

ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ мембранных биореакторов для обработки сточных вод

*М.Н. Видякин
Представительство Toray Membrane Europe AG
С.А. Гарипова
АкваКонтроль Самара*

Технология мембранного биореактора (МБР) составляет всё более серьёзную конкуренцию традиционным процессам биохимической очистки бытовых и производственных сточных вод, причем для многих отраслей промышленности МБР становится единственной наилучшей доступной технологией, позволяющей получать очищенную воду, соответствующую нормативным показателям.

На сегодняшний день мембранные технологии нашли широкое применение в области водоподготовки и очистки природных и сточных вод. Например, баромембранные процессы ультрафильтрации (УФ) и обратного осмоса (ОО) уже стали традиционными при подготовке питьевой и производственной воды из поверхностных и подземных источников. Не менее эффективно применение УФ при доочистке хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод, ведь в традиционном понимании технология мембранного биореактора является аппаратурно оформленным сочетанием процессов биохимической очистки сточных вод и микро- или ультрафильтрации [1-3]. Более предметно следует остановиться на новаторских решениях, которые принесли мембранные технологии в сферу очистки сточных вод, а именно на технологии МБР – одной из наиболее динамично развивающихся областей на-

уки и техники последнего десятилетия [2, 3].

Внедрение мембранной технологии для решения широкого спектра задач очистки сточных вод и повторного использования очищенной воды для производственных нужд объективно является одной из самых актуальных технологических задач. Высокая интенсивность фундаментальных научных исследований и прикладных разработок, постоянно увеличивающийся интерес широкого круга потенциальных потребителей, устойчивый рост рынка промышленного оборудования, а также другие факторы свидетельствуют об актуальности тематики мембранных биореакторов сегодня и о широких перспективах их развития в дальнейшем [2-4].

Поскольку технология МБР – комбинированный процесс, объединяющий глубокую биологическую очистку и селективное разделение, характерное для мембранных процессов,

применение МБР не только открывает возможность существенной интенсификации процессов биологической очистки за счёт увеличения концентрации активного ила и селективного развития биоценоза, а следовательно, за счёт роста окислительной мощности очистных сооружений, но и позволяет существенно повысить надёжность и других этапов очистки сточных вод. Современные полимерные и неорганические мембраны, применяемые в технологии МБР, являются физическим барьером, исключающим возможность выноса биомассы из зоны биологической очистки [3, 4]. А ведь известно, что ключевая проблема эффективной эксплуатации биологических очистных сооружений производственных сточных вод – это повышенная «вспухаемость» (высокий иловый индекс) и низкая способность к седиментации активного ила на стадии вторичного отстаивания.

Внедрение МБР возможно как для замены стадии вторичного отстаивания на более эффективную и компактную стадию мембранно-биологической очистки, так и для дополнительной обработки сточных вод перед финишной очисткой. Однако в последнем случае технологические закономерности, характерные для МБР, реализуются не в полной мере, а лишь частично.

Ограниченность площадей, доступных для размещения очистных сооружений (ОС) производственных сточных вод, необходимость применения ОС закрытого типа для сокращения санитарно-защитной зоны, ежегодно ужесточающиеся требования к составу очищенной воды зачастую заставляют полностью отказаться от классических технологий очистки сточных вод предприятий и использовать МБР. Ведь при обработке производственных сточных вод технология МБР во многих случаях является единственной альтернативой традиционным методам очистки, поскольку позволяет достичь высокого качества очищенной воды (пермеата), соответствующего самым жёстким нормативным требованиям и недостижимого

при использовании традиционных методов очистки.

Немаловажным свидетельством востребованности технологии МБР в области водотведения является постоянно возрастающее количество вводимых в эксплуатацию установок по очистке сточных вод с использованием этой технологии по всему миру, в том числе в Российской Федерации и Казахстане. Анализ публикаций [3, 5–7], охватывающих крупнейшие мировые рынки технологии МБР, показывает, что МБР уже внедрены и успешно применяются более чем на 7000 сооружений очистки и доочистки сточных вод по всему миру. Среднегодовой мировой рост рынка оборудования для технологии МБР составляет около 11%, а в ряде бурно развивающихся регионов (в Азии, на Ближнем Востоке и др.) достигает 50–60%. Наиболее активное внедрение технологии МБР наблюдается в технически и технологически развитых странах Европы и Азии, а также в США и Канаде. По обобщенной информации из литературных источников, 60% сооружений очистки с МБР обрабатывают муниципальные хозяйственно-бытовые сточные воды и 40% используют для обработки производственных стоков. Более 99% всех МБР-установок используют мембранные модули погружного типа, поскольку они позволяют устойчиво работать в жестких условиях с концентрацией ила от 10 до 15 г/л и обладают существенно более низкими эксплуатационными энергозатратами и простотой обслуживания. Чаще всего мембраны, применяемые в МБР, изготавливают из полимерных материалов (ПЭ, ПЭС, ПС, ПП, ПВДФ и др.) и в ряде случаев – из неорганических (оксиды Al, Ti, Zr и др.).

Особенно следует отметить широкое применение технологии МБР для обработки производственных стоков. Концентрации загрязнений в них в 50–1000 раз превышают аналогичные значения для хозяйственно-бытовых стоков, поэтому классические схемы очистки зачастую не могут обеспечить достижение значений

требований нормативных документов к качеству очищенной воды по целому ряду технологических причин.

Каждый производственный сток характеризуется уникальным составом, определяемым специфическими компонентами, используемыми в производстве, поэтому проект очистки сточных вод конкретного производства, предусматривающий использование технологии МБР, – уникален. Лишь в ряде отраслей промышленности возможны обобщения по качеству исходных сточных вод и, как следствие, схожие проектные решения.

Можно привести множество примеров [2, 3] успешного внедрения технологии МБР для очистки и доочистки производственных сточных вод в различных отраслях промышленности: в производстве молока и молочных продуктов, соков, вина, пива, виски и спирта, в переработке овощей и фруктов, в мясоперерабатывающей промышленности, фармацевтике, химической и целлюлозно-бумажной промышленности, в текстильной, а также в обработке сточных вод полигонов ТБО.

Одним из самых эффективных и перспективных направлений внедрения технологии МБР является мясоперерабатывающая промышленность, где сточные воды обычно представляют собой смесь стоков убойных цехов, образующихся в технологическом цикле при убое скота и промывке технологического оборудования, цехов переработки мяса, а также бытовых сточных вод (рис. 1).

Биологическая очистка таких сточных вод сопряжена с определёнными трудностями, связанными с их составом, а также с неравномерностью поступления стоков на ОС. Средние объёмы стоков составляют до 800 л при убое крупного рогатого скота, до 300 л при убое свиней и до 30 л при убое птицы. При этом образующиеся сточные воды являются весьма концентрированными со значениями БПК₅ до 5000 мг/л, ХПК до 10000 мг/л, общего азота до 200 мг/л, с

содержанием жиров (эфирорастворимых и нерастворимых) до 150 мг/л, а также со значительным количеством взвешенных частиц.

Технология МБР уже успешно применяется на многих очистных сооружениях мясоперерабатывающей промышленности различной производительности по всему миру, поэтому при проектировании новых производств или реконструкции существующих отсутствуют основания для проведения лабораторных и пилотных испытаний технологии, поскольку её эффективность уже доказана успешным внедрением на многочисленных объектах.

Существенный практический опыт, накопленный зарубежными и российскими специалистами при внедрении МБР для обработки производственных сточных вод, показал, что основными их преимуществами по сравнению с классической биохимической и альтернативной физико-химической технологиями являются:

- гарантированно высокое качество очищенной воды (концентрация взвешенных частиц в пермеате – от 1 до 3 мг/л, мутность – ниже 1 NTU);
- повышенная окислительная мощность ступени биологической очистки за счёт увеличения дозы активного ила в аэротенке;
- существенная экономия производственных площадей, необходимых для размещения основного и вспомогательного технологического оборудования;
- надёжность работы, обеспечиваемая непроницаемой для взвешенных частиц мембраной.

В частности, использование МБР позволяет заменять узлы осветления сточной воды после её биологической обработки свободными, смешанными, аэробными и анаэробными культурами. Кроме того, возможно достижение практически полного удаления взвешенных веществ независимо от состояния ила и илового индекса, так как мембраны способны задерживать даже нес-

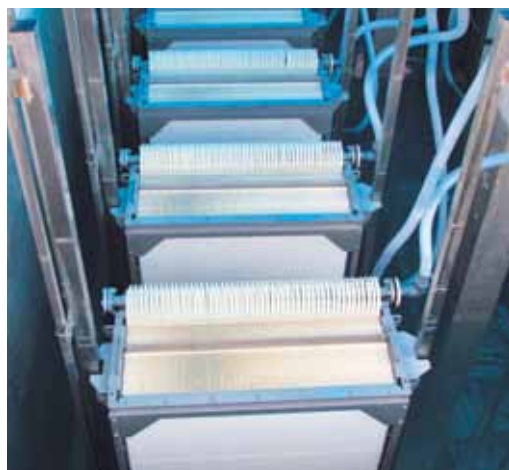


Рис. 1. Очистные сооружения с МБР-технологией, плоскостные МБР-модули в работе

флокулированные микроорганизмы. Одновременно с удалением взвешенных веществ происходит обеззараживание (УФ-мембраны удаляют патогенные микроорганизмы, бактерии и частично вирусы). При очистке производственных сточных вод предприятий пищевой, в частности мясной, промышленности данный фактор является особенно актуальным, поскольку при использовании МБР согласно результатам многочисленных испытаний достигается снижение патогенов на уровне 4–6 lg, в то время как классическая технология обеспечивает лишь 1–2 lg.

Немаловажно, что при применении технологии МБР возможно использование свободных культур (активного ила) с очень мелкими хлопьями, что способствует уве-

личению диффузии субстрата и кислорода внутрь хлопьев и интенсификации процессов очистки. Кроме того, УФ-мембрана не пропускает некоторые макромолекулярные метаболиты, предотвращая тем самым их разрушение, благодаря чему конечная величина ХПК оказывается меньше, чем при использовании классической технологии с активным илом [8].

Более наглядно продемонстрировать преимущества технологии МБР по сравнению с классической схемой, предусматривающей использование вторичных отстойников, можно на примере биологических очистных сооружений птицефабрики с убойным цехом (рис. 2, табл. 1). Схема ОС предполагает несколько этапов очистки: ме-



Рис. 2. Сооружения физико-химической очистки сточных вод птицефабрики

ханическую, физико-химическую, биологическую. При проектировании сооружений биологической очистки (в том числе с применением МБР) для таких сточных вод необходимо предусматривать тщательную предварительную подготовку (тонкую механическую очистку для удаления частиц размером от 0,5 до 1,5 мм, коагуляцию, флоатацию и др.).

Исходные данные для сравнения сооружений биологической очистки с применением МБР и основанных на классической технологии (аэротенк – вторичный отстойник):

- производительность ОС – 1000 м³/сут;
- концентрация БПК₅ после предварительной механической и физико-химической очистки (перед блоком биологической очистки) – 800 мг О₂/дм³;
- удельная нагрузка на ил для условий глубокой биологической очистки – 0,05 кг БПК на 1 кг ила беззольного в сутки.

Поскольку биологические ОС промышленных сточных вод мясоперерабатывающей промышленности могут испытывать значительные перегрузки (во время мойки оборудования и очистки трубопроводов от жира), то при эксплуатации аэротенков и вторичных отстойников возможно возникновение различных трудностей. Так, при применении классической схемы очистки с использо-

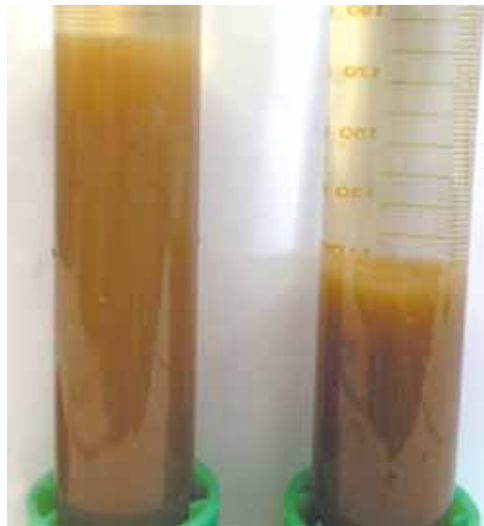


Рис. 3. Пробы активного ила очистных сооружений мясокомбината после аэротенка первой ступени (слева) и аэротенка второй ступени (справа)

ванием вторичных отстойников, возможен вынос взвешенных веществ, который обусловлен множеством факторов, связанных с избыточными гидравлическими нагрузками и перегрузками активного ила, неправильной эксплуатацией отстойников и конструктивными неполадками, образованием пены на поверхности отстойников, всплыванием активного ила и др. Вынос активного ила из вторичных отстойников существенно деста-

Таблица 1

Сравнительный анализ возможности применения технологии МБР для очистки производственных сточных вод птицефабрики с убойным цехом

	Классическая технология	Технология МБР
Доза ила в аэротенке, г/л	3–5	8–12
Расчётный объём блока биологической очистки, м ³	~2500–4000	~1000–1500
Площадь вторичных отстойников, м ² [9]	~100–160 м ²	–
Удельное потребление электроэнергии на биологическую очистку стоков, кВт/м ³ *	0,6–0,9	1,3–1,5
Удельное потребление электроэнергии на очистку сточных вод в целом, кВт/м ³ **	1,5–1,8	2,1 – 2,3

*Для классической схемы было учтено энергопотребление насосов рециркуляции ила, воздуходувки, для схемы с МБР было учтено энергопотребление насосов рециркуляции ила, воздуходувок для биореактора и МБР, насосов откачки пермеата.

**Для расчёта была учтена полная схема предварительной очистки, общая для обеих технологий: механическая очистка, усреднение, напорная флотация. Далее для классической схемы была учтена доочистка на напорных засыпных фильтрах.



Рис. 4. Пенообразование в аэротенке в результате сбросов стока убойного цеха мясокомбината

билизирует работу аэротенка: уменьшается концентрация биомассы и снижается эффективность очистки.

Для обеспечения работы очистных сооружений по классической схеме может также применяться 2-ступенчатая биологическая очистка (последовательное расположение: аэротенк первой ступени – отстойник – аэротенк второй ступени – отстойник), однако при реализации такой технологии для размещения основного оборудования требуются существенные производственные площади. Кроме того, первая ступень биологической очистки испытывает гидравлические перегрузки, в результате чего требования к очистке сточных вод не достигаются (рис. 3).

В случае отказа от использования вторичных отстойников в пользу технологии МБР при строительстве новых или

реконструкции существующих ОС вынос активного ила невозможен, поскольку УФ-мембрана является физическим барьером для взвешенных частиц размером более, чем размер пор мембраны. В этом случае при воздействии токсических сбросов и диспергировании хлопьев активного ила, а также при образовании пены (наличие СПАВ, жиров) ОС продолжают устойчиво обеспечивать высокое качество фильтрата на выходе. При вспухании активного ила и нарушении его флокуляционных и седиментационных свойств применение МБР может способствовать стабилизации работы ОС при условии, что причины вспухания устраняются (рис. 4).

Включение в общую схему очистки производственных сточных вод блока мембранной фильтрации также оказывает влияние и на работу других основных

Таблица 2

Влияние применения технологии МБР на дополнительные узлы очистки

Узлы очистки	Классическая технология	Технология МБР
Доочистка	Требуются обязательно: – песчаные фильтры; – адсорбционные фильтры; – фильтры с полимерными загрузками	Не требуются
Обезвоживание избыточного ила	Требуется применение илоуплотнителя, так как концентрация сухого вещества в избыточном иле невысока	Возможна подача избыточного ила на обезвоживание непосредственно из блока МБР, концентрация сухого вещества достаточна
Обеззараживание очищенной воды	Требуются большие дозы активного хлора при хлорировании или частая замена ламп УФО	Эффект обеззараживания достигается уже на стадии мембранной фильтрации, поэтому не требуются высокие дозы активного хлора, увеличивается срок службы ламп УФО

узлов ОС, таких, как обезвоживание, доочистка и обеззараживание (табл. 2).

Таким образом, внедрение на различных производственных объектах технологии МБР для очистки и доочистки сточных вод позволяет решать задачи повышения качества очистки воды (в том числе и для её повторного использования на предприятии). Кроме того, в условиях постоянного ужесточения нормативных требований и повышения платы за негативное воздействие на окружающую среду применение МБР может быть важным инструментом повышения экономической эффективности и экологической безопасности промышленного производства.

Следует отметить, что мониторинг работы ОС, использующих технологию МБР, показывает, что очень важна компетентная эксплуатация ОС, обеспечивающая стабильность их работы и высокое качество очистки воды в точке выхода [3]. В то же время высокая эффективность работы многих ОС, использующих МБР в климатических условиях Российской Федерации, Украины и Казахстана, доказала, что влияние климата не столь существенно, как предполагали ранее, – даже в зимнее время их работа стабильна и соответствует проектным решениям.

По-видимому, основными причинами, ограничивающими внедрение технологии МБР на территории стран СНГ, являются недостаточная осведомленность проектных и подрядных организаций о возможностях и преимуществах данной технологии над классическими технологическими решениями и необходимость организации компетентной службы эксплуатации, способной анализировать изменения эксплуатационных параметров в процессе работы и вовремя принимать взвешенные решения.

Совокупность преимуществ технологии МБР для очистки промышленных сточных вод сполна компенсирует более существенные капитальные вложения и текущие затраты (на 10–20% выше) на её реализацию, чем при использовании классической технологии, а качество очистки сточных вод позволяет повторно использовать воду и (или) сократить объёмы и токсичность сбросов. Это уже позволило многим специалистам сделать обоснованный выбор в пользу этой инновационной технологии более чем на 80 объектах канализования в России, на Украине, в Казахстане, Туркменистане и других странах СНГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков А.М., Соловьев С.А., Видякин М.Н. Технология мембранного биореактора (МБР) для очистки природных и сточных вод [J] // Критические технологии. Мембраны. 2008. № 3.
2. Membrane Biological Reactors: Theory, Modeling, Design, Management and Applications to Wastewater Reuse / ed. by F. I. Hai, K. Yamamoto, C.-H. Lee. London: IWA Publishing, 2013.
3. Judd S. The MBR book, Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment, 2nd ed. Elsevier, 2010.
4. Свитцов А.А. Введение в мембранные технологии. М.: ДеЛи принт, 2007.
5. Huisjes E., Colombel K., Lesjean B. The European MBR market: specifics and future trends / Final MBR-Network workshop, Berlin, 31st March - 1st April 2009.
6. Survey of MBR market: Trends and perspectives in China / Zheng X., Zhou Y. et al. // Desalination. 2010. № 250. P. 609–612.
7. Le-Clech P. Membrane bioreactors and their uses in wastewater treatments // Appl Micro-biol, Biotechnol. 2010. № 88 (6).
8. Технический справочник по обработке воды: в 2-х т. Пер. с фр. Т. 1. СПб.: Новый журнал, 2007.
9. Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. 4-rth Ed., Metcalf&Eddy, Inc., 2004.