

Р. М. Маркевич, доцент; М. В. Рымовская, ассистент;
О. И. Лазовская, лаборант; Н. В. Холодинская, зам. гл. инженера УП «Минскводоканал»

БИОЛОГИЧЕСКОЕ УДАЛЕНИЕ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД АЗОТА И ФОСФОРА В АЭРОТЕНКАХ МИНСКОЙ ОЧИСТНОЙ СТАНЦИИ АЭРАЦИИ

Investigation results for classical four-section aerotank and anaerobic-anoxic-aerobic aerotank of Minsk Treatment Aeration State exploitation by ammonium and nitrate nitrogen, total phosphorous and dissolved oxygen indexes has been presented at this work. Nitrogen exchange and phosphorous removal processes intensity from aerotank section zoning has been shown. Nitrogen and phosphorous removal biochemical processes has been analyzed. Technological measures for nitrogen and phosphorous removal enhancing for aerotank with zonal oxygen supply.

Введение. Традиционная механобиологическая очистка городских сточных вод позволяет изъять из воды основную массу органических загрязняющих веществ, но не может обеспечить достаточную глубину удаления соединений азота и фосфора. В ходе очистки протекают процессы аммонификации и последующей нитрификации, гидролиз соединений фосфора. При этом часть азота и фосфора выводится с биомассой активного ила, некоторая часть малорастворимых соединений фосфора осаждается в первичных отстойниках. Содержание аммонийного азота и фосфора в очищенной воде на 20–40% меньше, чем в воде, поступающей на очистку. Содержание нитратного и нитритного азота может даже увеличиться.

Таким образом, в водоемы поступает большое количество этих биогенных элементов. Согласно водному кадастру, самые высокие среднегодовые концентрации биогенных элементов обнаруживаются в воде таких рек, как Свислочь, Березина, Днепр, Мухавец и др. Эвтрофикация водоемов приводит к нарушению процессов саморегуляции в биоценозах, наблюдается массовое развитие цианобактерий («цветение» водоемов), продуцирующих нейро- и гепатоксины, падает содержание растворенного кислорода в воде, накапливаются токсичные продукты разложения.

Для эффективного удаления биогенных элементов все более широкое применение находит биологическая очистка городских сточных вод, основанная на чередовании аэробных, анаэробных и аноксидных зон, что способствует формированию новых биоценозов активного ила [1].

Минская очистная станция аэрации является удобным объектом для сравнения процессов биологической очистки сточной воды в условиях разной обеспеченности кислородом. Классические аэротенки-вытеснители первой очереди Минской очистной станции аэрации (МОСА-1) предназначены преимущественно для удаления органических соединений. Основными превращениями соединений азота в таких аэротенках являются аммонификация органических соединений (если она не закончилась в канализационной сети и первичных отстойниках), ассими-

ляция аммонийного азота организмами активного ила и нитрификация (при наличии необходимых для нее условий).

Аэротенки второй очереди (МОСА-2) рассчитаны на удаление из сточной воды не только углерода органических соединений, а также азота и фосфора за счет выделения зон с разным уровнем аэрации (аэробных, аноксидных и анаэробных), в зависимости от которого создаются благоприятные условия для протекания нитрификации, денитрификации, а также дефосфатации. Биологическое удаление фосфора основано на селекции фосфатаккумулялирующих организмов (ФАО), которые в анаэробных условиях из ацетата и пропионата синтезируют полимерные насыщенные оксикислоты, используя для этого энергию расщепления полифосфатов. В аэробных условиях в клетках этих микроорганизмов уменьшается содержание полимерных насыщенных жирных кислот, а протекает синтез гликогена и накопление полифосфатов, для чего из воды активно поглощаются ортофосфаты. Таким образом, обязательными условиями биологической дефосфатации являются чередование аэробных и анаэробных зон, наличие в анаэробной зоне легкодоступных органических соединений (предпочтительно, ацетата) и отсутствие нитратов [2].

Цель работы заключалась в том, чтобы проследить превращения соединений азота и переход фосфора в клетки по ходу движения иловой смеси в аэротенке и на основании полученных данных оценить эффективность функционирования соответствующих коридоров и зон аэротенков.

Объекты и методы исследований. Объектом исследования являлись иловая смесь из аэротенков и осветленная сточная вода после первичных и вторичных отстойников первой и второй очереди МОСА. Отбор проб иловой смеси производили на МОСА-1 из последней четверти коридоров № 1, 2, 3 и 4 аэротенка первой секции и на МОСА-2 из анаэробного резервуара, денитрификаторов № 1, 2 и 3 и нитрификаторов № 1, 2 и 3 из последней четверти каждой зоны (первая секция). Отбор проб осуществляли в течение марта – декабря 2008 г.

В осветленной и биологически очищенной воде, а также в иловой смеси из каждого коридора

(зоны) аэротенков определяли содержание азота в аммонийной и нитратной формах. Содержание общего фосфора устанавливали в осветленной и биологически очищенной воде, а в коридорах и зонах аэротенков – отдельно в клетках микроорганизмов и в воде. В иловой жидкости во всех зонах аэротенков определяли содержание растворенного кислорода.

В ходе анализа превращений азота учитывали технологические режимы работы аэротенков. Возврат иловой смеси из вторичного отстойника составляет 50–100% (в среднем 70%) для МОСА-1 и 100% для МОСА-2. Соотношение объемов отстаиваемой в первичном отстойнике сточной воды и циркуляционного ила из вторичных отстойников в смеси, подаваемой в коридор № 1 аэротенка МОСА-1, принимали равным 1,85 : 1, в смеси, подаваемой в анаэробный резервуар аэротенка МОСА-2, это соотношение составило 1 : 1.

Процессы обмена азота оценивали по разностям между концентрациями азота в восстановленной (аммонийный азот) и окисленной (в основном в виде нитрат-ионов) формах в конце зоны отбора и их содержанию в начале зоны. Концентрация азота в разных формах на входе в аэротенк определялась расчетным путем исходя из приведенных выше соотношений и концентраций соответствующих форм азота в сточной и биологически очищенной воде, на входе в остальные зоны принималась равной концентрации соответствующего показателя на выходе из предыдущей зоны. Данные по разным формам соединений азота представляли в пересчете на азот для удобства сравнения. Значимыми считали изменения концентраций азота в пределах зоны более 2 мг/л. Снижение концентрации аммонийного азота при уменьшении либо отсутствии изменения концентрации нитратного азота трактовалось как ассимиляция аммонийного азота, то же при увеличении концентрации нитратного азота – как процесс нитрификации. Увеличение концентрации аммонийного и снижение концентрации нитратного азота свидетельствовали о протекании процессов аммонификации и денитрификации соответственно. Обработку полученных опытных данных производили путем суммирования случаев значимых процессов.

Для показателя концентрации растворенного кислорода определяли среднее значение по выполненным измерениям в течение марта – августа и октября – декабря, для показателя концентрации общего фосфора среднее значение устанавливалось в зимний период. Вычисление доверительного интервала не проводилось, поскольку исследуемые системы являются открытыми и учет всех влияющих факторов, а тем более исключение их воздействия, не представляется возможным.

Концентрацию неорганического азота в аммонийной и нитратной формах определяли

в соответствии с [3, с. 67, 73–74] путем отгонки фильтрата иловой жидкости с последующим титрованием. Концентрацию общего фосфора устанавливали по [4, с. 202–208] после фильтрования пробы иловой жидкости в фильтрате (содержание фосфора в очищаемой воде) и в остатке на фильтре (содержание фосфора в активном иле) с последующей минерализацией органических компонентов и колориметрическим определением. Концентрацию растворенного кислорода определяли по [3, с. 49–52] иодометрическим методом по Винклеру в отстаиваемой от ила жидкости. Для исключения снижения показателя за счет биологических процессов внесение растворов соли марганца и иодида калия производили не позднее чем через 10 мин после отбора пробы, плотно закрывали склянки с пробами и доставляли в лабораторию для титриметрического анализа.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Результаты определения концентрации растворенного в сточной воде кислорода (таблица) свидетельствуют о том, что этот показатель соответствует конструктивным особенностям каждого аэротенка.

Таблица

Средние значения концентрации растворенного кислорода по зонам аэротенков

Зона	Концентрация растворенного кислорода, мг/л	
	весна – лето	осень – зима
Аэротенк МОСА-1		
Коридор № 1	1,7	2,9
Коридор № 2	2,4	4,2
Коридор № 3	2,3	3,8
Коридор № 4	3,0	4,1
Аэротенк МОСА-2		
Анаэробный резервуар	1,6	2,7
Денитрификатор № 1	1,7	3,0
Нитрификатор № 1	3,0	4,5
Денитрификатор № 2	1,8	2,6
Нитрификатор № 2	4,3	5,8
Денитрификатор № 3	1,8	3,4
Нитрификатор № 3	5,2	5,4

В аэротенке МОСА-1 от коридора № 1 к коридору № 4 по мере снижения загрязненности сточной воды концентрация растворенного в ней кислорода возрастает, более существенное увеличение концентрации растворенного кислорода в коридоре № 4 должно способствовать активно протекающей нитрификации.

В аэротенке МОСА-2 в соответствии с его конструкцией наблюдается чередование зон в зависимости от концентрации содержащегося в этих зонах растворенного кислорода.

Вместе с тем в аноксидных зонах для удовлетворительного протекания денитрификации содержание растворенного кислорода не должно превышать 1 мг/дм³. В анаэробном резервуаре, возможно, вследствие интенсивного перемешивания подаваемой сточной воды и достаточно высокого содержания нитратов в циркуляционном активном иле условия анаэробнобиоза нарушаются.

Полученные данные по изменению концентраций неорганических соединений азота и извлечению органических и неорганических

соединений фосфора свидетельствуют о том, что зоны аэротенка с различным уровнем аэрации не в полной мере выполняют свое назначение.

Процессы превращения соединений азота, наиболее характерные для каждой зоны аэротенков, представлены на рис. 1 и 2. Градация от белого (0–1 случай значимого процесса за период изучения – 12 измерений) до темно-серого (8 и более случаев) наглядно отражает интенсивность протекающих процессов.

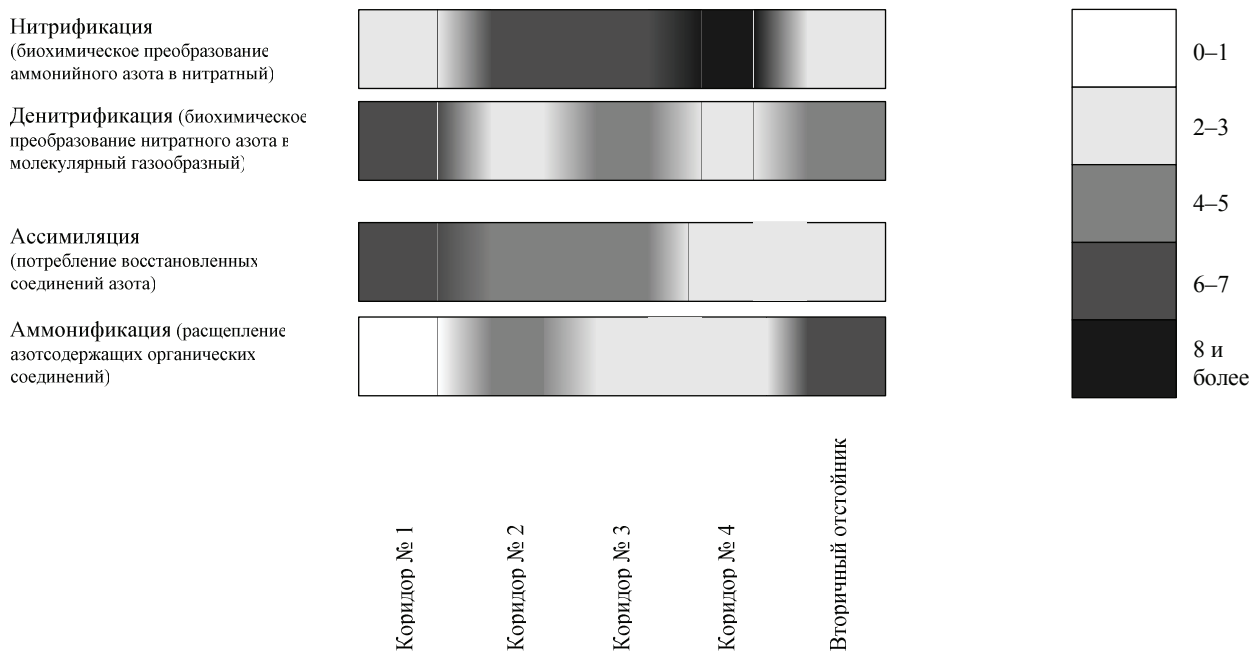


Рис. 1. Превращения соединений азота при биологической очистке городских сточных вод в аэротенке и вторичном отстойнике МОСА-1

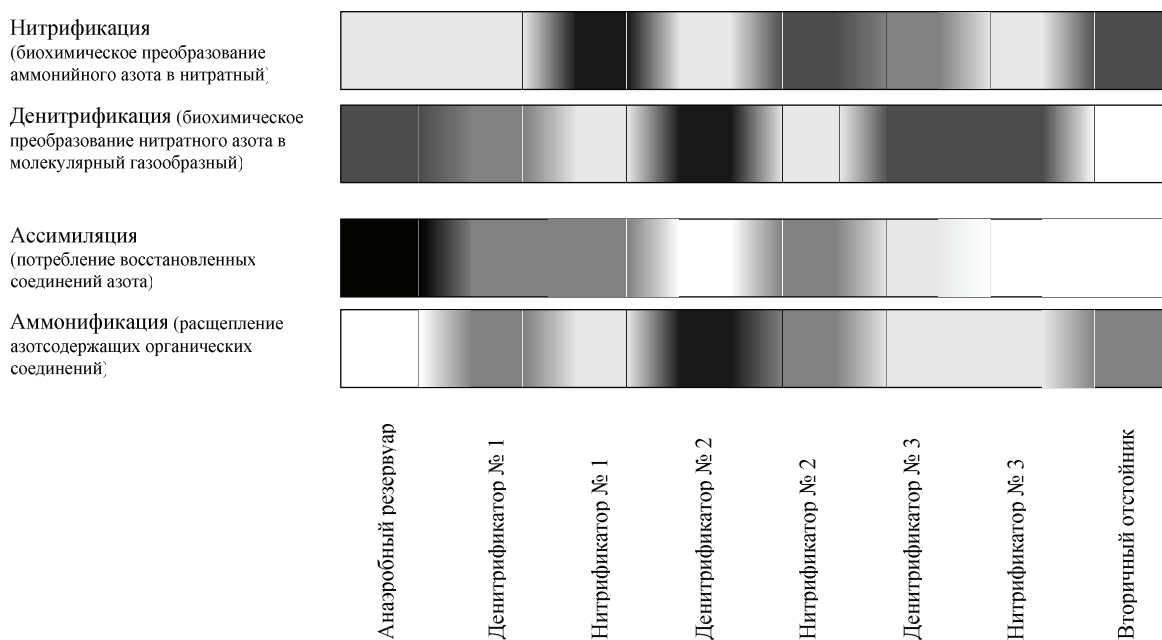


Рис. 2. Превращения соединений азота при биологической очистке городских сточных вод в аэротенке и вторичном отстойнике МОСА-2

Из рис. 1 видно, что в коридоре № 1 протекают процессы ассимиляции аммонийного азота и денитрификации, обычные при значительной нагрузке на активный ил по органическим загрязнениям при подаче осветленной сточной воды. Нитраты в коридор № 1 поступают с циркуляционным активным илом. Денитрификация затухает в коридоре № 2 из-за увеличения концентрации растворенного кислорода, снижения интенсивности ассимиляционных процессов удаления легкоокисляемых органических загрязнений и уменьшения содержания нитрат-ионов в иловой жидкости. Эти факторы приводят к нарастанию интенсивности процесса нитрификации, достигающего своего максимума в коридоре № 4. Всплеск аммонификации в коридоре № 2, возможно, связан с разрушением органических азотсодержащих загрязнений сточной воды (прежде всего, белков), высвобождение органического питания незначительно интенсифицирует денитрификацию в коридоре № 3. Процессы денитрификации и аммонификации характерны для иловой жидкости, находящейся во вторичном отстойнике из-за отсутствия аэрации в сооружении.

Из рис. 2 следует, что в анаэробном резервуаре аэротенка с чередованием зон преимущественно протекает ассимиляция аммонийного азота и денитрификация нитратов, поступивших с возвратным илом. Эти же процессы продолжаются в зоне денитрификации. В аэробной зоне (нитрификатор № 1) заканчивается ассимиляция трудноокисляемых органических соединений и протекает нитрификация. Таким образом, первые три зоны соответствуют своему конструктивному назначению.

Далее в денитрификаторе № 2 преимущественно протекает денитрификация, но она сопровождается аммонификацией органических соединений, чаще всего это белки, возможно, отчасти белки биомассы ила. Таким образом, содержание аммонийного азота возрастает, в нитрификаторе № 2 он превращается в нитраты, а в денитрификаторе № 3 снова протекает денитрификация, что нежелательно, поскольку эта зона уже предназначена для селекции фосфатаккумулялирующих организмов и подготовки их к поглощению фосфора. Присутствие нитратов в денитрификаторе № 3 крайне нежелательно, поскольку идет денитрификация, и денитрифицирующие и фосфатаккумулялирующие организмы конкурируют за субстрат, особенно низкомолекулярные жирные кислоты. Итак, процессы удаления азота и биологической дефосфатации противоречат друг другу.

Для того чтобы денитрификация в денитрификаторе № 2 протекала более интенсивно, необходимо выполнение двух условий: во-первых, концентрация растворенного кислорода должна быть менее 1 мг/дм^3 , в противном случае денитрифицирующие бактерии в качестве акцептора электронов используют кислород, и денитрифи-

кация не идет; во-вторых, скорость реакции не должна лимитироваться субстратом, т. е. для денитрификаторов должен быть легкодоступный субстрат. С этой целью в денитрификатор № 2 можно подавать сточную воду после первичных отстойников, в мировой практике иногда используют внесение уксусной кислоты или метанола.

В нитрификаторе № 2 нитрификация оказывается затянутой, возможно потому, что присутствует некоторое количество органических веществ, которые сначала ассимилируются. Второй причиной может быть уменьшение концентрации микроорганизмов-нитрификаторов из-за разрушения клеток в денитрификаторе № 2. Нитрификаторы имеют невысокую скорость роста, и для накопления необходимой концентрации клеток требуется продолжительное время.

Заканчивается нитрификация в денитрификаторе № 3, чему благоприятствует наличие в этой зоне растворенного кислорода. В свою очередь окончательная денитрификация сдвигается в нитрификатор № 3.

Таким образом, в денитрификаторе № 3, где в клетках фосфатаккумулялирующих бактерий должны были синтезироваться полимерные насыщенные кислоты, энергия расщепления которых в последней зоне – нитрификаторе № 3 – расходовалась бы на синтез и накопление полифосфатов внутри клеток, эти процессы не протекают. Для этого нет легкодоступных органических субстратов, прежде всего, уксусной кислоты, и она не может образоваться, поскольку в денитрификаторе № 3 не созданы анаэробные условия. Для обеспечения анаэробнозона в эту зону можно подавать осветленные сточные воды. Существуют технологии, когда в анаэробную зону, предназначенную для подготовки фосфатаккумулялирующих организмов к активному поглощению фосфатов, подают сырой осадок, обработанный в анаэробных условиях до достижения ацетогенной стадии.

Соответственно, в нитрификаторе № 3 фосфатаккумулялирующие организмы не готовы к поглощению фосфатов, о чем свидетельствуют результаты изучения распределения фосфора между клетками активного ила и водой в зонах аэротенка МОСА-2 (рис. 3). Это средние данные, полученные в январе – феврале 2009 г. по результатам трех определений. Из рис. 3 видно, что наблюдается некоторая тенденция увеличения содержания фосфора в клетках по мере движения иловой смеси к нитрификатору № 2. Однако основными зонами для удаления фосфора в аэротенке такой конструкции должны быть денитрификатор № 3, где в клетках синтезируются полимерные насыщенные жирные кислоты, и нитрификатор № 3, в котором за счет распада этих кислот должен активно протекать синтез полифосфатов из поглощенных из воды ортофосфатов. Как изложено выше, условия для таких процессов в этих зонах не вполне благоприятны.

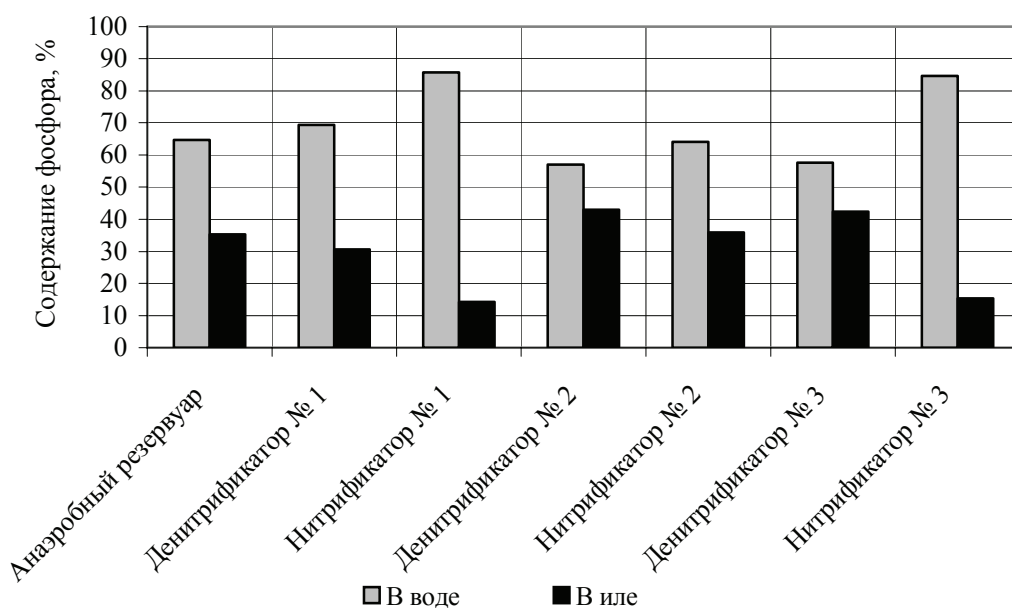


Рис. 3. Перераспределение общего фосфора (в пересчете на фосфор) между твердой и жидкой фазами иловой жидкости

Заключение. На основании вышесказанного можно сделать вывод, что процессы, протекающие в коридорах первой секции аэротенка МОСА-1, адекватны создаваемым там условиям, согласно конструкции аэротенка. Специально выделенные в первой секции аэротенка МОСА-2 зоны для нитрификации, денитрификации и дефосфатации не вполне соответствуют своему назначению.

С целью интенсификации биологического удаления из сточных вод азота и фосфора, согласно конструкции аэротенка, должны быть обеспечены следующие условия:

- в денитрификаторах № 2 и 3 должны присутствовать легкодоступные органические соединения, из которых предпочтительна уксусная кислота. Она может образоваться из других легкодеструктурируемых соединений, содержащихся в осветленной (в первичных отстойниках) сточной воде, которую необходимо подавать в эти зоны. При этом в денитрификаторах № 2 и 3 должен отсутствовать растворенный кислород;

- особо строгие анаэробные условия должны быть в денитрификаторе № 3. Одним из путей их достижения может быть отказ от перемешивания и обеспечение движения жидкости в режиме вытеснения. Кроме того, само по себе добавление свежей (отстоянной) сточной воды в эту зону способствует созданию анаэробных условий;

- после обеспечения вышеприведенных условий необходимо отрегулировать возраст активного ила. С одной стороны, уменьшение количества циркуляционного ила снижает приток фосфора, с другой стороны, для успешной нитрификации возраст ила должен быть не менее 4–5 сут. Кроме того, требует уточнения время пребывания ила в каждой зоне. В частности, в зимний период для фосфатаккумулирующих бактерий время пребывания в анаэробной зоне – денитрификаторе № 3 – может быть недостаточным для подготовки фосфатаккумулирующих организмов к поглощению фосфатов в последующей аэробной зоне.

Литература

1. Жмур, Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.
2. Очистка сточных вод: пер. с англ. / М. Хенце [и др.]. – М.: Мир, 2004. – 480 с.
3. Химический анализ производственных сточных вод / Ю. Ю. Лурье [и др.]. – М.: Химия, 1974. – 336 с.
4. Емельянова, И. З. Химико-технический контроль гидролизных производств / И. З. Емельянова. – М.: Лесная пром-сть, 1976. – 328 с.