

УДК 628.356.39

Р. М. Маркевич, доцент (БГТУ); М. В. Рымовская, ассистент (БГТУ);  
О. И. Лазовская, инженер (БГТУ); И. П. Дзюба, магистрант (БГТУ);  
Е. А. Флюрик, ассистент (БГТУ); И. А. Гребенчикова, ст. преподаватель (БГТУ)

### ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АЭРОТЕНКОВ НА ПРОТЕКАНИЕ НИТРИ-, ДЕНИТРИФИКАЦИИ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕФОСФОТАЦИИ

В настоящей статье представлены результаты исследования работы аэротенка с чередующимися аноксидными и аэробными зонами Минской очистной станции по показателям аммонийного и нитратного азота и общего фосфора. Установлена интенсивность процессов обмена азота и извлечения фосфора по зонам аэротенка. Проанализированы биохимические процессы удаления соединений азота и фосфора из сточной воды до и после реализации рекомендованных технологических мероприятий для улучшения удаления биогенных элементов. Определены стабильно достигаемые остаточные концентрации азот- и фосфорсодержащих соединений.

Investigation results for anaerobic-anoxic-aerobic aerotank of Minsk Treatment State exploitation by ammonium and nitrate nitrogen and total phosphorous indexes has been presented at this work. Nitrogen exchange and phosphorous removal processes intensity for aerotank section zoning has been shown. Nitrogen and phosphorous removal biochemical processes from waste water before and after recommended technological measures for nitrogen and phosphorous removal enhancing realization has been analyzed. Stability attained nitrogen and phosphorous compounds concentrations have been determined.

**Введение.** Представленные в данной статье результаты получены в ходе продолжения исследований по изучению биологического удаления из сточных вод азота и фосфора в аэротенках Минской очистной станции [1].

На первом этапе исследований мы установили, что в аэротенке первой очереди, рассчитанном на традиционную биологическую очистку, превращения соединений азота по ходу движения иловой смеси по коридорам увязаны с окислением органических веществ. В первом коридоре, когда содержание органических загрязнителей еще высоко и растворенного кислорода недостаточно, происходит денитрификация нитратов, поступивших с возвратным активным илом. Далее идет окисление органических веществ, прирост биомассы ила, ассимиляция восстановленных соединений азота. В четвертом коридоре в условиях хорошей обеспеченности кислородом протекает нитрификация, а во вторичном отстойнике в этом случае наряду с аммонификацией белковых соединений существует вероятность денитрификации.

Сооружение второй очереди предназначено для глубокого удаления азота и фосфора и представляет собой биореактор, разделенный на зоны с разным уровнем аэрации. Осветленные в первичном отстойнике сточные воды поступают в первую (анаэробную) зону, затем последовательно проходят зоны с чередующимися аноксидными (денитрификаторы № 1, 2, 3) и аэробными (нитрификаторы № 1, 2, 3) условиями. Анализируя превращения соединений азота и перераспределение фосфора между твердой и жидкой фазами по ходу движения иловой смеси в биореакторе, мы пришли к за-

ключению, что для успешной реализации механизма нитри-денитрификации и биологической дефосфотации необходим ряд условий.

Для обеспечения достаточного денитрификационного потенциала в денитрификаторах № 2 и № 3 должны присутствовать легкодоступные органические вещества. Наилучшими источниками органического углерода для денитрификации являются уксусная кислота, ацетон, этанол, метанол, отходы производства сахара, пива [2, 3]. Однако такие добавки не всегда экономически оправданы, поэтому чаще используют в качестве источника углерода неочищенные или осветленные сточные воды или подают в денитрификатор осветленные сточные воды с продуктами ацидофикации сырого осадка.

Кислород в зонах денитрификации может быть только в составе нитритов и нитратов и должен отсутствовать в растворенном виде. Добавление осветленных сточных вод, содержащих высокие концентрации органических загрязнений, может способствовать созданию анаэробных условий в зонах нитрификации.

И, наконец, для реализации принципа биологической дефосфотации важно выполнение двух требований: чередование анаэробных и аэробных условий и отсутствие нитратов в анаэробной фазе. Биологическое удаление фосфора заключается в выводе его в составе избыточного активного ила в результате включения в клеточную массу фосфатаккумулирующих организмов. В аэробных условиях эти организмы растут, потребляя фосфат, накапливая его в виде полифосфатов и возобновляя таким образом запас гликогена; в анаэробных условиях они потребляют ацетат и пропионат и запасают

их в виде полимерных насыщенных оксикислот, расходуя при этом гликоген с высвобождением фосфатов. Процесс накопления их в клетках возможен благодаря энергии, выделяющейся при разложении полифосфатов, что приводит к образованию ортофосфата [2, 3].

Для обеспечения вышеприведенных условий на втором этапе исследований подача осветленных в первичном отстойнике сточных вод была организована дозированно: в анаэробный резервуар, денитрификаторы № 2 и № 3 в соотношении 60, 20 и 20%.

Цель второго этапа исследований заключалась в изучении превращений соединений азота и перераспределения фосфора между твердой и жидкой фазами по ходу движения иловой смеси в биореакторе в условиях дозированной подачи осветленных сточных вод и оценке эффективности удаления биогенных элементов.

**Объекты и методы исследований.** Объектом исследования являлись осветленные сточные воды после первичных отстойников, иловая смесь из биореактора и биологически очищенная вода после вторичных отстойников. Отбор проб иловой смеси производили из анаэробного резервуара (АнР), денитрификаторов № 1, 2, 3 (Д1, Д2, Д3 соответственно) и нитрификаторов № 1, 2, 3 (Н1, Н2, Н3 соответственно) из последней четверти каждой зоны первой секции биореактора МОС-2 в течение марта-мая 2009 г. (весенний период). Для оценки процессов, происходящих в биореакторе, во всех зонах определяли содержание азота в нитратной и аммонийной формах, содержание фосфора в биомассе активного ила и в воде.

Концентрацию неорганического азота в аммонийной и нитратной формах определяли в соответствии с [4, с. 67, 73–74] путем отгонки фильтрата иловой жидкости с последующим титрованием. Концентрацию общего фосфора устанавливали по [5, 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.

В ходе анализа превращений азота учтено, что соотношение объемов отстаиваемых в первичном отстойнике сточных вод и циркуляционного ила из вторичных отстойников в смеси, подаваемой в анаэробный резервуар аэротенка, составило 1 : 1.

Процессы обмена азота оценивали по изменению концентраций азота в восстановленной (аммонийный азот) и окисленной (в основном в виде нитрат-ионов) формах в конце зоны отбора по отношению к 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 приведены 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.

Определение общего фосфора проводили колориметрическим методом после минерализации пробы. Иловую смесь, отобранную на различных стадиях очистки сточных вод, разделяли на активный ил и воду фильтрованием.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** Процессы превращения соединений азота, наиболее характерные для каждой зоны биореактора, представлены на рис. 1. Градация от белого (0–1 случай значимого процесса за период изучения) до темно-серого (максимальное число случаев) наглядно отражает интенсивность протекающих процессов.

Из-за изменения режима подачи сточной воды уменьшилось количество органических веществ, поступающих в анаэробную зону, в этой зоне интенсивно протекает и заканчивается процесс их ассимиляции. В этих условиях денитрификаторы не могут конкурировать с гетеротрофами за легкодоступную органику и денитрификация не протекает ни в анаэробной зоне, ни в последующей зоне денитрификации № 1. В этой зоне не исключено голодание и разрушение части клеток аэробных микроорганизмов. Возможно, именно по этой причине в денитрификаторе № 1 в этот период наблюдается самое высокое содержание общего фосфора в воде и самое низкое его содержание в биомассе ила (рис. 2). Высвободившиеся белки подвергаются аммонификации в денитрификаторе № 1.

В нитрификаторе № 1 в условиях активной аэрации происходит ассимиляция более трудно окисляемой органики и только теперь начинается денитрификация тех нитратов, которые поступили с циркуляционным илом.

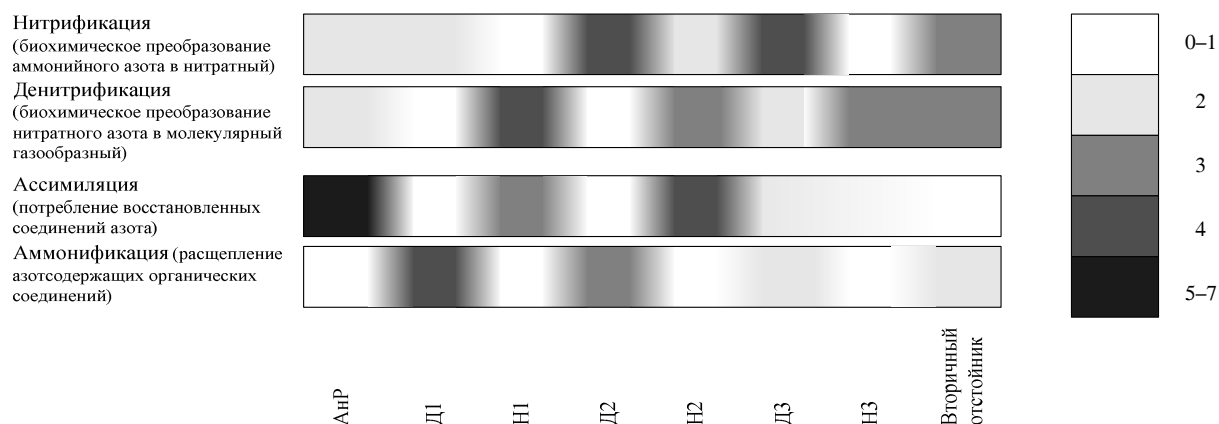


Рис. 1. Процессы обмена азота в биореакторе

В денитрификаторы № 2 и 3 поступают с отстоянной сточной водой органические вещества, но, возможно, из-за небольшой протяженности этих зон и наличия некоторого периода адаптации денитрификаторов активный процесс восстановления нитратов (денитрификация) с сопутствующей ассимиляцией легкодоступной органики оказывается смещенным в зоны нитрификации № 2 и 3 и во вторичный отстойник. Денитрификация чередуется с нитрификацией, но процесс нитрификации смещается соответственно в зоны денитрификации № 2 и 3 и даже во вторичный отстойник.

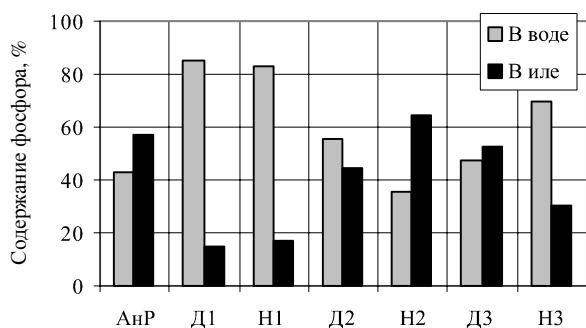


Рис. 2. Перераспределение общего фосфора между твердой и жидкой фазами иловой жидкости (в пересчете на фосфор)

Таким образом, рассредоточенный впуск сточной воды в биореактор в целом увеличил интенсивность денитрификационных процессов, за счет которых и происходит выведение азота. Общее содержание азота в биологически очищенной воде в весенний период ( $13,1 \text{ мг/дм}^3$ ) несколько ниже, чем в осенне-зимний ( $15,1 \text{ мг/дм}^3$ ). В целом все процессы превращений азота в весенний период менее выражены. Вероятно, это связано с более высоким содержанием растворенного кислорода во всех зонах, поскольку органические загрязнения, поступающие с осветленной сточной водой, распределились на три зоны, где они достаточно быстро окисляются.

Кроме того, условия анаэробно-анаэробной зоны, обеспечиваются еще в меньшей степени, в этой зоне присутствуют не только нитриты и нитраты, но и растворенный кислород. В этих условиях не обеспечивается отдача клетками активного ила фосфора в воду, а, значит, и не стимулируется последующее его «жадное» поглощение в аэробных условиях (рис. 2). Значение дозы ила в пробах и содержание общего фосфора в сухом веществе активного ила представлены на рис. 3 и 4.

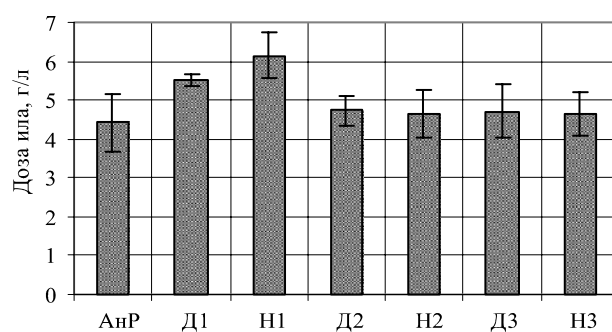


Рис. 3. Доза ила

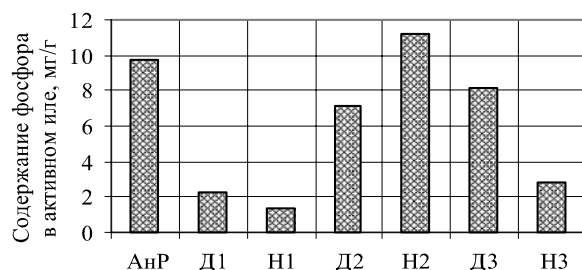


Рис. 4. Содержание фосфора в сухой биомассе активного ила

Из приведенных данных видно, что фосфор максимально переходит в воду в зоне денитрификации № 1, а затем наблюдается тенденция накопления фосфора в биомассе активного ила. В наибольшем количестве фосфор аккумулируется в клетках бактерий в зоне нитрификации № 2, хотя и в этом случае его содержание ниже максималь-

но возможного при удовлетворительной биологической дефосфатации. По литературным данным фосфатаккумулялирующие организмы могут накапливать фосфор до 20% от своей массы [6].

Если бы избыточный активный ил отводился из зоны нитрификации № 2, эффект очистки сточных вод от фосфора был бы значительно выше, поскольку далее, в зонах денитрификации № 3 и нитрификации № 3 фосфор снова переходит в воду.

В целом удаление фосфора в весенний период происходило удовлетворительно (до содержания в очищенной воде 1,5–2 мг/дм<sup>3</sup>).

**Заключение.** За изученный период очистка сточных вод по азоту и фосфору в биореакторе, предназначенном для глубокого удаления этих элементов, обеспечивалась до нормативных показателей. Вместе с тем из-за общего невысокого содержания органических веществ в сточной воде и подачи циркуляционного ила в анаэробный резервуар обеспечить строгий анаэробизм в этой зоне, а значит и эффект по удалению фосфора в соответствии с проектом, не удастся. Кроме того, невысокое содержание органики в отстаиваемой сточной воде, подаваемой в зоны денитрификации № 2 и 3, не обеспечивает отсутствие растворенного кислорода в этих зонах. Несмотря на то, что подача исходной воды в зону денитрификации № 3 в некоторой степени способствовала выделению фосфора из клеток ила, в последующей зоне нитрификации № 3 не наблюдалось интенсивное поглощение фосфора клетками, за счет чего и должно обеспечиваться его удаление из воды. С другой стороны, при подаче значительного количества отстаиваемой сточной воды (более 10%) в зону денитрификации № 3 снижается эффект удаления органических веществ, а значит, и нарушается нитрификация в зоне нитрификации № 3.

Одновременная очистка сточных вод от азота и фосфора представляет собой очень сложную проблему.

Во-первых, процессы биологической очистки сточных вод от азота (вследствие нитрификации и денитрификации) и от фосфора взаимосвязаны и даже отчасти исключают друг друга. Глубокое удаление фосфора можно было бы осуществить за счет увеличения прироста ила (для удаления большего количества фосфора с биомассой избыточного ила), однако это противоречит условиям нитрификации, требующим снижения прироста ила для существования бактерий-нитрификаторов.

Во-вторых, для селекции фосфатаккумулялирующих организмов кроме чередования зон с разным уровнем обеспеченности кислородом обязательно должна присутствовать зона строго анаэробизма. Однако создание строго анаэробных условий практически невозможно из-за

специфики состава сточных вод, которая заключается по сравнению с европейскими в более низком содержании органических веществ при высоком соотношении N/БПК и P/БПК. Кроме того, с циркуляционным активным илом в анаэробный резервуар поступают нитриты и нитраты, что нецелесообразно. Например, в соответствии с технологией Кейптаунского университета (УСТ-процесс), реализованной на нескольких блоках Люберецких очистных сооружений (г. Москва) [7], иловая смесь перед анаэробной зоной проходит предварительную денитрификацию, благодаря чему не приносит в анаэробную зону связанных форм азота.

В третьих, межсезонные переходные условия с перепадами температур и с колебаниями состава поступающих сточных вод (например, наблюдавшееся возрастание содержания общего фосфора в конце зимы – начале весны) оказывают на биоценоз ила даже более неблагоприятное воздействие, чем не самые оптимальные, но постоянные параметры.

Технология глубокой очистки сточных вод от биогенных элементов, реализованная на МОС-2, может обеспечить следующие остаточные концентрации азот- и фосфорсодержащих веществ: по азоту общему (по Кьельдалю) – 8 мг/дм<sup>3</sup>; по нитратному азоту – 12–15 мг/дм<sup>3</sup>; по фосфору общему – 1,5–2,0 мг/дм<sup>3</sup>.

### Литература

1. Биологическое удаление из сточных вод азота и фосфора в аэротенках Минской очистной станции аэрации / Р. М. Маркевич [и др.] // Труды БГТУ. Сер. IV, Химия, технология орган. в-в и биотехнология. – 2009. – Вып. XVII. – С. 242–246.
2. Технический справочник по обработке воды: в 2 т. / Компания «Дегремон»; редкол.: М. И. Алексеев [и др.]. – СПб.: «Новый Журнал», 2007. – 2 т.
3. Жмур, Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – М.: Акварос, 2003. – 512 с.
4. Химический анализ производственных сточных вод / Ю. Ю. Лурье [и др.]. – М.: Химия, 1974. – 336 с.
5. Емельянова, И. З. Химико-технический контроль гидролизных производств / И. З. Емельянова. – М.: Лесная пром-сть, 1976. – 328 с.
6. Биологическая очистка от фосфора / Е. М. Крючихин [и др.] // Водоочистка. – 2007. – № 1. – С. 42–43.
7. Крупномасштабные сооружения биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов / Д. А. Данилович [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 10. – С. 45–51.

Поступила 26.03.2010