

УДК 628.3

**Е. А. Соловьева****ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД И ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ ПРИ ГЛУБОКОМ УДАЛЕНИИ АЗОТА И ФОСФОРА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД**

Дата поступления: 20.05.2015

Решение о публикации: 19.02.2016

**Цель:** Выявить способы повышения эффективности удаления азота и фосфора в технологии биологических процессов денитрификации и дефосфатирования (Денифо), а также реагентного связывания минеральных форм фосфора. **Методы:** Используются описательные методы, а также методы статистической обработки данных. **Результаты:** Составлен перечень условий, которые обеспечивают максимум эффективности процессов очистки сточных вод и обработки осадков. Рассмотрена работа первичных отстойников, аэротенков по технологии Денифо, вторичных отстойников. Приведены математические зависимости для усредненного расхода сточных вод в сухую погоду при нормальных условиях эксплуатации очистных сооружений. Выявлено, что при совместном обезвоживании ила и осадков (с длительным пребыванием в резервуарах) происходит интенсивное вытеснение фосфора фосфатов в сливные воды, соответственно, повышается содержание фосфора в очищенной воде. Даны рекомендации для изменения режима работы узла по обработке осадков сточных вод. **Практическая значимость:** Материалы статьи позволяют комплексно оценивать степень удаления азота и фосфора из городских сточных вод, в том числе из вторичных загрязнений, поступающих с возвратными стоками от узлов обработки осадков на действующие очистные станции Санкт-Петербурга, а также совершенствовать технологию очистки городских сточных вод.

Активный ил, нитрификация, денитрификация, продолжительность осветления, осадок, ХПК, аммонийный азот, фосфор.

**Elena A. Solovieva**, Cand. Sci. (Eng.), assistant professor, el-sol@yandex.ru (Petersburg State Transport University) TECHNOLOGY FOR WASTEWATER TREATMENT AND PRECIPITATION TREATMENT WITH DEEP NITROGEN AND PHOSPHORUS REMOVAL FROM WASTEWATER

**Objective:** To identify methods of increasing efficiency of removal of nitrogen and phosphorus in the technology of biological processes of denitrification and phosphate removal (Denipho), as well as reagent fixation of mineral forms of phosphorus. **Methods:** Descriptive methods were used, as were statistical data processing methods. **Results:** A list of conditions that ensure maximum efficiency of processes of wastewater and precipitation treatment. The operation of primary sedimentation tanks, Denipho technology aerotanks, secondary sedimentation tanks is considered. Mathematical dependencies for average wastewater flow in dry weather under normal conditions of treatment facilities' operation are provided. It was established that during joint dehydration of sludge and precipitation (with lengthy storage in tanks), intensive displacement of phosphorus from phosphates into drain water occurs, thus phosphorus content of treated water increases. Recommendations for amending the operating regime of wastewater sludge unit are provided. **Practical importance:** Materials of the paper allow for complex evaluation of the degree of removal of nitrogen and phosphorus from urban wastewater, including from secondary pollution that is carried with return water from precipitation treatment units to the operating water treatment plants of St Petersburg, as well as to improve the technology of treating urban wastewater.

Active sludge, nitrification, denitrification, duration of clarification, sediment, COD, ammonia nitrogen, phosphorus.

Многообразие технологических и конструктивных решений, особенно ярко проявляющееся в зарубежной практике, предоставляет возможность использовать множество вариантов схем в зависимости от конкретных местных условий. В отечественной практике ввиду массового применения типовых проектов меньше приемов реализации технологии такого типа.

При реконструкции имеющихся сооружений проблемы сводятся к устройству анаэробно-аноксидных отсеков в двух-, трех- и четырехкоридорных типовых аэротенках.

Ограничивая задачу реконструкции сооружений и строительства новых очистных станций рамками России и государств СНГ, уменьшив разнообразие возможных вариантов несколькими схемами денитрификации и дефосфатирования (Денифо). При этом составим перечень условий, которые обеспечивают максимум эффективности очистки сточных вод и обработки осадков.

### **Осветление сточных вод, подбраживание загрязнений и осадков первичных отстойников**

Высокий эффект осветления сточных вод в первичных отстойниках означает удаление тонкодисперсной взвеси, приближающейся по свойствам к коллоидной дисперсной фазе, полезной для процессов денитрификации и дефосфатирования, поэтому достижение глубокого осветления, использование предварительной аэрации, коагуляция сточных вод в первичных отстойниках нежелательны, а иногда вредны.

В случае поступления весьма разбавленных стоков первичные отстойники включают в схему циркуляции активного ила: циркулирующий активный ил частично или полностью подают в первичные отстойники, осветленная жидкость направляется в аэротенки, осевший ил и взвешенные вещества также откачиваются в аэротенк, при этом осадочная часть отстойников играет роль анаэробно-

аноксидной зоны, т. е. становится предденитрификатором.

Биоблок выполняется по схеме анаэробно-аноксидно-оксидной обработки сточных вод (АА/О). Ввод реагента в первичные отстойники дестабилизирует коллоидные и часть растворенных загрязнений, вследствие их удаления снижается количество денитрифицированного азота [4].

Другой способ насыщения сточных вод продуктами брожения загрязнений заключается в накоплении и подбраживании осадка прямо в отстойниках. За сутки в отстойниках слой осадка увеличивается на 5–10 см, накопление осадка высотой до 1–1,5 м длится 3–4 недели.

При этом внешние признаки брожения выражаются в виде интенсивного газовыделения, всплывания частиц осадка на поверхность воды, потемнения воды вследствие образования сульфидов железа. Несмотря на кажущийся дискомфорт в облик отстойников наблюдается более глубокая денитрификация в биоблоке (снижение количества азота нитратов на 2–4 мг/л).

Из-за накопления осадка в отстойниках образуется плотный вязкий слой на дне, поэтому приходится еженедельно выгружать этот слой для обезвоживания. Для лучшего контроля за брожением осадка целесообразно один из отстойников перевести в режим работы сбраживателя.

Весь осадок из других отстойников выгружаются ежедневно в сбраживатель, в который подается меньшее количество воды (30–50% от нормального расхода) с целью вымывания продуктов брожения в биоблок. Количество осадка от первичных отстойников снижается, увеличиваются прирост активного ила и вынос фосфора из системы. Узел обезвоживания осадков необходимо подготовить к такому режиму работы.

На очистных сооружениях также эксплуатируются вертикальные отстойники диаметром 9, 12 и 15 м с центральным расположением скребка, радиальные – диаметром от 18 до 54 м (рис. 1).

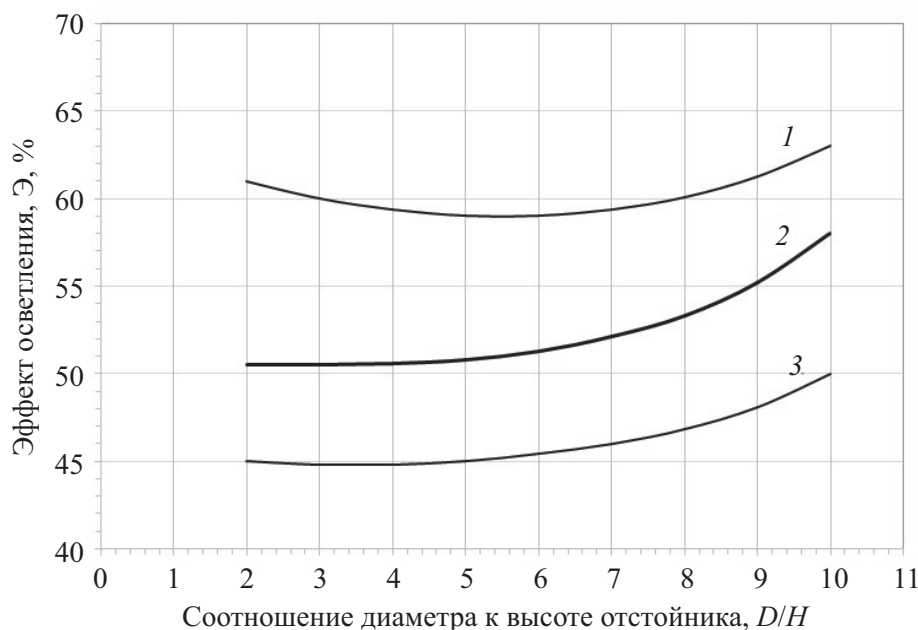


Рис. 1. Эффект осветления сточных вод в вертикальных и радиальных отстойниках  
 1 – продолжительность осветления 4 ч, средний расход; 2 – продолжительность осветления 3 ч, средний расход; 3 – продолжительность осветления 4 ч, среднечасовой расход в сутки максимального водоотведения

Для этой группы вертикальных и радиальных отстойников составлена обобщенная формула, которая опирается на результаты эксплуатации отстойников на очистных сооружениях:

$$\lg\left(\frac{C_{en}}{C_{ex}}\right) = 2,5 t_{cp}^{0,59} C_{en}^{0,03} \times \left(\frac{H_{set}}{q_{вод}}\right)^{0,25} \left(\frac{D}{H}\right)^{0,18} s^{0,88} 10^{-3}, \quad (1)$$

где  $C_{en}$  и  $C_{ex}$  – концентрация взвешенных веществ во входящей воде и выходящей из отстойника, мг/л;  $s$  – зольность осадка, доли единицы;  $H_{set}$  – глубина проточной части в отстойнике, м;  $t_{cp}$  – продолжительность отстаивания, с;  $L_{вод}$  – длина водосборных лотков, м;  $q_{вод} = q/L_{вод}$ , м<sup>3</sup>/ч на 1 пог. м длины водосборных лотков;  $\frac{D}{H}$  отображает влияние соотношения диаметра отстойника и высоты проточной части применительно к вертикальным

и радиальным отстойникам диаметром от 6 до 54 м.

Далее определяют состав осветленной воды по убыли концентрации загрязнений с осадком (по его беззольной части). Таким образом, в цели и задачи осветления сточных вод включаются процессы подготовки воды для денитрификации и дефосфатирования, что существенно меняет регламент работы этого узла.

### Технологические схемы устройства и режимы биоблока

Эффективное безреагентное удаление фосфора, а также азота достигается в схемах очистки, включающих предварительную денитрификацию циркулирующего активного ила и маневренную секцию аноксидно-оксидной обработки иловой смеси (секцию с мешалками и аэраторами).

Схема изображена на рис. 2 в двух вариантах: с денитрификатором ила в голове биоблока и внутри аноксидной зоны.

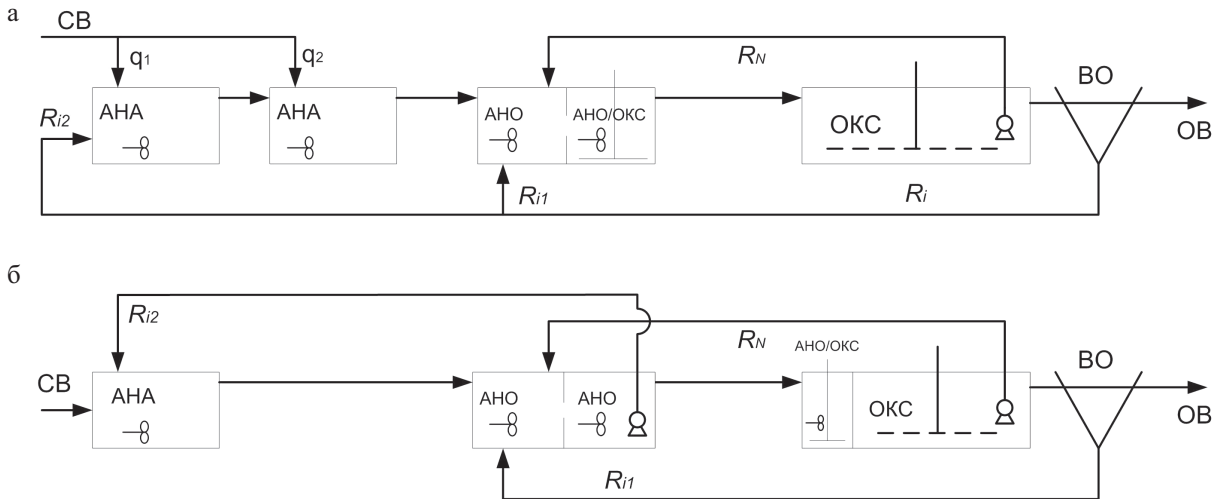


Рис. 2. Схема очистки с предденитрификатором ила в начале биоблока (а) и внутри аноксидной зоны (б)

В первом случае (рис. 2а) циркулирующий активный ил дробно ( $R_{i1}$  и  $R_{i2}$ ) возвращается в головные отсеки. Если концентрация азота нитратов в иле достаточно низка (4–4,5 мг/л), то весь ил подается в аноксидную зону (предденитрификатор), в которую впускается часть сточных вод (расход  $q_1$ ). Высокое содержание азота нитратов в иле (7–8 мг/л) заставляет подавать его дробно: потоком  $R_{i1}$  в основной денитрификатор и  $R_{i2}$  в предденитрификатор в зависимости от наличия легкоокисляемой органики (БПК<sub>5</sub>) в сточных водах.

Маневренный отсек может служить продолжением денитрификатора либо началом оксидной части, например, при снижении температуры воды при снеготаянии. Достоинства схемы заключаются в возможности управления работой предденитрификатора за счет манипулирования потоками  $q_1$  и  $R_{i2}$ .

Во втором случае (рис. 2б) денитрификация в активном иле осуществляется в основном денитрификаторе. Создание наиболее благоприятных условий работой анаэробной зоны достигается за счет регулирования потока  $R_{i2}$ , но при этом доза ила в анаэробной зоне может снижаться до минимально допустимого уровня (1,2–1,5 г/л), что нежелательно. Маневренная секция выполняет те же функции.

Обе схемы являются основополагающими для процессов Денифо, применяющихся в условиях традиционного состава городских сточных вод ХПК 300–400 мг/л, азота общего до 40 мг/л и требуемого качества очищенной воды в пределах до 10–12 мг/л по общему азоту и 1–1,5 мг/л – по общему фосфору.

При ослаблении требований к качеству очищенной воды начинается упрощение схем: удаляется маневренная зона, исключается ре-

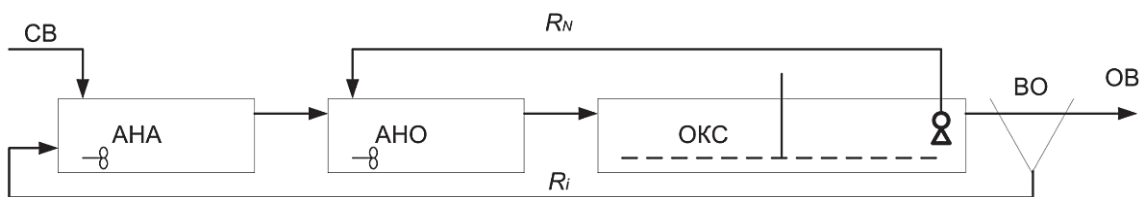


Рис. 3. Схема анаэробно-аноксидно-оксидной обработки сточных вод (АА/О)

гулирование потоков  $q_1$  и  $q_2$ ,  $R_{i_1}$  и  $R_{i_2}$ , в конечном итоге остается схема АА/О с фиксированными объемами отсеков Ана и Ано (рис. 3).

Добавка реагентов для снижения концентрации фосфора до 0,5 мг/л несколько меняет ситуацию. Отпадает необходимость тщательной подготовки циркулирующего ила перед анаэробной зоной, концентрация фосфора в очищенной воде регулируется путем изменения дозы реагента.

В схеме АА/О (рис. 3) реагент может вводиться перед вторичными отстойниками либо в циркулирующий активный ил.

При подаче коагулянта перед вторичными отстойниками для соблюдения требуемого качества очищенной воды необходимо установить переменную дозу реагента в соответствии с гидрографом и полтографом поступления массы воды и загрязнений; учесть изменение рН и щелочности воды; отрегулировать процессы образования  $FePO_4$  и  $Fe(OH)_3$  во времени и в объеме зоны хлопьеобразования во вторичных отстойниках.

При подаче коагулянта в циркулирующий активный ил доза реагента устанавливается постоянной (либо пропорциональной расходу ила при регулировании рециркуляции), и все колебания параметров должны компенсироваться за счет аккумулирующей емкости активного ила [5]. Разумеется, при этом может происходить некоторый перерасход реагента вследствие передозировки для погашения естественных флуктуаций процесса биологической очистки. Доза реагента по  $Fe^{+3}$  1,5–2,0 г/м<sup>3</sup> при подаче в ил, 3,0–4,0 г/м<sup>3</sup> – при подаче перед вторичными отстойниками [5].

## Вторичные отстойники

Роль вторичных отстойников значительно усиливается в связи с ограничениями по выносу фосфора с активным илом. Например, при повышенном содержании фосфора в иле порядка 3 % (традиционный уровень в технологии Денифо) и выносе ила 12–15 мг/л

будет наблюдаться повышение концентрации общего фосфора на 0,36–0,45 мг/л, что существенно снизит общую эффективность очистки сточных вод. Следовательно, необходимо максимально осветлять очищенную воду во вторичных отстойниках.

Способы кардинального снижения количества взвеси в очищенной воде связаны с новыми процессами – коагуляции и флокуляции очищенной воды, ультрафильтрации с использованием бактерицидных мембран или простой фильтрации на зернистых минеральных и пластмассовых фильтрах.

Простое отстаивание иловой смеси позволяет снизить концентрацию взвешенных веществ до 7–8 мг/л, и этот уровень можно считать предельным. Нагрузка на 1 м<sup>2</sup> площади дна отстойника снижается до 0,8–1,0 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч [2].

Выносу частиц активного ила способствует неудачная конструкция илососов и отстойников в целом. В типовых радиальных отстойниках из-за малых размеров впускной камеры создаются мощные потоки иловой смеси, вследствие чего формирующиеся хлопья ила относят к периферии. Одинаковые размеры илососов и одна сборная труба не способствуют равномерному отводу ила.

Целесообразно увеличить впускную камеру, установив продолжительность пребывания в ней иловой смеси до 25–30 мин, заменить илососы на скребки и организовать отвод циркулирующего ила из центрального приемка (кроме отстойников диаметром 54 м). Рекомендуемые изменения учитывают возможность ввода реагентов перед вторичными отстойниками, когда впускное устройство становится камерой хлопьеобразования.

Среди различных способов интенсификации осветления наиболее просты коагуляция иловой смеси минеральными реагентами, совмещенная с удалением фосфора, добавка флокулянтов либо использование смеси минеральных и органических полиэлектролитов (композитных смесей из флокулянтов с минеральными коагулянтами). Ввод реагентов

в циркулирующий ил улучшает его способность к осаждению.

### Обработка осадков

Стабилизация осадков в аэробных или анаэробных условиях продуцирует появление вторичных загрязнений в виде аммонийного азота, нитратов и ортофосфатов, включение таких процессов в схему обработки осадков нежелательно. Распадающееся органическое вещество осадков необходимо для денитрификации и дефосфатирования. Для этого рекомендуется обезвоживание сырых осадков с их последующей стабилизацией и обеззараживанием путем компостирования или ликвидации сжиганием.

В основном подготовка осадков к обезвоживанию заключается в раздельной обработке осадка первичных отстойников и избыточного активного ила. Смешивание осадка и ила вызывает активное вытеснение фосфатов из тела клеток бактерий, иногда в огромных количествах (250–280 мг/л по фосфору).

Технология уплотнения осадка и ила меняется для сокращения времени уплотнения до 8–10 ч при добавке 1–1,2 кг флокулянта на 1 т сухих веществ [3].

Отдельное уплотнение осадка первичных отстойников полезно для снижения водоотдающих свойств при его подбраживании. В уплотнителях необходимо предусматривать стержневые мешалки для отделения газов и разрушения слоистой структуры осадков.

Раздельно уплотненные осадки обезвоживаются на центрифугах (центрипрессах) либо на ленточных фильтр-прессах. В первом случае доза флокулянта составляет 4–5 кг/т для осадка и 5–6 кг/т для избыточного ила [1]. На ленточные фильтр-прессы осадки подаются через вихревые камеры флокуляции, в которые вводятся флокулянты дозой 3–4 кг/т [3].

Увеличение производительности узла обезвоживания достигается при установке барабанных, ленточных или тарельчатых сгустителей, на которые можно подавать смесь осадка

и ила, сгущать ее до влажности 93–94 % при дозировании 1,8–2,2 кг/т флокулянта [2].

Обезвоживание осадков может сопровождаться большим выносом фосфатов с фугатом или фильтратом. Целесообразно удалять фосфаты введением коагулянтов на основе железа  $Fe^{+3}$ . Коагулянт дозируют непосредственно в поток фугата (фильтрата), который далее направляется в голову очистных сооружений.

Сжигание кека, как это принято на очистных станциях Санкт-Петербурга, выдвигает ряд ограничений, в том числе достижение влажности кека не более 75 % и зольности не выше 40 %.

### Заключение

Основным результатом данной статьи является раскрытие особенностей функционирования очистной станции как единой системы, ориентированной на удаление из городских сточных вод и возвратных потоков азота и фосфора, а также выбор рациональных, эффективных и надежных комплексных технологических схем биологической и химико-биологической (реагентной и безреагентной) обработки сточных вод и осадков.

### Библиографический список

1. Водоснабжение и водоотведение в Санкт-Петербурге / под общ. ред. Ф. В. Кармазина. – СПб. : Новый журнал, 2008. – 462 с.
2. Иванов Г. Г. Оценка эффективности работы крупноразмерных вторичных отстойников / Г. Г. Иванов, Ю. Ф. Эль, М. Р. Телеснин // Водоснабжение и санитарная техника. – 1992. – № 3. – С. 5–6.
3. Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга / под общ. ред. Ф. В. Кармазина. – СПб. : Новый журнал, 2002. – 683 с.
4. Сойфер В. Н. Молекулы живых клеток / В. Н. Сойфер. – М. : Знание, 1975. – 208 с.
5. Соловьева Е. А. Удаление азота и фосфора из городских сточных вод. Технологии удаления азота

и фосфора в комплексе по очистке сточных вод и обработке осадка / Е. А. Соловьева. – Саарбрюккен : LAP LAMBERT Acad. Publ., 2011. – 292 с.

## References

1. Vodosnabzheniye i vodootvedeniye v Sankt-Peterburge [Water and Sanitation in St Petersburg], ed. F.V. Karmazinov. St. Petersburg, Novyy zhurnal, 2008. 462 p.

2. Ivanov G.G., El Yu.F. & Telesnin M.R. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika – Water Supply and Sanitary Equipment*, 1992, no. 3, pp. 5–6.

3. Otvedeniye i ochistka stochnykh vod Sankt-Peterburga [Disposal and Treatment of Sewage in St Petersburg], ed. F.V. Karmazinov. St. Petersburg, Novyy zhurnal, 2002. 683 p.

4. Soyfer V.N. *Molekuly zhivyykh kletok [Living Cell Molecules]*. Moscow, Znaniye, 1975. 208 p.

5. Solovieva E.A. *Udalenie azota i fosfora iz gorodskikh stochnykh vod. Tekhnologii udaleniya azota i fosfora v komplekse po ochistke stochnykh vod i obrabotke osadka [Removal of Nitrogen and Phosphorus from Urban Wastewater. Technologies for Removal of Nitrogen and Phosphorus in Sewage and Sludge Treatment]*. Saarbrucken, LAP LAMBERT Acad. Publ., 2011. 292 p.

СОЛОВЬЕВА Елена Александровна – канд. техн. наук, доцент, el-sol@yandex.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).