

АЭРАЦИЯ И КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ В ПРОЦЕССАХ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОТЕНКАХ

ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящей работы – показать влияние подачи воздуха в аэротенки и ее режимов на процессы биологической очистки сточных вод.

Аэротенки относятся к группе очистных сооружений сточных вод в искусственных условиях. Биологические методы очистки сточных вод основываются на естественных процессах жизнедеятельности микроорганизмов, обладающих рядом особых свойств, из которых следует выделить три основных, широко используемых для целей очистки:

1. Способность потреблять в качестве источников питания самые разнообразные органические (и некоторые неорганические) соединения для получения энергии и обеспечения своего функционирования.
2. Свойство быстро размножаться.
3. Способность образовывать колонии и скопления, которые сравнительно легко можно отделить от очищенной воды после завершения процессов изъятия содержащихся в них загрязнений.

Микроорганизмы, используемые в аэротенках для очистки, присутствуют в виде активного ила. Для обеспечения его жизнедеятельности, а также для поддержания во взвешенном состоянии в аэротенки подается через систему аэрации сжатый воздух. В зависимости от размеров пузырьков воздуха, поступающих в иловую смесь, системы аэрации можно разделить на:

1. Крупнопузырчатую (крупность пузырька более 10 мм). Использование кислорода активным илом при этом составляет 6-7%.
2. Среднепузырчатую (крупность пузырька в пределах 5-10 мм). Использование кислорода составляет 8-12%.
3. Мелкопузырчатую (крупность пузырька 1-4 мм). Использование воздуха достигает 15-18%.

В силу низкой эффективности использования подаваемого воздуха, крупнопузырчатая аэрация не получила широкого распространения. Однако ее можно использовать в том случае, когда требуется обеспечить только перемешивание иловой смеси. Такая система представляет собой вертикально опущенные трубы ($d = 30...50$ мм) на глубину 0,5 м от дна аэротенка.

Конструкции среднепузырчатой аэрации более разнообразны. В первую очередь это – перфорированные горизонтально уложенные у дна аэротенка трубы. Отверстия перфорации имеют диаметр 3-4 мм. Опыт эксплуатации таких систем показал, что через короткий срок отверстия засоряются и подача воздуха уменьшается [1, с.277].

Однако наибольшее распространение получила мелкопузырчатая система аэрации. Вариантов ее использования очень много. На большинстве действующих очистных сооружений в Республике Беларусь до недавнего времени работала система аэрации, выполненная в виде фильтросных пластин. Ее размеры составляли, как правило, 300×300 мм, толщина – 35 мм. Изготавливалась фильтросная пластина из шамота, который связан смесью жидкого стекла с мелкой шамотной пылью, или из кварцевого песка и кокса, которые связаны бакелитовой смолой. Фильтросные пластины заделывались цементным раствором в железобетонные каналы, устраиваемые в днище аэротенка у стенки вдоль длинной его стороны. Пластины можно укладывать в два или три ряда – для обеспечения подачи в аэротенки

необходимого объема воздуха. Кроме этого, возможно устройство таких каналов как вдоль одной стороны коридора, так и с обеих сторон. В зависимости от этого, в коридоре образуются одно или два циркуляционных контура. При этом существенно изменяется гидродинамический режим движения иловой смеси. Основным недостатком фильтросных пластин [2] является их постепенное засорение, которое приводит к ухудшению распределения воздуха в обрабатываемой жидкости. В то же время высокая степень их распространения обусловлена хорошим диспергированием воздуха и сравнительно высокой эффективностью его использования. В настоящее время широкое распространение получили трубчатые системы аэрации. Трубчатый аэратор представляет собой перфорированную трубу, обтянутую волокнисто-пористой полиэтиленовой оболочкой. Вместо последней может быть использована труба из пористого полиэтилена. Такие аэраторы обладают достаточно высокой эффективностью использования воздуха, что приводит к существенному снижению эксплуатационных затрат на подачу воздуха. Трубчатые системы аэрации выполняются, как правило, рассредоточенными, что увеличивает площадь зоны аэрации. А влияние ширины аэрируемой зоны на расход подаваемого воздуха очевидно. Резкое уменьшение расхода воздуха достигается при увеличении ширины полосы аэрации с 10 до 50 %. В этом случае экономится более 25 % подаваемого воздуха. Дальнейшее увеличение ширины полосы аэрации не приводит к существенному снижению расхода воздуха.

ОСНОВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нами был выполнен расчет кислородного режима для трехкоридорного аэротенка ($B_{ат} = 4,5$ м, $H_{ат} = 3,2$ м, $L_{ат} = 50$ м). Для системы аэрации с фильтросными пластинами величина удельного расхода воздуха составила $6,4 \text{ м}^3 \text{ O}_2 / (\text{м}^3 \text{ сточных вод})$. Для системы аэрации из пористых труб, уложенных в три плети, эта же величина составила $4,0 \text{ м}^3 \text{ O}_2 / \text{м}^3$. Таким образом, экономия составляет ок. 38 %.

Некоторые авторы [3, 102] отмечают, что наибольшей эффективностью насыщения иловой смеси кислородом обладают тарельчатые аэраторы. При этом, как показала практика использования таких аэраторов на очистных сооружениях Республики Беларусь, они обладают и некоторыми серьезными конструкционными недостатками по их креплению.

Немаловажным фактором, определяющим работу системы аэрации, является глубина погружения аэраторов. С одной стороны, для увеличения эффективности процесса аэрации необходимо стремиться к уменьшению заглубления аэратора. Это связано с тем, что значительная часть кислорода переходит в жидкость в моменты образования и выхлопа пузырька, а в период подъема нарастает его кислородное истощение, снижающее скорость массопередачи. В то же время - абсолютное количество кислорода, переходящее из воздуха в воду, с ростом глубины увеличивается, так как время контакта воздуха с водой становится большим. С другой стороны, с уменьшением глубины погружения аэратора процент использования кислорода уменьшается. Как следствие, с уменьшением глубины погружения придется соответственно увеличивать количество подаваемого воздуха и расход энергии на его подачу. Одновременно происходит изменение гидродинамических условий движения жидкости в сторону ухудшения перемешивания.

вания ила. Поэтому мелкопузырчатые системы аэрации целесообразно располагать у дна аэротенка. При этом рабочую глубину аэротенка желательно принимать в пределах до 5 м.

Таким образом, можно констатировать, что эффективность аэрации зависит от размеров пузырьков воздуха, формы применяемых аэрирующих элементов и их расположения в аэротенке.

В соответствии с указаниями действующего СНиП [4, п. 6.152] - число аэраторов в регенераторах и на первой половине длины аэротенков-вытеснителей надлежит принимать вдвое больше, чем на остальной длине аэротенков. При этом следует четко знать, что методика расчета, изложенная в [4] преследует своей целью только удаление органических загрязнений из сточной воды. В последние годы в Республике Беларусь наблюдается тенденция ужесточения требований к очищенным сточным водам, в том числе по таким показателям, как азот и фосфор. Эти вещества относятся к биогенным элементам. Их наличие в сточной воде при сбросе в водоем приводит к эвтрофикации водного объекта, истощению в нем кислорода, а при больших концентрациях - может вызывать токсический эффект. Поэтому на первый план выходят задачи организации биологической очистки сточных вод с глубоким удалением биогенных элементов. Для достижения этих целей широко используются процессы нитрификации. На сегодняшний день известно достаточно большое количество комбинаций этих процессов. В зарубежной практике для удаления фосфора наибольшее распространение получили реагентные методы. Однако их существенным недостатком является увеличение затрат на очистку воды и обработку осадка. Поэтому в условиях Республики Беларусь целесообразно рассматривать методы только биологического удаления азота и фосфора. В любом случае, при определении количества подаваемого в аэротенк воздуха следует исходить из желаемой степени очистки:

- очистка сточных вод без денитрификации;
- очистка сточных вод с нитрификацией;
- очистка сточных вод с нитрификацией и денитрификацией.

Эксплуатационные затраты на электроэнергию для подачи воздуха в систему аэрации составляют ок. 60 % от общих эксплуатационных затрат очистных сооружений. Поэтому грамотное и рациональное использование воздуха - задача не только локальная, но и государственная. Действующая на многих предприятиях очистки сточных вод «приказная» система экономики, проводимая без достаточной технической подготовки, приводит к ухудшению качества очищенной воды и свойств активного ила. Перерасход электроэнергии возникает при возможности изменения режима работы нагнетателей, излишне высокой концентрации растворенного кислорода в иловой смеси, особенно в ночные часы, необходимости подачи минимально допустимого расхода воздуха по условиям предотвращения осаждения ила. К сожалению, на большинстве очистных сооружений нашей страны установлены воздухоподающие машины, не позволяющие регулировать их производительность. Одной из главных ошибок эксплуатации воздухоподводящего хозяйства является регулирование подачи воздуха на напорных линиях воздуходувок. Применение регулируемых электроприводов для воздуходушных турбоагрегатов, как показали исследования [5], нецелесообразно. Это связано с тем, что турбоагрегаты работают с низкой динамической составляющей напора и большой статической составляющей, обусловленной уровнем жидкости в аэротенках. В этом случае экономия электроэнергии сравнительно мала относительно капитальных затрат на оснащение турбоагрегата частотным преобразователем, особенно при использовании высоковольтных электродвигателей большой мощности.

Одним из важнейших показателей, характеризующих подачу воздуха, является интенсивность аэрации.

Согласно [4] регламентируется максимальная и минимальная интенсивности аэрации в аэротенках. Величина максимальной интенсивности аэрации определяется экономическими факторами и приведенными затратами на подачу воздуха. Минимальная интенсивность определяется условием поддержания активного ила во взвешенном состоянии. Однако эти теоретические выкладки имеют значение при проведении проектных работ.

Влияние недостаточной интенсивности аэрации на процессы очистки сточных вод в аэротенке-вытеснителе было изучено в условиях Минской очистной станции (МОС).

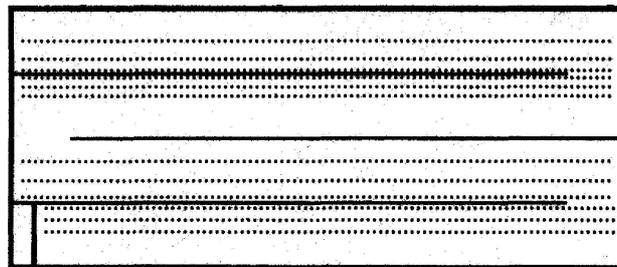


Рис. 1. Схема расположения аэраторов третьей секции МОС.

В третьей секции аэротенков типовая система аэрации из фильтровальных пластин была заменена на систему аэрации из волокнисто-пористого полиэтилена фирмы «Экополимер» (Харьков) в виде продольных труб диаметром 150 мм. В каждом коридоре шириной 10 мм уложено 3 плети. Расположение этих труб по коридорам представлено на рис. 1. Размеры секции в плане - 40×125, таким образом, площадь поверхности аэротенка составляет 5000 м². Расход воздуха определяется вихревым расходомером фирмы «Фотон» (Санкт-Петербург), который установлен на магистральном трубопроводе подачи воздуха в третью секцию.

Целью исследований явилась оценка снижения концентрации загрязнений поступающей сточной воды по длине аэротенка с учетом фактического равномерного распределения подаваемого воздуха. Работы проводились при расходе воздуха, сложившемся в процессе эксплуатации. Для определения качества сточной воды были определены следующие показатели: ХПК, растворенный кислород, азот аммонийный, азот нитритов и нитратов, фосфаты. В качестве показателей состояния и количества активного ила выбраны объемная и массовая доза ила, а также иловый индекс.

Для изучения процессов биологической очистки аэротенк был разбит на контрольные створы, которые располагаются друг от друга на расстоянии 50 м. В условный момент поступления сточной воды в аэротенк ($t = 0$) отбиралась проба циркуляционного активного ила объемом 1 л из верхнего канала активного ила. Одновременно с этим фиксировалось значение расхода воздуха, м³/ч, подаваемого в аэротенк. Спустя несколько минут измерялась концентрация растворенного кислорода и температура иловой смеси на расстоянии 10 м от начала первого коридора. Все последующие пробы отбирались в контрольных точках. Интервал времени между отбором проб соответствовал времени прохождения поступившим расходом иловой смеси расстояния между контрольными точками. Таким образом, в каждой контрольной точке отбирались пробы иловой смеси в две емкости - для определения контролируемых параметров для воды и для ила. После отбора пробы иловой смеси, для определения показателей качества очистки воды, выполнялось отделение очищаемой воды от активного ила для прекращения их контакта между собой и, соответственно, процессов очистки.

В период исследований температура сточных вод колебалась в пределах 18,0-21,5 °С. Продолжительность нахождения иловой смеси в аэротенке составляла в среднем 4 часа. Подача воздуха в секцию аэротенка варьировалась в пределах 3000 - 5800 м³/ч. Это соответствовало интенсивности аэрации не более 0,6 - 1,16 м³/м²·ч, что в 2,8 - 5,4 раза ниже минимально допустимой величины 3,25 м³/м²·ч (табл. 43, [4]). Концентрация растворенного кислорода колебалась в пределах 0 - 1,2 мг/л, но чаще находилась в пределах до 0,4 мг/л. При интенсивности аэрации менее 1,0 м³/м²·ч концентрация растворенного кислорода на водосливе, как правило, была нулевой.

Концентрация органических загрязнений, оцениваемая по ХПК, в осветленной воде, подаваемой в аэротенк составляла 150 - 280 мг/л, а в биологически очищенной - 40 - 60 мг/л соответственно. Эффект очистки сточных вод по ХПК (рис. 2) составил ок. 75%. При этом резкое снижение ХПК (порядка 55 - 60 %) наблюдалось уже в первом коридоре аэротенка (25 % объема аэротенка).

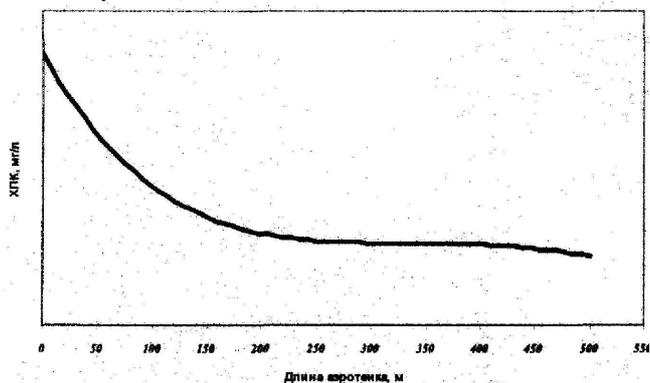


Рис. 2. Снижение ХПК по длине аэротенка.

Для изучения процессов нитрификации (окисления азота) проводился анализ концентрации форм азота. При интенсивности подачи воздуха 1,15 м³/м²·ч снижение концентрации азота аммонийного составило 25 % (рис. 3). Во всех остальных случаях эта величина колебалась в пределах 10 - 17 %. При этом следует обратить внимание на волнообразный характер кривой изменения концентрации азота аммонийного по длине аэротенка, который наблюдается во всех случаях недостаточной интенсивности аэрации.

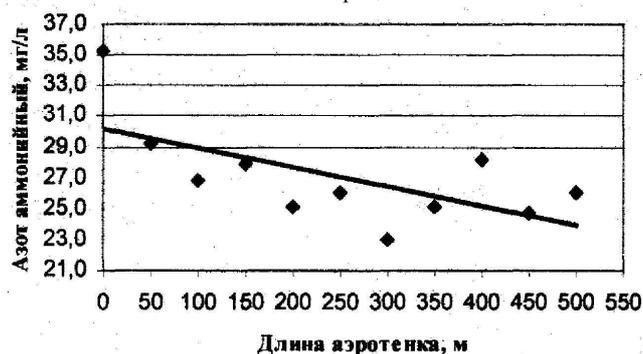


Рис. 3. Изменение концентрации азота аммонийного по длине аэротенка.

Кроме того, только при интенсивности аэрации 1,0-1,15 м³/м²·ч появлялась определяемая концентрация азота нитритного. Во всех других случаях азот нитритов полностью отсутствовал. Следует отметить, что при интенсивности аэрации 1,15 м³/м²·ч максимальная концентрация азота нитритов составляла 0,3 - 0,4 мг/л. Аналогичная картина наблюдалась и с концентрацией азота нитратов. Максимальная его концентрация достигала 1,1 - 1,3 мг/л. Это свидетельствует о том, что

процессы окисления азота практически полностью отсутствуют. Подтверждением этому являются результаты анализов по определению концентрации азота аммонийного.

Помимо удаления азота, актуальным вопросом является и утилизация фосфора. При интенсивности аэрации 1,15 м³/м²·ч кривая изменения концентрации фосфора фосфатов по длине аэротенка принимает "горбообразный" вид (рис. 4). При этом на первых 100 м длины аэротенка наблюдается существенное повышение концентрации фосфора, вероятно, вследствие создания условий, близких к анаэробным. По отношению к начальной максимальной концентрация может достигать 3 - 5-ми кратного превышения при дозе ила 2 - 2,5 г/л. При этом, к концу аэротенка, концентрация фосфора может быть меньше исходной на 25 - 50 %. В случаях, когда интенсивность аэрации ниже 1,0 м³/м²·ч – общий вид кривой сохраняется, однако конечная концентрация фосфора превышает исходную.

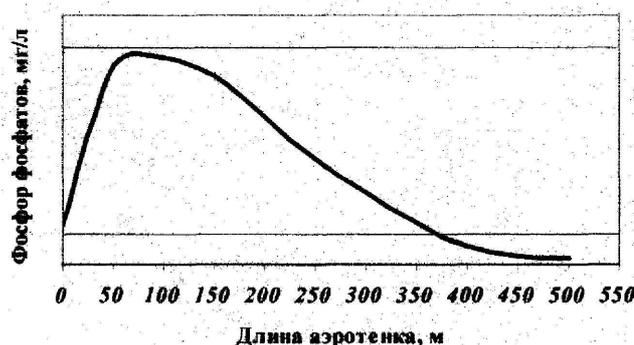


Рис. 4. Изменение концентрации фосфора фосфатов по длине аэротенка.

Таким образом, нами установлено, что при интенсивности аэрации меньше установленной нормативными требованиями [1] в 2,8 - 5,4 раза процессы биологической очистки сточных вод не прекращаются. В частности, эффект удаления органических загрязнений по ХПК составляет 75%. Однако процессы окисления соединений азота прекращаются практически полностью. Об этом свидетельствует отсутствие окисленных форм азота – нитритов и нитратов. Кроме того, эффект удаления азота в процессе биологической очистки составляет всего 10 - 15 %. Это является следствием недостаточной концентрации растворенного кислорода, которая колеблется в пределах не выше 0,5 мг/л, а для протекания процесса нитрификации требуется минимальная концентрация растворенного кислорода 1,5 - 3,0 мг/л.

В условиях недостаточной интенсивности аэрации удаление фосфора фосфатов может быть осуществлено до 50 %, однако этот процесс является незаконным. При недостаточной интенсивности аэрации концентрация фосфора на водосливе может быть и больше начальной.

На оснований вышеизложенных фактов можно сделать вывод о недопустимости использования в технологическом процессе биологической очистки сточных вод значений интенсивности аэрации существенно ниже определенных нормами проектирования [4].

На секции аэротенков № 9 МОС были проведены исследования при интенсивности подачи воздуха близкой к минимально допустимой [4]. При этом, система аэрации была зарегулирована таким образом, чтобы приблизить подачу воздуха по длине аэротенка к его биологическому потреблению, т.е. в начальные коридоры подавалось большее количество воздуха, чем в последние. Результаты получились следующие. Удаление органических веществ (по ХПК) составило 85 %, снижение концентрации азота аммонийного - 76 %, фосфатов - 20 %. Таким образом, удаление фосфатов при таком режиме подачи воздуха практически не происходит.

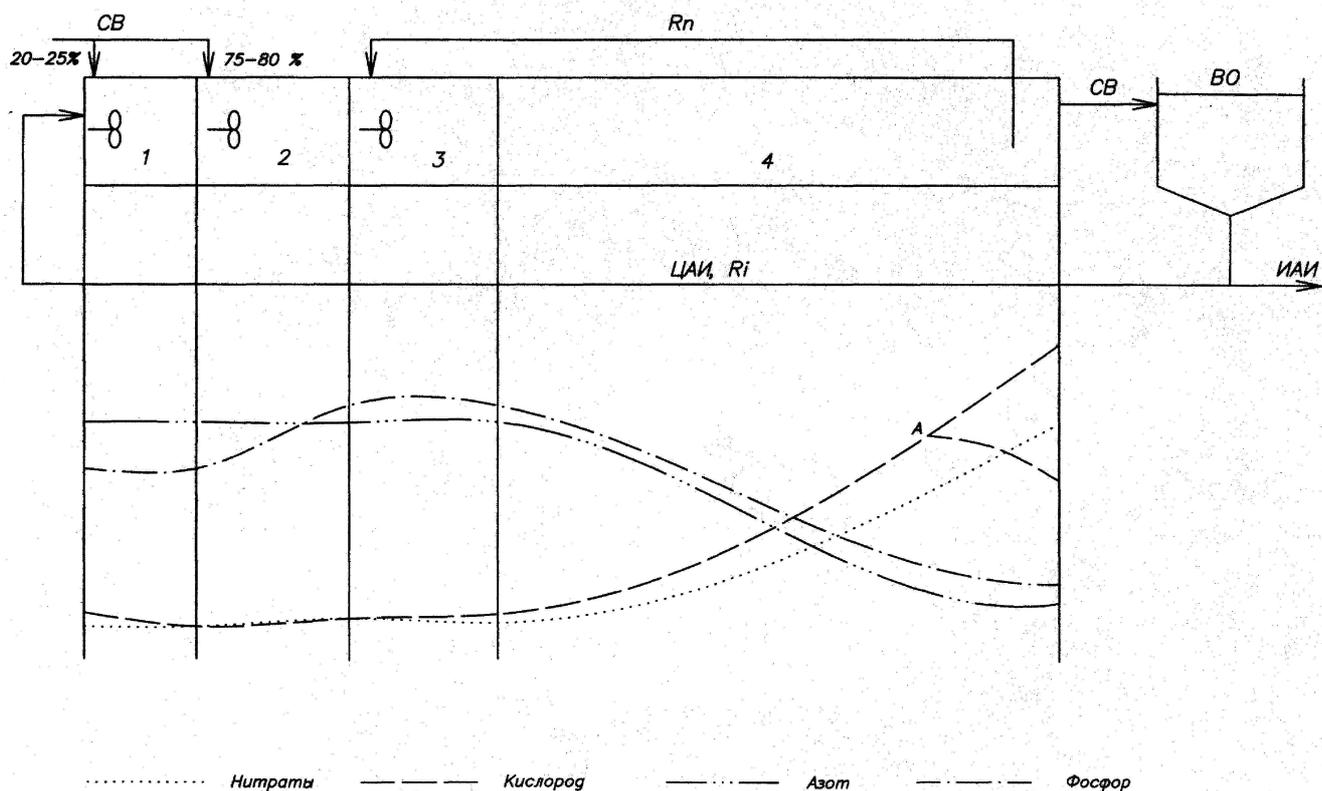


Рис. 5. Технологическая схема аэротенка с предденитрификатором и относительные изменения основных характеристик биологической очистки: 1 – предденитрификационный резервуар; 2 – анаэробный резервуар; 3 – аноксидный резервуар; 4 – аэробный резервуар

Рассмотрим организацию кислородного режима в биоблоке, предназначенном для глубокой биологической очистки, в том числе от биогенных элементов. На рисунке 5 представлена технологическая схема работы аэротенка с предденитрификацией и относительные изменения концентрации основных технологических характеристик процесса биологической очистки: растворенный кислород, нитраты, азот, фосфор. В состав аэротенка включены предденитрификационная, анаэробная, аноксидная и аэробная зоны. Очевидно, что потребность в кислороде по длине коридоров аэротенка меняется от максимальной в начале до минимальной в конце. Высокая концентрация кислорода на заключительном этапе нитрификации бесполезна, а в данной технологической схеме – даже вредна, так как вместе с нитратосодержащим циркуляционным потоком вносится в денитрификатор значительное количество кислорода, оказывающее, безусловно, негативное влияние на процесс денитрификации. Поэтому, целесообразно в точке А снизить количество воздуха, подаваемого в аэробную зону. В целом, средняя концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне должна составлять 2,5 - 4,0 мг/л. При этом, максимальная концентрация может достигать 6,0 мг/л.

Предденитрификационный резервуар в данной схеме предназначен для снижения концентрации нитратов в циркулирующем возвратном иле. Сюда подается весь циркуляционный ил и 20 - 25 % расхода осветленной сточной воды.

Необходимое количество кислорода в аноксидную зону поступает в химически связанном виде в виде нитратов, в результате расщепления которых образуется газообразный азот, удаляемый в атмосферу. Наличие растворенного кислорода в анаэробной и аноксидной зонах существенным образом снижает скорость протекания процессов денитрификации и выделения фосфора. Поэтому для перемешивания иловой смеси допускается только установка мешалок.

Потребность в кислороде на окисление углеродсодержащих примесей принято выражать в виде БПК₅ и БПК_П с учетом удельного расхода q_0 , мг/мг. Для неполной очистки при отсутствии нитрификации значение q_0 принимается 0,9 мг/мг. Изъятие части БПК на прирост ила не учитывается. При наличии нитрификации добавляется расход кислорода на окисление азота в количестве $4,57 \cdot \text{CN}_\text{H}$, а если в схеме имеется денитрификатор, то из общей потребности вычитается возвращаемый кислород - в количестве $2,86 \cdot \text{CN}_\text{Д}$. Таким образом, потребность в кислороде составит:

$$0,9 \cdot (L_5^{\text{en}} - L_5^{\text{ex}}) + 4,57 \cdot \text{CN}_\text{H} - 2,86 \cdot \text{CN}_\text{Д}$$

Изъятие части БПК₅ на денитрификацию в расчет целесообразно не вводить, создавая тем самым некоторый запас.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе аэротенков с обеспечением требуемых технологических режимов определяющими являются подача и распределение воздуха, а также в целом кислородный режим.

Можно констатировать, что на сегодняшний день существует реальная необходимость изучения в условиях Республики Беларусь, внедрения и автоматизированного контроля новых технологических режимов подачи воздуха, способных обеспечить как высокие показатели очистки сточных вод, в том числе от биогенных элементов, так и рациональное использование подаваемого воздуха и, соответственно, затрачиваемой электроэнергии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Яковлев СВ., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод / Учебник для вузов. - М.: АСВ, 2002. - 704 с.

2. Попкович Г.С., Репин Б.Н. Системы аэрации сточных вод. - М.: Стройиздат, 1986. - 136 с.
3. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. - М: Акварос, 2003. - 512 с.
4. СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. - М: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. - 72 с.
5. Лезнов Б.С. Энергосберегающие автоматизированные системы в водоснабжении и водоотведении // Водоснабжение и санитарная техника. - 2004. - № 2. - С. 17 - 19.
6. Мишуков Б.Г., Соловьева Е.А. Удаление азота и фосфора на очистных сооружениях городской канализации // Приложение к журналу «Вода и экология. Проблемы и решения», 2004. - 72 с.

УДК 628.162.1

Житенёв Б.Н.

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРООКИСЛЕНИЯ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование технологических приемов удаления из природных вод органических загрязнений природного и техногенного происхождения позволит более широко использовать поверхностные источники для водоснабжения, в частности для водоснабжения промышленных предприятий. Органические загрязнения природного происхождения в условиях Республики Беларусь в подавляющем числе случаев представлены гумусовыми соединениями и обуславливают высокую цветность воды. Такая вода непригодна для водоснабжения, перед подачей потребителю она должна быть подвергнута обесцвечиванию. Главенствующую роль в формировании цветности поверхностных вод РБ играют гуминовые кислоты.

Наряду с очисткой воды от органических загрязнений электрокоагуляцией в последнее время находит широкое распространение метод электрохимического окисления. В ряде работ [1-10] показано, что этим методом успешно удаляются органические загрязнения различной степени дисперсности. Данные в литературе об электрохимическом окислении отдельных фракций водного гумуса отсутствуют.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электроокисление гуминовых кислот исследовали на модельной воде, приготовленной из препарата гуминовых кислот, выделенных по методике [11]. В качестве электродов использовалась пара: графитовый анод и титановый катод. Опыты проводились в статических условиях в электролизере из органического стекла емкостью 200 мл. В процессе экспериментов исследовалось влияние плотности тока, времени обработки и pH на электроокисление гуминовых кислот.

Для уменьшения количества опытов и получения математической модели процесса электроокисления использовался метод ротационного ЦКП. Основные характеристики плана эксперимента представлены в таблице 1.

Проверку воспроизводимости осуществляли с помощью критерия Кохрена ($G_{табл.} = 0,877, G_{расч.} = 0,733$ при $P = 0,95$). После реализации полного факторного эксперимента 2^3 , опытов в центре плана и в «звездных точках», данные опытов были обработаны и было получено уравнение регрессии:

$$Y = 74,60 + 6,97 \cdot X_1 + 6,47 \cdot X_2 - 7,55 \cdot X_3 - 3,31 \cdot X_1 \cdot X_2 + 2,21 \cdot X_2 \cdot X_3 + 3,40 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,42 \cdot X_1^2 + 2,27 \cdot X_2^2 - 1,42 \cdot X_3^2 \quad (1)$$

Уравнение (1) адекватно по F-критерию описывало поверхность отклика ($F_{табл.} = 5,05, F_{расч.} = 4,85$).

Кодированные переменные связаны с физическими следующими соотношениями:

$$X_1 = \frac{i - 10}{5}, \quad (2)$$

$$X_2 = \frac{t - 4}{2}, \quad (3)$$

$$X_3 = \frac{pH - 7}{2}. \quad (4)$$

Подставляя в (1) и выполнив преобразования, получим уравнение, связывающее эффект удаления гуминовых кислот электроокислением с плотностью тока, временем обработки и активной реакцией среды в физических значениях переменных:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{ГК} = & 93,35 - 0,01 \cdot i - 1,88 \cdot t - 4,33 \cdot pH - \\ & - 0,33 \cdot i \cdot t + 055 \cdot t \cdot pH + 0,34 \cdot i \cdot pH - \\ & - 0,02 \cdot i^2 + 0,57 \cdot t^2 - 0,36 \cdot pH^2 \end{aligned} \quad (5)$$

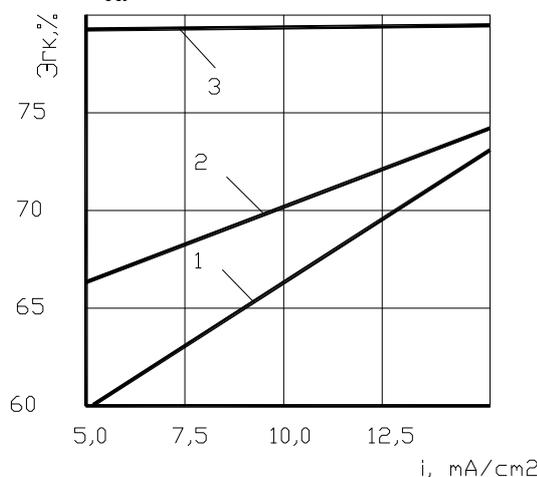
Уравнение (5) содержит информацию по совместному влиянию исследованных факторов, позволяет получить частные зависимости эффекта удаления гуминовых кислот электроокислением от плотности тока, времени обработки и pH, выявить силу их влияния, а также определить оптимальные значения указанных факторов.

Решив зависимость (5) при $pH = 7$ и $t = 2, 4, 6$ мин. соответственно, получим частные уравнения, описывающие влияние плотности тока при различном времени обработки:

$$\mathcal{E}_{ГК} = 51,62 + 1,71 \cdot i - 0,02 \cdot i^2, \quad (6)$$

$$\mathcal{E}_{ГК} = 61,40 + 1,05 \cdot i - 0,02 \cdot i^2, \quad (7)$$

$$\mathcal{E}_{ГК} = 77,74 + 0,39 \cdot i - 0,02 \cdot i^2. \quad (8)$$



1, 2, 3 - время обработки соответственно 2, 4, 6 мин.
Рис. 1. Влияние плотности тока на эффект удаления ГК ($\mathcal{E}_{ГК}$) электроокислением.