

УДК 628.316.12:546.18

**В. Н. ЧЕРНЫШЕВ, Е. А. ЩЁКОВ**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЙ УДАЛЕНИЯ ФОСФОРА ИЗ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД**

**Аннотация.** В статье описаны основные методы удаления фосфора из городских сточных вод, такие как реагентный, химико-биологический и биологический. Рассмотрены виды реагентов, применяемых в реагентном и химико-биологическом методе для удаления фосфора, определены их дозы и эффективность применения. Описан процесс удаления фосфора при помощи биологических технологий микробиологических схем за счет чередования анаэробной среды с аэробной. Описано применение специальных микроорганизмов *Acinetobacter* в биологическом методе очистки, а также рассмотрен процесс культивирования данных микроорганизмов в активном иле. Приводится эффективность удаления, а также остаточные концентрации соединений фосфора в жидкости. Указаны достоинства и недостатки методов. Дана оценка технологиям удаления фосфора из городских сточных вод. Приведено экономическое сравнение применения реагентного и биологического методов.

**Ключевые слова:** эвтрофикация, реагентный метод, химико-биологический метод, биологический метод, реагенты, ортофосфаты, фосфор, *acinetobacter*, биореактор.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Внедрение технологий удаления фосфора является одной из основных задач для предотвращения эвтрофикации водоемов. Для удаления фосфора из городских сточных вод требуется применение методов, отвечающих требованиям высокой эффективности удаления фосфора и экономичности в применении.

### **ЦЕЛИ**

Проанализировать имеющиеся методы очистки городских сточных вод от фосфора, дать экономическое сравнение основных методов очистки сточных вод от соединений фосфора, выбрать наиболее рациональный метод очистки, отвечающий биологическим и экономическим показателям.

### **ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

Удаление фосфора из сточных вод производится для предотвращения эвтрофикации водоема, куда сбрасываются очищенные стоки.

Основными методами для удаления соединений фосфора является реагентный, химико-биологический и биологический методы [1].

В настоящее время наиболее распространенный в применении является реагентный метод. Реагентный метод основан на превращении растворимых ортофосфатов в нерастворимые формы, при этом в качестве реагентов используют соли алюминия и железа, в некоторых случаях может применяться известь. Полнота осаждения фосфатов зависит от рН. При применении  $Fe^{3+}$  для осаждения фосфатов оптимальная величина рН должна быть 4,5–5,0. Однако достаточно высокая степень удаления фосфора может быть обеспечена при более высоком рН. При использовании  $Fe^{2+}$  оптимальное значение рН равно 7–8 [2]. Введение реагентов может осуществляться перед первичными отстойниками или после вторичных отстойников [3].

Эффективность удаления фосфора при введении реагента перед первичными отстойниками может составить до 80 % [4], кроме того, за счет процессов коагуляции одновременно наблюдается увеличение эффективности удаления взвешенных веществ. Остаточные концентрации фосфатов при этом могут снижаться до 1 мг/л. Необходимые дозы реагентов по  $\text{Fe}^{3+}$  или  $\text{Al}^{3+}$  должны составлять 6–9 г/м<sup>3</sup> [4].

При введении реагентов в сточные воды после вторичного отстаивания, эффективность удаления фосфора достигает 75–80 %, если содержание взвешенных веществ находится в пределах 10–15 мг/дм<sup>3</sup>. При этом дозы реагентов составляют 20–25 мг/дм<sup>3</sup> по  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , или 15–17 мг/дм<sup>3</sup> по  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а остаточные концентрации фосфатов снижаются до 0,6 мг/л. Более высокое содержание взвешенных веществ (30 – 36 мг/дм<sup>3</sup>) уменьшает эффект удаления до 55–60 % при тех же дозах реагента [5].

Следует заметить, что после обработки реагентами нерастворимые соединения фосфора находятся в высокодисперсном состоянии. Для эффективного осаждения фосфора дозу реагента необходимо увеличивать по сравнению с дозой вычисленной по стехиометрическим уравнениям реакции в 1,3–1,5 раза [2].

Образующиеся нерастворимые соединения фосфора удаляют отстаиванием или фильтрованием, для повышения эффективности удаления могут быть использованы последовательно отстаивание с фильтрованием. Это дает возможность повысить эффективность до 90 % [5].

Известь в качестве реагента применяется крайне редко ввиду того, что при добавлении извести реакция должна проходить при  $\text{pH} = 11$ , при этом требуется увеличение расходов реагента для полноценной реакции. Высокая щелочность требует в дальнейшем обработки путем нейтрализации.

Химико-биологический метод основан на сочетании реагентного метода с биологической очисткой сточных вод. Этот метод позволяет добиться более высокого качества очистки сточных вод от фосфора, эффективность удаления при этом достигает 90 % [5]. При этом методе введение реагента может осуществляться перед вторичными отстойниками в рециркулирующую иловую смесь или аэротенки.

При введении реагента перед вторичными отстойниками концентрация фосфатов в сточной жидкости после отстаивания падает до 0,2–0,3 мг/л, доза реагентов при этом составляют 2–4 г/м<sup>3</sup>, что достигается за счет процессов образования нерастворимых ортофосфатов и адгезии на хлопьях ила. При низком содержании в сточных водах фосфора увеличивается доля реагента идущего на реакцию с  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , поэтому приходится значительно увеличивать дозу для связывания конкурирующих анионов. Установлено, что повышение дозы против необходимого количества для связывания достигает превышения в 2–4 раза [4]. Кроме того, увеличение дозы реагента приводит к выносу избытка алюминия и железа с очищенной водой, что может привести к повышению концентраций этих ионов выше ПДК. Это требует повышенного контроля за дозированием и концентрацией реагента.

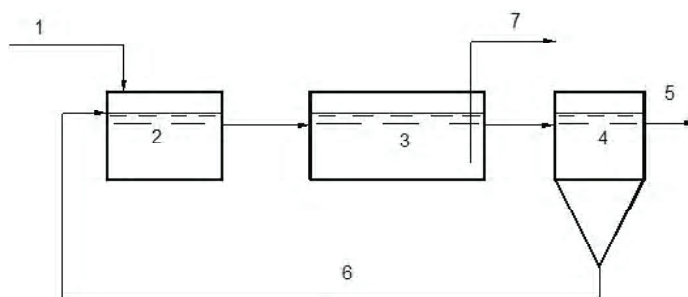
Введение реагента в рециркулирующую иловую смесь или непосредственно в аэротенки позволяет за счет благоприятной гидродинамики смешения реагента и фосфора сточных вод и значительной продолжительности их контакта эффективно обеспечивать использование реагента и получать достаточно высокое качество очищенной воды [3]. Доза реагентов при таком способе подачи в сточную воду составляет 1,5–2,5 г/м<sup>3</sup> по  $\text{Fe}^{3+}$ , зависит от щелочности воды и содержания фосфора [2], остаточные концентрации фосфатов в сточной воде составляют 0,1 мг/л [5].

Химико-биологический метод обладает существенными преимуществами перед реагентным методом за счет меньших доз и более высокой эффективности удаления фосфора. Недостатки химико-биологического метода удаления фосфора связаны с загрязнением активного ила и очищенных сточных вод соединениями металлов железа и алюминия, а применение реагентов снижает экономичность данного метода.

Таким образом, общими недостатками реагентного и химико-биологического метода является применение реагентов, которые приводят к значительным экономическим затратам, удорожая себестоимость очистки сточных вод от фосфора.

Рассмотренные недостатки реагентного и химико-биологического метода привели к поиску безреагентной технологии удаления фосфора, к которой относится биологический метод. Технологическая схема биологического удаления фосфора из сточных вод приведена на рис. 1.

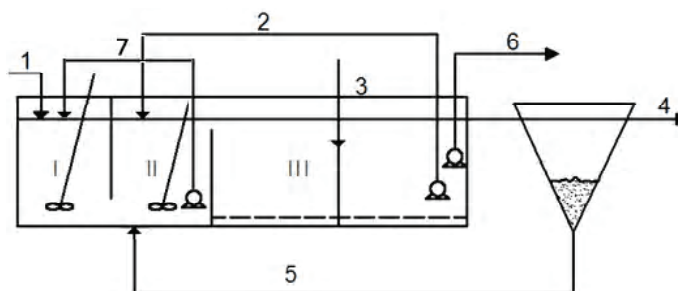
Биологический метод основан на генерации в активном иле микроорганизмов с повышенным потреблением ионов фосфора. К таким микроорганизмам относятся бактерии *Acinetobacter* [5]. Известно, что такие микроорганизмы потребляют фосфора в три раза больше, чем обычный активный ил. Если активный ил обычных аэротенков содержит в своем составе 0,011–0,013 мг на 1 мг сухого вещества, то активный ил, культивируемый для удаления фосфора, содержит уже 0,033–0,035 мг фосфора на 1 мг сухого вещества.



**Рисунок 1** – Схема биологического удаления фосфора из сточных вод: 1 – сточные воды на очистку; 2 – анаэробный биореактор; 3 – аэротенк; 4 – вторичный отстойник; 5 – очищенные сточные воды; 6 – рециркулирующий активный ил; 7 – избыточный активный ил.

Такие условия создаются в биореакторах, куда поступают неочищенные сточные воды. В результате анаэробного брожения образуются легкоокисляемые простые органические вещества, используемые бактериями *Acinetobacter* в качестве питательных веществ. При пищеварении из клеток микроорганизмов в сточные воды выделяются ортофосфаты, при дальнейшем поступлении иловой смеси из анаэробного биореактора в аэротенк фосфаты интенсивно поглощаются микроорганизмами, при этом количество фосфора в клетках восстанавливается, а дополнительное количество фосфатов в процессе анаболизма расходуется на прирост биомассы активного ила. В результате удаления избыточного активного ила обеспечивается и удаление фосфора. Эффект биологического удаления фосфора может составить до 70 %, а содержание фосфора в очищенной воде снижается до 1,0–1,5 мг/л [6].

Зачастую возникает необходимость одновременно из сточных вод удалять азот и фосфор. Далее представлена простая схема удаления соединений азота вместе с соединением фосфора (рис. 2).



**Рисунок 2** – Технологическая схема биологического удаления соединений азота и фосфора из сточных вод: I – анаэробная зона; II – аноксидная зона; III – аэробная зона; 1 – поступающая сточная вода; 2 – иловая смесь, содержащая нитраты; 3 – сжатый воздух; 4 – очищенная сточная вода; 5 – рециркулирующий активный ил; 6 – избыточный активный ил; 7 – аноксидный рецикл.

Представленная схема очистки сточных вод от соединений азота и фосфора имеет эффективность очистки 80–85 %, с содержанием в очищенной воде общего азота менее 10 мг/л и общего фосфора менее 1,5 мг/л [6].

Повысить эффективность удаления фосфора возможно также за счет использования ступенчатой технологической схемы. Разделение анаэробных, аноксидных и аэробных секций на отсеки позволяет добиться очистки сточных вод от фосфора до 0,6 мг/л [7].

Отсутствие реагентов в биологическом методе удаления фосфора делает этот метод более экономичным по сравнению с вышерассмотренными методами, при этом не загрязняются сточные воды и осадками ионов железа и алюминия. Однако в технологических схемах биологического удаления фосфора отсутствуют параметры работы отдельных сооружений, например анаэробного биореактора, и не рассмотрены вопросы дальнейшей обработки осадков и их утилизации.

Следует также отметить, что при биологическом удалении фосфора иловый индекс имеет высокие значения, что свидетельствует о низких седиментационных свойствах ила требующих увеличения размеров вторичных отстойников.

Для подтверждения экономической эффективности биологического метода удаления фосфора выполнено технико-экономическое сравнение вариантов реагентного и биологического методов.

Сравнение проводилось для производительности сооружений 10 000 м<sup>3</sup>/сут и следующих показателей состава сточных вод: по взвешенным веществам – 250 мг/л; по БПК<sub>полн</sub> – 220 мгО<sub>2</sub>/л; по фосфору – 8 мг/л. Очищенные сточные воды сбрасывают в водоем для централизованного водоснабжения I категории, ПДК фосфора в таком водоеме составляет 1,2 мг/л. По условиям расчета принято содержание фосфора в очищенных сточных водах 1 мг/л. Расчеты показывают, что приведенные затраты реагентного метода составили 18 897,6 тыс. руб, приведенные затраты биологического метода составили 10 386,34 тыс. руб. На основании данных по приведенным затратам, сравнительная экономическая эффективность составляет 8 511,26 тыс. руб. Данное сравнение показывает целесообразность применения в экономических целях для очистки от фосфора биологического метода.

## ВЫВОД

В условиях сброса в водоемы централизованного водоснабжения биологический метод экономичнее в эксплуатации и экологичнее для природы и окружающей среды, чем реагентный и химико-биологический методы, но требует дополнительных исследований. До настоящего времени отсутствуют рекомендации по продолжительности обработки рециркулирующего ила в смеси в анаэробном биореакторе. Не разработана технология обработки избыточного активного ила, исключая поступление с иловой водой фосфора, при обычных технологиях стабилизации, исключая возврат фосфора в сточную воду. Однако, если рассматривать со стороны качества очистки сточных вод, для рыбохозяйственных водоемов более целесообразно использовать химико-биологический метод, позволяющий извлекать фосфор до величин, близких к ПДК.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов, Д. В. Удаление фосфора из сточных вод [Текст] / Д. В. Анисимов // Экология производства. – 2012. – № 5. – С. 84–87.
2. Канализация населенных мест и промышленных предприятий [Текст] : справ. проектировщика / Н. И. Лихачев, И. И. Ларин и др. ; под общ. ред. В. Н. Самохина. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 1981. – 639 с.
3. Харькина, О. В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод [Текст] / О. В. Харькина. – Волгоград : Панорама, 2015. – 433 с.
4. Мишуков, Б. Г. Очистка городских сточных вод [Текст] : курс лекций / Б. Г. Мишуков, С. Ю. Игнатчик, В. С. Игнатчик ; С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т. – СПб. : СПбГАСУ, 2014. – 195 с.
5. Жмур, Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками [Текст] / Н. С. Жмур. – М. : АКВАРОС, 2003. – 507 с.
6. Технологии биологического удаления азота и фосфора на станциях аэрации [Текст] / Б. В. Васильев, Б. Г. Мишуков, И. И. Иваненко и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – № 5, Часть 1. – С. 22–25.
7. Удаление азота и фосфора на канализационных очистных сооружениях / А. Н. Беляев, Б. В. Васильев, С. Е. Маскалева и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 9. – С. 38–43.

Получено 04.03.2019

## В. М. ЧЕРНИШЕВ, Е. О. ЩОКОВ ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЙ ВИДАЛЕННЯ ФОСФОРУ З МІСЬКИХ СТІЧНИХ ВОД ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті описані основні методи видалення фосфору з міських стічних вод, такі як реагентний, хіміко-біологічний і біологічний. Розглянуто види реагентів, що застосовуються в реагентному і хіміко-біологічному методах для видалення фосфору, визначені їх дози і ефективність застосування. Описано процес видалення фосфору за допомогою біологічних технологічних схем за рахунок чергування анаеробної середовища з аеробного. Описано застосування спеціальних мікроорганізмів *Acinetobacter* в біологічному методі очищення, а також розглянуто процес культивування даних мікроорганізмів в активному мулі. Наводиться ефективність видалення, а також залишкові концентрації сполук фосфору в рідині. Вказані переваги і недоліки методів. Дана оцінка технологій видалення фосфору з міських стічних вод. Наведено економічне порівняння застосування реагентного та біологічного методу.

**Ключові слова:** евтрофікація, реагентний метод, хіміко-біологічний метод, біологічний метод, реагенти, ортофосфати, фосфор, *acinetobacter*, біореактор.

VALENTIN CHERNYSHEV, YEVHEN SHCHOKOV  
COMPARATIVE EVALUATION OF PHOSPHORUS REMOVAL TECHNOLOGIES  
FROM MUNICIPAL WASTEWATER

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article describes the main methods of phosphorus removal from municipal wastewater, such as reagent, chemical-biological and biological methods. The types of reagents used in the reagent and chemical-biological method for the removal of phosphorus are considered, their doses are determined and the effectiveness of the application is given. The process of phosphorus removal using biological technological schemes due to the alternation of anaerobic environment with aerobic is described. The use of special microorganisms *Acinetobacter* in the biological purification method is described, and the process of cultivation of these microorganisms in activated sludge is also considered. The removal efficiency is given, as well as the residual concentrations of phosphorus compounds in the liquid. The advantages and disadvantages of the methods are indicated. The technology of phosphorus removal from municipal wastewater is assessed. The economic comparison of the use of the reagent and biological method is given.

**Key words:** eutrophication, reagent method, chemical and biological method, biological method, reagents, orthophosphates, phosphorus, *acinetobacter*, bioreactor.

**Чернышев Валентин Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: интенсификация методов очистки сточных вод и обработки осадков.

**Щёков Евгений Александрович** – магистрант кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: методы утилизации осадков

**Чернишев Валентин Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: інтенсифікація методів очищення стічних вод і обробки опадів.

**Щоков Євген Олександрович** – магістрант кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: методи утилізації осадків.

**Chernyshev Valentin** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientifics interests: intensification of methods of sewage treatment and deposits processing.

**Shchokov Yevhen** – Master's student, Water Supply, Sanitation and Protection of Water Resources, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientifics interests: methods of deposits recycling.