

V. LAZAROVA, P. DAUTHUILLE

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ И ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В МЕМБРАННЫХ БИОРЕАКТОРАХ

Вступление, цели и методика работы

Начало XXI столетия отмечено беспрецедентным воздействием на природные ресурсы. Изменение климата, защита биологического разнообразия и сохранение природных ресурсов являются сегодня важнейшими проблемами, требующими реального эффективного решения. Столкнувшись вплотную с этими сложнейшими задачами, компания Suez Environment приступила к выполнению программы EDELWAY и в сотрудничестве с местной администрацией проводит мероприятия, необходимые для согласования последствий экономического роста с экологической ситуацией с целью обеспечения устойчивого экономического развития, не наносящего ущерба окружающей среде.

В рамках этой глобальной программы в период 2006-2008 гг. был выполнен масштабный совместный проект, направленный на оценку значимости технологии очистки воды с помощью мембранных биореакторов (МБР) в части снижения воздействия на окружающую среду при производстве высококачественной рециркуляционной воды для повторного использования по различному назначению, улучшения защиты биологического разнообразия за счет повышения эксплуатационной надежности и удаления следовых количеств органики и возникающих загрязнений, а также в части оптимизации энергетических и местных водных ресурсов с целью сохранения природного наследия.

На протяжении последних 20 лет МБР технология чрезвычайно быстро эволюционировала, пройдя путь от инновационной разработки до вполне жизнеспособной конкурентоспособной альтернативы традиционной биологической технологии очистки воды. В настоящее время во всем мире находится в эксплуатации несколько тысяч МБР-систем, причем только в Европе установлено свыше 300 систем промышленного назначения и около 100 систем для очистки городских сточных вод (Lesjean и Huisjes, 2007). Проведенные недавно прогнозные исследования рынка подтверждают перспективы дальнейшего распространения этой технологии в течение ближайших 10 – 20 лет.

Несмотря на значительный интерес исследователей к этой технологии и наличие значительного эксплуатационного опыта, в настоящее время известна лишь незначительная информация о причинах отказов МБР-систем. Стоит отметить, что основной технической проблемой являлся контроль загрязнения мембран. Однако, основные причины отказов полномасштабных МБР-систем, использовавшихся для очистки производственных или городских сточных вод, не имеют надежного документирования и объяснения. Долговременные исследования в этом направлении ведутся во Франции и Испании. Мониторинг проводился на четырех станциях полномасштабной очистки городских сточных вод, оснащенных погружными мембранами из полых волокон, и на четырех МБР-системах полномасштабной очистки производственных сточных вод, оснащенных боковыми контурами с керамическими фильтрами. Задача мониторинга состояла в оценке эффективности очистки, эксплуатационной надежности, контроля загрязнения и в выявлении основных причин сбоев системы. Для мониторинга систем очистки городских сточных вод были выбраны только погружные системы Zenon (ZeeWeed 500c,d) вследствие того, что они обнаружили высокую надежность при эксплуатации в различных климатических условиях на станциях различной производительности. По тем же причинам для мониторинга систем очистки производственных сточных вод были отобраны системы с боковым контуром фильтрации, оснащенные керамическими мембранами Kerasep (Рисунок 1).



Рисунок 1. Внешний вид исследованных МБР-систем (керамическая и погружная органическая), используемых для очистки производственных и городских сточных вод соответственно

Sidestream ceramic UF – боковой контур с керамическими мембранами ультрафильтрации

Submersed organic UF – погружной реактор с органическими мембранами ультрафильтрации

Для упрощения сбора необходимой информации МБР-системы разбивались на типовые функциональные блоки и подблоки. Технические характеристики оценивались, исходя из эксплуатационной надежности, срока службы оборудования, лёгкости управления, контролирования запаха, а также потенциальной возможности удаления возникающих загрязнителей. Анализ эксплуатационной надежности МБР-систем проводился в ходе формальных и неформальных совещаний менеджеров и операторов, причем в качестве исходной информации рассматривались как реально наблюдавшиеся сбои и отказы оборудования, так и вероятность подобных событий и их возможные последствия.

Эксплуатационная надежность оценивалась в ходе анализа характера отказов в соответствии с основными положениями метода анализа характера, последствий и критичности отказов (Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA)) (Lazarova *et al.*, 2007). Этот метод основан на оценке важнейших последствий технологических сбоев, включая такие показатели, как загрязнение окружающей среды, выходы за допустимые пределы, соблюдение требований к размерам, наличие запаха, сброс ила неудовлетворительного качества, загрязнения пляжей, безопасность жизнедеятельности, репутация и враждебное общественное восприятие, финансовые проблемы (прямые затраты на ремонтные работы, дополнительные расходы, снижение дохода) и неисполнение контрактных обязательств. Каждое из этих последствий включает в себя несколько важнейших факторов воздействия, каждый из которых оценивался в баллах по относительной шкале, увязанной с определенным экономическим показателем. После этого производилось присваивание приоритетов видам отказов в соответствии с вероятностью их возникновения, серьезностью и обнаруживаемостью. На основе установленных приоритетов и результатов соответствующего технико-экономического исследования всех возможных отказов данного мембранного реактора вырабатывались рекомендации на проведение мероприятий, направленных на снижение вероятности возникновения сбоев и отказов.

Воздействие на биологическое разнообразие и окружающую среду оценивалось путем определения характерных химических и микробиологических эксплуатационных показателей полномасштабной МБР-системы очистки городских стоков, имевшей проектную мощность $6250 \text{ м}^3/\text{сут.}$ (24,000 p.e.) и оснащенной погружными мембранами из полых волокон типа ZeeWeed 500d.. Система функционировала при соотношении F/M, составлявшем $0.05 \pm 0.01 \text{ кг DBO/kg кг MVS сут.}$, и концентрации ила $6 \pm 1 \text{ г/л}$, причем возраст ила составлял 25 – 40 суток, а средний поток через мембрану при 20°C равнялся 23 л/час.м^2

Показатели химического воздействия МБР-процесса оценивались через эффективность удаления 60 важнейших органических соединений и ряда других возникающих загрязнителей.

Хотя в литературе уже имеются сведения о метаболическом пути некоторых органических загрязнителей в ходе процесса очистки воды (Zuehlke *et al.*, 2006, Snyder *et al.*, 2006, Joss *et al.*, 2008), данные об эффективности удаления этих загрязнений имеют значительный разброс вследствие отсутствия информации об их возможном накоплении в иле. В данном исследовании особое внимание уделялось информации об условиях проведения процесса, что позволило повысить надежность пробоотбора и анализа, а также дало возможность проведения оценки глобальной эффективности удаления с учетом переноса микрозагрязнений в ил. Массовый баланс определялся на основании измерений, проведенных на исходной и очищенной воде, избыточном активном иле и возврате от обезвоживания ила в течение двух последовательных суточных периодов функционирования при сухой погоде. Для отбора проб использовались охлаждаемые пробоотборники с тефлоновыми трубками и стеклянными резервуарами. В обязательном порядке выполнялись процедуры очистки, пробоотбора и отбора холостых проб (Геологический надзор США (US Geological Survey), 2002). Для анализа 60 органических соединений (8 ПАУ (полициклические ароматические углеводороды), 2 пластификатора (DEHP, бисфенол А), 7 летучих органических соединений (VOC), 8 хлорфенолов, 7 ингибиторов горения (PBDEs), 9 специальных химреагентов (включая хлоралканы C10-C13, хлорбензолы и триклозан), 17 пестицидов различного класса и 2 антибиотика) применялись 7 различных методик. Растворимые и твердые фазы анализировались в исходной воде, за исключением летучих органических соединений (только необработанные пробы). Твердые фазы анализировались в иле.

Таблица 1. Список методов, использованных для количественного определения целевых загрязнителей

Метод	Экстракция	Метод разделения**	LoQ исходной воды (нг/л)	LoQ ила (мкг/кг)
Multiresidue - Определение множественных остатков	Жидкость-жидкость+Florisil	GC-MS-MS	20 – 1000 (в зависимости от соединения)	20 – 1000 (в зависимости от соединения)
COVs (ISO 15680:2003)	Продувка и ловушка	GC-MS	100	Не анализировались
Хлорфенолы	Микровыделение твёрдой фазы SPME	GC-MS	50 – 150*	Требуется проверки
Пестициды-антибиотики	Твердофазная экстракция SPE	HPLC-MS-MS	1 – 2*	Требуется проверки
Глифосат/АМПА	SPE	HPLC-MS-MS	100	Не анализировались
Хлоралканы	SBSE	TD-GC-EDC	500	1000
Полиброминат-дифенил-эфир PBDE/ Бисфенол А	SBSE	TD-GC-MS	1 – 100*	4 – 50*

* GC- газовая хроматография;

MS – масс-спектрометрия

HPLC- высокоэффективная жидкостная хроматография

Микробиологические показатели очищенной воды оценивались с использованием новейших разработок в области детектирования молекул, таких, например, как количественное определение в режиме онлайн цепочек ДНК (чип ДНК) и метод ПЦР. Эти инновационные методики позволяют получать надежные данные о наличии патогенных микроорганизмов. Хотя обычно микробиологический мониторинг требует отбора больших объемов проб и применения специальных фильтрующих систем для каждого типа микроорганизмов, в данном случае была использована универсальная процедура концентрирования, основанная на ультрафильтрации.

Перечень детектируемых микроорганизмов включает 6 таксонов бактерий (*Escherichia coli*, *Escherichia coli O157:H7*, *Salmonella spp*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella spp.* and *L. pneumophila*); три энтеровируса человека (*Enterovirus*, *Hepatitis A*, *Norovirus*) и двух паразитов (*Cryptosporidium spp./C. parvum* ; *Giardia lamblia*).

Этот многосторонний мониторинг качества воды позволяет оценить воздействие МБР-технологии на здоровье людей и на окружающую среду в сравнении с традиционным методом очистки сточных вод в аэротенке. Помимо этого, оценивались также и другие эксплуатационные характеристики, включая надежность эксплуатации, срок службы оборудования, потребление энергии, простота укрытия для контроля запаха, каждая из которых вносит значительный вклад в глобальное экологическое воздействие предприятия, производящего очистку сточных вод.

Полученные результаты и их обсуждение

Основные факторы, обуславливающие отказы в МБР-системах

Анализ технических и эксплуатационных характеристик исследовавшихся мембранных систем подтвердил высокую надежность МБР-технологии в сравнении с традиционными системами биологической очистки. Все исследовавшиеся МБР-системы очистки городских сточных вод располагались в зонах повышенной экологической напряженности (пляжи, повторное использование воды для аквакультуры), так что любое ухудшение качества воды могло быть чревато кризисными ситуациями, влекущими за собой значительные финансовые взыскания. Что касается МБР-систем, используемых для очистки производственных сточных вод и обрабатывающих чрезвычайно загрязненные сбросы, то финансовые и экологические последствия любого отказа или сбоя системы также весьма чувствительны.

Для некоторых функциональных элементов каждой МБР-системы составлялась матрица анализа риска согласно частоте отказов и их воздействию (Таблица 2). Возникновение отказов и их серьезность классифицируются от весьма маловероятных до повторяющихся и оцениваются в баллах от 1 до 10.

Таблица 2. Пример матрицы анализа риска для оценки эксплуатационной надежности МБР-станции очистки городских сточных вод (3 года эксплуатации)

Возникновение	Очень маловероятно	Маловероятно	Редко	Вероятно	Часто
Очень высокая (катастрофическая)	–	–	–	–	–
Критическая	–	Сбой удаления жира и масла	Повреждение мембраны или сильное загрязнение	Загрязнение сетчатого фильтра 3 мм	–
Значительная	Сбой ПЛК*	Сбой дозирования химреагентов (полимер, FeCl ₃)	Отказ рециркуляции	Отказ обдувки мембраны и аэрации	Загрязнение сетчатого фильтра 0,75 мм
Умеренная	Отказ системы SCADA и HMI**	Отказ впускного насоса	Отказ вспомогательного мембранного оборудования	Отказ воздуходувок и диффузоров аэрационных бассейнов	Отказ линии ПЛК (модемы и т.п.)
Незначительная	–	Отказ оборудования буферного резервуара	Отказ системы удаления запаха	Отказ системы обработки ила	–

* ПЛК – программируемый логический контроллер

** SCADA and HMI – система контроля и сбора данных и интерфейса "пользователь-машина"

При добавлении третьего фактора риска – обнаруживаемости отказа - можно рассчитать показатель приоритета риска (Risk Priority Number - RPN). В этом случае ранжирование типов отказа МБР-систем для очистки городских и производственных стоков принимает вид, представленный на Рис. 2. Во всех остальных случаях наибольшая величина показателя RPN отвечает загрязнению сетчатых фильтров с мелкими отверстиями и отказам систем ПЛК – сбой по этим причинам характеризуются высокой частотностью и относительно затрудненной обнаруживаемостью.

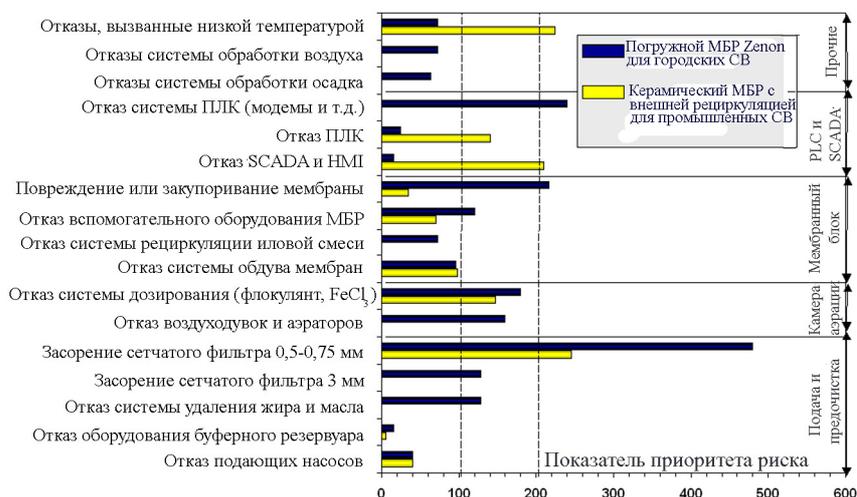


Рис. 2. Сравнение показателей приоритета риска для некоторых видов отказа двух систем МБР

Загрязнение мембраны сохраняет высокий показатель риска как для органических, так и для керамических мембран. Керамические мембраны легче очищаются (методом химической регенерации), что имеет большое значение при очистке таких высокозагрязненных производственных сточных вод, как продукты выщелачивания и фильтрации. По этой причине рассчитанные значения показателя приоритета риска для таких мембран более низкие.

Предочистка является критическим этапом в отношении эксплуатационной надежности и защиты от загрязнений для мембран обоих типов. Забивание сетчатых микросит оказалось важнейшим типом отказа во всех исследовавшихся МБР-системах. Основное последствие плохой предочистки заключается в скоплении волос и обрывков тряпья на волокнах мембраны (Рис. 3), что ускоряет ее загрязнение и повышает опасность повреждения мембраны и/или сокращает срок ее службы.



Рис. 1. Загрязнение погружных мембран из полых волокон в случае неудовлетворительной предочистки

Другим важным фактором, оказывающим значительное влияние на эксплуатационные характеристики мембран, являются условия аэрации активированного ила. Любое повреждение флоков активированного ила, сопровождающееся высвобождением коллоидов и растворимых микробиологических продуктов вследствие ферментации, резкого повышения солености или при шоковых токсичных нагрузках, приводит к ухудшению проницаемости мембраны и ее забиванию. В сравнении с традиционной технологией, основанной на применении активированного ила, ухудшение характеристик смешанных растворов оказывает менее значительное влияние на проницаемость и не ухудшает качество сбрасываемых жидких отходов. Этот факт является основной причиной, по которой МБР-системы считаются более эффективными и надежными. Тем не менее, следует указать, что срок службы и проницаемость мембран могут при этом уменьшаться, понижая, таким образом, глобальные технико-экономические показатели.

Воздействие МБР-систем на окружающую среду

На входе очистной станции производилось количественное определение всего лишь 21 соединения, концентрация которых составляла от 27 мг/д до 10 нг/л. Эффективность удаления из водной фазы была весьма высока (> 90%), и для таких сильно адсорбируемых соединений, как ДЕНР или пентабромодифенилэфир она оказалась сравнимой с аналогичным показателем для систем с активированным илом. Однако, по большей части эти соединения переходят в ил, снижая, тем самым, глобальную эффективность очистки. С другой стороны, первые результаты показывают, что для некоторых медленно разрушающихся соединений, таких, например, как сульфометоксазол, триклозан или нафталин, наблюдается возрастание эффективности удаления. МБР-системы обеспечивают улучшение очистки от органических микрозагрязнений в сравнении с обычным методом очистки сточных вод в аэротенке.

МБР-системы оказывают значительно меньшее микробиологическое воздействие на окружающую среду по сравнению с речной водой, и их стоки, в отличие от стоков систем очистки сточных вод в аэротенке, могут считаться полностью обеззараженными (в них не был обнаружен ни один из 11 патогенных микроорганизмов). Тем не менее, мониторинг, проводившийся на линии пермеата очистной станции, выявил присутствие небольших колоний бактерий *E.coli*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Legionella* spp., возникших вследствие разрастания биопленки. Это микробиологическое загрязнение легко устраняется путем обратной промывки трубопровода с добавлением хлора.

Заключение

На основе данных анализа характера отказов и их влияния на качество воды и технические характеристики мембранного биореактора предложено взвешенное ранжирование их воздействия на окружающую среду в сравнении с традиционными системами с активированным илом. Каждому критерию присваивался определенный балл от 1 (неблагоприятный) до 10 (наиболее благоприятный). Присвоенные баллы умножались на определенный весовой коэффициент с тем, чтобы подчеркнуть влияние наиболее важных критериев. Более строгие требования недавно введенных стандартов на сточную воду повышают важность соответствия новым требованиям для снижения риска отказов в техпроцессе. По этой причине весовые коэффициенты для качества воды и эксплуатационной надежности становятся более важными в сравнении с этими показателями для энергопотребления и капитальных и эксплуатационных расходов.

Как можно видеть из таблицы 3, МБР-системы становятся более конкурентоспособными, чем традиционные системы с активированным илом в тех случаях, когда выдвигаются жесткие требования, направленные на улучшение защиты здоровья и окружающей среды, в отношении таких показателей, как эксплуатационная надежность, обеззараживание и/или удаление возникающих загрязнений, а также при необходимости дезодорации (укрытие очистного

сооружения для вытяжки воздуха и его очистки). Несмотря на ограниченный срок службы мембран и относительно высокие эксплуатационные расходы (обусловленные, в основном, заменой мембран), мембранные биореакторы становятся вполне жизнеспособной альтернативой традиционным технологиям очистки воды.

Таблица 3. Ранжирование технико-экономических показателей мембранных биореакторов и традиционных систем с активированным илом

Параметр	Весовой коэффициент	МБР	Активный ил
Эксплуатационная надежность	25%	10	5
Срок службы оборудования	10%	5	10
Легкость укрытия для дезодорации	5%	10	2
Степень обеззараживания и удаления возникающих загрязнений	15%	9	3
Капитальные затраты	20%	9	10
Эксплуатационные расходы	25%	6	8
Балл без учета весового коэффициента ⁽¹⁾	-	49	38
Балл с учетом весового коэффициента ⁽²⁾	-	8.15	6.8
Ранжирование	-	1	2

⁽¹⁾Максимальное количество баллов 60; ⁽²⁾Максимальное количество баллов 10

Литература

- Joss, A., Siegrist, H., Ternes, T.A. (2008). Are we about to upgrade wastewater treatment for removing organic micropollutants? *Wat. Sci. Tech.* **57**(2), 251-255.
- Lazarova V., Bonroy J.L. and Richard J.L. (2008) Reliability of operation and failure management of membrane wastewater treatment. *Wat. Practice. Tech.* **3**(2), 8p.
- Snyder S., Adham S., Redding A.M., Cannon F.S., DeCarolis J., Oppenheimer J., Wert E. and Yoon Y. (2006) Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals. *Desalination*, **202**, 156-181.
- U.S. Geological Survey (2002). National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data. TWRI BOOK 9. 180 p.
- Zuehlke S., Duennbier U., Lesjean B., Gnirss R. and Buisson H. (2006) Long-term comparison of trace organics removal performances between conventional and membrane activated sludge, *Water Env. Research*, **78**(13), 2480-2486.