

МОДУЛЬНЫЕ МЕМБРАННЫЕ БИОРЕАКТОРЫ

С. В. Степанов¹, А. С. Степанов², Ю. Е. Сташок³, Л. А. Блинкова⁴

¹ *Степанов Сергей Валериевич, кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, Самарский государственный архитектурно-строительный университет*

443001, Россия, г. Самара, Молодогвардейская ул., 194, тел.: (846) 242-37-63, e-mail: stepanovsv@ecos-samara.ru

² *Степанов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, директор ГК «ЭКОЛОС»*

443036, Россия, г. Самара, Набережная р. Самары, 1, тел.: (846) 99-345-99, e-mail: alstepanov@ecolos.ru

³ *Сташок Юрий Евгеньевич, аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Самарский государственный архитектурно-строительный университет, Тел.: (846) 973-58-88, e-mail: stashok@membrane.pro*

⁴ *Блинкова Людмила Андреевна, магистрант кафедры водоснабжения и водоотведения, Самарский государственный архитектурно-строительный университет, Тел.: (846) 973-58-88, e-mail: blinkova@membrane.pro*

Показаны преимущества мембранных биореакторов перед традиционными сооружениями биологической очистки и перспективные области применения МБР. Приведены основные принципы расчета. Рассмотрены конструкция и особенности устройства мембранных биореакторов малой производительности с погружными полуволоконными мембранами.

Ключевые слова: Биологическая очистка, мембрана, мембранный биореактор, сточные воды

The advantages of membrane bioreactors over conventional biological treatment as well as perspective spheres of MBR using are shown. The basic calculation methods are displayed. The construction and features of small capacity membrane bioreactors with submersible hollow fiber membranes are considered.

Keywords: biological treatment, membrane, membrane bioreactor, wastewater

Традиционные биологические очистные сооружения имеют ряд недостатков. К ним относятся большие объемы аэротенков и вторичных отстойников, а также недостаточная степень очистки, которая в большинстве случаев не удовлетворяет нормативам допустимого сброса загрязняющих веществ в рыбохозяйственные водные объекты, требуя использования сооружений доочистки. Необходимое качество очищенных сточных вод может быть достигнуто применением биомембранных установок, сочетающих процессы биохимического окисления и мембранной фильтрации. Гибридные биомембранные технологии позволяют максимально использовать преимущества биологических и мембранных процессов, исключив при этом их недостатки.

Мембранный биореактор (МБР) представляет собой аэротенк с погружным или вынесенным мембранным блоком. В биореактор поступает сточная вода, предварительно прошедшая механическую очистку. Процесс разделения очищенной воды и активного ила осуществляется с использованием микро- и ультрафильтрационных мембран, через которые фильтруется иловая смесь. Пермеат отводится на окончательное обеззараживание, активный ил возвращается в аэротенк. Внедрение мембранной технологии позволяет увеличить дозу ила в аэротенках в два - три раза, что дает возможность повысить окислительную мощность биореактора и отказаться от вторичных отстойников и фильтров доочистки. В результате может быть увеличена производительность или сокращена площадь застройки.

Известно, что для классических сооружений «аэротенк – вторичный отстойник» колебания нагрузки на ил являются основной причиной нарушения процессов очистки (особенно нитри- и денитрификации). Мембранные биореакторы устойчивы к изменениям концентрации органических соединений, взвешенных веществ, соединений азота, а также трудноокисляемых веществ промышленного происхождения, что объясняется возможностью работы с высокими дозами активного ила. Кроме того, в МБР при резком увеличении нагрузки по органическим загрязнениям и взвешенным веществам повышенный прирост биомассы не влечет за собой необходимости увеличения выгрузки избыточного активного ила. Следовательно, в мембранном биореакторе отсутствует вымывание из системы нитрифицирующих микроорганизмов, поэтому в отличие от традиционных технологий, нарушения процесса нитрификации не происходит [1].

Наиболее значительным барьером на пути повсеместного применения МБР остается цена. Отрицательно сказывается также отставание нормативной базы, трудности мировой экономики и сложившийся рынок установок биологической очистки. Первое коммерческое применение мембранного биореактора осуществила компания Dorr-Oliver

Inc. в конце 1960-х для очистки сточных вод на борту судна. Экспоненциальный рост количества и производительности промышленных МБР начался с середины 1990-х. Стимулируют использование биомембранных технологий строгое природоохранное законодательство, рост стоимости услуг водоотведения, необходимость очистки производственных сточных вод, международный стандарт по созданию экологического менеджмента ISO 14001, наличие устаревших очистных сооружений, обеспокоенность общественности экологическими проблемами и интерес инженерного сообщества [2].

По данным анализа рынка оборудования биомембранных технологий [3] 97–99% существующих МБР используют погружные мембранные элементы и модули. Наибольшее распространение получили полуволоконные и плоские мембраны. Модули из полуволоконных мембран имеют большую удельную поверхность ($300\text{--}600 \text{ м}^2/\text{м}^3$) по сравнению с плоскими ($50\text{--}150 \text{ м}^2/\text{м}^3$). При этом удельные проницаемости, определенные при температуре $-20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$, у полуволоконных мембран из ПВДФ несколько меньше, чем у плоских мембран из аналогичного материала (обычно 10–30 против 15–30 л/м²·ч). Полуволоконные мембраны характеризуются более низкой стоимостью, меньшей склонностью к загрязнению и устойчивостью к обратным промывкам. Плоские мембраны обладают большей механической прочностью, их проще заменить.

Анализ референций ведущих производителей мембран и поставщиков оборудования [3] позволил определить, что 53% всех действующих МБР имеют производительность менее $100 \text{ м}^3/\text{сут}$. Еще 40% установок находятся в диапазоне от 100 до $2000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Поэтому подавляющее количество МБР может быть изготовлено в виде контейнерных и модульных установок полной заводской готовности.

Расчет мембранного биореактора проводится по тем же зависимостям, что и аэротенков. В основу положена концепция лимитирующего загрязнения, которое требует наибольшей продолжительности пребывания сточных вод в контакте с активным илом [4]. Продолжительность окисления i -го загрязнения определяется по формуле:

$$t_i = (C_{en\ i} - C_{ex\ i}) / a_i (1-s) \rho_i, \quad (1)$$

где $C_{en\ i}$ и $C_{ex\ i}$ – концентрации i -го загрязнения на входе и на выходе из очистных сооружений, мг/л; a_i – концентрация активного ила, г/л; s – зольность; ρ_i – удельная скорость окисления i -го загрязнения, мг/(г·ч).

Расчетную концентрацию активного ила в биореакторе целесообразно принимать 6–8 г/л. Верхний предел является оптимальным значением для хозяйственно-бытовых и близких к ним по составу промышленных сточных вод. Увеличение концентрации активного ила в МБР свыше 10 – 12 г/л приводит к ухудшению гидродинамической

обстановки в реакторе, росту трансмембранного давления, снижению массообменных характеристик, затруднению доступа кислорода к активному илу, наблюдаются процессы самоокисления ила, которые сопровождаются ухудшением качества очищенной воды [5].

Объем аноксидной зоны определяется аналогично по продолжительности денитрификации. После определения суммарного объема иловой смеси в сооружении осуществляется проверка нагрузки на беззольное вещество биомассы, которая не должна превышать 150 мг/(г·сут) по БПК_{полн} [6].

Наиболее сложной частью расчета является определение удельных скоростей окисления загрязнений. Они должны определяться с использованием кинетических кривых в зависимости от заданного качества очищенной воды. Кинетические параметры могут быть рассчитаны по данным эксплуатации существующих сооружений, найдены в процессе пилотных испытаний или приняты по литературным данным для аналогичных объектов [4, 7].

Требуемая площадь мембран рассчитывается на основании данных производителя с учетом средних, максимальных и пиковых расходов сточных вод. Как правило, поддерживается постоянная проницаемость мембран за счет частотного привода пермеатного насоса, имеющего запас по расходу и напору. По мере роста трансмембранного давления частота питающего тока возрастает. В случае необходимости отбор пермеата может быть увеличен, однако работа с максимальной удельной проницаемостью более 24 часов подряд не рекомендуется во избежание сложностей с последующей химической промывкой мембран.

Циркуляция активного ила в МБР обычно выполняет две функции: поддержания массообмена в системе и подачи нитратов в аноксидную зону. Кратность нитратного рецикла может быть определена по формуле [8]:

$$R_{DN} = \frac{t_{DN} \rho_{DN} a_i - (N - NO_3)_{en}}{(N - NO_3)_{ex}}, \quad (2)$$

где t_{DN} - продолжительность пребывания в зоне денитрификации, час; ρ_{DN} - удельная скорость денитрификации, мг/(г·ч); $(N - NO_3)_{en}$ и $(N - NO_3)_{ex}$ концентрация азота нитратов на входе и на выходе из очистных сооружений, мг/л.

Если кратность по формуле (2) получается менее трех, для дальнейших расчетов принимается трехкратная циркуляция.

С учетом проведенного выше анализа, компанией «ЭКОЛОС» используется конфигурация МБР с погружными полуволоконными мембранами. Технология очистки может быть проиллюстрирована принципиальной схемой (рис. 1).

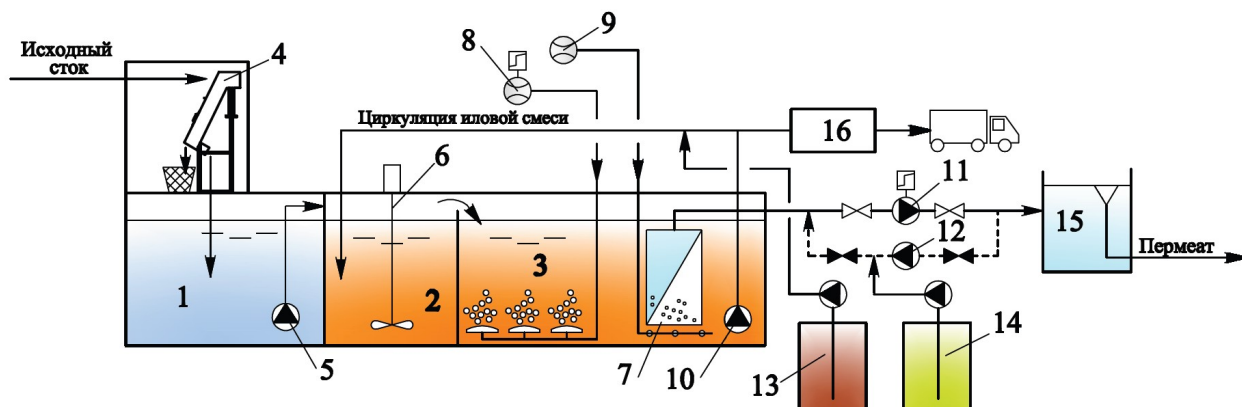


Рис. 1. Принципиальная схема модульной установки МБР

1 – усреднитель; 2 – денитрификатор; 3 – нитрификатор; 4 – сито; 5 – подающий насос; 6 – мешалка; 7 – мембранная кассета; 8 – воздуходувка биореактора; 9 – воздуходувка мембранного блока; 10 – насос рециркуляции иловой смеси; 11 – пермеатный насос; 12 – насос обратной промывки; 13 – система дозирования хлорного железа; 14 – система дозирования лимонной кислоты/гипохлорита натрия; 15 – бак обратной промывки; 16 – установка обезвоживания осадка.

Принятые технические решения обусловлены небольшой производительностью (до $2000 \text{ м}^3/\text{сут}$), модульной конструкцией и необходимостью снижения стоимости установок. Для механической очистки сточных вод используется сито с прозорами 2 мм, что необходимо для защиты половолоконных мембран от волокнистых включений, содержащихся в сточных водах. Блок биологической очистки состоит из одной (при производительности менее $100 \text{ м}^3/\text{сут}$) или нескольких параллельных линий. Мембранные кассеты установлены непосредственно в аэробной зоне, что принято для упрощения конструкции установки. В поток циркулирующего активного ила насосом-дозатором подается раствор хлорного железа для реагентного удаления фосфора.

Наряду с аэрацией мембран, для предупреждения образовавшихся на них отложений, используется обратная промывка пермеатом, которая чередуется с режимом «релаксации» – прекращением отбора пермеата без включения насоса обратной промывки. Режим релаксации позволяет увеличить периоды между обратными промывками и снизить энергозатраты.

В состав установки входит оборудование для химических промывок мембран. Различают профилактические и восстановительные промывки. Профилактическая промывка проводится непосредственно в реакторе без удаления активного ила, имеет более короткую продолжительность, требует меньшей концентрации химикатов и выполняется не чаще одного – двух раз в месяц. Целью профилактической промывки является поддержание проницаемости мембран и увеличение периодов между восстановительными промывками. Восстановительная промывка проводится один – два раза в год в течение 8-12 часов в отдельном резервуаре, куда необходимо перенести

мембранные модули. Целью восстановительной промывки является восстановление проницаемости мембран при достижении предельного трансмембранного давления. Реальная периодичность промывок зависит от качества сточных вод, фактической удельной проницаемости мембран и других условий эксплуатации. Описанные выше системы обеспечивают расчетную проницаемость и срок службы мембран, установленный производителем (от 3-5 до 10 лет).

Автоматизированная система управления технологическим процессом с помощью частотно регулируемых приводов обеспечивает оптимальную концентрацию растворенного кислорода в аэробной зоне и установленную производительность пермеатных насосов. Также в автоматическом режиме чередуются режимы релаксации и обратной промывки мембран, удаляется воздух из пермеатного тракта, поддерживаются заданные уровни иловой смеси в реакторе. Ввод граничных параметров этих процессов осуществляется с сенсорного дисплея. Опционально возможен удаленный доступ к управлению через интернет. Перечень МБР, изготовленных ГК «ЭКОЛОС», представлен в таблице.

Наименование объекта	Расположение	Производительность, м ³ /сут	Год выпуска
«Торговый Порт Посьет», очистные сооружения хозяйственно-бытовых сточных вод	Приморский край	40	2011
Очистные сооружения коттеджного поселка (первая очередь)	Ленинградская область	125	2012
Очистные сооружения коттеджного поселка (первая очередь)	Московская область	200	2013
Очистные сооружения санатория	Чеченская республика	200	2013

На рис. 2-6 приведены фотографии МБР полной заводской готовности производства ГК «ЭКОЛОС» на разных этапах изготовления.



Рис. 2. Изготовление МБР производительностью 200 м³/сут для поселка в Московской области на заводе ГК «ЭКОЛОС»



Рис. 3. Вид внутри технологического павильона МБР-200 для поселка в Московской области в процессе заводского изготовления



Рис. 4. Монтаж технологического павильона с баком обратной промывки установки МБР-125 на площадке в Ленинградской области



Рис. 5. Монтаж емкостного блока МБР-200 на площадке в Московской области



Рис. 6. Мембранный блок с погружными полуволоконными модулями установки производительностью 200 м³/сут в Московской области перед пуском в работу

Выводы

1. Мембранный биореактор позволяет заменить традиционные сооружения биологической очистки и доочистки. Преимущества МБР перед классической технологией проявляются в наибольшей степени при наличии в сточных водах трудноокисляемых загрязнений, высоких требованиях к качеству очищенной воды и отсутствии свободных площадей.

2. В основу расчета МБР, аналогично традиционным сооружениям биологической очистки, может быть положена концепция лимитирующего загрязнения, требующего наибольшей продолжительности контакта сточных вод с активным илом.
3. Мембранные биореакторы производительностью до 2000 м³/сут, занимающие наибольшую долю рынка установок биологической очистки, предпочтительно изготавливать в виде модульных установок полной заводской готовности.

Литература

1. Степанов С. В., Стрелков А. К., Сташок Ю. Е., Баумгартен С., Шерень Й., Харьковина О. В. Очистка сточных вод Сызранского НПЗ в мембранном биореакторе // Водоснабжение и сан. техника. 2012. № 3.
2. Judd S., Judd C. The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment. – Amsterdam: Elsevier. 2007.
3. Видякин М., Поляков А. Краткий анализ рынка оборудования технологии МБР // Вода Magazine. 2009. № 6.
4. Морозова К. М. Принципы расчета систем биологической очистки сточных вод // Водоснабжение и сан. техника. 2009. № 1.
5. Киристаев А.В. Очистка сточных вод в мембранном биореакторе. Дис. ... канд. техн. наук. Москва. 2008.
6. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы. М.: Мир, 2004.
7. Степанов С. В., Швецов В. Н., Морозова К. М., Беляков А. В., Блинкова Л. А. Исследование технологии нитри-денитрификации для очистки нефтесодержащих сточных вод // Водоснабжение и сан. техника. 2013. № 5.
8. Швецов В. Н., Морозова К. М. Расчет сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов // Сборник докладов научно-техн. конф. к 100-летию журнала ВСТ. - М. 2013.