

УДК 628.3

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕМБРАННЫХ БИОРЕАКТОРОВ (МБР) В ЛОКАЛЬНЫХ
ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ, ИХ ПРЕИМУЩЕСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ****Шевчук Настасья Евгеньевна,**

Студент

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

nastshev2816@gmail.com

Аннотация

В статье рассматривается технология мембранного биореактора (МБР) как современное решение для локальных очистных сооружений. Проанализирован принцип работы системы, сочетающей биологическую очистку активным илом и мембранное разделение, что позволяет полностью отказаться от вторичных отстойников. Основное внимание уделено ключевым преимуществам МБР: гарантированно высокому качеству очищенной воды, значительной компактности и устойчивости к колебаниям нагрузки. Параллельно детально разобраны основные ограничения технологии, включая высокие капитальные и эксплуатационные затраты, проблему мембранного загрязнения (фоулинга) и повышенные требования к квалификации персонала. В итоге, технология МБР представлена как эффективный, но требовательный инструмент, выбор которого требует комплексного технико-экономического обоснования для каждого конкретного объекта.

Ключевые слова: мембранный биореактор (МБР), локальные очистные сооружения (ЛОС), очистка сточных вод, активный ил, мембранное загрязнение (фоулинг), компактность, качество пермеата, эксплуатационные затраты, технология очистки.

**APPLICATION OF MEMBRANE BIOREACTORS (MBR) IN LOCAL WASTE
WATER TREATMENT PLANTS, THEIR ADVANTAGES AND LIMITATIONS****Shevchuk Nastasia Evgenievna,**

Student

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

ABSTRACT

The article discusses the technology of a membrane bioreactor (MBR) as a modern solution for local wastewater treatment plants. The principle of operation of a system combining biological treatment with activated sludge and membrane separation is analyzed, which makes it possible to completely abandon secondary settling tanks. The main attention is paid to the key advantages of MBRs: guaranteed high quality of purified water, significant compactness and resistance to load fluctuations. At the same time, the main limitations of the technology are analyzed in detail,

including high capital and operating costs, the problem of membrane contamination (fouling) and increased requirements for personnel qualifications. As a result, IBR technology is presented as an effective but demanding tool, the choice of which requires a comprehensive technical and economic justification for each specific facility.

Keywords: membrane bioreactor (MBR), local wastewater treatment plants (VOCs), wastewater treatment, activated sludge, membrane pollution (fouling), compactness, permeate quality, operating costs, purification technology.

Введение

В современных условиях, когда требования к качеству очищенных сточных вод ужесточаются, а площади для размещения очистных сооружений становятся ограничены, традиционные технологии биологической очистки сталкиваются с серьезными проблемами. Классические аэротенки с последующими вторичными отстойниками, хоть и остаются широко распространенными, не всегда способны гарантировать стабильно высокий результат, особенно при колебаниях состава и расхода стоков. Именно в этом контексте все больший интерес при проектировании локальных очистных сооружений (ЛОС) вызывает технология мембранного биореактора (МБР). Данная статья посвящена анализу принципов работы МБР, его ключевых преимуществ перед классическими схемами, а также рассмотрению существующих ограничений и проблем, связанных с эксплуатацией таких систем. Целью является комплексное рассмотрение МБР как перспективной, но не идеальной технологии для локальных объектов.

Принцип работы и архитектура мембранного биореактора

В основе технологии МБР находятся два процесса: классическая биологическая очистка активным илом и физическое разделение с помощью ультра- или микрофильтрационных мембран. Если в традиционной схеме ил отделяется от очищенной воды путем гравитационного отстаивания во вторичном отстойнике, то в МБР эту функцию выполняет мембранный модуль, размещенный непосредственно в аэротенке или в отдельной камере. Это позволяет полностью отказаться от отстойника, что является ключевым архитектурным отличием.

Сточная вода последовательно проходит механическую очистку (удаление крупного мусора и песка) и поступает в биореактор, где органические загрязнения и соединения азота окисляются активным илом. Затем иловая смесь под давлением или под вакуумом прокачивается через поры мембран. Размер пор (обычно от 0,01 до 0,1 мкм) гарантирует полное задержание всех взвешенных веществ, бактерий и большинства вирусов. В итоге, через мембрану проходит только чистая, технически прозрачная вода (пермеат), а активный ил полностью возвращается в технологический процесс. Как следствие, в системе может поддерживаться значительно более высокая концентрация активного ила (MLSS) – до 12-15 г/л против 3-4 г/л в обычном аэротенке [2]. Это позволяет сократить требуемый объем реактора, что критически важно для локальных ЛОС с дефицитом территории [6].

Ключевые преимущества технологии МБР

Анализ литературных источников и практического опыта позволяет выделить ряд неоспоримых преимуществ МБР, которые и обуславливают растущую популярность технологии.

Первое – это высокое и стабильное качество очистки. Мембрана служит абсолютным барьером для твердых частиц. Это позволяет добиться практически нулевой концентрации взвешенных веществ на выходе (менее 1 мг/л), что недостижимо для гравитационного отстаивания. Высокое качество пермеата по таким показателям, как БПК и ХПК, также

отмечается в работах, посвященных современным методам очистки [4]. Качество очищенной воды часто позволяет напрямую использовать ее для технических нужд (орошение, мойка) или сбрасывать в чувствительные водные объекты.

Второе – компактность и модульность. Отказ от объемных вторичных отстойников и возможность работы с высокой концентрацией ила приводят к сокращению общей занимаемой площади и строительного объема сооружений в 2-4 раза. Это делает МБР идеальным решением для объектов с территориальными ограничениями: внутригородских станций, промышленных предприятий, коттеджных поселков [3]. Система легко масштабируется добавлением стандартных мембранных модулей.

Третье – это упрощение технологической схемы и устойчивость к нагрузкам. Отсутствие стадии отстаивания устраняет целый ряд традиционных проблем: вынос взвеси при пиковых нагрузках, необходимость рециркуляции ила, чувствительность к изменению седиментационных свойств ила. МБР демонстрирует высокую устойчивость к колебаниям расхода и концентрации загрязнений, обеспечивая стабильный выходной результат независимо от нагрузки. Потенциал биотехнологий в создании устойчивых систем также подчеркивается в научной литературе [5].

Стоит так же отметить потенциал для водопользования и снижения экологического следа. Высокое качество пермеата открывает путь к организации замкнутых систем водопользования на предприятии или локальной территории. Это не только экономит водные ресурсы, но и кардинально снижает нагрузку на окружающую среду, минимизируя объем сброса.

Ограничения, проблемы эксплуатации и пути их решения

Несмотря на впечатляющие преимущества, технология МБР не лишена существенных недостатков, которые необходимо учитывать при выборе и проектировании.

Технология МБР имеет высокие капитальные и эксплуатационные затраты. Основная статья расходов – стоимость самих мембранных модулей, которая остается значительной. Эксплуатационные затраты также выше из-за необходимости создания перепада давления для фильтрации и регулярных химических промывок мембран. Энергопотребление системы (аэрация + перекачка) может быть на 20-40% выше, чем у классической установки с отстойником.

Ключевой проблемой МБР является мембранное загрязнение (фоулинг). В процессе работы поры мембран забиваются коллоидными частицами, биополимерами и самими микробными клетками, что приводит к снижению производительности и росту рабочего давления. Для борьбы с фоулингом требуется комплекс мер: оптимизация гидродинамики в модуле (интенсивная аэрация для создания сдвиговых усилий), регулярные обратные промывки и периодические химические промывки реагентами (кислотой и гипохлоритом). Неправильное управление процессом может привести к необратимому загрязнению и необходимости дорогостоящей замены мембран. Проблемы устойчивости и регенерации материалов в таких системах требуют постоянного внимания [1].

Технология МБР сложна в эксплуатации и требует особо обученного персонала. Управление МБР требует более высокой квалификации обслуживающего персонала по сравнению с традиционными ЛОС. Необходим постоянный контроль трансмембранного давления, организация цикла промывок, управление режимом аэрации и концентрацией ила. Автоматизация является практически обязательным условием для стабильной работы, что также увеличивает начальные инвестиции.

Так же необходимо помнить о образовании и утилизация избыточного ила. Хотя в МБР образуется меньше избыточного ила по массе, его структура часто отличается из-за высокой концентрации и длительного времени пребывания в системе. Это может

затруднять его последующее обезвоживание и требовать специальных методов обработки [6].

Заключение

В рамках данной статьи был проведен анализ технологии мембранного биореактора в контексте ее применения на локальных очистных сооружениях. Было рассмотрено, как сочетание биологической очистки и мембранного разделения создает качественно новый уровень эффективности, обеспечивая компактность, стабильность и высочайшее качество очищенной воды.

Список литературы:

1. Трухина М. Г., Пельменёва Н. Д. Мембранные биореакторы: опыт применения в зарубежных странах // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 244–231.
2. Воронина М. В. Достоинства и недостатки использования мембранных биореакторов в очистке сточных вод // Студенческий форум. – 2020. – № 32-1 (125). – С. 59–60.
3. Володина С. Н., Мельникова Е. А. Использование мембранного биореактора для очистки сточных вод // Сборник трудов конференции. – 2024. – С. 88–90.
4. Гриценко М. В. Требования к локальным очистным сооружениям. Практический опыт // Сантехника. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 16–23. – ISSN 1609-9559
5. Рязских А. И., Кокоров Д. Т. Анализ функционирующих локальных очистных сооружений // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 115-16. – С. 170–172.
6. Ганижева Л. Л., Пономаренко Д. Б., Ганижев Р. Д., Токарев О. В. Очистка ливневых сточных вод на локальных очистных сооружениях // Сборник трудов конференции. – 2020. – С. 428–432.

References:

1. Trukhina M. G., Pelmeneva N. D. Membrane bioreactors: application experience in foreign countries // News of universities. Investments. Construction. Real estate. - 2022. - Vol. 12, No. 2. - Pp. 244-231.
2. Voronina M. V. Advantages and disadvantages of using membrane bioreactors in wastewater treatment // Student forum. - 2020. - No. 32-1 (125). - Pp. 59-60.
3. Volodina S. N., Melnikova E. A. Use of a membrane bioreactor for wastewater treatment // Collection of conference papers. - 2024. - Pp. 88-90.
4. Gritsenko M. V. Requirements for local treatment facilities. Practical experience // Plumbing. - 2017. - Vol. 4, No. 4. - Pp. 16-23. - ISSN 1609-9559
5. Ryazhskikh A. I., Kokorov D. T. Analysis of functioning local treatment facilities // Trends in the development of science and education. - 2024. - No. 115-16. - Pp. 170-172.
6. Ganizheva L. L., Ponomarenko D. B., Ganizhev R. D., Tokarev O. V. Stormwater treatment at local treatment facilities // Collection of conference proceedings. - 2020. - Pp. 428-432.