

## Применение мембранных технологий в очистке производственных сточных вод

Максим Андреевич Жаров<sup>1,2</sup>, Станислав Евгеньевич Алексеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

<sup>2</sup> *Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ); г. Ярославль, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрены современные методы применения мембранных технологий в очистке производственных стоков. Проблема снижения негативного воздействия на окружающую среду путем повышения эффективности очистных сооружений является наиболее актуальной в данный момент. В последнее время мембранные технологии очистки сточных вод (СВ) становятся все более востребованными для их включения в существующие технологические схемы промышленных предприятий, расположенных в мире.

**Материалы и методы.** Изучены примеры использования технологии в молочной промышленности, масложировой промышленности, автомобильном производстве, электроэнергетической промышленности, кожевенном производстве. Проанализированы отечественные и зарубежные источники.

**Результаты.** Предпочтение отдается технологическим схемам, позволяющим создать безотходное производство, а именно повторному использованию очищенных СВ в технологических процессах предприятия, что способствует повышению эффективности очистных сооружений. Применение мембранных технологий дает возможность добиться поставленных целей по снижению негативного воздействия на окружающую среду, но вместе с этим данная технология не лишена недостатков.

**Выводы.** Технология сильно зависит от состава СВ и существующей технологической схемы очистки. Исходя из рассмотренных примеров в различных отраслях промышленности установлено, что данная технология получает все большее распространение и показывает отличные результаты по снижению негативного воздействия от стоков промышленных предприятий. Технология мембранных фильтров для создания безотходного производства должна исследоваться дальше и получать развитие.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** очистка сточных вод, мембранные биореакторы (МБР), биологическая очистка, нанофильтрация, кожевенное производство, нулевой сброс жидкости, обратный осмос, аэротенки

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Жаров М.А., Алексеев С.Е. Применение мембранных технологий в очистке производственных сточных вод // Строительство: наука и образование. 2024. Т. 14. Вып. 4. Ст. 112–122. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.112-122

Автор, ответственный за переписку: Максим Андреевич Жаров, [mask.jarov2014@yandex.ru](mailto:mask.jarov2014@yandex.ru).

## Application of membrane technologies in industrial wastewater treatment

Maxim A. Zharov<sup>1,2</sup>, Stanislav E. Alekseev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;*

<sup>2</sup> *Yaroslavl State Technical University (YSTU); Yaroslavl, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** Modern methods of application of membrane technologies in industrial wastewater treatment are considered. The problem of reducing the negative impact on the environment by increasing the efficiency of treatment facilities is the most urgent at the moment. Recently, membrane technologies of wastewater treatment are becoming more and more demanded for their inclusion in the existing technological schemes of industrial enterprises located all over the world.

**Materials and methods.** Examples of technologies used in the dairy industry, oil and fat industry, automobile manufacturing, electric power industry, and tanning industry were studied. Domestic and foreign sources were analyzed.

**Results.** As a result of the work carried out, preference is given to technological schemes that allow to create waste-free production, namely, the reuse of treated water in the technological processes of the enterprise, which contributes to improving the efficiency of treatment facilities. The application of membrane technologies makes it possible to achieve the goals set to reduce the negative impact on the environment, but at the same time this technology is not without disadvantages.

**Conclusions.** The technology strongly depends on the specific composition of wastewater and the existing technological scheme of treatment. However, based on the reviewed examples in various industries, this technology is becoming more and more widespread and shows excellent results in reducing the negative impact of industrial effluents. The technology of membrane filters for creation of waste-free production should be further considered and developed.

**KEYWORDS:** wastewater treatment, Membrane Bioreactors (MBR), biological treatment, nanofiltration, tannery, zero liquid discharge, reverse osmosis, aerotanks

**FOR CITATION:** Zharov M.A., Alekseev S.E. Application of membrane technologies in industrial wastewater treatment. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2024; 14(4):112-122. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.4.112-122

*Corresponding author:* Maxim A. Zharov, [mack.jarov2014@yandex.ru](mailto:mack.jarov2014@yandex.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Тема исследования обусловлена необходимостью сохранения окружающей среды. Вода является важным элементом жизни людей. Она используется во всех сферах жизнедеятельности человека: хозяйственно-бытовой, промышленной, сельскохозяйственной и т.д. Применяется с целью приготовления пищи и выращивания сельскохозяйственных продуктов, изготовления материалов промышленного сектора и охлаждения технологических процессов, орошения и производства материалов легкой промышленности, водоподготовки для городских жителей и населенных пунктов.

С каждым годом объемы используемой воды значительно увеличиваются. Согласно докладу ООН<sup>1</sup> за последние четыре десятилетия они возросли примерно на 1 % каждый год. Это вызвано такими факторами, как увеличение народонаселения, социально-экономическое развитие. С ростом потребления воды возрастает также и процент ее загрязнения стоками, которые образуются после ее использования. По данным на 2022 г.<sup>2</sup> сточные воды (СВ) распределены по отраслям следующим образом: жилищно-коммунальные — 25 %, сельскохозяйственные — 9 %, промышленные — 63 %, другие стоки — 9 %.

Перед сбросом в водные объекты все стоки должны быть очищены до нормативов предельно допустимой концентрации (ПДК) вредных веществ<sup>3</sup>. К наиболее загрязненным по содержанию вредных веществ относятся СВ промышленного сектора (кожевенных, металлургических, целлюлозно-бумажных заводов, предприятий нефтяной, молочной промышленности и автомобильных предприятий).

<sup>1</sup> Доклад ООН: преодолеть водный кризис можно только сообща. 21.03.2023. URL: <https://news.un.org/ru/story/2023/03/1438972>

<sup>2</sup> Бузин И. Современные методы очистки сточных вод // База знаний «МГУЛАБ – Испытательный центр». Вода. Современные методы очистки сточных вод. URL: <https://www.msulab.ru/knowledge/water/sovremennye-metody-ochistki-stochnykh-vod/>

<sup>3</sup> Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации : Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 № 644 (ред. от 28.11.2023).

Это обусловлено возрастающей сложностью технологического процесса, для которого с каждым годом требуется все больше и больше воды. Для сокращения использования воды промышленными предприятиями, а следовательно, и уменьшения образования стоков во всем мире стремятся к созданию таких технологических систем очистки, которые позволят организовать безотходное производство. Так, в г. Дурбане<sup>4</sup>, третьем по величине городе Южной Африки, с 2001 г. ежедневно очищаются и повторно применяются СВ количеством, которое эквивалентно 13 бассейнам олимпийского размера, для нужд легкой и нефтеперерабатывающей промышленности. Рециркуляция СВ в сочетании с повторным использованием уменьшает негативное воздействие на климат, а именно снижает выбросы парниковых газов. С учетом положительного влияния на климат технологии повторного использования очищенных СВ в развитых странах Европы получают большой объем инвестиций — 100–200 млн долларов США [1–18]. Эти инвестиции окупаются за счет сокращения затрат на забор воды на технологические нужды и затрат на очистку стоков в дальнейшем, а также снижения или исключения штрафов за загрязнение окружающей среды. Если города в странах с развивающейся экономикой сфокусируются на рециркуляции СВ после кризиса в 2019 г., то к 2030 г. это позволит мобилизовать до \$2 трлн инвестиций и создать более 23 млн рабочих мест.

Рост использования мембранных биореакторов (МБР) начался с середины 1990-х гг. [3] ввиду ужесточения природоохранного законодательства, повышения стоимости услуг водоотведения, наличия устаревших очистных сооружений.

К 2010 г. [3] было отмечено применение МБР на 7000 сооружениях по очистке и доочистке производственных СВ в мире. На период 2014 г. МБР [3] уже очищали 60 % хозяйственно-бытовых стоков, а также 40 % производственных.

Применение МБР для очистки стоков производства обосновано следующими факторами: 1) со-

<sup>4</sup> Увеличение масштабов повторного использования воды: почему важно повторно использовать сточные воды. 23.08.2021. URL: <https://blogs.worldbank.org/ru/climatechange/scaling-water-reuse-why-recycling-our-wastewater-makes-sense>

держание трудно окисляемых загрязнений; 2) малая площадь территории для размещения очистных сооружений; 3) необходимость применения метода повторного использования очищенных стоков.

В данной обзорной статье будут рассмотрены варианты очистки СВ с помощью мембранных технологий, включая МБР.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрены отечественные и зарубежные материалы по использованию мембранных технологий в системах очистки СВ промышленных предприятий.

Объект исследования — очистка СВ.

Метод исследования — анализ, который позволил изучить существующие и наиболее перспективные способы применения метода рециркуляции посредством применения мембранных технологий.

Сделан вывод о эффективности применения мембранных технологий для очистки СВ промышленных предприятий, а также создания безотходных производств.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проанализированы перспективные и существующие системы очистки промышленных СВ с помощью мембранных технологий.

Исследована очистка СВ предприятия по производству мороженого с использованием технологии МБР [1]. В СВ указанного производства попадают составляющие: потери сырья и готовой продукции; производственные отходы; реагенты, используемые для мытья полов и транспорта; полисахариды и высокомолекулярные белковые соединения (глобулин, альбумин); также отмечается высокое содержание соединений фосфора и азота, взвешенных веществ до 8000 мг/дм<sup>3</sup>, жиров до 3000 мг/дм<sup>3</sup>, БПКп до 4000 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, ХПК до 6000 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> [2]. Все это классифицирует стоки производства как сильно-

загрязненные и токсичные, требующие комплексной системы очистки. В работе [1] предлагается использование МБР. Метод сочетает в себе биологическую обработку илом и механическую фильтрацию посредством мембран.

Мембранный модуль [19] применяется для разделения иловой смеси и выступает в роли альтернативы вторичному отстойнику, используемому для осаждения активного ила. Для очистки СВ предприятия по производству мороженого в труде [1] рассматривается следующая схема:

- 1) механический фильтр;
- 2) уравнильная емкость;
- 3) перекачивающие насосы;
- 4) станция дозирования реагентов для контроля среды pH;
- 5) станция дозирования коагулянта;
- 6) напорная флотация;
- 7) аэротенки (анаэробный и аэробный);
- 8) станция МБР;
- 9) воздуходувка;
- 10) система дозирования хлора;
- 11) емкость очищенной воды.

Применение МБР в этой технологической схеме позволяет увеличить концентрацию активного ила в биореакторе до значений 10–20 г/дм<sup>3</sup>. В данном случае мембранная технология выступает в роли доочистки СВ до требуемых показателей<sup>3</sup>, снижая негативное воздействие на окружающую среду. На рис. 1 представлены вариации мембранных элементов.

Далее проанализируем очистку СВ маслосодержащего производства [3]. Состав СВ маслосодержащего производства: нерастворимые или малорастворимые в воде жидкие углеводороды сырой нефти, смол, растительных и минеральных масел, животных жиров легких и тяжелых топлив (мазута, бензина, керосина, газойля), а также их смесей [4]. Перспективным техническим решением для очистки стоков данного производства выступает мембранный био-

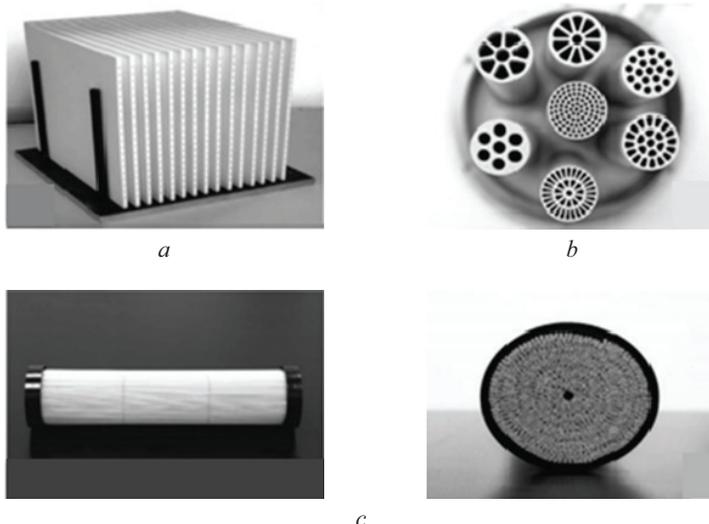


Рис. 1. Вариации мембранных элементов: *a* — плоские; *b* — трубчатые; *c* — полуволокнонные

реактор. Рассматривается технологическая схема очистки СВ [3] с предварительной механической и физико-химической очисткой и их подачей в МБР. Невозможность выноса активного ила из системы позволяет повысить его концентрацию в аэротенках в 2–3 раза, что, в свою очередь, увеличивает окислительную мощность биореактора и дает возможность отказаться от использования вторичного отстойника. В этом случае мембранная технология выступает в роли доочистки СВ до требуемых показателей<sup>3</sup>, снижая негативное воздействие на окружающую среду. Основной проблемой применения МБР является повышенный иловый индекс, который приводит к загрязнению мембран, что требует большого количества воды на их промывку.

Рассмотрим очистку СВ гальванического производства [5]. Состав СВ гальванического производства: соединения тяжелых металлов (цинк, медь, хром, железо, никель, кадмий и др.), растворов минеральных и органических кислот, щелочей, поверхностно-активных веществ, моющих средств [6].

В публикации [5] описывается следующая технологическая схема очистки:

- 1) корректировка pH;
- 2) электрокоагуляция;
- 3) отстойник, используемый для удаления взвешенных и коллоидных веществ;
- 4) глубокая очистка обратным осмосом (применяются специальные рулонные композитные мембраны, предназначенные для обработки сильно загрязненных сред);

5) выпаривание концентрата обратного осмоса при помощи роторно-пленочного испарителя (РПИ).

Эта замкнутая схема была реализована на ОАО «Роберт Бош» (г. Энгельс) [5] в 2004 г. Введение схемы позволило снизить объем забираемой воды для очистки СВ. Объем потребляемой воды с момента внедрения по сегодняшний день сократился в 55,2 раза, а вместе с этим уменьшился и объем стоков в 4,2 раза. Состав стоков стал полностью соответствовать требованиям<sup>3</sup>. В данном примере мембранные технологии были реализованы для создания замкнутой схемы очистки сто-

ков, что позволило значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду, и соответствия установленным требованиям<sup>3</sup>.

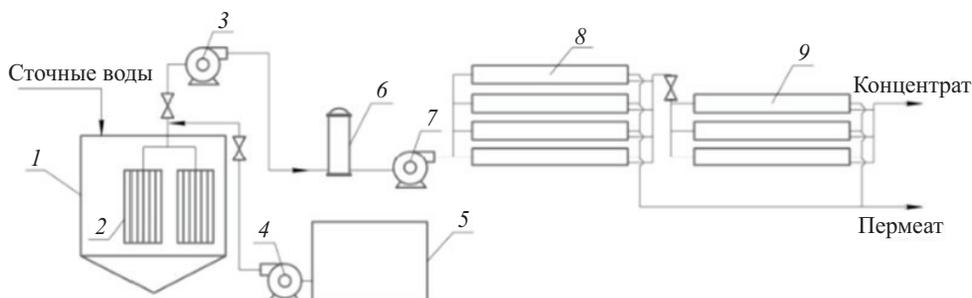
Изучим очистку СВ коксохимического производства [7]. Состав СВ коксохимического производства: взвешенные вещества, различного рода масла и другие примеси как органического, так и неорганического характера, фенолы [8]. В настоящий момент не существует реальной технологической схемы для очистки стоков коксохимического производства, только лабораторные установки. Это связано со следующими причинами:

- высокая стоимость и дефицит отечественных обратноосмотических и ультрафильтрационных мембран;
- высокие требования к исходному качеству биохимической сточной воды по содержанию взвешенных веществ;
- отсутствие безопасных способов по утилизации концентратов обратноосмотических и ультрафильтрационных процессов очистки.

На рис. 2 представлена вариация возможной технологической схемы очистки СВ коксохимического производства с применением мембранных технологий.

Таким образом, внедрение технологии обратного осмоса для очистки стоков позволит сократить забор воды из источников и соответственно уменьшить сброс СВ, а также добиться выполнения требования<sup>3</sup>, но для внедрения данной технологии нужно решить вопрос, связанный с образующимися концентратами обратноосмотических и ультрафильтрационных мембран [7].

Рассмотрим очистку СВ кожевенно-обувного предприятия [9]. Состав СВ кожевенного производства: pH — 8,09; количество взвешенных веществ — 1436,3 мг/дм<sup>3</sup>, общее содержание хрома — 78,13 мг/дм<sup>3</sup> (Хром 6+ — 3,69 мг/дм<sup>3</sup> + Хром 3+ — 74,55 мг/дм<sup>3</sup>); ХПК — 7090,2 мг/дм<sup>3</sup>. В работе [9] поднимается вопрос об использовании мембран различных модификаций, которые дадут возможность не только снизить нагрузку на окружающую среду, но и осуществить



**Рис. 2.** Технологическая схема доочистки стоков коксохимического производства с включением мембранных установок: 1 — резервуар исходной воды (вторичный отстойник); 2 — поволоконные ультрафильтрационные погружные модули; 3 — вакуум-насос; 4 — насос обратной промывки; 5 — бак сбора воды после УФ-модулей; 6 — патронный фильтр; 7 — рабочий насос высокого давления; 8 — мембранные обратноосмотические модули первой ступени; 9 — мембранные обратноосмотические модули второй ступени

возврат стоков в производство в качестве вторичного ресурса. Благодаря процессам плазмохимической модификации возможно получение композиционных мембран различного назначения (увеличение эффективности процесса фильтрации, обратный осмос, газоразделение).

В исследовании [10] приводится зарубежный опыт очистки СВ кожевенного производства, а именно технология систем нулевого сброса жидкости (Zero Liquid Discharge System). Эта система позволяет очистным сооружениям повторно использовать очищенные СВ в технологических процессах [10].

Система нулевого сброса жидкости обычно состоит из трех этапов:

1) предварительная подготовка (уменьшение нерастворимых веществ в стоках при помощи фильтрации);

2) концентрация растворенных веществ (комбинация обратного осмоса с электродиализом);

3) тепловая обработка (испаритель и катализатор).

Существующие ограничения по применению обратного осмоса: метод обратного осмоса имеет ограничение по солености и будет эффективен только при концентрации солей ниже 70 г/л; высокая степень загрязнения мембран и образование накипи [11]. Для преодоления этих ограничений необходима предварительная обработка:

- химическое умягчение;
- ионный обмен;
- регулировка pH;
- использование мембранных фильтров низкого давления.

В 2015 г. в Европейском Союзе объем повторно используемой воды составил порядка 1 млрд м<sup>3</sup>/год, предполагается, что к 2025 г. он увеличится до 6 млрд м<sup>3</sup>/год [12]. В данном примере продемонстрирована возможность использования систем нулевого сброса жидкости и их широкая интеграция в производства по всему миру, а также развитие этой технологии.

Другой пример очистки сточных вод кожевенного производства [13]. В рассматриваемой работе

обобщаются результаты исследования мембранных технологий [14] для повторного использования СВ: мембранные биореакторы [15], обратный осмос [16], микрофильтрация и нанофильтрация. Главной проблемой использования мембранных технологий остается их высокая степень загрязнения в ходе эксплуатации. Основной вывод заключается в перспективе научных исследований и практическом применении немембранных и мембранных технологий [20]. Улучшение биоразлагаемости стоков кожевенного производства с помощью O<sub>3</sub> может быть более благоприятным для разложения органических веществ в мембранном биореакторе [17] на обратном конце, что позволит достичь высоких производительности и степени очистки СВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализировано современное состояние вопроса очистки СВ промышленных предприятий, а именно применение мембранных технологий. Рассмотрены отечественные и зарубежные источники. Исходя из всего материала можно сделать следующие выводы:

- данная технология остается востребованной и развиваемой;
- мембранные технологии еще имеют важные недостатки, которые могут быть устранены по мере их развития;
- предпочтение отдается технологиям, позволяющим добиться нулевого сброса жидкости;
- развитие и применение технологии наблюдается как в отечественном сегменте, так и в зарубежном;
- будущее мембранных технологий неразрывно связано с их интеграцией с немембранными технологиями.

Дальнейшие исследования по включению мембранных технологий в существующие технологические схемы позволят снизить негативное воздействие на окружающую среду и организовывать системы нулевого сброса жидкости.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зидан О.Д. Очистка сточных вод производства мороженого с использованием мембранного биореактора (МБР) // Пищевые системы. 2021. Т. 4. № 3S. С. 86–92. DOI: 10.21323/2618-9771-2021-4-3S-86-92. EDN TKRFFA.

2. Гарзанов А.Л., Усов А.В., Кушнирук М.Ю., Барабаи В.П., Камалян О.А. Модернизация очистных сооружений фабрики мороженого // Мороженое и замороженные продукты. 2004. № 6. С. 26–27.

3. Стрелков А.К., Теплых С.Ю., Быстранова А.О. Современные методы очистки масложиродержащих сточных вод // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9. № 4 (37). С. 61–65. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.10. EDN GNPDPY.

4. Южанинов А.Г., Рудова Н.А., Огнева Л.Ю. Маслосодержащие сточные воды, их классификация и методы очистки // Строительство и образование. 1999. С. 140–142. EDN KCGGZA.

5. Поворов А.А., Павлова В.Ф., Шиненкова Н.А., Краснов А.Н. Комплексная мембранная технология очистки сточных вод гальванических производств с обеспечением замкнутого водооборота // Современные технологии очистки воды.

6. Краснокутская Н.В. Состав сточных вод гальванического производства машиностроительного предприятия Комсомольска-на-Амуре // Вестник научного общества студентов, аспирантов и молодых ученых. 2018. № 3. С. 29–36. EDN YGGYFV.

7. Царицон Е.И., Сабирова Т.М. Внедрение мембранных технологий для очистки сточных вод коксохимического производства // *Modern Science*. 2021. № 7. С. 35–39. EDN BZMTR.
8. Федорова В.С., Манина Л.К. Модернизация системы очистки сточных промышленных вод в условиях коксохимического производства филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» // *Актуальные проблемы металлургии чугуна и стали* : сб. тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. 2021. С. 86–88.
9. Абдуллин И.Ш., Нефедьев Е.С., Ибрагимов Р.Г., Парошин В.В. Применение мембранной технологии для очистки сточных вод кожевенно-обувных предприятий // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15. № 3. С. 21–26. EDN OPPIWZ.
10. Ricky R., Shanthakumar S., Ganapathy G.P., Chiampo F. Zero liquid discharge system for the tannery industry — an overview of sustainable approaches // *Recycling*. 2022. Vol. 7. Issue 3. P. 31. DOI: 10.3390/recycling7030031
11. Хорохорина И.В., Лазарев С.И., Бидуля С.М. Мембранные технологии — экологичные способы очистки сточных вод // *Вопросы современной науки и практики*. Университет им. В.И. Вернадского. 2021. № 3 (81). С. 37–43. DOI: 10.17277/voprosy.2021.03.pp.037-043. EDN PXIQUG.
12. Yaqub M., Lee W. Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater : a review // *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 681. Pp. 551–563. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.062
13. Yang F., Wang X.B., Shan Y., Wu C., Zhou R., Hengl N. et al. Research recap of membrane technology for tannery wastewater treatment : a review // *Col-lagen and Leather*. 2023. Vol. 5. Issue 1. DOI: 10.1186/s42825-023-00132-8
14. Ezugbe E.O., Rathilal S. Membrane technologies in wastewater treatment : a review // *Membranes*. 2020. Vol. 10. Issue 5. P. 89. DOI: 10.3390/membranes10050089
15. Iorhemen O., Hamza R., Tay J. Membrane Bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: membrane fouling // *Membranes*. 2016. Vol. 6. Issue 2. P. 33. DOI: 10.3390/membranes6020033
16. Abdel-Fatah M.A., Amin A., Elkady H. Industrial wastewater treatment by membrane process // *Membrane-Based Hybrid Processes for Wastewater Treatment*. 2021. Pp. 341–365. DOI: 10.1016/B978-0-12-823804-2.00025-2
17. Fazal S., Zhang B., Zhong Z., Gao L., Chen X. Industrial wastewater treatment by using MBR (membrane bioreactor) review study // *Journal of Environmental Protection*. 2015. Vol. 6. Issue 6. Pp. 584–598. DOI: 10.4236/jep.2015.66053
18. Tong T., Elimelech M. The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions // *Environmental Science & Technology*. 2016. Vol. 50. Issue 13. Pp. 6846–6855. DOI: 10.1021/acs.est.6b01000
19. Макиша Н.А. Исследование рабочих характеристик мембранных модулей для очистки сточных вод // *Строительство: наука и образование*. 2020. Т. 10. № 1. С. 6. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.6. EDN LPQTLV.
20. Макиша Н.А., Смирнов Д.Г. Комплексная очистка сточных вод с минимизацией образования избыточного активного ила и осадка // *Вестник МГСУ*. 2012. № 12. С. 192–198. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.12.192-198. EDN PJOUUB.

Поступила в редакцию 9 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 9 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 20 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Максим Андреевич Жаров** — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ассистент кафедры строительства зданий и сооружений; **Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ)**; 150023, г. Ярославль, Московский проспект, д. 88; mack.jarov2014@yandex.ru;

**Станислав Евгеньевич Алексеев** — кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; AlekseevSE@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Жаров М.А. — идея, сбор материала, обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Алексеев С.Е. — идея, научное редактирование текста, концепция исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INTRODUCTION

The topic of the research is conditioned by the need to preserve the environment. Water is an important element of human life. It is used in all spheres of human activity: household, industrial, agricultural, etc. It is also used for the purpose of cooking and growing agricultural products, manufacturing of industrial sector materials and cooling of technological processes, irrigation and production of light industry materials, water treatment for urban residents and settlements.

Every year, the amount of water used is increasing significantly. According to the UN report<sup>1</sup> they have been increasing by about 1 % every year for the last four decades. This is caused by such factors as population growth, socio-economic development. As water consumption increases, so does the percentage of water pollution from wastewater that is generated after its use. As of 2022<sup>2</sup> wastewater is distributed by sector as follows: residential — 25 %, agricultural — 9 %, industrial — 63, other wastewater — 9 %.

Before discharge into water bodies, all effluents must be treated to the maximum permissible concentration (MPC) of harmful substances<sup>3</sup>. The most polluted in terms of the content of harmful substances are the effluents of the industrial sector (tanneries, metallurgical, pulp and paper plants, oil, dairy and automotive enterprises). This is due to the increasing complexity of the technological process, which requires more and more water every year. In order to reduce the use of water by industrial enterprises and, consequently, to reduce the generation of effluents, the world is striving to create such technological treatment systems that will make it possible to organize waste-free production. For example, in Durban<sup>4</sup>, South Africa's third largest city, since 2001, the equivalent of 13 Olympic-sized swimming pools have been treated and reused daily for light industry and refining. The recycling of wastewater combined with reuse reduces the negative impact on the climate, namely greenhouse gas emissions. Given the positive impact on the climate, technologies for reuse of treated wastewater in developed European countries receive a large amount

of investment — 100–200 million USD [1–18]. These investments are recouped by reducing the cost of water intake for technological needs and the cost of wastewater treatment in the future, as well as reducing or eliminating fines for environmental pollution. If cities in emerging economies focus on wastewater recycling after the crisis in 2019, it could mobilize up to \$2 trillion of investment and create more than 23 million jobs by 2030.

The use of membrane bioreactors (MBR) began to grow in the mid-1990s [3] due to stricter environmental legislation, higher costs of wastewater services, and outdated wastewater treatment facilities.

By 2010 [3], the use of membrane bioreactors was observed in 7,000 industrial wastewater treatment plants worldwide.

As of 2014, membrane bioreactors [3] were already treating 60 per cent of domestic wastewater and 40 per cent of industrial wastewater.

The application of MBR for industrial wastewater treatment is justified by the following factors: 1) content of hard-to-oxidize contaminants; 2) small area of territory for placement of treatment facilities; 3) necessity of application of the method of reuse of treated effluents.

In this review article the options of wastewater treatment with the help of membrane technologies, including membrane bioreactors, will be considered.

## MATERIALS AND METHODS

Domestic and foreign materials on the use of membrane technologies in the systems of treatment of sewage treatment of industrial enterprises are considered.

The object of the study is the wastewater treatment.

The research method is analysis, which allowed us to study the existing and the most promising ways to apply the recycling method through the application of membrane technology.

It is concluded about the efficiency of membrane technologies application for treatment of sewage water of industrial enterprises, as well as creation of waste-free productions.

## RESEARCH RESULTS

The result of the study is the analysis of promising and existing systems of industrial wastewater treatment, using membrane technology.

Wastewater treatment of the enterprise for the production of ice cream using membrane bioreactor technology [1]. The following components fall into the wastewater of this production: losses of raw materials and finished products; production wastes; reagents used for washing floors and transport; polysaccharides and high molecular weight protein compounds (globulin, albumin); high content of phosphorus and nitrogen compounds, suspended solids up to 8,000 mg/dm<sup>3</sup>, fats up to 3,000 mg/dm<sup>3</sup>, BOD<sub>p</sub> up to 4,000 mgO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>, COD up to 6,000 mgO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup> is also noted [2]. All this classifies production effluents as highly polluted and toxic, requiring a comprehen-

<sup>1</sup> UN report: the water crisis can only be overcome together. 21.03.2023. URL: <https://news.un.org/ru/story/2023/03/1438972>

<sup>2</sup> Buzin I. Modern methods of wastewater treatment. Knowledge base "MSULAB — Testing Centre". *Water: Modern methods of wastewater treatment*. URL: <https://www.msulab.ru/knowledge/water/sovremennye-metody-ochistki-stochnykh-vod/>

<sup>3</sup> Approval of the Rules of Cold Water Supply and Water Disposal and Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation: Resolution of the Government of the Russian Federation of 29.07.2013 No. 644 (ed. of 28.11.2023).

<sup>4</sup> Scaling up water reuse: why it is important to reuse wastewater. 23.08.2021. URL: <https://blogs.worldbank.org/ru/climatechange/scaling-water-reuse-why-recycling-our-wastewater-makes-sense>

sive treatment system. The paper [1] proposes the use of MBR. The method combines biological sludge treatment and mechanical filtration by means of membranes.

The membrane module [19] is used to separate the sludge mixture and acts as an alternative to the secondary settling tank used for settling activated sludge. The following scheme is considered for the treatment of sludge from an ice-cream production plant in [1]:

- 1) mechanical filter;
- 2) equalizing capacity;
- 3) transfer pumps;
- 4) reagent dosing station for pH media control;
- 5) coagulant dosing station;
- 6) pressure flotation;
- 7) aeration tanks (anaerobic and aerobic);
- 8) MBR station;
- 9) air blower;
- 10) chlorine dosing system;
- 11) the capacity of treated water.

Application of MBR in this technological scheme allows increasing the activated sludge concentration in the bioreactor up to 10–20 g/dm<sup>3</sup>. In this case, the membrane technology acts as an additional treatment of activated sludge to the required indicators<sup>3</sup>, reducing the negative impact on the environment. Fig. 1 shows the variations of membrane elements.

Wastewater treatment of oil-containing production [3]. The composition of oil-containing production waste water: insoluble or poorly water-soluble liquid hydrocarbons of crude oil, resins, vegetable and mineral oils, animal fats of light and heavy fuels (fuel oil, petrol, paraffin, gas oil), and also their mixtures [4]. The membrane bioreactor is a promising technical solution for the treatment of wastewater from this production. The technological scheme of wastewater treatment [3] with preliminary mechanical and physicochemical treatment and their feeding into MBR is considered. The impossibility of removing activated sludge from the system allows increasing its concentration in aeration tanks by 2–3 times, which,

in turn, increases the oxidative capacity of the bioreactor and makes it possible to refuse the use of a secondary settling tank. In this case, membrane technology acts as an additional treatment of wastewater to the required indicators<sup>3</sup>, reducing the negative impact on the environment. The main problem of MBR application is the increased sludge index, which leads to fouling of membranes, which requires a large amount of water for their washing.

Wastewater treatment of galvanic production [5]. Composition of electroplating production waste water: compounds of heavy metals (zinc, copper, chromium, iron, nickel, cadmium, etc.), solutions of mineral and organic acids, alkalis, surfactants, detergents [6].

The publication [5] describes the following technological scheme of purification:

- 1) pH adjustment;
- 2) electrocoagulation;
- 3) A settling tank used to remove suspended and colloidal matter;
- 4) deep purification by reverse osmosis (special roll-up composite membranes are used, designed to treat highly contaminated media);
- 5) Evaporation of the reverse osmosis concentrate using a rotary film evaporator (RFE).

This closed scheme was implemented at JSC “Robert Bosch” (Engels) [5] in 2004. The introduction of this scheme allowed to reduce the volume of water intake for wastewater treatment purposes. The volume of consumed water from the moment of implementation to the present day has decreased by 55.2 times, and together with it the volume of effluent has decreased by 4.2 times. The composition of the effluent has become fully compliant with the requirements<sup>3</sup>. In this example, membrane technology has been implemented to create a closed-loop wastewater treatment scheme, which has significantly reduced the negative environmental impact and compliance<sup>3</sup>.

Wastewater treatment of coke-chemical production [7]. The composition of coke-chemical production

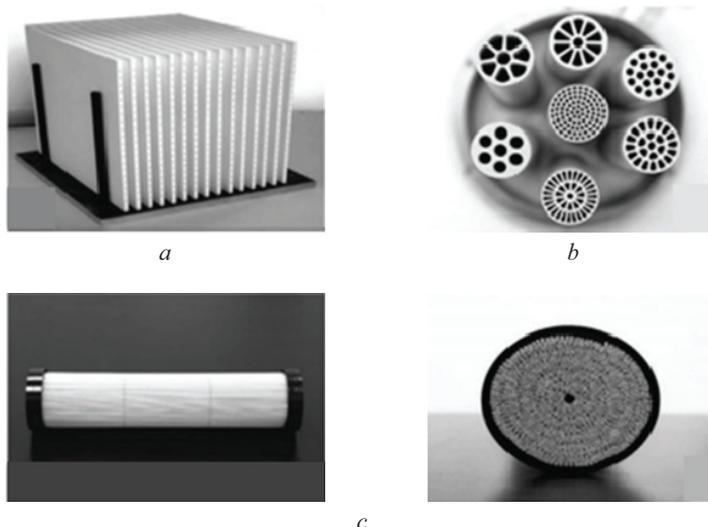
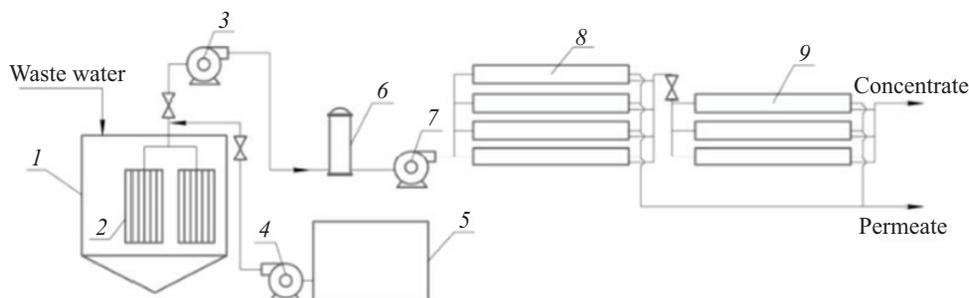


Fig. 1. Variations of membrane elements: *a* — flat; *b* — tubular; *c* — hollow fibres



**Fig. 2.** Technological scheme of additional treatment of coke-chemical production wastewater with inclusion of membrane units: 1 — source water tank (secondary settling tank); 2 — hollow-fibre ultrafiltration submersible modules; 3 — vacuum pump; 4 — backwash pump; 5 — water collection tank after UV modules; 6 — cartridge filter; 7 — high-pressure working pump; 8 — membrane reverse osmosis modules of the first stage; 9 — membrane reverse osmosis modules of the second stage

waste water: suspended solids, various oils and other impurities of both organic and inorganic nature, phenols [8]. At the moment there is no real technological scheme for the treatment of coke-chemical production effluents, only laboratory installations. This is due to the following reasons:

- high cost and shortage of domestic reverse osmosis and ultrafiltration membranes;
- high requirements to the initial quality of biochemically treated wastewater in terms of suspended solids content;
- lack of safe methods for utilization of concentrates from reverse osmosis and ultrafiltration purification processes.

Fig. 2 shows a variation of a possible technological scheme of wastewater treatment of coke-chemical production.

Thus, the introduction of reverse osmosis technology for wastewater treatment will reduce water withdrawal from sources and consequently reduce the discharge of wastewater, as well as achieve the fulfilment of requirement<sup>3</sup>, but for the introduction of this technology it is necessary to solve the issue related to the generated concentrates of reverse osmosis and ultrafiltration membranes [7].

Wastewater treatment of leather and footwear enterprise [9]. Composition of tannery sewage: pH — 8.09; amount of suspended solids — 1,436.3 mg/dm<sup>3</sup>, total chromium content — 78.13 mg/dm<sup>3</sup> (Chromium 6+ — 3.69 mg/dm<sup>3</sup> + Chromium 3+ — 74.55 mg/dm<sup>3</sup>); COD — 7,090.2 mg/dm<sup>3</sup>. The paper [9] raises the question of using membranes of various modifications, which will give an opportunity not only to reduce the load on the environment, but also to return the effluent to production as a secondary resource. Due to plasma chemical modification processes it is possible to obtain composite membranes for various purposes (increasing the efficiency of the filtration process, reverse osmosis, gas separation).

In the study [10] foreign experience of tannery wastewater treatment, namely the technology of Zero Liquid Discharge Systems (Zero Liquid Discharge System) is presented. This system allows treatment facilities

to reuse treated waste water in technological processes [10].

A zero liquid discharge system typically consists of three stages:

- 1) pre-treatment (reduction of insoluble substances in the effluent by filtration);
- 2) concentration of dissolved substances (combination of reverse osmosis and electrodialysis);
- 3) heat treatment (evaporator and catalyst).

Existing limitations on the application of reverse osmosis: the reverse osmosis method has a salinity limitation and will only be effective at salt concentrations below 70 g/l; high membrane fouling and scaling [11]. Pre-treatment is necessary to overcome these limitations:

- chemical softening;
- ion exchange;
- pH adjustment;
- use of low-pressure membrane filters.

In 2015, the volume of water reused in the European Union was about 1 billion m<sup>3</sup>/year and is expected to increase to 6 billion m<sup>3</sup>/year by 2025 [12]. This case study demonstrates the feasibility of zero liquid discharge systems and their widespread integration into production facilities around the world, as well as the development of this technology.

Another example is the treatment of wastewater from tannery production [13]. This paper summarizes the results of research on membrane technologies [14] for reuse of wastewater: membrane bioreactors [15], reverse osmosis [16], microfiltration and nanofiltration. The main problem with the use of membrane technologies remains their high degree of fouling during operation. The main conclusion is the prospect of research and practical application of non-membrane and membrane technologies [20]. Improving the biodegradability of tannery effluent with O<sub>3</sub> may be more favourable for decomposition of organic matter in a membrane bioreactor [17] at the reverse end, thus achieving high productivity and treatment degree of wastewater treatment.

## CONCLUSION

The modern state of the issue of treatment of sewage treatment of industrial enterprises, namely the use

of membrane technologies is analyzed. Domestic and foreign sources are considered. Proceeding from all material it is possible to draw the following conclusions:

- this technology remains in demand and is being developed;
- membrane technologies still have important disadvantages that can be addressed as they evolve;
- technologies that achieve zero liquid discharge are favoured;

- development and application of the technology is observed both in the domestic segment and in the foreign segment;

- the future of membrane technologies is inextricably linked to their integration with non-membrane technologies.

Further research into the incorporation of membrane technologies into existing process schemes will reduce the negative environmental impact and organize zero liquid discharge systems.

## REFERENCES

1. Zidane O.D. The treatment of wastewater produced by an ice cream factory with a membrane bioreactor. *Food Systems*. 2021; 4(3S):86-92. DOI: 10.21323/2618-9771-2021-4-3S-86-92. EDN TKRFFA. (rus.).
2. Garzanov A.L., Usov A.V., Kushniruk M.Y., Barabash V.P., Kamalyan O.A. Modernization of treatment facilities of an ice cream factory. *Ice Cream and Frozen Products*. 2004; 6:26-27. (rus.).
3. Strelkov A.K., Teplykh S.Yu., Bystranova A.O. Modern methods for cleaning fat-and-oil waste waters. *Urban Construction and Architecture*. 2019; 9(4):61-65. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.10. EDN GNPDPGY. (rus.).
4. Yuzhaninov A.G., Rudova N.A., Ogneva L.Yu. Oil-containing wastewater, its classification and treatment methods. *Construction and Education*. 1999; 140-142. EDN KCGGZA. (rus.).
5. Povorov A.A., Pavlova V.F., Shinenkova N.A., Krasnov A.N. Complex membrane technology of galvanic production wastewater treatment with the provision of closed water rotation. *Modern Technologies of Water Purification*.
6. Krasnokutskaya N.V. Composition of waste water of galvanic production of machine-building enterprise Komsomolsk-on-Amur. *Bulletin of scientific society of students, postgraduates and young scientists*. 2018; 3:29-36. EDN YGGYFV. (rus.).
7. Tsaritson E.I., Sabirova T.M. Implementation of membrane technologies for wastewater treatment of coke-chemical production. *Modern Science*. 2021; 7:35-39. EDN BZMTSR. (rus.).
8. Fedorova V.S., Manina L.K. Modernization of the industrial wastewater treatment system in the conditions of coke-chemical production of branch No. 12 of Vneshtorgservis CJSC. *Actual problems of iron and steel metallurgy : collection of abstracts of reports of the international scientific and practical conference*. 2021; 86-88. (rus.).
9. Abdullin I.Sh., Nefedyev E.S., Ibragimov R.G., Paroshin V.V. Application of membrane technology for wastewater treatment of leather and footwear enterprises. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2012; 15(3):21-26. EDN OPPIWZ. (rus.).
10. Ricky R., Shanthakumar S., Ganapathy G.P., Chiampo F. Zero Liquid discharge system for the tannery industry — an overview of sustainable approaches. *Recycling*. 2022; 7(3):31. DOI: 10.3390/recycling7030031
11. Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Bidulya S.M. Membrane technologies as environmentally safe methods of waste water purification. Issues of modern science and practice. *Vernadsky University*. 2021; 3(81):37-43. DOI: 10.17277/voprosy.2021.03.pp.037-043. EDN PXIQUG. (rus.).
12. Yaqub M., Lee W. Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater : a review. *Science of The Total Environment*. 2019; 681:551-563. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.062
13. Yang F., Wang X.B., Shan Y., Wu C., Zhou R., Hengl N. et al. Research recap of membrane technology for tannery wastewater treatment : a review. *Collagen and Leather*. 2023; 5(1). DOI: 10.1186/s42825-023-00132-8
14. Ezugbe E.O., Rathilal S. Membrane technologies in wastewater treatment : a review. *Membranes*. 2020; 10(5):89. DOI: 10.3390/membranes10050089
15. Iorhemen O., Hamza R., Tay J. Membrane Bio-reactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: membrane fouling. *Membranes*. 2016; 6(2):33. DOI: 10.3390/membranes6020033
16. Abdel-Fatah M.A., Amin A., Elkady H. Industrial wastewater treatment by membrane process. *Membrane-Based Hybrid Processes for Wastewater Treatment*. 2021; 341-365. DOI: 10.1016/B978-0-12-823804-2.00025-2
17. Fazal S., Zhang B., Zhong Z., Gao L., Chen X. Industrial wastewater treatment by using MBR (Membrane Bioreactor) review study. *Journal of Environmental Protection*. 2015; 6(6):584-598. DOI: 10.4236/jep.2015.66053
18. Tong T., Elimelech M. The global rise of zero liquid discharge for wastewater management: drivers, technologies, and future directions. *Environmental Science & Technology*. 2016; 50(13):6846-6855. DOI: 10.1021/acs.est.6b01000
19. Makisha N.A. Research of performance characteristics of membrane modules for wastewater treatment. *Construction: Science and Education*. 2020; 10(1):6.

DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.6. EDN LPQTLV.  
(rus.).

20. Makisha N.A., Smirnov D.G. Integrated waste  
water treatment accompanied by minimal generation

of excessive activated sludge or sediment. *Vestnik MGSU*  
[Proceedings of Moscow State University of Civil Engi-  
neering]. 2012; 12:192-198. DOI: 10.22227/1997-0935.  
2012.12.192-198. EDN PJOUUB. (rus.).

*Received September 9, 2024.*

*Adopted in revised form on September 9, 2024.*

*Approved for publication on September 20, 2024.*

**B I O N O T E S:** **Maxim A. Zharov** — postgraduate student of the Department of Water Supply and Drainage; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; assistant of the Department of Construction of Buildings and Structures; **Yaroslavl State Technical University (YSTU)**; 88 Moskovsky prospect, Yaroslavl, 150023, Russian Federation; mack.jarov2014@yandex.ru;

**Stanislav E. Alekseev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Water Supply and Drainage; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; AlekseevSE@mgsu.ru.

*Authors' contribution:*

*Maxim A. Zharov — idea, collection of material, material processing, writing of the original text, final conclusions.*

*Stanislav E. Alekseev — idea, scientific editing of the text, research concept.*

*The authors declare no conflict of interest.*