



УДК 628.35

А. Л. ВАСИЛЬЕВ¹, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой водоснабжения, водоотведения, инженерной экологии и химии; **С. М. ГУСЕЙНОВА¹**, ст. преп. кафедры водоснабжения, водоотведения, инженерной экологии и химии; **С. А. ЛУКОВ²**, гл. инженер; **Т. Л. БОРОВКОВА²**, ведущий инж.-технолог

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА И ФОСФОРА

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-87; эл. почта: k_viv@nngasu.ru

²АО «Нижегородский водоканал»

Россия, 603000, г. Н. Новгород, ул. Керченская, 15а. Тел.: (831) 246-99-77; эл. почта: info@vodokanal-nn.ru

Ключевые слова: сточные воды, биологическая очистка, иловые воды, возвратные воды, фугат, фильтрат, биогенные вещества.

Рассматривается проблема загрязнения водных объектов сточными водами, проведен анализ эффективности биологической очистки городских сточных вод и выявлены основные источники насыщения сточных вод внутриплощадочной канализации биогенными элементами; рассмотрены наиболее перспективные методы очистки возвратных потоков.

Вследствие роста темпов урбанизации и увеличения масштабов хозяйственной деятельности человека возрастает и уровень антропогенного воздействия на водные объекты. Анализ статистической информации и данных государственных докладов позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на сокращение объемов сброса загрязненных сточных вод, улучшения качества воды в поверхностных водных объектах в целом по стране не наблюдается. Вода большинства поверхностных водных объектов РФ, на которых проводятся наблюдения, оценивается как «загрязненная» (3 класс качества воды) [1, 2, 3].

По данным за 2021 г. и 2022 г. по аммонийному и нитритному азоту в водных объектах на территории России наблюдались превышения ПДК в 10, 30 и 50 раз, что свидетельствует о высоком уровне загрязненности воды по данным веществам [1, 2]. Согласно данным за последние несколько лет, в поверхностных водоемах на территории страны также наблюдались превышения по фосфору фосфатов до 10 ПДК [1, 2].

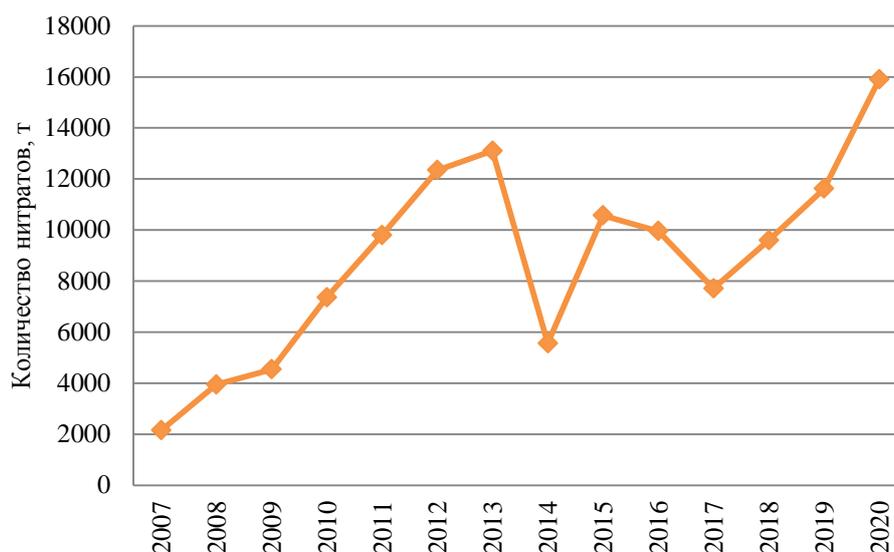


Рис. 1. Динамика поступления нитратов со сточными водами в водоемы по Нижегородской области за 2007–2020 гг.

В Нижегородской области объем сброса сточных вод за последние 9 лет сократился почти на 35 %. Отчасти это обусловлено внедрением ресурсосберегающих технологий на предприятиях, а также механизмами регулирования водопотребления населением. Однако, как известно, сокращение объемов сточных вод зачастую сопряжено с повышением концентрации в них загрязняющих веществ.

По данным экологического мониторинга в бассейне р. Оки и р. Волги вода относится к классу «загрязненная» и «грязная». Наблюдаются высокие (1-2 ПДК) концентрации азота аммонийного, в некоторых притоках периодически фиксируется содержание фосфора фосфатов в концентрациях на верхних границах ПДК.

Наличие в природной воде биогенных элементов, таких как фосфор и азот, в высоких концентрациях может способствовать быстрому и повсеместному распространению отдельных представителей фитопланктона, вызывающих «цветение» воды и ускорять процесс эвтрофикации водного объекта.

В связи с этим важное значение имеет вопрос обеспечения эффективной очистки образующихся сточных вод, сброс которых осуществляется в поверхностные водотоки. Наиболее распространенным методом очистки хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод на городских очистных сооружениях является биологическая очистка.

Одним из основных источников поступления соединений азота и фосфора в поверхностные водные объекты является сброс промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод. Таким образом, актуальной на сегодняшний день является задача повышения эффективности очистки от указанных биогенных элементов сбрасываемых в водоемы сточных вод.

Известные на сегодняшний день методы удаления азота можно разделить на биологические и физико-химические. В области очистки городских сточных вод на практике наибольшее распространение получили биологические методы удаления азота, так как они более экологичные (за счет отсутствия вторичных



загрязнений, образующихся после применения коагулянтов и т. д.) и не требуют добавления реагентов.

Традиционным методом очистки сточных вод от соединений азота в технологических схемах биологической очистки является нитри-денитрификация. В процессе нитрификации аммонийный азот окисляется бактериями сначала до нитритов, затем до нитратов. Денитрифицирующие бактерии восстанавливают азот нитратов до свободного азота. Недостатком данного метода являются дополнительные затраты на обеспечение аэрации, а также потребность в высоком содержании органического вещества и необходимость внесения источников углерода.

Помимо изученных на протяжении многих лет и повсеместно внедренных на очистных сооружениях традиционных методов очистки, в последние годы разрабатываются и апробируются новые технологии удаления биогенных элементов.

К таким технологиям можно отнести аннамокс и удаление азота и фосфора осаждением струвита.

Аннамокс – это процесс окисления аммония нитритом с образованием молекулярного азота, осуществляемый автотрофными анаэробными аннамокс-бактериями, которые впервые были открыты всего 20 лет назад [4].

Необходимо отметить, что сооружения очистки стоков от соединений азота и фосфора могут быть внедрены в технологическую схему как на этапах биологической очистки (для избавления от биогенных веществ в поступающих на сооружения городских сточных водах), так и обособленно в виде локальных сооружений после участков образования иловых вод. Например, местами насыщения сточных вод фосфором и азотом могут быть участки механического обезвоживания осадка, где в центрифугах или в фильтр-прессах происходит механическое разрушение частиц осадка и живых бактерий и, как следствие, обогащение фугата или фильтрата фосфором и азотом, которые возвращаются в начало очистных сооружений.

Для очистки стоков с низким содержанием азота и достаточно высокой концентрацией органики, таких как городские сточные воды, традиционного метода нитри-денитрификации будет достаточно. Однако для вод с высокими концентрациями азота и низким содержанием органических веществ нитри-денитрификация не эффективна и здесь может применяться технология аннамокс. Таким образом, аннамокс-процесс является наиболее перспективным и эффективным способом удаления аммония из сточных вод, содержащих высокие концентрации азота и низкие концентрации органического вещества.

Методы удаления из сточных вод фосфатов можно разделить на биологические, химические и физико-химические.

Биологический метод основан на поглощении микроорганизмами рода *Acinetobacter* большого количества фосфора для синтеза клеток. Данный метод является наиболее экологичным, однако имеет низкую эффективность (менее 70 %) и требует периодических рециклов [5].

Из физико-химических методов можно выделить адсорбционный метод, при котором фосфор адсорбируется на поверхности сорбента, и метод кристаллизации, при котором в сточных водах выращиваются кристаллы фосфатов с последующим их удалением из системы.



Среди химических методов на очистных сооружениях канализации наиболее распространен реагентный метод удаления фосфатов. В качестве реагентов применяются соли металлов. Большое распространение получил комбинированный метод, сочетающий биологическое изъятие фосфора и осаждение коагулянтами, так как благодаря такому сочетанию можно достичь наибольшего процента извлечения фосфора из жидкости. Однако в результате применения реагентов наблюдается вторичное загрязнение ионами металлов и др. соединениями. Также к недостаткам этих методов можно отнести финансовые затраты на реагенты.

Перспективы применения перечисленных выше методов удаления фосфора и азота были рассмотрены на примере Нижегородской станции аэрации – комплекса сооружений, предназначенных для полной биологической очистки сточных вод г. Н. Новгорода и г. Бора.

Общая производительность сооружений, занимающих площадь 270 га, составляет 1200,0 тыс. м³ в сутки. Среднесуточный расход сточных вод в настоящее время составляет около 770 тыс. м³. На станции осуществляется полная биологическая очистка, включающая следующие основные этапы: механическую очистку, непосредственно биологическую очистку и обработку осадков.

В 2019 году на станции была завершена вторая очередь модернизации аэротенков, в ходе которой было установлено оборудование для обеспечения процессов нитрификации и денитрификации с целью удаления аммонийного азота.

В данной работе было проанализировано изменение концентрации соединений фосфора и азота на входе и выходе сооружений очистки, а также на промежуточных этапах очистки (табл. 1).

Таблица 1

Изменение концентрации соединений фосфора и азота на разных этапах очистки сточных вод

Место отбора пробы воды	Фосфат-ион (PO ₄) мг/дм ³	Аммоний-ион, мг/дм ³	Нитрит - ион, мг/дм ³	Нитрат - ион, мг/дм ³
Общий поток	10,2	38,9	0,138	0,53
Осветленная вода I очереди (вода после первичных отстойников)	11,0	41	<0,02	0,41
Осветленная вода II очереди (вода после первичных отстойников)	10,7	39,7	<0,02	0,45
Очищенная вода I очереди (после биологической очистки)	1,23	2,95	0,439	46,3
Очищенная вода II очереди (после биологической очистки)	4,13	5,09	0,451	67,5
Выпуск в водоем	2,46	3,95	0,440	55,8

В ИТС 10-2019 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов», приведены характерные диапазоны концентраций загрязнений сточных вод (табл. 2).



Таблица 2

Характерные диапазоны концентраций загрязнений в сточных водах

Загрязняющие вещества	Диапазоны загрязненности сточных вод		
	Низко концентрированные сточные воды	Средне концентрированные сточные воды	Высоко концентрированные сточные воды
БПК ₅	менее 130	(130–230)	свыше 230
ХПК	менее 300	(300–600)	свыше 600
Аммонийный азот	менее 25	(25–35)	свыше 35

По данным табл. 2, сточные воды, поступающие на очистку, можно считать средне концентрированными по таким показателям, как: БПК₅; ХПК; ион аммония.

Таким образом, концентрация фосфат-иона в процессе очистки снижается в 4 раза, а аммоний-иона – почти в 10 раз. Однако в сбрасываемых в водоем очищенных стоках увеличена концентрация нитрат-иона (более, чем в 100 раз по сравнению с концентрацией в поступающих на станцию неочищенных стоках). Это может быть обусловлено процессами нитрификации, в результате которых азот аммонийный превращается в азот нитратов.

Наглядно эту трансформацию азота из одного соединения в другое можно наблюдать на рис. 2.

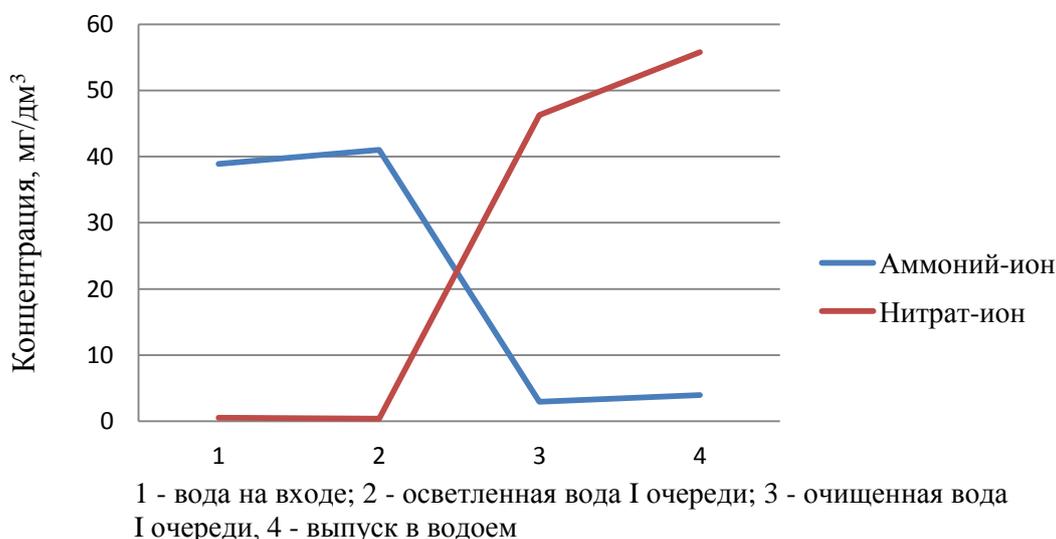


Рис. 2. Изменение концентрации соединений фосфора и азота на разных этапах очистки сточных вод на Нижегородской станции аэрации (на примере сооружений I очереди)

В случае стабильного функционирования сооружений нитриденитрификации эта проблема, скорее всего, будет решена, так как денитрифицирующие бактерии восстанавливают азот нитратов до свободного азота, который удаляется в атмосферу. Следовательно, в пробах воды на выпуске в водоем концентрация азота нитратов значительно уменьшится.



По характеристике фильтрата, после механического обезвоживания осадка сточных вод, представленной в табл. 3, и по данным табл. 2 можно судить о степени его загрязнения. Фильтрат в таком случае является высококонцентрированным по показателю аммоний-ион. В связи с этим даже с учетом разбавления основным потоком сточных вод обеспечивается дополнительная нагрузка на очистные сооружения.

Таблица 3

**Результат количественного анализа сточных вод
(место отбора проб: канал дренажных вод на участке механического
обезвоживания осадка)**

Показатель	Фильтрат	
	Результат	Погрешность
Взвешенные вещества, мг/дм ³	140	±10
Сухой остаток, мг/дм ³	566	±51
ХПК, мг/дм ³	256	±51
БПК ₅ мгО ₂ /дм ³	42,5	±6,0
Ион-аммония, мг/дм ³	213	±51
Нитрит-ион, мг/дм ³	0,128	±0,018
Нитрат-ион, мг/дм ³	2,62	±0,78

Установлено, что в возврат иловых вод в голову очистных сооружений увеличивает нагрузку на них по взвешенным веществам, азоту и фосфору, что способствует недостаточно эффективной очистке сточных вод.

Установлено, что на рассматриваемых очистных сооружениях местом образования наиболее высококонцентрированных по азоту и фосфору возвратных потоков является участок механического обезвоживания осадка.

Таким образом, нерешенной остается задача очистки от фосфора и азота высококонцентрированных возвратных потоков, таких, например, как иловая вода после сбраживания осадка в метантенках или фильтрат после обезвоживания осадка.

Для локальной очистки возвратных потоков на станции аэрации можно применить методы реагентного осаждения фосфора, а также частичную денитрификацию и аннамокс для удаления азота. Именно эти технологии в перспективе могут позволить решить проблему увеличения нагрузки на очистные сооружения по фосфору и азоту от возвратных потоков.

Для подбора наиболее эффективного метода необходимо провести соответствующие расчеты и технико-экономическое обоснование.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2021 / редактор М. М. Трофимчук. – Ростов-на-Дону : Гидрохимический институт : Росгидромет, 2022. – URL: <https://gidrohim.com/node/2796>. – Текст : электронный.



2. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2022 / редактор М. М. Трофимчук. – Ростов-на-Дону : Гидрохимический институт : Росгидромет, 2023. – URL: <https://gidrohim.com/node/2803>. – Текст : электронный.

3. Окружающая среда. Водные ресурсы. – Текст : электронный // Федеральная служба государственной статистики : сайт. – URL: <https://www.gks.ru/folder/11194>.

4. Аннамокс-бактерии в природе и экобиотехнологии : монография / А. Н. Ножевникова, Ю. В. Литти, Е. А. Бочкова, Г. М. Зубов ; под редакцией А. Н. Ножевниковой. – Москва : Университетская книга, 2017. – 280 с. : ил. – ISBN 978-5-98699-241-9. – Текст : непосредственный.

5. Матюшенко, Е. Н. Удаление фосфора из возвратных потоков площадки очистных сооружений канализации / Е. Н. Матюшенко. – Текст : непосредственный // Вода и экология : проблемы и решения. – Новосибирск, 2019. – № 2 (78). – С. 40–49.

VASILEV Aleksey Lvovich¹, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of water supply, sewage, engineering ecology and chemistry; GUSEYNOVA Sayad Mukhtarovna¹, senior teacher of the chair of water supply, sewage, engineering ecology and chemistry; LUKOV Sergey Aleksanrovich², chief engineer; BOROVKOVA Tatyana Leonidovna², leading process engineer

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF BIOLOGICAL TREATMENT OF MUNICIPAL WASTEWATER FROM NITROGEN AND PHOSPHORUS COMPOUNDS

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: +7 (831) 430-54-87;
e-mail: k_viv@nngasu.ru

²JSC "Nizhny Novgorod Vodokanal".
15A, Kerchenskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: (831) 246-99-77;
e-mail: info@vodokanal-nn.ru

Key words: wastewater, biological treatment, silt water, return water, fugate, filtrate, biogenic substances.

The article discusses the problem of contamination of water bodies by waste waters; analysis of the efficiency of biological treatment of urban wastewater was carried out and the main sources of saturation of wastewater of the on-site sewage system with biogenic elements were identified; the most promising methods of cleaning return flows are considered.

REFERENCES

1. Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiyskoy Federatsii [Quality of surface waters of the Russian Federation]. Ezhegodnik 2021 / red. M. M. Trofimchuk. – Rostov-on-Don, Gidrokhimicheskiy institute, Rosgidromet. – 2022. – URL: <https://gidrohim.com/node/2796>.

2. Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiyskoy Federatsii [Quality of surface waters of the Russian Federation]. Ezhegodnik 2022 / red. M. M. Trofimchuk. – Rostov-on-Don, Gidrokhimicheskiy institute, Rosgidromet. – 2023. – URL: <https://gidrohim.com/node/2803>.

3. Okruzhayushchaya sreda. Vodnye resursy [The environment. Water resources]. Federalnaya sluzhba gos. statistiki : sayt. – URL: <https://www.gks.ru/folder/11194>. – Tekst: elektronnyj.

4. Nozhevnikova A. N., Litti Yu.V., Bochkova E. A., Zubov G. M. Annamoks-bakterii v prirode i ekobiotekhnologii [Annamox bacteria in nature and ecobiotechnology] :



monografiya ; pod red. A. N. Nozhevnikovoy. – Moscow : Universitetskaya kniga, 2017. – 280 p.; il. – ISBN 978-5-98699-241-9.

5. Matyushenko E. N. Uдалenie fosfora iz vozvratnykh potokov ploshchadki oчитnykh sooruzheniy kanalizatsii [Removal of phosphorus from return flows of the sewage treatment plant site]/ Voda i ekologiya: problemy i resheniya [Water and ecology: problems and solutions]. – Novosibirsk, 2019. – № 2 (78). – P. 40–49.

© А. Л. Васильев, С. М. Гусейнова, С. А. Луков, Т. Л. Боровкова, 2024

Получено: 01.02.2024 г.