



УДК 628.3

doi:10.23968/2305-3488.2017.19.1.24-30

**Б. Г. Мишуков, А. А. Логинов**

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПЕРВИЧНЫХ ОТСТОЙНИКОВ В РЕЖИМЕ РЕАГЕНТНОГО УДАЛЕНИЯ ФОСФОРА**

UDC 628.3

doi:10.23968/2305-3488.2017.19.1.24-30

**Mishykov B. G., Loginov A. A**

## **IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE PRIMARY CLARIFIERS IN THE MODE OF CHEMICAL PHOSPHORUS REMOVAL**

### **Аннотация**

**Введение:** основным фактором, определяющим интенсивность эвтрофикации водоемов, является поступление в водоемы со сбрасываемыми сточными водами биогенных элементов – азота и фосфора. Одним из вариантов задержания фосфора в процессе очистки сточных вод является реагентное задержание фосфора в процессе отстаивания в первичных отстойниках. При этом наиболее значимым (целевым) показателем работы первичных отстойников становится эффективность удаления фосфора. Данные были предоставлены ГУП Водоканал Санкт-Петербурга по результатам эксплуатации первичных отстойников Северной станции аэрации за 2014–2015 гг. **Цель исследования:** Определение необходимой дозы реагента при соосаждении фосфора в первичных отстойниках. Определение эффективности работы первичных отстойников в режиме реагентного соосаждения фосфора. **Результаты:** определено влияние вводимой дозы реагента на эффективность удаления фосфора фосфатов и процесс осветления сточных вод. Исследования показали, что реагентная

### **Abstract**

**Introduction:** The main influence determining the intensity of eutrophic water bodies is the intake of nutrient elements - nitrogen and phosphorus - into the water bodies with discharged sewage. One of the forms of phosphorus retention during wastewater treatment is reagent phosphorus retention during shipment in primary settling tanks. In this case, the most significant (target) indicator of primary settling tanks is the efficiency of phosphorus removal. The data were provided by the State Unitary Enterprise «Vodokanal of Saint Petersburg» on the basis of the operation of primary sedimentation tanks of the North Station for 2014–2015. **Purpose:** Determination of the required dose of the reagent upon coprecipitation of phosphorus in primary sedimentation tanks. Determination of the efficiency of primary settling tanks in the regime of reagent coprecipitation of phosphorus. **Results:** The effect of the administered dose of the reagent on the phosphorus removal efficiency of phosphate and the clarification process of wastewater have been determined. Studies have shown that the reagent treatment of wastewater in primary sedimentation tanks with reduced doses increases

обработка сточных вод в первичных отстойниках с пониженными дозами увеличивает эффект очистки по взвешенным веществам на 15–20% (по сравнению с безреагентным отстаиванием) и пропорционально повышает степень удаления ХПК, БПК<sub>5</sub>, общего азота и общего фосфора.

Связывание ортофосфатов позволяет на стадии биологической очистки довести концентрации фосфора фосфатов до 0,1–0,2 мг/л. Образующиеся твердые примеси алюминатов накапливаются в активном иле, являющемся благоприятной средой для развития бактерий-нитрификаторов и способствуют глубокой нитрификации. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать для первичных отстойников вводимую для удаления фосфора фосфатов дозу реагента и учитывать ее влияние на эффект осветления.

**Практическая значимость:** при помощи полученных моделей возможна оптимизация процессов реагентной очистки сточных вод на действующих очистных станциях и расчет проектируемых отстойников с учетом влияния дозы вводимого реагента.

**Ключевые слова:** реагентное удаление фосфора, доза реагента, первичное отстаивание, эффект очистки.

## Наши авторы

### Мишуков Борис Григорьевич

Доктор техн. наук, профессор кафедры водопользования и экологии Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4  
Тел.: +7 (911) 979-44-56

### Логинов Артур Александрович

Аспирант кафедры водопользования и экологии Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4  
Тел.: +7 (950) 020-47-96  
Эл. адрес: arlog89@mail.ru

*the cleaning effect of suspended substances by 15–20% (compared to non-reactive settling) and proportionally increases the removal of COD, BOD<sub>5</sub>, total nitrogen and total phosphorus. The binding of orthophosphates allows, at the stage of biological treatment, to bring the phosphorus phosphate concentrations to 0.1–0.2 mg / l. The resulting solid impurities of aluminates accumulate in the active sludge, which is a favorable environment for the development of nitrifying bacteria and promote deep nitrification. A mathematical model has been developed that allows to calculate the dose of reagent for the removal of phosphorus phosphate for primary sedimentation tanks and take into account its effect on the clarification effect.*

**Practical relevance:** Determination of the required dose of the reagent upon coprecipitation of phosphorus in primary sedimentation tanks. Determination of the efficiency of primary settling tanks in the regime of reagent coprecipitation of phosphorus.

**Keywords:** Reagent Phosphorus Removal, Reagent Dosage, Primary Clarifier, Effect of Sedimentation

## Authors

### Mishykov Boris Grigorievich

Dr. Sc., Tech., Professor, Department of Water usage and Ecology, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 2-nd Красноармейская St. 4, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation  
Tel.: +7 (911) 979-44-56

### Loginov Artyr Alexandrovich

Post-Graduate Student, Department of Water usage and Ecology, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 2-nd Красноармейская St. 4, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation  
Tel.: +7 (950) 020-47-96, E-mail: arlog89@mail.ru



## Введение

В технологиях химико-биологической очистки сточных вод с глубоким удалением азота и фосфора функции первичных отстойников расширяются. Наряду с традиционным осаждением взвешенных веществ появляются задачи увеличения содержания легкоокисляемых органических веществ в осветленном стоке путем преферментации и удаления фосфора ортофосфатов при дозировании реагентов [1, 2].

В качестве реагентов при удалении фосфора фосфатов используются серно-кислые соли железа и алюминия (коагулянты). Роль реагентов в этих технологиях отличается от классической физико-химической очистки сточных вод. Целью применения реагентов в данной технологии является снижение концентрации фосфора в осветленных сточных водах до уровня, обеспечивающего, с учетом биологической очистки, выполнение требований на сброс в водоемы [3, 4]. Доза вводимого реагента при реагентном удалении фосфора составляет 20–30 мг/л по сульфату алюминия, что в 3–4 раза меньше дозы для классической коагуляции [5–7]. Реагентное удаление фосфора направлено главным образом на связывание ортофосфатов, а не на радикальную дестабилизацию системы дисперсно-коллоидной фазы примесей сточных вод [8]. Таким образом, рассматриваемая задача включает изучение процесса осветления сточных вод при дефицитной дозе коагулянта (селективная коагуляция) как средства достижения необходимого результата (целевых показателей по фосфору).

Разработанные ранее методы расчета эффективности работы первичных отстойников базировались на результатах оценки осветления без применения реагентов или при использовании реагента как коагулянта (оптимальной дозе коагулянта) [5]. Процессы изъятия фосфора при дефицитной дозе реагента освещены в литературе крайне скудно. Наиболее точным способом являлся метод оценки работы отстойников по результатам, полученным в производственных условиях на действующих очистных сооружениях.

С целью определения параметров работы первичных отстойников, работающих в режиме реагентного удаления фосфора, и определения необходимой дозы реагента была разработана модель на основании данных работы первичных отстойников Северной станции аэрации.

## Модель работы первичных отстойников в режиме реагентного удаления фосфора

Математическая модель работы первичных отстойников в безреагентном режиме была сформулирована в 2010–2012 гг. на базе результатов работы отстойников Москвы и Санкт-Петербурга. В совокупности по всем рассмотренным очистным станциям была предложена зависимость [9–11]:

$$\lg \frac{C_{en}}{C_{ex}} = \lg A + \alpha_1 \lg F_1 + \alpha_2 \lg F_2 + \alpha_3 \lg F_3 + \alpha_4 \lg F_4 + \alpha_5 \lg F_5 + \alpha_6 \lg F_6, \quad (1)$$

$$\frac{C_{en}}{C_{ex}} = AF_1^{\alpha_1} F_2^{\alpha_2} F_3^{\alpha_3} F_4^{\alpha_4} F_5^{\alpha_5} F_6^{\alpha_6}. \quad (2)$$

Фактор  $F_1$  и фактор  $F_2$  - это учет свойств взвешенных веществ: (концентрация  $C_{en}$  и зольность  $s$ ).

Фактор  $F_3$  - среднесуточная продолжительность отстаивания сточных вод.

Фактор  $F_4$  - условия сбора осветленных сточных вод  $\left(\frac{H_{set}}{q_{вод}}\right)$ .

Фактор  $F_5$  - геометрический фактор  $\left(\frac{D}{H}\right)$ .

Фактор  $F_6$  - условия выгрузки осадка.

В уравнение включены показатели состава сточных вод  $C_{en}$  и  $s$ , кинетика осветления в режиме движущегося потока, условия сбора осветленной воды. Режим выгрузки осадка ввиду низкой значимости был позднее исключен. Уравнения 1 и 2 не учитывают влияние введения реагента в сточные воды перед их отстаиванием.

Для повышения степени дефосфатирования реагенты вводились при пониженных дозах, достаточных для связывания ортофосфатов и достижения требуемой эффективности осаждения фосфатов. В данной статье обсуждаются результаты реагентного удаления фосфора из сточных вод Северной станции аэрации (ССА) серноокислым алюминием [12, 13]. Дозирование реагента производилась пропорциональна расходу сточных вод и составляла по сухому веществу (по активному веществу) реагента в среднем 23–24 г/м<sup>3</sup>.

При дозировании реагента эффективность осаждения примесей повысилась. Эффект удаления фосфора фосфатов в первичных отстойниках летом составил в среднем 28 %, концентрация фосфатов, в среднем, понизилась до 1,5 мг/л (при минимальном значении 0,4 мг/л). Эффект осветления при работе отстойников в режиме реагентного удаления фосфора выше эффекта осветления в безреагентном режиме в среднем на 17%.

Обработка материалов работы первичных отстойников ССА проводилась по предложенной ранее эксплуатационной модели. Дополнительным фактором математической модели стал комплекс, отражающий влияние дозирования реагента.

При построении математической модели из общей дозы реагента выделялась часть, которая отвечала за связывание ортофосфатов по стехиометрическому соотношению [14].



Помимо образования фосфатов алюминия, часть дозы реагента расходуется на коагуляцию иных загрязнений, в связи с чем доза реагента превышает стехиометрическое соотношение в 3–4 раза [15, 16].

Не прореагировавшие с растворенным фосфатом ионы алюминия образуют гидроксиды (4) и металлоорганические комплексы [17]



Из выражений (3) и (4), условное количество реагента, идущего на образование флоккул  $Al(OH)_3$ , можно представить в виде:

$$d_k = d_p - \frac{M_{Al_2(SO_4)_3}}{M_{P-PO_4}} (C_{P-PO_4}^{en} - C_{P-PO_4}^{ex}), \quad (5)$$



где  $d_k$  – реагент, идущий на образование флокул гидроксидов и металлорганических комплексов;  $d_p$  – общая доза реагента;  $M_{Al_2(SO_4)_3}$  – молярная масса коагулянта;  $M_{P-PO_4}$  – молярная масса фосфора фосфатов;  $C_{P-PO_4}^{en}$  – концентрация фосфора фосфатов в исходных сточных водах;  $C_{P-PO_4}^{ex}$  – концентрация фосфора фосфатов в осветленных сточных водах.

Количество реагента, идущего на связывание фосфора, в среднем составляет 25% от общего расхода реагента.

С учетом предложенных соображений численная модель эффективности работы первичных отстойников в режиме реагентного удаления фосфора дополняется множителем:

$$\left( 1 + \frac{M_{Al_2(SO_4)_3}}{M_{P-PO_4}} d \right)^{\alpha_0} \quad (6)$$

При математической обработке массива данных, полученных при эксплуатации первичных отстойников в режиме добавки реагента, уравнения (5) и (6) принимают вид численной модели:

$$\lg \frac{C_{en}}{C_{ex}} = 2,9 \times C_{en}^{0,03} s^{0,88} t_{cp}^{0,59} \left( \frac{H_{set}}{q_{вод}} \right)^{0,25} \left( \frac{D}{H} \right)^{0,14} (1 + 0,12d_p)^{0,2} \times 10^{-3}, \quad (7)$$

где  $C_{en}$  – концентрация взвешенных веществ в исходном стоке;  $C_{ex}$  – концентрация взвешенных веществ в осветленном стоке;  $s$  – зольность;  $t_{cp}$  – среднесуточная продолжительность отстаивания;  $q_{вод}$  – нагрузка на ребро водослива  $m^3/п.м.водослива/час$ ;  $H_{set}$  – высота рабочей части отстойника;  $D$  – диаметр отстойника;  $H$  – строительная высота отстойника.

Математическая обработка результатов работы действующих отстойников ССА позволяет прогнозировать возможности повышения эффективности очистных станций в режиме реконструкции, а также оптимизировать дозу подаваемых реагентов с целью экономии.

## Заключение

Исследования показали, что реагентная обработка сточных вод в первичных отстойниках с пониженными дозами увеличивает эффект очистки по взвешенным веществам на 15–20% (по сравнению с безреагентным отстаиванием) и пропорционально повышает степень удаления ХПК, БПК<sub>5</sub>, общего азота и общего фосфора.

Связывание ортофосфатов позволяет на стадии биологической очистки довести концентрации фосфора фосфатов до 0,1–0,2 мг/л. Образующиеся твердые примеси алюминатов накапливаются в активном иле, являющемся благоприятной средой для развития бактерий-нитрификаторов и способствуют глубокой нитрификации.

Математическая обработка результатов работы действующих отстойников ССА позволяет прогнозировать возможности повышения эффективности работы очистных станций в режиме реагентного удаления фосфора, а также оптимизировать дозу подаваемых реагентов с целью экономии.

Литература

1. (2015), *Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов*, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, ИТС 10-2015, М.: Бюро НДТ, 377 с.
2. (2007), *Degremont. Технический справочник по обработке воды. Т. 2*. СПб: Новый журнал, 921 с.
3. (1992), «Конвенция по защите природной морской среды района Балтийского моря 1992 г.», <http://www.helcom.ru/media/helcon.pdf> (дата обращения: 09.03.2017).
4. (2016), Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 г. № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». <https://cdnimg.rg.ru/pril/135/60/63/45203.pdf> (дата обращения: 09.03.2017).
5. Воронов, Ю. В., Яковлев, С. В. (2006). *Водоотведение и очистка сточных вод*. М.: Издательство АСВ, 704 с.
6. Луценко, Г. Н., Цветкова, А. И., Свердлов, И. Ш. (1984). *Физико-химическая очистка городских сточных вод*. М.: Стройиздат, 88 с.
7. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, СП 32.13330.2012. (2012) «Свод правил. Канализация. Наружные сети и сооружения. «Актуализированная редакция СНиП 2.04.02–84\*». М.: Росстандарт.
8. Карттунен, Э. (2005), *Водоснабжение II*, СПб: Новый журнал, 688 с.
9. Соловьева, Е. А. (2011), *Удаление азота и фосфора из городских сточных вод*, AP Lambert, Academic Publishing GbmH, Germany. 213 с.
10. Мишуков, Б. Г., Соловьева, Е. А. (2014), *Глубокая очистка городских сточных вод*. СПб: СПбГАСУ, 178 с.
11. Кармазинов, Ф. В. (общ. ред.) (2002), *Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга*, СПб: Новый журнал, 683 с.
12. Кармазинов, Ф. В. (общ. ред.) (2008), *Водоснабжение и водоотведение в Санкт-Петербурге*, СПб: Новый журнал, 464 с.
13. Кинебас, А. К., Нефедова, Е. Д., Рублевская, О. Н., Панкова, Г. А., Пирогов, А. Г., Попова, Н. И., Клименко, А. И. (2011), «Опыт внедрения технологии химического удаления фосфора: от лабораторных тестов до промышленной эксплуатации», *Водоснабжение и санитарная техника*, № 1, С. 46–54.
14. Хенце, М., Армоэс, П., Ля-Кур-Янсен, Й., Арван, Э. (2004), *Очистка сточных вод: биологические и химические процессы*, пер. с англ. Т. П. Мосолова, М.: Мир, 480 с.
15. Лонгдонг, Й (2013). *Очистка сточных вод. Программа повышения квалификации в области водного хозяйства и охраны окружающей среды*. СПб: Новый журнал, 483 с.
16. Мишуков, Б. Г., Игнатчик, С. Ю., Игнатчик, В. С. (2014), *Курс лекций*, СПб: СПбГАСУ, 196 с.
17. (2009), *Leitfaden zur Verminderung des Phosphoreintrags aus Kläranlagen*. <http://apps.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload1044.pdf> (дата обращения: 15.03.2017).

Reference

1. (2015), *ITS 10-2015: Ochistka stochnyh vod s ispol'zovaniem centralizovannyh sistem vodootvedeniya poselenij, gorodskih okrugov* [Wastewater Treatment Using Centralized Sewerage Systems for Settlements, Urban Districts], Federal'noe agentstvo po tehicheskomu regulirovaniu i metrologii ITS 10-2015, Bjuro NDT, M., p. 377 (in Russian).
2. (2007), *Degremont. Tehnicheskij spravochnik po obrabotke vody. Tom 2* [Degremont. Technical Reference Book on Water Processing. Vol. 2], Novyj zhurnal, Saint-Petersburg, p. 921 (in Russian).
3. (1999), "Convention for the Protection of the Natural Marine Environment of the Baltic sea area", Available at: <http://www.helcom.ru/media/helcon> (accessed 09 March 2017).
4. (2016), «Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnyh ob'ektov rybohozajstvennogo znachenija, v tom chisle normativov predel'no dopustimyh koncentracij vrednyh veshhestv v vodah vodnyh ob'ektov rybohozajstvennogo znachenija» [On the Approval of Water Quality Standards for Water Bodies of Fishery



- Importance, Including Standards for Maximum Permissible Concentrations of Harmful Substances in the Waters of Water Bodies of Fishery Importance], Prikaz Ministerstva sel'skogo hozjajstva Rossijskoj Federacii ot 13.12.2016 g. № 552 [Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of December 13, 2016 No. 552]. Available at: <https://cdnimg.rg.ru/pril/135/60/63/45203.pdf> (accessed 09 March 2017) (in Russian).
5. Voronov, Ju. V., Jakovlev, S. V. (2006), *Vodootvedenie i ochistka stochnyh vod. Uchebnik dlja vuzov po spec."Vodosnabzhenie i vodootvedenie"* [Wastewater and Wastewater treatment. Textbook for Universities on Special "Water Supply and Sanitation"], Izdatel'stvo ASV, M., p. 704 (in Russian).
  6. Lucenko, G. N., Cvetkova, A. I., Sverdlov, N. Sh. (1984), *Fiziko-himicheskaja ochistka gorodskih stochnyh vod* [Physical and chemical treatment of municipal wastewater], Strojizdat, M., p. 88 (in Russian).
  7. Federal'noe agentstvo po tehničeskomu regulirovaniju i metrologii, (2012), *SP 32.13330.2012: Kanalizacija. Naruzhnye seti i sooruzhenija. Aktualizirovannaja redakcija. SNiP 2.04.02–84\**, Rosstandart (in Russian).
  8. Karttunen, Je., (2005), *Vodosnabzhenie II* [Water Supply II], Novyj zhurnal, Saint-Petersburg, p. 688 (in Russian).
  9. Solov'eva, E. A. (2011), *Udalenie azota i fosfora iz gorodskih stochnyh vod*. AP Lambert, Academic Publishing GbmH, Germany (in Russian).
  10. Mishukov, B. G., Solov'eva, E. A., (2014), *Glubokaja ochistka gorodskih stochnyh vod* [Deep cleaning of urban wastewater], Saint-Petersburg, SPbGASU (in Russian).
  11. Karmazinov, F. V. (ed.) (2002), *Otvedenie i ochistka stochnyh vod Sankt-Peterburga* [Disposal and Treatment of Sewage in Saint-Petersburg], Novyj zhurnal, Saint-Petersburg, p. 683 (in Russian).
  12. Karmazinov, F. V. (ed.) (2008), *Vodosnabzhenie i vodootvedenie v Sankt-Peterburge* [Water supply and water disposal in St. Petersburg], Novyj zhurnal, Saint-Petersburg, p. 464 (in Russian).
  13. Kinebas, A. K., Nefedova, E. D., Rublevskaja, O. N., Pankova, G. A., Pirogov A. G., Popova, N. I., Klimenko, A. I. (2011), «Opyt vnedrenija tehnologii himičeskogo udalenija fosfora: ot laboratornyh testov do promyšlennoj jekspluatacii» [Experience in introducing the technology of chemical phosphorus removal: from laboratory tests to industrial operation], *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika*, no.1, pp. 46–54 (in Russian).
  14. Hence, M., Armojes, P., Lja-Kur-Jansen, J., Arvan, Je. (2004), *Ochistka stochnyh vod. Biologičeskie i himičeskie processy* [Wastewater Treatment. Biological and Chemical Processes.], Translated by Mosolova, T. P., Mir, M., p. 480 (in Russian).
  15. Longdong, Y. (2013), *Ochistka stochnykh vod. Programma povyšeniya kvalifii katsii v oblasti vodnogo khozyajstva i okhrany okružhayushčey sredy* [Sewage Treatment. Advanced Sewage Treatment. Advanced Training in water Management and Environmental Protection], Novyj zhurnal, Saint-Petersburg, 483 p.
  16. Mishukov, B. G. (ed.), (2014), *Kurs lekcij* [Lecture Course], SPbGASU, Saint-Petersburg, p. 196 (in Russian).
  17. (2009), *Leitfaden zur Verminderung des Phosphoreintrags aus Kläranlagen* [Guideline for the Reduction of Phosphorus Input from Wastewater Treatment Plants], Available at: <http://apps.thueringen.de/de/publikationen/pic/pubdownload1044.pdf> (accessed: 15.03.2017).