

Совершенствование биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора в условиях каскадной денитрификации

О. С. ДУБОВИК¹, Р. М. МАРКЕВИЧ², К. В. АНТОНОВ³

¹ Дубовик Ольга Сергеевна, ведущий инженер-технолог, Минские очистные сооружения, УП «Минскводоканал» 220088, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Пулихова, 15, тел.: +375 (17) 299-69-47, e-mail: dubovik.volha@gmail.com

² Маркевич Раиса Михайловна, кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии, Белорусский государственный технологический университет 220006, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, тел.: +375 (29) 693-33-79, e-mail: markevich@belstu.by

³ Антонов Кирилл Викторович, заместитель начальника производства «Минскочиствод», начальник ПТО, УП «Минскводоканал» 220088, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Пулихова, 15, тел.: +375 (29) 199-37-88, e-mail: antonov_kv@minskvodokanal.by

Ввиду постоянно возрастающих требований к очистке сточных вод оптимизация и интенсификация работы очистных сооружений становятся одними из приоритетных направлений. На Минской очистной станции технологическая схема биологической очистки сточных вод представлена классическими аэротенками и аэротенками с организованной в них схемой каскадной денитрификации. Основным компонентом такой схемы является отсутствие внутреннего рецикла и возможность рассредоточенного поступления осветленных сточных вод по зонам аэротенка. Это обуславливает наличие легкоокисляемых органических веществ в каждой аноксидной зоне. Ввиду увеличения концентраций загрязнений в поступающих сточных водах и ужесточения требований к их очистке интенсификация биологической стадии является важным аспектом при эксплуатации очистных сооружений. Целью исследования стала схема каскадной денитрификации

на действующих очистных сооружениях, для оптимизации которой использовались различные варианты распределения осветленных сточных вод по зонам аэротенка. Сточные воды, поступающие на каскадную денитрификацию, характеризуются недостаточным количеством органических веществ ввиду значительной доли производственных стоков. Для увеличения количества органических веществ было решено вывести из эксплуатации первичный отстойник, а также уменьшить частоту выгрузки осадка. После выбора оптимального распределения осветленных сточных вод по зонам аэротенка и увеличения нагрузки по органическим веществам эффективность удаления фосфора фосфатов повысилась с 60 до 75%, азота общего – с 61 до 67%.

Ключевые слова: сточные воды, биологическая очистка, нитрификация, каскадная денитрификация, удаление биогенных элементов, активный ил.

Для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод используют различные технологические схемы и решения. Выбор той или иной схемы в основном зависит от качественных и количественных характеристик сточных вод. Основой любой технологической схемы являются механическая и биологическая стадии очистки городских сточных вод.

Биологическая очистка от азота и фосфора осуществляется с помощью специализированного биоценоза активного ила в ходе таких процессов, как нитрификация, денитрификация, дефосфотация. Нитрификация проводится в две стадии, первоначально идет превращение азота аммонийного в азот нитритов, затем последний переходит в азот нитратов, при этом задействуются разные бактерии. Суть денитрификации заключается в превращении азота нитратов в газообразный азот. Дефосфотация

сточных вод осуществляется посредством удаления избыточного активного ила. Известен механизм повышения степени удаления фосфора из сточных вод, который получил название «жадное поглощение» фосфора [1], предполагающий за счет создания специальных условий накопление фосфора в клетках микроорганизмов до 10% от сухого вещества.

Для удовлетворительной работы той или иной технологии очистки сточных вод от биогенных элементов необходимо создать специфические условия для каждого из процессов. Так, для успешной реализации нитрификации нужны благоприятные условия окружающей среды для бактерий, участвующих в данных процессах. Это отсутствие токсикантов, поддержание оптимальной концентрации растворенного кислорода и соответствующий температурный режим. Для денитрификации,

наоборот, создаются строго аноксидные условия (т. е. зоны с отсутствием молекулярного кислорода и наличием химически связанного кислорода) при наличии легкоокисляемых органических веществ. Для реализации дефосфотации с «жадным поглощением» фосфора необходима организация чередования зон: с отсутствием кислорода и присутствием легкоокисляемых органических веществ; с наличием кислорода в растворенном или химически связанном виде.

Для биологической очистки сточных вод существуют различные технологические схемы, например, с предвключенной денитрификацией, постденитрификацией, предвключенной денитрификацией и постсимультанной нитриденитрификацией, МУСТ, А2О, JHB, DEPHA-NOX и др. [1]. Каждая схема имеет свои недостатки и преимущества, касающиеся сложности исполнения, степени удаления биогенных элементов, чувствительности к колебаниям поступающих загрязнений. Такое разнообразие технологических схем обусловлено постоянным совершенствованием, наладкой и отработкой технологических режимов. Это помогает существенно интенсифицировать процессы удаления биогенных элементов и соответственно улучшать качество очищенных сточных вод после биологической очистки, а также уменьшать эвтрофикацию водоемов, в которые сбрасываются условно очищенные стоки.

На Минской очистной станции имеются две площадки очистных сооружений, одна из них запущена в эксплуатацию в 1964 г., вторая – в 2007 г. Наряду с механической очисткой биологическая стадия на первой площадке (МОС-1) представлена классическими аэротенками-вытеснителями, которые предусматривают очистку от органических загрязнений, соединений фосфора, а также нитрификацию с параллельной частичной денитрификацией.

На второй площадке (МОС-2) реализована технология каскадной денитрификации, которая предполагает чередование аэробных и аноксидных зон при рассредоточенном поступлении сточных вод. При реализации данной системы отсутствует необходимость внутреннего рецикла. Кроме того, в технологическую схему был добавлен блок дефосфотации – анаэробный резервуар, в котором предусмотрено выделение фосфора фосфатов из клеток с последующим поступлением сточных вод в аноксидную зону, чтобы таким образом стимулировать развитие фосфатаккумулирующих микроорганизмов, обладающих повышенной внутриклеточной аккумуляцией полифосфатов. Следует отметить, что состав сточных вод двух площадок очистных сооружений различается. Например, на МОС-2 объемное соотношение поступающих производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод составляет 40:60, тогда как на МОС-1 – около 25:75.

Технологическая схема каскадной денитрификации реализована следующим образом. В первый анаэробный коридор (рис. 1) подаются возвратный активный ил после вторичных отстойников и осветленные сточные воды, после чего смесь поступает в первый денитрификатор, далее – в нитрификатор. Такое чередование повторяется три раза, при этом во второй денитрификатор и в конец второго нитрификатора подаются осветленные сточные воды. Достоинствами данной технологической схемы в сравнении с классической системой биологической очистки, реализованной на первой площадке очистных сооружений, являются уменьшение количества образующегося избыточного активного ила, меньшая чувствительность к повышенным концентрациям загрязняющих веществ в поступающих сточных водах.

После ввода в эксплуатацию МОС-2 проводилось изучение превращений соединений азота и фосфора как в классических аэротенках, так и на

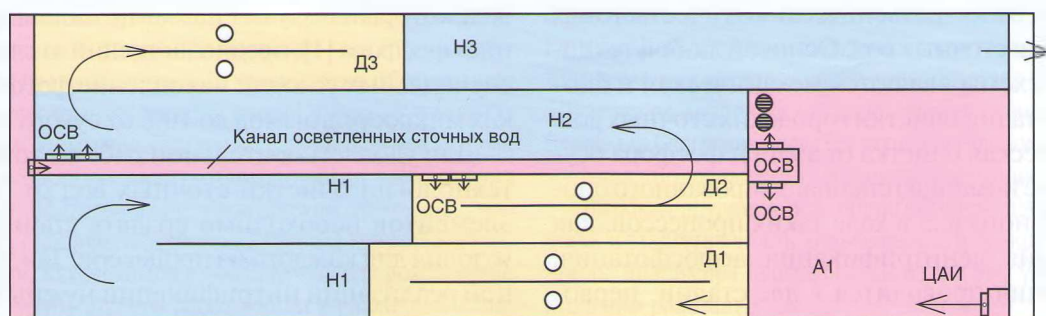


Рис. 1. Схема аэротенка биологической стадии очистки сточных вод МОС-2

ЦАИ – циркуляционный активный ил; ОСВ – осветленные сточные воды; Н1, Н2, Н3 – нитрификаторы секции аэротенка; Д1, Д2, Д3 – денитрификаторы секции аэротенка; – шиберы подачи осветленных сточных вод и циркуляционного активного ила; – мешалки

сооружениях, функционирующих в режиме каскадной денитрификации [2; 3].

Вместе с тем в последние 8–10 лет в Минске наблюдается тенденция уменьшения объема поступления сточных вод и, как следствие, увеличение концентраций загрязняющих веществ. Так, концентрация азота аммонийного, поступающего со сточными водами на первую площадку с 2005 г. до сегодняшнего дня, увеличилась практически в два раза (с 21 до 40 мг/дм³). В связи с формированием более концентрированных сточных вод проведены натурные исследования удаления биогенных элементов на действующих очистных сооружениях.

Поскольку в составе городских сточных вод чаще всего присутствует значительная доля производственных стоков, которые обычно характеризуются наличием токсикантов, а также недостаточным количеством органических веществ, эксплуатация очистных сооружений усложняется. Так, на вторую площадку поступает недостаточное количество органических веществ для оптимального протекания процессов денитрификации. Необходимое соотношение БПК₅ и азота должно быть более 3, а для обеспечения стабильного процесса – более 4 [1]. Однако по фактическим показателям сточных вод, поступающих на биологическую очистку, данное соотношение составляет 2,6 (БПК₅ 131,5 мг/дм³, азот общий 51,1 мг/дм³). Таким образом, количество органических веществ для успешной денитрификации не является оптимальным. Для решения данной проблемы существует несколько способов: уменьшение количества работающих первичных отстойников, проведение ацидофикации осадка в отстойниках. На некоторых очистных сооружениях используют дополнительный источник углерода (метанол, ацетат).

С целью изучения процессов, происходящих в зонах аэротенка, были рассмотрены различные варианты подачи осветленных сточных вод в аэро-

тенки МОС-2. В первом варианте весь объем осветленных стоков подавался в анаэробный резервуар. Во втором и третьем вариантах соотношение сточных вод, подаваемых в анаэробный резервуар, денитрификатор № 2 и в конец нитрификатора № 2, составляло 40:35:25 и 65:25:15 соответственно.

Вариант 1 подбирался с целью оптимизации удаления фосфора фосфатов, вариант 2 был заложен проектом, вариант 3 – промежуточный, для обеспечения легкоокисляемыми органическими веществами как фосфатаккумулирующих, так и денитрифицирующих микроорганизмов.

Кроме того, для улучшения удаления азота и фосфора был выведен из эксплуатации один первичный отстойник (в работе было два) ввиду низкой концентрации поступающих органических веществ в сточных водах, а также увеличен интервал между откачками сырого осадка. Осадок не удалялся полностью, поддерживался его минимальный постоянный уровень (не менее 10 см), что позволило повысить эффективность удаления фосфора фосфатов с 60 до 75%.

Исследования проводились на действующих очистных сооружениях в течение 2015–2018 годов. Отбор проб осуществлялся по ходу движения воды после каждой зоны аэротенка. Все измерения проводили колориметрическим методом: определение концентрации фосфора фосфатов основано на взаимодействии с молибдатом аммония с последующим восстановлением полученного комплекса аскорбиновой кислотой, азота аммонийного – на взаимодействии с реактивом Несслера, азота нитратов – с салициловой кислотой. Предел повторяемости (относительное значение допускаемого расхождения между двумя результатами параллельных определений, получаемых в условиях повторяемости) соответствовал характеристикам методик, по которым производились измерения.

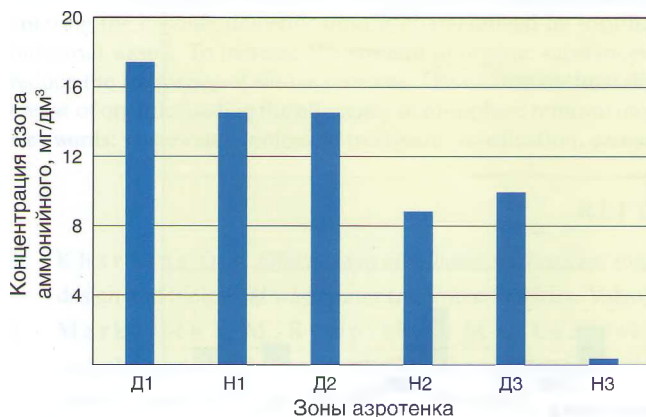


Рис. 2. Изменение концентрации азота аммонийного по зонам аэротенка при 100-процентной подаче сточных вод в анаэробную зону (вариант 1)



Рис. 3. Изменение концентрации азота аммонийного по зонам аэротенка при реализации варианта 2

При отсутствии рассредоточенного поступления осветленных сточных вод (100% в анаэробный резервуар) основное удаление азота аммонийного наблюдалось в нитрификаторе № 3 (рис. 2).

Что касается удаления азота аммонийного по вариантам 2 и 3, четко отследить удаление по зонам невозможно, так как его дополнительное количество добавляется совместно с осветленными сточными водами, которые подаются в денитрификатор № 2 и в конец нитрификатора № 2. На рис. 3 приведена динамика изменения содержания азота аммонийного в данных зонах аэротенка.

При реализации рассредоточенной подачи сточных вод удаление фосфора фосфатов отличается от варианта 1 (рис. 4). Однако степень его удаления достаточно высока во всех вариантах, что обусловлено оптимальным соотношением БПК₅ и общего фосфора 20:1 (по состоянию на 2017 г. 23:1). Что касается формирования фосфатаккумулирующей способности активного ила, то она почти не отличается от таковой для первой площадки очистных сооружений, где отсутствуют специализированные зоны для формирования «жадно поглощающего» фосфор активного ила. Однако при 100-процентной подаче сточных вод в анаэробный резервуар наблюдалось увеличение содержания фосфора фосфатов с 3,24 до 13,5 мг/дм³. Это максимальное значение, которое удавалось достичь (при реализации механизма удаления фосфора назначение данной зоны — высвобождение ортофосфатов в окружающую среду). Содержание фосфора фосфатов в сравнении с поступающим в среднем увеличилось в 1,5–2 раза. При рассредоточенном поступлении сточных вод концентрация фосфора фосфатов после анаэробной зоны увеличивалась лишь в 1,5 раза (максимально). Следует отметить, что концентрация фосфора общего, поступающе-

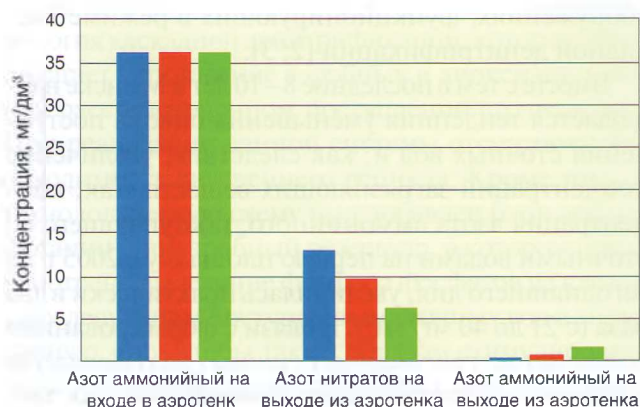


Рис. 5. Удаление азота аммонийного и азота нитратов при реализации разных вариантов подачи сточных вод
■ вариант 1; ■ вариант 2; ■ вариант 3

го на биологическую очистку в составе сточных вод, составляет 5,56 мг/дм³. С учетом того, что массовое содержание фосфора составляет до 3% массы сухого вещества клетки [1], весь фосфор, поступающий на вторую площадку, может быть удален с избыточным активным илом без создания специальных условий для развития фосфатаккумулирующих бактерий.

Недостаточное количество органических веществ при реализации каскадной денитрификации для различных вариантов подачи осветленных сточных вод влияет на эффективность удаления азота нитратов. Следует отметить, что при организации рассредоточенной подачи сточных вод удаление азота нитратов происходит эффективнее (рис. 5), что логично, так как в каждую зону денитрификации поступает большее количество органических веществ. Однако реализация рассредоточенного поступления сточных вод не обеспечивает существенного удаления азота нитратов: для варианта 2 на выходе из аэротенка содержание

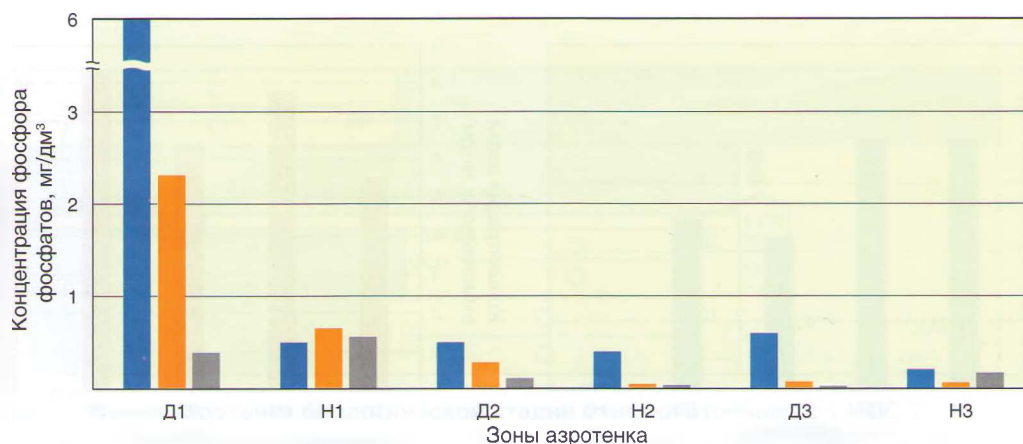


Рис. 4. Удаление фосфора фосфатов при реализации различных вариантов подачи сточных вод
■ вариант 1; ■ вариант 2; ■ вариант 3

азота нитратов составляет 9,7 мг/дм³, для варианта 3 — 6,3 мг/дм³, в то время как в первом варианте данная величина составляла 12,8 мг/дм³.

Выводы

Результаты исследований свидетельствуют о том, что удовлетворительное удаление азота нитратов из сточных вод при разных вариантах реализации технологии каскадной денитрификации полностью зависит от обеспечения требуемой концентрации легкоокисляемых органических соединений. Увеличение их содержания в зонах денитрификации за счет перераспределения подаваемого потока осветленных сточных вод позволило повысить эффективность удаления азота общего с 61 до 67%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харькина О. В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод. — Волгоград: Панорама, 2015. 433 с.
2. Маркевич Р. М., Рымовская М. В., Лазовская О. И., Холодинская Н. В. Биологическое удаление из сточных вод азота и фосфора в аэротенках Минской очистной станции аэрации // Труды БГТУ. 2009. Серия I. Вып. XVII. С. 242–246.
3. Маркевич Р. М., Рымовская М. В., Лазовская О. И., Дзюба И. П., Флюрик Е. А., Гребенчикова И. А. Влияние параметров функционирования аэротенков на протекание нитри-, денитрификации и биологической дефосфотации // Труды БГТУ. 2010. Серия IV. Вып. XVIII. С. 302–305.

Improvement of biological removal of nitrogen and phosphorus compounds from wastewater under the conditions of cascade denitrification

O. S. DUBOVIK¹, R. M. MARKEVICH², K. V. ANTONOV³

¹ Dubovik Ol'ga Sergeevna, Leading Process Engineer, Minsk Treatment Facilities, «Minskvodokanal» UE
15 Pulikhova St., 220088, Minsk, Republic of Belarus, tel.: +375 (17) 299-69-47, e-mail: dubovik.volha@gmail.com

² Markevich Raisa Mikhailovna, Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Department of Biotechnology,
Belarusian State Technological University
13a Sverdlova St., 220006, Minsk, Republic of Belarus, tel.: +375 (29) 693-33-79, e-mail: markevich@belstu.by

³ Antonov Kirill Viktorovich, Deputy Head of «Minskochistvod» Works, Head of Production and Technical Department,
«Minskvodokanal» UE
15 Pulikhova St., 220088, Minsk, Republic of Belarus, tel.: +375 (29) 199-37-88, e-mail: antonov_kv@minskvodokanal.by

In view of ever toughening requirements to wastewater treatment the optimization and intensification of wastewater treatment facilities operation become priority areas. The flow process scheme of wastewater biological treatment at the Minsk Wastewater Treatment Plant is represented by traditional aeration tanks and aeration tanks with organized cascade denitrification scheme. The main component of this scheme is the lack of inner recycle and possibility of dispersed inflow of clarified wastewater over the aeration tank zones. This provides for the presence of easily oxidizable organic substances in every anoxic zone. In view of building-up of pollutants in incoming wastewater and toughening the requirements to their removal the intensification of the biological stage has been an important aspect of the treatment facilities operation. The research objective was the scheme of cascade denitrification at the operating treatment facilities for the optimization of which different options of clarified wastewater distribution over the aeration tank zones were used. Wastewater entering the cascade denitrification is characterized by insufficient quantity of organic substances because a significant amount of industrial wastes. To increase the amount of organic substances it was decided to take out of service the primary settling tank and to reduce the frequency of sludge removal. The chosen optimal distribution of clarified wastewater over the aeration tank zones and increase of organic loading the efficiency of phosphate removal increased from 60 to 70%; and that of nitrogen removal — from 61 to 67%.
Key words: wastewater, biological treatment, nitrification, cascade denitrification, nutrients removal, activated sludge.

REFERENCES

1. Khar'kina O. V. *Effektivnaya ekspluatatsiya i raschet sooruzheniy biologicheskoy ochistki stochnykh vod* [Efficient operation and design and biological wastewater treatment facilities. Volgograd, Panorama Publ., 2015. 433 p.].
2. Markevich R. M., Rymovskaia M. V., Lazovskaia O. I., Kholodinskaia N. V. [Biological removal of nitrogen and phosphorus from wastewater in the aeration tanks of the Minsk Wastewater Treatment Plant]. *Proceedings of BSTU*, 2009, series 1, issue XVII, pp. 242–246. (In Russian).
3. Markevich R. M., Rymovskaia M. V., Lazovskaia O. I., Dziuba I. P., Fliurik E. A., Grebenchikova I. A. [Effect of the parameters of aeration tanks operation on nitrification, denitrification and biological dephosphorization behavior]. *Proceedings of BSTU*, 2010, series IV, issue XVIII, pp. 302–305. (In Russian).