стоимость опреснения за счет получения доходов [7, 21].

Выводы. Внедрение современных технологий и внимательное отношение к водопотреблению играют значительную роль в сохранении водного баланса в разных странах. Масштабное использование опресненных вод снизит нагрузку на возобновляемые пресные источники, что, безусловно, благоприятно скажется на экологической обстановке во всем мире.

Наиболее экономически выгодным и эффективным является метод опреснения морской воды на обратноосмотических установках. Технология обратного осмоса, применяемая как для морских, так и для подземных вод с высокой минерализацией, сочетает в себе высокое качество очистки воды, высокую производительность, низкие энергозатраты, простоту и удобство эксплуатации, а также сравнительно низкую стоимость всего процесса водоподготовки.

Несмотря на то, что установки обессоливания и опреснения воды весьма дорогостоящи, сохранение природных вод является на сегодняшний день приоритетным. Выделение необходимого финансирования на разработку усовершенствованных и высокоэффективных технологий опреснения воды, на строительство и эксплуатацию предприятий по ее переработке сейчас позволит избежать глобального водного кризиса в будущем.

Список источников

1. Данилов-Данильян В. И. Водные ресурсы России: состояние, использование, охрана, проблемы управления // Экономика. Налоги. Право. 2019. № 12. С. 18–31. DOI: 10.26794/1999-849X-2019-12-5-18-31.
2. Данилов-Данильян В. И. Глобальная экологическая проблема и устойчивое развитие // Вестник Московского университета. Сер. 6: Экономика. 2019. № 4. С. 8–23.
3. Вода или нефть? Создание Единой водохозяйственной системы / Д. В. Козлов [и др.]; под общ. ред. Д. В. Козлова. М.: Бимпа, 2008. 456 с.
4. Проблемы и перспективы использования водных ресурсов в агропромышленном комплексе России / В. Н. Щедрин [и др.]; под общ. ред. В. Н. Щедрина. М.: Мелиоводинформ, 2009. 342 с.
5. Иванкова Т. В. Опыт эффективного управления водными ресурсами в условиях дефицита (на примере Израиля) // Астраханский вестник экологического образования. 2018. № 1(43). С. 78–88.
6. Вергунов А. И., Федотов Р. В., Лапина И. А. Опыт использования биосорбционно-мембранного метода очистки воды из поверхностных источников с целью питьевого водоснабжения // Актуальные вопросы охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности промышленных регионов: материалы междунар. науч.-практ. конф., г. Кемерово, 3–4 окт. 2017 г. Кемерово, 2017. С. 174–176.
7. Fesenko L. N., Pchel'nikov I. V., Fedotov R. V. Technology of producing of sodium hypochlorite from the concentrate of reverse osmosis systems // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. P. 807–813. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.807>.
8. Pchel'nikov I. V., Fedotov R. V., Breus S. A. On the choice of the water treatment technology for rural areas // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 962(4). 042083. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042083.
9. Мосин О. В. Установки опреснения морской воды // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2011. № 12(120). С. 30–33.
10. Мосин О. В., Игнатов И. Современные технологии опреснения морской воды // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. № 3. С. 13–19.
11. Аскерния А. А., Хамизов Р. Х., Миголь В. Г. Особенности массопереноса соединений кремния через обратноосмотические мембраны // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 2. С. 20–26.
12. Елсуков А. В., Катасонов М. А. Совершенствование системы водоснабжения региональных городов // Метод Z. 2022. № 2(4). С. 23–26.
13. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». М.: НИА-Природа, 2019. 290 с.
14. Хамза А. Е., Джабраилов Х. А., Байтеш К. Автоматизация процесса опреснения морской воды методом обратного осмоса // Colloquium-journal. 2019. № 14-2(38). С. 125–129.
15. Кисель А. В. Опреснение морской воды Черного, Азовского и Каспийского морей методами мембранных технологий // Вестник науки. 2019. Т. 3, № 2(11). С. 79–94.
16. Смирнова Е. Е. Методы опреснения морской воды // Вестник науки. 2020. Т. 2, № 1(22). С. 249–252.
17. Current advances in membrane technologies for produced water desalination / N. A. Ahmad, P. S. Goh, L. T. Yogarathinam, A. K. Zulhairun, A. F. Ismail // Desalination. 2020. Vol. 493. 114643. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114643.
18. Гендеберя Н. В., Максимова С. В. Оценка применимости метода вымораживания для опреснения морской воды // Проблемы управления речными бассейнами при освоении Сибири и Арктики в контексте глобального изменения климата планеты в

XXI веке: сб. докл. XIX Междунар. науч.-практ. конф., г. Тюмень, 17 марта 2017 г. Тюмень: ТИУ, 2017. С. 45–52.

19. Venkatesh Murthy B., Santhoshkumar H., Nagesh H. Design and development desalination procedure to sea water using renewable sources // International Conference on Recent Trends in Electrical, Electronics and Computer Engineering for Environmental and Sustainable Development (ICRTEEC 2022). 2022. Vol. 2461. 060004. <https://doi.org/10.1063/5.0092776>.

20. Исследование технологии обратноосмотического опреснения морских вод с умягчением пермеата / К. М. Абдуллаев, М. М. Агамалиев, В. Е. Космодамианский, О. О. Дадашева // Энергосбережение и водоподготовка. 2005. № 4. С. 26–29.

21. Waste to wealth: A critical analysis of resource recovery from desalination brine / I. Ihsanullah, J. Mustafa, A. M. Zafar, M. Obaid, M. A. Atieh, N. Ghaffour // Desalination. 2022. Vol. 543. 116093. DOI: 10.1016/j.desal.2022.116093.

References

1. Danilov-Danilyan V.I., 2019. *Vodnye resursy Rossii: sostoyanie, ispol'zovanie, okhrana, problemy upravleniya* [Water resources of Russia: state, utilization, protection, management issues]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo* [Economics, Taxes and Law], no. 12, pp. 18-31, DOI: 10.26794/1999-849X-2019-12-5-18-31. (In Russian).

2. Danilov-Danilyan V.I., 2019. *Global'naya ekologicheskaya problema i ustoychivoe razvitie* [Global environmental issue and sustainable development]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 6: Ekonomika* [Moscow University Bulletin. Ser. 6: Economy], no. 4, pp. 8-23. (In Russian).

3. Kozlov D.V. [et al.], 2008. *Voda ili neft'? Sozdanie Edinoy vodokhozyaystvennoy sistemy* [Water or Oil? Creation of the Unified Water Management System]. Moscow, Bimpa Publ., 456 p. (In Russian).

4. Shchedrin V.N. [et al.], 2009. *Problemy i perspektivy ispol'zovaniya vodnykh resursov v agropromyshlennom komplekse Rossii* [Problems and Prospects of Using Water Resources in Agro-Industrial Complex of Russia]. Moscow, Meliovodinform Publ., 342 p. (In Russian).

5. Ivankova T.V., 2018. *Opyt effektivnogo upravleniya vodnymi resursami v usloviyakh defitsita (na primere Izrailya)* [Effective water resources management in water deficit conditions (on the example of Israel)]. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya* [Astrakhan Bulletin of Ecological Education], no. 1(43), pp. 78-88. (In Russian).

6. Vergunov A.I., Fedotov R.V., Lapina I.A., 2017. *Opyt ispol'zovaniya biosorbtsionno-membrannogo metoda ochistki vody iz poverkhnostnykh istochnikov s tsel'yu pit'evogo vodosnabzheniya* [Experience in using the biosorption-membrane method of water purification from surface sources for the purpose of drinking water supply]. *Aktual'nye voprosy okhrany okruzhayushchey sredy i obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti promyshlennykh regionov: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Topical Issues of Environmental Protection and Ecological Security of Industrial Regions: Proc. of International Scientific-Practical Conference]. Kemerovo, pp. 174-176. (In Russian).

7. Fesenko L.N., Pchel'nikov I.V., Fedotov R.V., 2018. Technology of producing of sodium hypochlorite from the concentrate of reverse osmosis systems. *Solid State Phenomena*, vol. 284, pp. 807-813, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.807>.

8. Pchel'nikov I.V., Fedotov R.V., Breus S.A., 2020. On the choice of the water treatment technology for rural areas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 962(4), 042083, DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042083.

9. Mosin O.V., 2011. *Ustanovki opresneniya morskoy vody* [Sea water desalination plants]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie* [Plumbing, Heating, Air Conditioning], no. 12(120), pp. 30-33. (In Russian).

10. Mosin O.V., Ignatov I., 2012. *Sovremennye tekhnologii opresneniya morskoy vody*

[Modern technologies for sea water desalination]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy Saving and Water Treatment], no. 3, pp. 13-19. (In Russian).

11. Askernia A.A., Khamizov R.Kh., Migol V.G., 2015. *Osobennosti massoperenosa soedineniy kremniya cherez obratnoosmoticheskie membrany* [Specific features of mass transfer of silicon compounds through reverse osmosis membranes]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Engineering], no. 2, pp. 20-26. (In Russian).

12. Elsukov A.V., Katasonov M.A., 2022. *Sovershenstvovanie sistemy vodosnabzheniya regional'nykh gorodov* [Improving the water supply system of regional cities]. *Metod Z* [Method Z], no. 2(4), pp. 23-26. (In Russian).

13. *Gosudarstvennyy doklad "O sostoyanii i ispol'zovanii vodnykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2018 godu"* [State Report "On State and Use of Water Resources in the Russian Federation in 2018"]. Moscow, NIA-Priroda Publ., 2019, 290 p. (In Russian).

14. Khamza A.E., Dzhabrailov Kh.A., Baitesh K., 2019. *Avtomatizatsiya protsessa opresneniya morskoy vody metodom obratnogo osmosa* [Automating the process of sea water desalination by reverse osmosis]. *Colloquium-Journal*, no. 14-2(38), pp. 125-129. (In Russian).

15. Kisel A.V., 2019. *Opresnenie morskoy vody Chernogo, Azovskogo i Kaspiyskogo morey metodami membrannykh tekhnologiy* [Desalination of sea water of the Black, Azov and Caspian Seas using membrane technologies]. *Vestnik nauki* [Science Bulletin], vol. 3, no. 2(11), pp. 79-94. (In Russian).

16. Smirnova E.E., 2020. *Metody opresneniya morskoy vody* [Methods of sea water desalination]. *Vestnik nauki* [Science Bulletin], vol. 2, no. 1(22), pp. 249-252. (In Russian).

17. Ahmad N.A., Goh P.S., Yogarathinam L.T., Zulhairun A.K., Ismail A.F., 2020. Current advances in membrane technologies for produced water desalination. *Desalination*, vol. 493, 114643, DOI: 10.1016/j.desal.2020.114643.

18. Gendeberya N.V., Maksimova S.V., 2017. *Otsenka primenimosti metoda vymorazhivaniya dlya opresneniya morskoy vody* [Evaluation of the applicability of the freezing method for sea water desalination]. *Problemy upravleniya rechnymi basseynami pri osvoenii Sibiri i Arktiki v kontekste global'nogo izmeneniya klimata planety v XXI veke: sb. dokl. XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of River Basin Management in the Development of Siberia and the Arctic in the Context of Global Climate Change of the Planet in the 21st Century: Proc. of the XIX International Scientific-Practical Conference]. Tyumen, TIU, pp. 45-52. (In Russian).

19. Venkatesh Murthy B., Santhoshkumar H., Nagesh H., 2022. Design and development desalination procedure to seawater using renewable sources. *International Conference on Recent Trends in Electrical, Electronics and Computer Engineering for Environmental and Sustainable Development (ICRTEEC 2022)*, vol. 2461, 060004, <https://doi.org/10.1063/5.0092776>.

20. Abdullaev K.M., Agamaliyev M.M., Kosmodamiansky V.E., Dadasheva O.O., 2005. *Issledovanie tekhnologii obratnoosmoticheskogo opresneniya morskikh vod s umyagcheniem permeata* [Study of the technology of reverse osmosis desalination of sea waters with permeate softening]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy Saving and Water Treatment], no. 4, pp. 26-29. (In Russian).

21. Ihsanullah I., Mustafa J., Zafar A.M., Obaid M., Atieh M.A., Ghaffour N., 2022. Waste to wealth: A critical analysis of resource recovery from desalination brine. *Desalination*, vol. 543, 116093, DOI: 10.1016/j.desal.2022.116093.

Информация об авторе

В. Ф. Талалаева – младший научный сотрудник.

Information about the author

V. F. Talalaeva – Junior Researcher.

Экология и водное хозяйство. 2022. Т. 4, № 4. С. 84–100.
Ecology and water management. 2022. Vol. 4, no. 4. P. 84–100.

Автор несет ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

The author is responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.10.2022; одобрена после рецензирования 01.12.2022; принята к публикации 01.12.2022.

The article was submitted 20.10.2022; approved after reviewing 01.12.2022; accepted for publication 01.12.2022.