



Основа управляемых процессов при биологической очистке

Современные пневматические мембранные аэраторы

Первые образцы пневматических аэраторов (рубеж 19-го века) были попросту дырчатыми трубами. На первом этапе освоения пневматической аэрации исследователи встретились с проблемой повышения степени использования кислорода при подаче в аэротенки сжатого воздуха. В нашей стране первые теоретические обобщения и расчетные зависимости были получены С.Н. Строгановым, К.Н. Корольковым и Н.А. Базякиной.

Суть пневматической системы аэрации предполагает распределение воздуха или кислородсодержащего газа под давлением по магистральным и воздухораспределительным трубопроводам к аэраторам-диспергаторам, установленным под слоем воды в аэротенках. Аэраторы классифицируются по давлению: до 10 кПа - низкого, от 10 до 50 кПа - среднего, более 50 кПа - высокого давления. По размеру образующихся на выходе из аэраторов пузырьков их разделяют на мелкопузырчатые (1-4 мм), среднепузырчатые (5-10 мм) и крупнопузырчатые (более 10 мм). Это обеспечивает эффективность Аэрации (ОТР) в пределах 2,2 - 3,5 кг/(кВт.ч) - для мелко- и среднепузырчатых аэраторов и 1,6 - 2,6 кг/(кВт.ч) для крупнопузырчатых при использовании воздухоподводящего оборудования с КПД порядка 70%.

Повышенная эффективность аэрации более свойственна современной тенденции энергосбережения. В соответствии с поэтапным развитием пневматических мелкопузырчатых аэраторов наблюдается следующая линейка: фильтросные элементы (трубы и пластины), керамические композиции, пористые пластмассы, полимерные синтетические материалы (в основном трубы, реже пластины), тканевые, мембранные диспергаторы (в основном из полимерных материалов).

С конца 19 века в охране водоемов от загрязнения важная роль принадлежит очистке сточных вод в искусственно созданных условиях. В первую очередь это относится к биологическим процессам очистки, где основная роль традиционно отводится процессам аэрации. На долю этих энергоемких процессов приходятся значительные эксплуатационные затраты (до 80%). Аэрационные системы, при их кажущейся простоте, продолжают оставаться сложным, недостаточно надежным и изученным оборудованием, принимая во внимание вопросы их технологического и автоматического регулирования.

Фильтросные элементы имеют сопротивление: новые - 5-7 кПа, старые - 15-20 кПа. Возрастание сопротивления, вызванное коагуляцией, проблемы с монтажом и однородным воздухораспределением следует отнести к недостаткам таковых систем.

Примером качественно выполненных отечественным керамических аэраторов являются диспергаторы ЗАО «Бакор» (плиты и трубчатые) с пористостью 36-45% и размером производимого пузырька 0,5-3,0 мм.

Широкое применение в РФ получили пористые полимерные трубчатые аэраторы «Экополимер», «Эко-тон», «Этек», «Креал», «Уралставан-инжиниринг», которые обладают как некоторым сходством, так и конструктивным различием. Трубчатые аэраторы выполняются из опорного каркаса (с отверстиями и каналами, выполненными из ребер и углублений) и диспергирующего покрытия (навивка сплавленного пористо-волокнистого слоя или фиксация пористого ПВД). Иногда используется материал стеклопластик.

Подобные аэраторы несомненно имеют достоинства, выраженные в высоких массообменных и пониженных гидравлических характеристиках: эффективность (или степень) использования кислорода воздуха (SOTE) до 33-36% (новые аэраторы, приводятся для глубины 6 м), эффектив-

ность аэрации 3,0-4,5 кг/(кВт.ч), и снижение сопротивлений в аэраторах до 0,7-2,5 кПа.

Появление в конце 80-х годов мембранных мелкопузырчатых аэраторов позволило значительно увеличить управляемость процесса и снизить засорение аэрационных систем. В настоящее время мелкопузырчатые аэраторы с использованием мембран являются основным оборудованием для систем аэрации, особенно на современных сооружениях с применением процессов удаления азота и фосфора, а также автоматизированным регулированием подачи воздуха.

Необходимость автоматизированного регулирования подачи воздуха в аэротенки диктуется не только развитием технических возможностей и современностью. Основные цели - энергосбережение и стабильная качественная очистка. Это достигается развитием способов технологического управления. Технологическое управление необходимо ввиду повсеместной исходной суточной и сезонной неравномерности по расходам и концентрациям исходного стока. Основное требование к аэраторам - они должны соответствовать возможности технологического управления. А именно, воспринимать колебания нагрузок по воздуху в достаточно широких диапазонах, зависящих от степени исходной неравномерности. Этим качеством из пневматических обладают только мембранные аэраторы, поскольку полимерные трубчатые аэраторы при технологическом управлении коагулируются.

Классическими материалами для производства мембран являются следующие полимеры, табл. 1:

- EPDM - этилен пропилен диен мономер,
- полиуретан - в основном полиэфир, реже полиэстер,
- силикон - существенно отличен от других полимеров тем, что химические связи углерод-углерод заме-

¹ OTR - Oxygen Transfer Rate, Эффективность Аэрации в реальных условиях, кг/(кВт.ч).

² SOTE - Standard Oxygen Transfer Efficiency, %, Эффективность Использования Кислорода в Стандартных условиях. Данная величина предложена для сравнения эффективностей различных аэрационных систем в аналогичных условиях. Практическая польза заключается в возможности подбора требуемого аэрационного оборудования. Результаты практического опыта по растворению в чистой воде кислорода воздуха (КРК) приводятся к начальным стандартным условиям (КРК = 0 мг/л, T = 20°C, атмосферному давлению 101,3 кПа). Динамика насыщения КРК во времени выражается величиной Окислительной Способности аэраторов (SOR), кгO₂/ч и величиной объемного коэффициента массопередачи (KLa), ч⁻¹. SOR - Standard Oxygen Requirement - Окислительная Способность аэраторов в стандартных условиях. Процентное отношение количества растворенного кислорода (SOR) к общему количеству кислорода, поданного с воздухом, кг O₂/ч, - есть SOTE, %, определяемое для различных глубин погружения аэраторов.



щены связями углерод-кремний-кислород (полиорганосилоксан).

Из таблицы 1 понятно, что EPDM является материалом достаточно широкого спектра действия для городских, иногда промышленных сточных вод (в отсутствие масел и жиров). Когда состав сточных вод содержит стоки НПЗ, ЦБК, пищевой промышленности, целесообразно использовать полиуретановую или силиконовую основу мембран. Силиконовые мембраны отличаются высокой стойкостью к концентрированным компонентам, хотя довольно часто используются для очистки городских сточных вод.

Представленные полимеры в классическом выражении довольно редко используются фирмами производителями без химических добавок пластификаторов и эластомеров. Например, в структуру EPDM иногда внедряются парафиновые масла в качестве пластификаторов, которые не образуют жестких внутренних химических связей между звеньями в общей структуре полимера. Поскольку парафины биоразлагаемы, они могут диффундировать из структуры материала, способствуя развитию хрупкости, потере эластичности и росту сопротивлений. Некоторые фирмы-производители намеренно отказываются от широкого использования пластификаторов и эластомеров, предполагая возникновение отрицательных эффектов.

Однако, по сведениям фирмы SSI (США), антиадгезионные покрытия PTFE (политетрафлюорэтилен, фторэластомер) способствуют защите материала EPDM от воздействия разрушающих элементов. Этот эластомер продлевает исходную эффективность использования кислорода SOTE во времени и создает устойчивость к нарастанию сопротивления в системе. Сведения радуют, но, вместе с тем, требуют проверки.

Современное развитие полимерных материалов ориентировано также на использование смесей элементов, например силикона и EPDM, что способствует эластичности комплексного материала и его химической стойкости к маслам и углеводородам.

В международной практике при выборе аэратора обычно учитывают его массообменные характеристики SOTE, площадь, обслуживаемую одним аэратором, которая зависит от площади мембраны и формы аэратора, удобство монтажа, цену, затраты по замене, обслуживанию и прочее. Количество подаваемого в аэрационную систему воздуха пропорционально степени использования кислорода воздуха SOTE для выбранного типа аэраторов.

Данные о современных мембранных аэраторах представлены в табл. 2.

■ **Таблица 1.** Свойства полимерных материалов для производства мембран

Полимеры	Стойкость по отношению к элементам	Разрушают следующие элементы
EPDM	тепло, кислород, озон	растворители, ароматические углеводороды, минеральные масла, животные и растительные жиры и масла
Полиуретан	масла, растворители, высокоабразивная стойкость	кислоты, кетоны, полиэферы
Силикон	тепло, кислород, озон, ароматические углеводороды, животные и растительные жиры и масла, промышленные сточные воды	растворители, кислоты

■ **Рис. 1.** Монтаж системы биологического удаления биогенных элементов на Люберецкой станции аэрации с использованием аэраторов Sanitaire, 1998 г.



■ **Рис. 2.** Сдвоенный мембранный дисковый аэратор фирмы Siemens Water Technologies (Германия) - слева. Мембранный диффузор фирмы ABS Nopon (Финляндия) для контактного процесса SBR с периодической аэрацией





■ **Таблица 2.** Сравнительная характеристика современных импортных мембранных аэраторов - диспергаторов

Фирма изготовитель	SOTE*, %	Материалы мембран	Наличие системы промывки	Типы аэраторов	Экономически оправданный лет срок*, слобы*	Системы креплений Обычно применяемый материал распределительной системы (РС)
U&D Китай	38 - 45	EPDM с добавками, Силиконовые композиции.	Химическая один раз в 12 - 24 месяца	Трубчатые, Дисковые до 350 мм, Борд 660 - 160 мм, Пластинчатые с алюминиевым корпусом до 200 *2000	EPDM 5 - 6 Силикон До 8	Различные варианты (защелкивающие замки, резьбовые, софт-коннекторы). Замкнутая РС из ПВХ проектируется и поставляется совместно
REHAU Германия	38 - 45	Силиконовые композиции	Химическая один раз в 12 - 24 месяца. Для силиконовых мембран возможно реже	Диски до 300 мм, Трубчатые до 2 м (по обе стороны РС)	EPDM 6 Силикон не менее 8	Различные варианты (защелкивающиеся замки? резьбовые, софт-коннекторы) РС из ПВХ
Bioworks Германия	48 - 52	Силиконовая композиция	Воздушная до 1 раза в месяц, возможна химическая	Трубчатые модули	До 8	РС на гибких элементах к плавающему фидеру из ПВХ
Aqua Consult Австрия	42 - 48	Полиуретановая композиция	Воздушная	Пластинчатые (борд) с нержавеющей основой до 4000 мм длиной	Не менее 8	Сочетание ПВХ и нержавеющей стали. Быстрорборная конструкция РС
Sanitaire США	42 - 48	Полиуретановая композиция	Химическая, по периодичности нет данных.	Пластинчатые до 2286 мм длиной	Не менее 8	Защелкивающиеся замки с системой из ПВХ
SSI США	42 - 45 40 - 42	EPDM с добавками, Силиконовые композиции	Химическая, по периодичности нет данных	Диски диаметром 270 и 350 мм	EPDM 5 - 6 Силикон До 8	Защелкивающиеся замки, софт-коннекторы с системой из ПВХ
NORON Финляндия	36 - 43 34 - 39	EPDM с добавками, пористый полиэтилен	Химическая, в зависимости от потери давления	Диски диаметром 215 - 300 мм	EPDM 5 - 6	Защелкивающийся замок с системой из ПВХ
Siemens Германия	36 - 41	EPDM с добавками	Химическая По потери давления	Сдвоенные диски по 210 мм	6	Круговой замок
Gummi-Jaeger Германия	36 - 46	EPDM с пониженным содержанием пластификаторов	Химическая по потере давления и периодическая воздушная	Диски 270 - 340 мм	Не менее 8	Софт-конектор с системой из ПВХ

Примечания:

* SOTE приводится для глубины 6 м в рабочем диапазоне 30 - 60% от производительности аэратора по воздуху.

** Экономически оправданный срок службы - означает, что в связи со старением мембран экономически целесообразно заменить мембраны или систему при падении ее эффективности на 20% (поскольку современные аэрационные системы позволяют сокращать расход воздуха на 30 - 40%, по сравнению с установленной системой аэрации - не столь современной).

Форма аэраторов-диспергаторов в любом случае достаточно практичная: диск, трубчатый модуль, пластина (или борд). Перфорация мембран выполняется обычно насечкой 1-2 мм при прессовании. Формование мембран происходит при использовании прессов и вакуумной технологии, что обеспечивает высокую воспроизводимость качества продукции. Повышенное давление прессования способствует повышенной плотности мембран, их эластичности и продлению срока службы.

В качестве конструктивной основы для установки мембран используются материалы: ПВХ, ПНД, алюминий, реже - нержавеющая сталь.

Одним из первых патентообладателей на диспергатор с использова-

нием мембран стала фирма Sanitaire (США). В таблице 2 приведена ее современная пластинчатая модификация серии «Gold». Еще в 1998 году авторы проводили генподрядные работы по инжинирингу, монтажу и наладке системы биологического удаления биогенных элементов на ЛбСА (рис. 1).

Многие фирмы-производители стремятся применять крупные аэраторы с большой площадью мембраны и длиной изделия или заранее собранные модули, к этим же конструкциям можно отнести сдвоенные диски, рис. 2, слева. Это позволяет сокращать затраты на воздухопроводящие системы, которые в случае дисковых аэраторов с малой площадью могут достигать до 50% стоимости системы аэрации в целом. Крепление

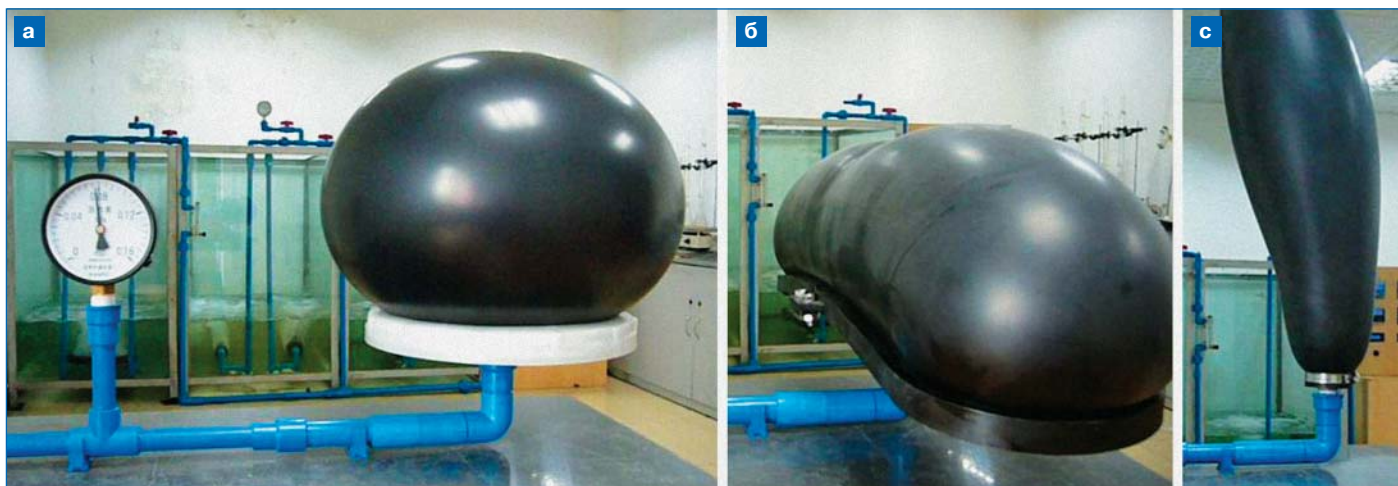
современных аэраторов позволяет максимально упростить монтаж.

На рис. 2, справа, представлен мембранный диффузор, разработанный специально для контактного процесса периодической аэрации (SBR[®]). Аэратор имеет горизонтальную поверхность поддерживающего слоя, что, по сведениям фирмы, способствует улучшению распределения воздуха и более плотному закрытию мембраны в момент прекращения подачи воздуха.

Таблица 2 свидетельствует о широкой по гамме и разнообразии продукции фирмы U&D (Китай), что в сочетании с высокой эффективностью делает их весьма привлекательными. Кроме стандартных лабораторных измерений массообменных характе-



■ **Рис. 3.** Тест для определения давления разрушения для мембранных аэраторов: а) дисковых, б) борд или пластинчатых, в) трубчатых



ристик мембранных аэраторов фирма реализовала необычный тест, названный нами в шутку «crash test». Через аэраторы пропускались расходы воздуха 20-кратно превышающие рабочие нагрузки. Эластичные и прочные аэраторы при этом раздувались, причем давление в системе измерялось непрерывно до момента их разрыва. Давление разрушения для аэраторов: дисковые, борд и трубчатые - 0,8; 0,45; 0,65 атм. соответственно (рис. 3).

Для комплектации средних и крупных аэротенков мембранными аэраторами предлагается вариант сооружений называемый «алюминиевый борд» (рис. 4). Данное решение экономит количество воздухоразводящих труб, сокращает сроки и стоимость монтажа. Алюминиевая основа, в отличие от полимерной не подвержена старению, изменению свойств материала и его размеров. Поэтому в процессе эксплуатации будет требоваться только замена собственно мембраны. Конструкция мембран выполняется таким образом, чтобы до минимума упростить ее замену. Последовательность замены весьма

проста: 1 - рулон ленты мембраны разрезается на проектные длины, 2 - отрезок мембраны вручную заводят в продольные пазы алюминиевого корпуса, 3 - по краям мембраны фиксируются упругими защелками. На рис. 4 справа модули выполнены подъемными для удобства эксплуатации.

Наибольшую эффективность имеют аэраторы Bioworks в среднем 50%. Это позволяет дополнительно экономить до 18% расхода воздуха в сравнении с другими производителями. Это объясняется увеличением массопереноса за счет движения аэратора относительно жидкости. Аэратор раскачивается в воде на гибкой системе креплений за счет динамики восходящих аэрационных потоков (рис. 5). Сравнение эффективности гибких (качающихся) аэраторов и жестко закрепленных представлено на рис. 6.

В случае аэрационной системы Bioworks аэрационный модуль разрабатывался совместно с системой промывки, что позволяет производить воздушную промывку достаточ-

но часто и практически постоянно поддерживать высокую эффективность системы. Все ведущие производители аэраторов рекомендуют применение систем промывки. Приведем пример Gummi-Jaeger (Германия) - рис. 7. Специалисты фирмы сообщают о снижении энергозатрат после воздушной и химической кислотной промывки, сопротивления снижаются в среднем на 65% (усреднено по рабочему диапазону). При этом мембраны полностью не восстанавливаются и их сопротивление повышается в среднем на 23%, по сравнению с первоначальным, табл. 3.

Сроки службы современных аэраторов из EPDM составляют 5-6 лет (для композиций с пониженным содержанием пластификаторов возможно 8 лет), а силиконовых и полиуретановых мембран - до 8 лет. Наибольшие сроки службы по старению мембран из силикона предлагает фирма REHAU, разработки которой направлены на увеличение стойкости мембран. Некоторые крупные стан-

■ **Рис. 4.** Варианты комплектации аэротенков мембранными пластинчатыми аэраторами «алюминиевый борд», материалы: силикон, EPDM



³ SBR - Sequencing batch reactors, реакторы переменного действия (в России существует термин «контактный процесс»). В отличие от традиционных методов, при которых вода протекает через несколько емкостей различного назначения, в реакторах переменного действия все этапы очистки проходят последовательно в одной емкости - биореакторе. Этапы очистки с процессами аэрации при конструктивном размещении в едином реакторе разделены во временных интервалах: удаление органических загрязнений, нитрификация, денитрификация, иногда химическая дефосфатация, отстаивание. При этом сооружения могут иметь различную конфигурацию. Самым простым вариантом является комбинация из двух-трех биореакторов и предварительного накопительного резервуара, необходимого для приема стоков.



ции аэрации сообщают о снижении эффективности отечественных мембран более чем на 30% уже в первые 2-3 года эксплуатации, а также о практически полной потере эластичности мембранами бывшими в эксплуатации без промывки 3-5 лет.

Энергосбережение важно для практики, которую в полной мере отражает величина эффективности использования кислорода воздуха в реальных условиях (AOTE⁴ или OTE), который, будучи сопряжен с величиной AOR⁵, в 1,5-2,5 раза ниже SOTE, поскольку учитывает влияние следующих факторов:

- коэффициент качества воды [1], принятый в зарубежной практике как α -фактор. Выражается отношением: K_{La} (реальные условия) / K_{La} (стандартные условия) для новых аэраторов;

- β -фактор, выражающий соотношение между насыщением кислородом в реальных условиях к аналогу в стандартных условиях;

- Θ -фактор, отражающий влияние температуры иловой смеси на объемный коэффициент массопередачи K_{La} к аналогу в стандартных условиях;

- реальных данных: давления P , температуры T

- засорение аэраторов F^6 ;
- соотношение f_{az}/f_{at} [1], в зарубежной практике AT/AD^7 .

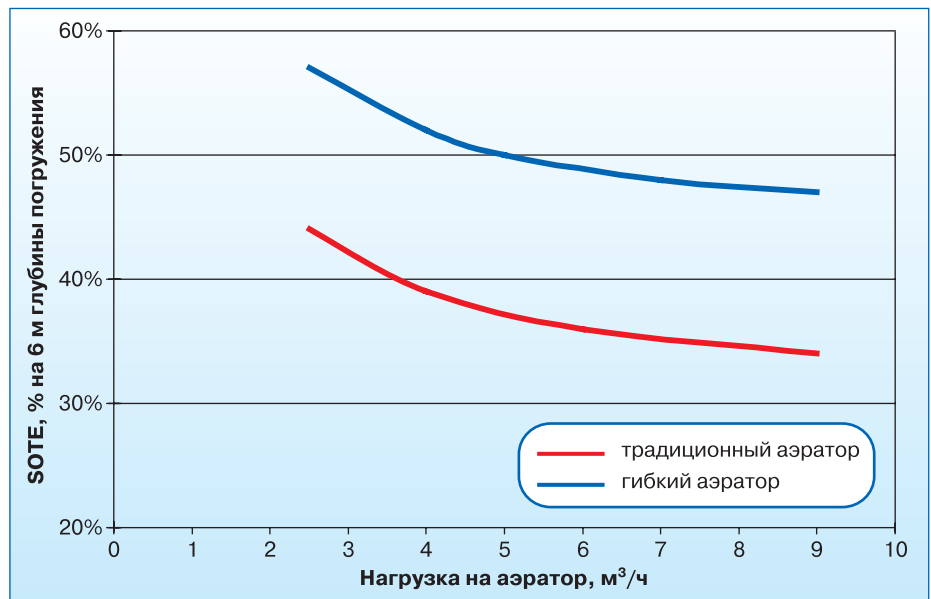
Последнее в отечественной практике, к сожалению, очень часто игнорируется, поскольку «улучшает» массообменные характеристики отечественных производителей аэрационного оборудования. Однако, прирост эффективности между крайними величинами $f_{az}/f_{at} = 0,05$ и $1,0$ составляет 72% [1]. Желательно, чтобы проектировщики в большей степени уделяли внимание принципам технологической раскладки аэрационных плетей, что существенно сэкономит регулярные энергозатраты при эксплуатации.

Заключительным элементом, вызывающим интерес и споры, является F -фактор. Он свидетельствует о необходимости воздушной и/или химической промывки-регенерации мембранных аэраторов, а также об их старении. Приведем некую косвенную характеристику этого фактора - изменение давления мембранными

■ **Рис. 5.** Монтаж аэраторов Bioworks снижает капитальные затраты за счет использования пленочных покрытий взамен железобетонных конструкций - слева. Раскачивающийся аэратор на гибкой системе креплений - справа



■ **Рис. 6.** Сравнение эффективности гибких (качающихся) аэраторов и жестко закрепленных традиционных аэраторов



аэраторами в процессе эксплуатации (рис. 8). Данные приводятся для классических материалов, описанных в табл. 1.

Увеличение сопротивления мембран приводит к увеличению потерь энергии, и в ряде случаев, к нарушению процессов аэрации в сооружениях. Но, из графиков видно, что не все мембраны увеличивают сопротивление.

В ходе старения мембраны из полиуретана теряют упругость, а мембраны из EPDM, наоборот, теряют эластичность. Для EPDM во всем диапазоне расходов воздуха наблюдается существенное увеличение по-

терь напора для бывших в работе аэраторов. А для полиуретана, наоборот, в диапазоне низких расходов наблюдается снижение потерь напора. Оба явления, наряду с показанными в экспериментах потерями прочности, доказывают наличие химического старения мембран и неблагоприятны для эксплуатации аэраторов. Потеря эластичности увеличивает затраты энергии и не позволяет порам раскрываться равномерно, а потеря упругости приводит к растягиванию пор, их неполному закрытию и усилению процессов коагуляции.

В конце концов, изменение свойств мембраны приводит к возникновению механических разрушений, в первую очередь в местах наличия отверстий, через которые проходит воздух. Увеличение размеров отверстий изменяет диаметр пузырьков и резко снижает эффективность аэрации.

Если аэрационные системы не подвергаются своевременной промывке и часть пор не работает в силу

⁴ AOTE - Actual Oxygen Transfer Efficiency, %, Эффективность Использования Кислорода в Реальных условиях. AOTE (или OTE) может быть определен расчетным путем, а также опытным практическим, например методом замера «концентрации и/или составаходящих газов».

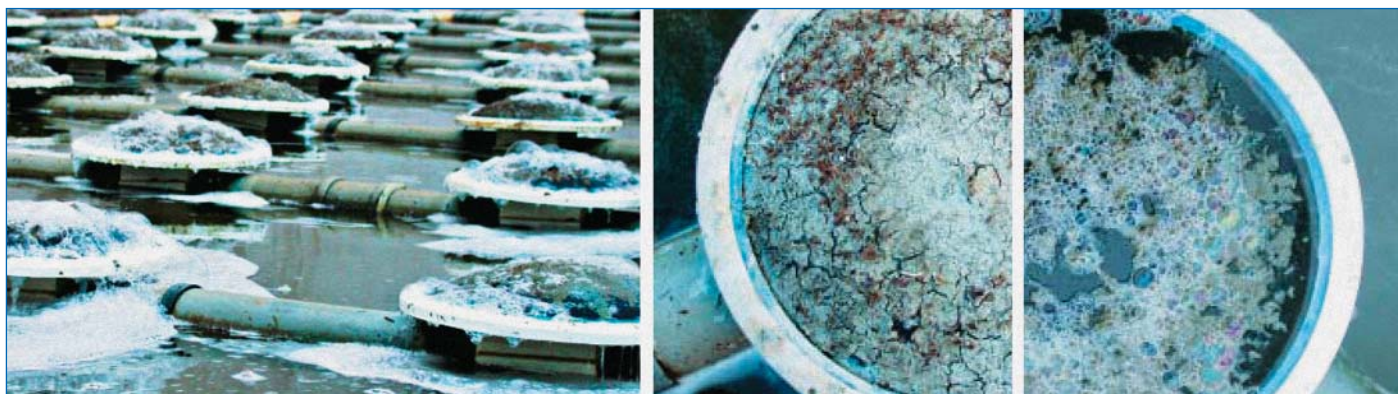
⁵ AOR - Actual Oxygen Requirement, кгO₂/ч, Окислительная Способность аэраторов в реальных условиях и из расчета подачи объема воздуха, выраженного в Нормальных физических единицах.

⁶ F - Fouling factor, коэффициент засорения аэраторов, соотношение: K_{La} (старые аэраторы) / K_{La} (новые аэраторы) за указанный срок эксплуатации.

⁷ AT/AD - соотношение площадей аэрируемой зоны и аэротенка.



Рис. 7. Система мембранной аэрации Gummi-Jaeger (Германия) во время воздушной и химической промывки - по краям. Пример кольматации мембраны до ее очистки - в центре



их обрастания и кольматации, то механическая нагрузка на оставшиеся поры увеличивается и процессы механического разрушения происходят быстрее, что в свою очередь дополнительно снижает срок эксплуатации аэраторов. Большинство крупных фирм-производителей аэраторов предлагают оборудование для осуществления химической промывки методом ведения газа или раствора кислот в распределительную систему аэраторов.

Выводы:

1) Основой управляемых процессов биологической очистки являются пневматические мембранные аэраторы, способные воспринимать колебания нагрузок по воздуху в достаточно широких диапазонах, соответствующих нагрузкам поступления исходных сточных вод.

2) Передовые производители мембран предлагают современные системы аэрации с эффективностью массопереноса в среднем диапазоне 42-43% для принятой глубины погружения 6 м. Технология изготовления мембран непрерывно изменяется путем совершенствования механических устройств прессования, вакуумирования и т.д. и химического состава мембран (добавок, пластификаторов, эластомеров и смесей классических полимеров).

3) Для увеличения срока службы мембран ведущие производители аэраторов рекомендуют применение воздушной и/или химической промывки 1 раз в 12-24 месяца. Это способствует энергосбережению, поскольку снижает сопротивление систем аэрации.

4) При падении эффективности мембранных аэраторов (в условиях регулярных промывок) на 20% в связи с их старением экономически целесообразно заменить мембраны или систему. Вводится понятие «экономически оправданный срок службы мембран». Он зависит от качества их изготовления и материалов. При этом он может составлять 5-6 лет или не менее 8 лет.

Рис. 8. Изменение сопротивлений стандартными классическими материалами в процессе эксплуатации в диапазоне рабочих нагрузок по воздуху [4]

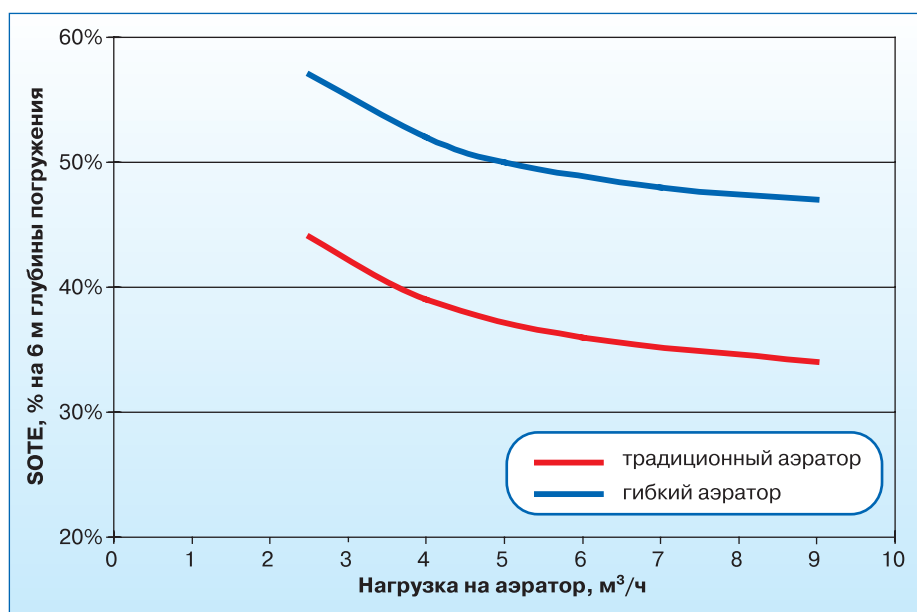


Таблица 3. Сравнение сопротивлений до и после воздушной и химической очистки - промывки, а также при использовании новых мембранных аэраторов Gummi-Jaeger

Состояние мембранных аэраторов	Сопротивления, кПа, при различной подаче воздуха на диффузор		
	2 м³/ч	6 м³/ч	10 м³/ч
Использованные, до очистки - промывки	5,0	8,4	10,2
Использованные, после очистки - промывки	3,0	4,7	6,5
Новые, не использованные	2,7	3,5	4,8

5) Для корректного сравнения и выбора аэраторов следует предусматривать в технических условиях по закупкам параметры и определения, общепринятые в международной практике. В статье приводятся отечественные термины и определения и соответствующие им зарубежные аналоги.

Виктор Баженов, доктор технических наук, исполнительный директор, Андрей Эпов, руководитель отдела проектирования, Марина Канунникова, инженер-проектировщик, ЗАО «Водоснабжение и водоотведение» (г. Москва)

Литература

1) СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения./ Госстрой России - М.: ГУП ЦПП, 1999.
 2) Design manual. Fine pore aeration systems./EPA/625/1-89/023, 1989.
 3) Информационные проспекты фирм: ЗАО «Бакор», ГК Экополимер, НПФ Экотон, НПФ «Этек», ЗАО «Креал» ЗАО «Уралставан-инжиниринг», U&D, REHAU, Bioworks, VODACO, Sanitaire, SSI, NOPON, Siemens, Gummi-Jaeger.
 4) Diego Rosso, Michael K. Stenstrom, Economic Implications of Fine-Pore Diffuser Aging./ Water Environment Research, vol. 78, № 8, p. 810 - 815.