никам» зданий и использование искусственного интеллекта для управления климатом и энергией – это уже не футурология, а стандарт индустрии. Будущее ИКТ в инженерии лежит в плоскости дальнейшей автономизации систем, где искусственный интеллект берет на себя рутинное управление, оставляя человеку роль стратега и архитектора смыслов.

Список литературы

1 **Smith, J.** The Role of AI in Building Management Systems / J. Smith // Journal of Engineering & Tech. – 2025.

2 **Wang, Y.** Digital twins in the construction industry: A systematic review of current practices and future directions / Y. Wang, A. Rezaei, S. Hicks // Journal of Information Technology in Construction (ITcon). – 2026. – Vol. 31.

3 **Thapar, R.** Handbook on Integrating Smart Technologies for Sustainable Development. / R. Thapar, A. V. S. Kumar, O. S. Saleh (Eds.) // Routledge & CRC Press, 1st Edition. – 2026. – Vol. 1. – P. 238.

УДК 628.35:62-278

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕМБРАННЫХ БИОРЕАКТОРОВ

М. Д. ЮЗЕНКОВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Актуальность. Очистка сточных вод с использованием мембранного биореактора (МБР) активно применяется в странах Европы, в России она также набирает популярность. Так, на Московском нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) построен комплекс очистных сооружений «Биосфера», в который входит этап очистки в мембранных реакторах. Аналогичный комплекс только в более широком масштабе строится на Омском НПЗ. Эффективность очистки в «Биосфере» составляет 99,9 %, а 75 % воды после биоочистки повторно поступают в производство. Таким образом, технология МБР является перспективным направлением в области очистки сточных вод [1].

Цель работы. Анализ технологии мембранных биореакторов как современного способа очистки сточных вод, а также выявление преимуществ и недостатков по сравнению с традиционными системами.

Основные результаты. Мембранный биореактор представляет комбинацию традиционной биологической очистки и мембранного разделения, реализуемого на ультра- или микрофильтрационных мембранах. Размер пор таких мембран составляет от 0,01 до 0,1 мкм. Для очистки бытовых сточных вод традиционно используется аэробный процесс, однако для очистки промышленных стоков применяют и анаэробные МБР [2].

Мембраны в МБР в основном изготавливаются из полимеров (полиэтилена, полисульфона, полиэтиленсульфона, полиакриланитрила, поливинилиденфторида, поливинилхлорида и др.), а иногда используют неорганические материалы (оксиды Al, Ti, Zr и др).

Особенности мембранных биореакторов, дающие им преимущества перед традиционными схемами очистки:

1 Полное задержание всех взвешенных веществ и микроорганизмов, что обеспечивает:

– более высокую эффективность очистки по ХПК и $БПК_5$;

– устойчивость к колебаниям расхода и качества исходной воды.

2 Минимальное время пребывания воды в зоне отделения твердой фазы.

3 Полное удержание микроорганизмов в реакторе, что влияет на автоселекцию микроорганизмов активного ила.

4 Значительно меньшая площадь по сравнению с отстойниками [2].

Применение МБР в технологических схемах очистки сточных вод позволяет:

1 Изменить параметры работы реактора (аэротенка):

– увеличивать возраст активного ила при высоких гидравлических нагрузках, в том числе накопить медленно растущие виды микроорганизмов (нитрификаторы; микроорганизмы, окисляющие биорезистентные соединения);

–продлить время пребывания в реакторе взвешенных веществ вплоть до их полного биологического распада;

– минимизировать влияние седиментационных характеристик активного ила на качество очищенной воды;

– увеличить устойчивость системы к изменениям концентраций загрязнений за счет адаптации биоценозов.

2 Разделить время пребывания воды и микроорганизмов со взвешенными веществами.

3 Повысить гидравлическую производительность и окислительную мощность биологической очистки.

Использование погружных мембранных модулей дает возможность легко модернизировать сооружения биологической очистки без значительных конструктивных изменений. Наиболее яркий положительный эффект от внедрения МБР наблюдается при стесненных условиях, необходимости более компактных конструктивных решений, особенно при высоких требованиях к содержанию взвешенных веществ в очищенной воде.

К главным недостаткам мембранных биореакторов относятся:

– высокие капитальные вложения, при этом стоимость самих мембранных блоков почти не зависит от производительности;

– засорение мембран, требующее дополнительных расходов;

– большие эксплуатационные затраты (электроэнергия, замена мембран);

– усложненное управление и контроль;

– трудность в обеспечении необходимой аэрации при высоких концентрациях активного ила в мембранных биореакторах.

В основу действия биореактора положен синтез биотехнологии и технологии разделения водных суспензий на ультрафильтрационных полимерных мембранах. Технологическая схема состоит из аэротенка и мембранного модуля, с ультрафильтрационными или микрофильтрационными полимерными мембранами. Сточные воды подаются в аэротенк, где иловая смесь циркулирует через мембраны, обеспечивая высокую концентрацию активного ила и глубокую очистку. Аэротенки в системе МБР компактнее классических проточных, имея размер в 2–3 раза меньше объема [3].

Опыт эксплуатации МБР подтвердил высокую эффективность процесса и позволил определить ряд особенностей.

1 Решение проблемы выноса активного ила с очищенными сточными водами. Эквивалентный диаметр пор ультра- и микрофильтрационных мембран находится в пределах 0,02–0,5 мкм. Размер бактерий и простейших, составляющих биоценоз активного ила, превышает 5 мкм, мембрана является физическим барьером на пути проникновения организмов активного ила в водные объекты с очищенными сточными водами.

2 Эффективная очистка благодаря увеличенной площади контакта микроорганизмов со сточными водами. Размер хлопьев активного ила в МБР 5–10 раз меньше, а концентрация нитчатых микроорганизмов в 5–10 раз выше, чем в аэротенках с последующим вторичным осаждением. За счет дисперсности активного ила многократно увеличивается площадь контакта активного ила со стоками, что приводит к эффективной сорбции тяжелых металлов, трудноокисляемых и инертных органических веществ.

3 Высокая окислительная мощность при малых объемах биореактора. МБР эксплуатируются при дозе ила 8–15 мг/дм^3, что при равенстве объемов с традиционными конструкциями аэротенков позволяет производить очистку высококонцентрированных сточных вод. Одновременно высокие дозы ила позволяют уменьшить объем биореактора в 2–3 раза.

4 Сокращение количества избыточного активного ила. Возраст ила в МБР составляет 25–30 сут, нередко превышая 60–70 сут. Верхний предел возраста ила, принимаемый службой эксплуатации, зависит от эффективности гидролиза отмершей клеточной массы и допустимой массы инертных взвешенных веществ в мембранном биореакторе.

Несмотря на наличие нитчатых микроорганизмов, за счет повышенной минерализации активный ил обладает удовлетворительной водоотдачей и отводится на обработку непосредственно из биореактора.

5 Эффективная нитрификация и деструкция сложноокисляемых компонентов сточных вод. Эксплуатация в условиях повышенного возраста активного ила приводит к селекции в пользу медленнорастущих микроорганизмов, в частности бактерий-нитрификаторов, а также к снижению прироста активного ила.

6 Частичное обеззараживание сточных вод. Вследствие того, что поры мембран имеют меньший размер, чем клетки подавляющего большинства известных бактерий и некоторых вирусов, а также за счет образования отложений на поверхности мембраны, выступающих как дополнительный фильтрующий слой, в МБР происходит эффективное обеззараживание сточных вод.

7 Устойчивость процесса очистки к колебаниям концентраций загрязняющих веществ и залповым сбросам. Эксплуатация мембранных биореакторов в режиме низкой нагрузки на активный ил создает резерв окисляющей способности и повышает устойчивость процесса очистки к колебанию состава сточных вод.

Со временем мембранная производительность снижается из-за осаждения частиц на и в мембране. Современные методы борьбы с загрязнением включают постоянную аэрацию поверхности мембран, гидравлическую и периодическую обратную промывку, а также погружение мембран для дополнительной очистки.

Вывод. Мембранные биореакторы являются высокоэффективной и перспективной технологией очистки сточных вод, сочетающей биологическую обработку и мембранное разделение. Они обеспечивают глубокую очистку, компактность сооружений и возможность повторного использования воды. Несмотря на более высокие капитальные и эксплуатационные затраты, преимущества МБР – высокая степень удаления загрязнений, снижение объема избыточного ила и компактность – делают их востребованными как в промышленности, так и при модернизации действующих очистных сооружений.

Список литературы

1 **Гоголева, Н. А.** Применение технологии мембранных биореакторов (МБР) в очистке сточных вод как один из перспективных методов очистки / Н. А. Гоголева, С. В. Белькова // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф., Омск, 26–29 февр. / Омский гос. техн. ун-т ; редкол.: В. А. Лихолобов [и др.]. – Омск : ОмГТУ, 2020. – С. 275–276.

2 **Адрианов, А.** Особенности и перспективы применения мембранных биореакторов для очистки сточных вод / А. Адрианов // Вода Magazine. – 2020. – № 6. – С. 10–15.

3 **Ходневский, А. В.** Аппаратурное оформление процесса очистки сточных вод в мембранных биореакторах / А. В. Ходневский, В. В. Кузьмин, В. С. Францкевич. – Минск : БГТУ, 2023. – С. 184–188.