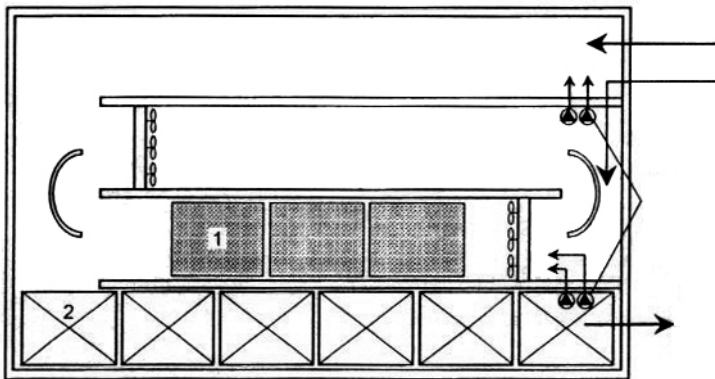


Л.Ф. Долина

# Очистка сточных вод от биогенных элементов.



Днепропетровск  
2011

УДК 628.3(075.8)  
ББК 38.761.2  
Д 64

Печатается по решению Ученого Совета Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В.Лазаряна.

Рецензенты:

**Беляев Н.Н.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и водоснабжения Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

**Рожко В.Ф.**, доктор технических наук, профессор Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры.

**Савин Л.С.**, доктор технических наук, профессор Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры.

**Долина Л.Ф.**

Д64. Очистка сточных вод от биогенных элементов: Монография. – Днепропетровск.: Континент. 2011. - 198с  
ISBN 978-966-8733-07-3.

В монографии рассматриваются вопросы, связанные с очисткой сточных вод от биогенных элементов.

Для студентов, аспирантов, научных работников, проектировщиков, специализирующихся в области очистки вод и охраны окружающей среды.

У монографії розглядаються питання, пов'язані з очисткою стічних вод від біогенних елементів.

Для студентів, аспірантів, наукових працівників, проектувальників, які спеціалізуються у галузі очистки стічних вод та охорони довкілля.

In this book the up-to-date technologies and constructions for waste waters treatment from the biogenes element's.

This book will be helpful for students, postgraduates and experts working in the field of waste waters treatments, water supply and ecology

УДК 628.3(075.8)  
ББК 38.761.2  
Д 64  
©Л.Ф. Долина, 2011  
ISBN 978-966-8733-07-3.



### **Аэротенки КП «Кривбас водоканал»**

*Вода, как самый распространенный в биосфере планеты Земля минерал, как среда в которой зародилась жизнь на Земле, как самое загадочное по своим физико-химическим свойствам вещество, было, остается и будет объектом пристального внимания исследователей.*

*В.А. Прикляжнюк, к.х.н.*

## Содержание

|                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Предисловие                                                                                                                      | 5   |
| Ответственность перед будущим.                                                                                                   | 7   |
| Глава 1. Особенности сточных вод, содержащих биогенные элементы, источники образования вод и воздействие их на окружающую среду. | 8   |
| Глава 2. Краткая характеристика известных методов очистки сточных вод от биогенных элементов.                                    | 21  |
| 2.1 Краткая характеристика методов очистки сточных вод от азотсодержащих веществ.                                                | 22  |
| 2.2 Краткая характеристика методов очистки сточных вод от фосфорсодержащих веществ.                                              | 26  |
| Глава 3. Реконструкция аэротенков с целью интенсификации извлечения биогенных элементов из сточных вод.                          | 31  |
| 3.1 Перспективные технологии и схемы биологической очистки сточных вод от азота и фосфора.                                       | 51  |
| 3.2 Реализация технологий удаления азота и фосфора на различных станциях аэриции.                                                | 87  |
| 3.2.1 Реализация технологий удаления азота и фосфора на различных станциях аэриции Украины.                                      | 108 |
| Глава 4. Удаление из сточных вод соединений фосфора.                                                                             | 110 |
| 4.1 Биогальванический метод удаления фосфорсодержащих веществ из сточных вод.                                                    | 124 |
| 4.2 Анализ промышленного применения биологических технологий для удаления фосфора из городских сточных вод.                      | 127 |
| 4.3 Физико-химический (реагентный) и биологический методы удаления соединений фосфора из сточных вод.                            | 140 |
| 4.4 Очистка от фосфора высококонцентрированных сточных вод животноводческих комплексов.                                          | 153 |
| Глава 5. Проектирование современных комплексов биологической очистки сточных вод от биогенных элементов.                         | 158 |
| Глава 6. Расчет сооружений для удаления биогенных элементов                                                                      | 170 |
| Литература.                                                                                                                      | 192 |

## Предисловие.

Ухудшение качества воды в поверхностных источниках происходит, главным образом, из-за их постоянного загрязнения веществами антропогенного происхождения: нефтепродуктами, поверхностно-активными веществами, органическими и биогенными элементами и пр., что связано с недостаточной глубиной очистки сточных вод. Это говорит о том, что технология и сооружения, запроектированные в 60-70-х годах прошлого столетия, не справляются с современной антропогенной нагрузкой. В связи с развитием промышленности, в частности моющих средств, количество наименований которых трудно сосчитать, а также резкое увеличение использования стиральных машин-автоматов в быту, привело к изменению состава хозяйственно-бытовых сточных вод. С каждым днем все больше увеличивается содержание биогенных элементов (азота и фосфора), так как разрабатываются новые составы моющих средств, защищающих нагревательные элементы моющих машин от накипи, улучшающих стирку загрязненного белья и пр. Содержание полифосфатов в составе моющих средств может достигать 30-50%. Приводим примерный состав моющего средства, который широко применяется в Украине в бытовых стиральных машинах: фосфаты – 15-30%; анионоактивные ПАВ – 5-15%; катионоактивные и неионогенные ПАВ < 5%; ЭДТА; поликарбонаты; мыло; цеолиты; энзимы; отдушка.

Удаление биогенных элементов из сточных вод требуется в связи с тем, что соединения азота и фосфора вызывают процесс эвтрофикации водоемов. Эвтрофикация – процесс роста биологической растительности водоемов, который происходит вследствие превышения баланса питательных веществ. Он сопровождается чрезмерным развитием водорослей, особенно зеленых, сине-зеленых и диатомовых, преобладанием нежелательных видов планктона, нарушением жизнедеятельности рыб. Продукты метаболизма водорослей дают воде неприятный запах, могут вызывать кожные аллергические реакции и желудочно-кишечные заболевания у людей и животных. При своем разложении водоросли выделяют в воду полипептиды, аммиак и промежуточные продукты белкового распада. В воде отмечается содержание фенолов (канцерогенов), в 3-4 раза превышающих ПДК. Во всех створах Днепра наблюдается превышение нормативов ПДК для водоемов рыбо-хозяйственного назначения в 1,5 - 6,9 раза для фосфора (до 0,58 мг/дм<sup>3</sup>).

Удаление биогенных элементов требуется также при создании оборотных и замкнутых систем водоснабжения промышленных предприятий, использующих биологически очищенные городские сточные воды. Наличие соединений фосфора и азота вызывает биологическое обрастание трубопроводов, коллекторов и другого канализационного оборудования, а присутствие аммонийного азота, нитритов и нитратов приводит к развитию коррозионных процессов.

Традиционная биологическая очистка сточных вод не обеспечивает достаточной глубины удаления биогенных элементов. Так, при механической очистке содержание азота и фосфора снижается на 8-10%, а при биологической – на 35-50%. Даже при значительной рабочей дозе активного ила  $6 \text{ г/дм}^3$  для биологического процесса очистки сточных вод в аэротенках эффективность удаления фосфора может повыситься только на 50-55%.

Согласно современным воззрениям, главенствующая роль в эвтрофикации водоемов принадлежит фосфору, поэтому для сдерживания процессов эвтрофикации необходимо в первую очередь удалять соединения фосфора.

Указанные проблемы достаточно эффективно решены и продолжают разрабатываться в Европейском Союзе (Дания, Финляндия, Швеция и др.), в США, а в Украине и России еще находятся в начальном состоянии.

Студенты и специалисты, занимающиеся очисткой сточных вод от биогенных элементов, нуждаются в обобщенной информации по указанному вопросу. Цель данной монографии является – современная концепция развития технологии и оборудования в области очистки городских и промышленных сточных вод от биогенных элементов, прежде всего азота и фосфора.

Автор выражает благодарность за ценные советы и критические замечания профессорам Н.Н.Беляеву, В.Ф.Рожко, Л.С.Савину.

Автор.

## Ответственность перед будущим.

С каждым годом возрастают экологические риски, связанные с глобальными климатическими изменениями, полным истощением ресурсов отдельных местностей или их токсичным загрязнением. Все это чревато значительным увеличением мест на планете, абсолютно не пригодных для нормального проживания. Такое положение дел однозначно приведет к такому, пока еще мало распространенному явлению, как экологическая миграция (хотя наша страна имела большой печальный опыт этого явления в 1989 году после аварии на ЧАЭС). Поэтому можно со всей уверенностью спрогнозировать усиление экологической миграции в будущем и конкуренцию за места проживания. А это, в свою очередь, будет только усиливать обострение социальной напряженности и конфликтов.

Поэтому не вызывает сомнения утверждение, что для достижения благополучия будущих поколений в первую очередь необходимо изменить отношение людей к природе, которая представляет собой как среду жизнедеятельности нынешних поколения, так и место жизнедеятельности поколений будущих. Именно изменение отношения к природе является поворотным пунктом к прекращению ее беспощадной эксплуатации и деградации.

Невозможно достичь благополучия потомков, если сегодня руководствоваться лишь эгоистическими мотивами. Поэтому человечество сегодня должно поступиться частью своих материальных интересов, как ради интересов потомков, так и ради самой природы как полноценного субъекта. А достичь этого без альтруистических, бескорыстных мотиваций невозможно.

Алексей Бурковский, журналист. Газета  
«Лица», №30 (534) пятница, 17 апреля 2009г.

## Глава 1. Особенности сточных вод, содержащих биогенные элементы, источники образования вод и воздействие их на окружающую среду.

Давайте знову зробим листівку Богу,  
Давайте різню Матір обіймем,  
І станемо не-сравньому народом,  
А решта все добавиться саме.  
Некинемо хитирити і мушкетувати  
В дцїї повинні бути Бог і Мати!

*Володимир Косовський.*

К биогенным элементам относятся углерод, азот, фосфор и калий. При очистке сточных вод наибольшее внимание уделяется удалению азота и фосфора, что связано с эвтрофикацией водоемов. Замедления и даже обратимости процесса эвтрофикации принципиально можно достичь путем прекращения доступа в водоемы биогенных элементов.  $\text{CO}_2$  поглощается водой из воздуха, поэтому ограничить концентрацию углерода в воде сравнительно трудно. На общую продуктивность водоемов влияет количество и характер соединений азота и фосфора. При благоприятных условиях 1 мг азота продуцирует 20-25 мг водорослей, 1 мг фосфора – 40-250 мг [1].

Грамотную технологическую оценку и подбор способов очистки сточных вод для конкретных условий водохозяйственных объектов следует проводить на базе знаний о кинетике процессов очистки, а также гидродинамике сооружений.

**Азот** содержится в сточных водах в виде органических и неорганических соединений [2]. В городских сточных водах главную часть органических азотных соединений составляют вещества белковой природы – фекалии и пищевые отходы. Неорганические соединения азота представлены восстановленными  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{NH}_3$  и окисленными  $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$  формами. Большая часть аммонийного азота образуется при гидролизе мочи, которая является конечным продуктом азотного обмена человека. Образование соединений аммония происходит также в процессе аммонификации белковых соединений. В неочищенных городских сточных водах концентрация аммонийного азота составляет 8,8-70 мг/дм<sup>3</sup>, нитритов – 0,08 – 0,6 мг/дм<sup>3</sup> и нитратов – 0,6 – 3 мг/дм<sup>3</sup>.

Для получения представления о балансе азотсодержащих веществ в сточных водах определяют общий азот.

**Таблица 1.1.** – Концентрация различных форм азота в городских сточных водах Левобережной станции аэрации г. Днепропетровска за апрель 2010г.

| Место отбора проб          | Азот аммонийный<br>мг/дм <sup>3</sup> |      |      | Нитриты, мг/дм <sup>3</sup> |      |      | Нитраты, мг/дм <sup>3</sup> |      |      |
|----------------------------|---------------------------------------|------|------|-----------------------------|------|------|-----------------------------|------|------|
|                            | min                                   | max  | ср.  | min                         | max  | ср.  | min                         | max  | ср.  |
| Сточная вода до очистки    | 34,0                                  | 19,4 | 26,0 | 055                         | 0,08 | 0,28 | 2,91                        | 0,67 | 1,3  |
| Сточная вода после очистки | 3,7                                   | 1,61 | 2,43 | 1,45                        | 0,29 | 0,94 | 30,7                        | 15,2 | 21,0 |
| ПДС, мг/дм <sup>3</sup>    | 2,0                                   |      |      | 3,3                         |      |      | 45,0                        |      |      |

Экологическая опасность неорганических соединений азота чрезвычайно отличается: наиболее токсичными являются нитриты, наиболее безопасными – нитраты, среднее положение занимает аммоний, что отражает ПДК для сброса этих азотсодержащих соединений в природные водоемы [3]. Концентрация различных форм азота в сточных водах не постоянна, она изменяется как в сетях водоотведения, так и на различных этапах очистки.

Трансформация азотсодержащих соединений начинается уже в процессе транспортировки сточных вод на городские очистные сооружения. В частности, органические соединения карбамид (мочевина), в результате микробной деструкции, распадается с образованием аммоний-иона (процесс аммонификации). Концентрация азота нитритов и нитратов в транспортируемых стоках снижается за счет спонтанной денитрификации.

В настоящее время нормативными документами по качеству поверхностных и сточных вод в Украине контролируется 3 формы азота: аммонийный, нитритов и нитратов. А в странах ЕС контролируется четвертая форма азота – либо азот органический, либо азот общий (сумма  $N-NH_4$ ,  $N-NO_2$ ,  $N-NO_3$ ,  $N_{орг.}$ ), либо азот Кьельдаля (сумма  $N-NH_4$  и  $N_{орг.}$ ). Контроль этого показателя предусмотрен в Проекте Федерального закона «О коммунальном водоотведении» России, а в настоящее время в странах СНГ ведется только в городе Санкт-Петербурге.

**Таблица 1.2.** Концентрация различных форм азота в промышленных СВ.

| Сточные воды                       | Концентрация, N, мг/дм <sup>3</sup> |                              |                              |                              |
|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|                                    | N <sub>орг.</sub>                   | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
| Металлообрабатывающие предприятия  | 9,0-12,0                            | 2,3-9,8                      | 0-0,14                       | 0-0,5                        |
| Молочные предприятия               | 56,0-121,0                          | 10,6-22,0                    | 0-0,28                       | 0-0,4                        |
| Поступающие на очистные сооружения | 35,0                                | 26,3                         | 0,1                          | 0,4                          |
| Очищенные                          | 7,5                                 | 1,9                          | 1,0                          | 10,5                         |

Из таблицы 1.2 можно сделать выводы:

Концентрация N<sub>орг.</sub> в СВ, поступающих на обследованные очистные сооружения, составляет около 44% от общего N. Наиболее высокое содержание N<sub>орг.</sub> Установлено в сточных водах молочных предприятий. Общая нагрузка на биосооружения по азоту (сумма NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и N<sub>орг.</sub>) в 3-6 раз превышает предельно-допустимую для данных сооружений, рассчитанную по азоту аммонийному. Поэтому остаточная концентрация N<sub>орг.</sub> (в отдельных пробах азота аммонийного) в очищенных СВ достаточно высокая.

Объем сточных вод сахарного завода средней мощности, на котором перерабатывается до 3 тыс. т. Свеклы в сутки, составляет от 700 до 1200 м<sup>3</sup>/сут., или 200-250 тыс. м<sup>3</sup>/год.[4] Стоки завода характеризуются высоким содержанием органического вещества (ХПК>2852 мг/дм<sup>3</sup>), фосфора (14,2 мг/дм<sup>3</sup>) и калия (69 мг/дм<sup>3</sup>).

Сточные воды маслосыркокомбинатов формируются из 30% производственных и 70% хозяйственно-бытовых. Содержание биогенных элементов следующее, мг/дм<sup>3</sup>: 9,7-37,8 азота; 5,7-44,2 фосфора; 22,9-42,7 калия.

Механизированные прачечные при станциях железных дорог Украины характеризуются сточными водами, имеющими следующие показатели: pH – 7,2-9,8; t>30°, содержание общего азота – 100-130мг/дм<sup>3</sup>, аммонийного азота – 15 мг/дм<sup>3</sup>; фосфатов по P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 140-150мг/дм<sup>3</sup>; БПК<sub>н</sub>=490-520мг/дм<sup>3</sup>; ХПК мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>=1000-1100 мг/дм<sup>3</sup>.

Заводы по производству аммиачной селитры, азотной кислоты и химических реактивов характеризуются повышенным содержанием азотсодержащих соединений: азот аммонийный 50(min) – 1000(max)

мг/дм<sup>3</sup>; азот нитритов 50(min) – 1000(max) мг/дм<sup>3</sup>; азот нитратов – 130(min) – 250(max) мг/дм<sup>3</sup>; фосфаты 1(min) – 3(max) мг/дм<sup>3</sup>.

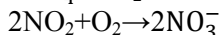
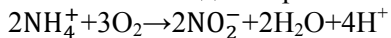
Сточные воды рыбоконсервных заводов имеют следующую характеристику по биогенным элементам: азот общий – 30-40 мг/дм<sup>3</sup>; азот аммонийный – 30-35мг/дм<sup>3</sup>; фосфор (в пересчете на Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub>) – 8-10 мг/дм<sup>3</sup>.

В сточных водах мясокомбинатов общего азота может быть от 80 до 160 мг/дм<sup>3</sup>, а аммонийного – 50-80 мг/дм<sup>3</sup>.

Сточные воды, поступающие на очистные сооружения Великого Новгорода первой очереди, содержат азотные загрязнения от одного из крупнейших в Европе производителей минеральных удобрений АО «Акрон» (азот суммарный до 4т/сут., концентрация до200 мг/дм<sup>3</sup>) [5]. Содержание азота аммонийного на входе на очистку находится в пределах 70-120 мг/дм<sup>3</sup>, а азота нитратного – 13,3-18 мг/дм<sup>3</sup>, азота нитритного – 6,2-6,46 мг/дм<sup>3</sup>, а БПК<sub>п</sub> – 158-343,4 мг/дм<sup>3</sup>.

В процессе биологической очистки сточных вод аммонийный азот частично переходит в белковый азот биомассы микроорганизмов и в определенных условиях может окисляться до нитритного и нитратного, что свидетельствует о высокой эффективности биологического процесса, поскольку нитрификация аммонийного азота начинается лишь после глубокого извлечения органических загрязнений. В свою очередь, в результате процессов биохимической денитрификации, нитритный и нитратный азот может восстанавливаться до молекулярного, который уходит в атмосферу.

**Нитрификация** – процесс окисления кислородом воздуха аммонийного азота до нитритов и нитратов, осуществляемый нитрифицирующими микроорганизмами. На первой стадии процесса нитрификации аммоний окисляется до нитритов, на второй стадии нитриты окисляются до нитратов:



Для процесса нитрификации оптимальная величина рН составляет 7-9; возможна нитрификация и при рН – 6-7.

**Денитрификация** – процесс восстановления нитритов и нитратов до свободного азота, который выделяется в атмосферу. Процесс может быть реализован при наличии в воде определенного количества органического субстрата, окисляемого сапрофитными микроорганизмами до СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>О за счет кислорода азотсодержащих соединений. При денитрификации обеспечивается очистка сточных вод одновременно от биологически окисляемых органических соединений и от

соединений азота ( $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$ ). Наиболее эффективно процесс денитрификации протекает при  $\text{pH} = 7-7,5$ ; при  $\text{pH} <$  или  $> 9$  процесс затормаживается. В качестве органического субстрата в процессе денитрификации могут быть использованы любые биологически окисляемые органические соединения (углеводы, спирты, органические кислоты и т.д.), а также сточные воды после первичных отстойников; производственные стоки, предпочтительно не содержащие азот.

Необходимо соотношение величин БПК<sub>н</sub>:  $\text{NO}_3^- \approx 4:1$ .

Для процессов нитрификации и денитрификации могут быть использованы традиционные сооружения биологической очистки: аэротенки и биофильтры.

**Фосфор** входит в состав фосфатов, которые интенсивно используются в составе моющих средств и стиральных порошков. Фосфаты находят широкое применение в пищевой промышленности и в процессах водоподготовки. В состав сельскохозяйственных удобрений входят фосфатные минералы; фосфаты также являются следствием разложения остатков растений и животных. Фосфаты могут попадать в водоемы самыми различными путями, в частности, с бытовыми и промышленными стоками, и конечно же, вымываться с сельскохозяйственных угодий. Анализ содержания фосфатов – важная составляющая комплексного контроля состава природных и питьевых вод.

Фосфаты широко применяются для обработки воды бойлеров и котлов. Фосфаты добавляются к воде теплоносителю для уменьшения отложений на поверхностях теплообмена. Вот почему важной частью водоподготовки котловой воды является непрерывный контроль концентрации фосфатов, что обеспечивает соблюдение технологических норм эксплуатации [6].

Хорошая растворимость фосфорорганических соединений в воде обуславливает несомненную опасность для окружающей среды и человеческого организма. Это обусловлено способностью фосфорорганических соединений химически связывать и инактивировать биологические катализаторы различных реакций в организме [7]. Фосфорорганические соединения обладают кумулятивными свойствами в живых организмах, что еще больше усиливает их токсическое воздействие на окружающую среду.

Фосфорорганические соединения входят в состав многих так называемых системных инсектицидов. Фосфорорганические соединения различного строения являются основой многих боевых отравляющих

веществ (БОВ). В связи с этим актуальной является разработка эффективных технологий, предупреждающих последствия террористических актов с использованием отравляющих веществ. Высокая растворимость фосфорорганических соединений в воде требует создания надежных методов обезвреживания, в первую очередь воды от этих соединений.

Многие исследователи анализировали пути поступления фосфора и его содержание в поверхностных водоемах [8]. Так, в Китае общее поступление в озера составляло от 3,1 до 3,2 г/м<sup>3</sup> в один год, при этом 80% фосфора поступило с канализационными стоками, а остальная часть с атмосферными осадками. В Германии с бытовыми сточными водами в водоемы поступает около 38% соединений фосфора.

Лабораторией по охране природы в Бристоле (Великобритания) определены и исследованы источники поступления фосфатов в р. Темзу [8]. Концентрация фосфатов, попадающих в реку с сельскохозяйственных полей, варьировалась в пределах 0,08-0,46 мг/дм<sup>3</sup>.

Существенным источником поступления биогенных веществ в поверхностные водоемы могут быть животноводческие комплексы. В одной тонне навоза содержится около 5 кг азота; 2,5 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и 6 кг K<sub>2</sub>O.

Таким образом, значительное количество фосфора поступает в почву с навозом, а остальная часть его вымывается поверхностным стоком с водосбора в водоем.

Мощным источником поступления фосфора в поверхностные водоемы являются также предприятия сельскохозяйственного производства. Установлено [8], что наибольшее количество фосфора (80-90%) выносится сточными водами с обрабатываемой почвы сельхозугодий, особенно осенью с распаханых под зябь полей.

Концентрация фосфатов (P<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>3-</sup>) в некоторых водоемах около г. Киева:

р. Нивка – 0,1-2,29 мг/дм<sup>3</sup>

р. Ирпень – 0,26 мг/дм<sup>3</sup>

р. Днепр выше г. Киева – 0,2 мг/дм<sup>3</sup>

Сбросный канал воды со

станции аэрации Бортничи - 4,5 мг/дм<sup>3</sup>

Во всех створах Днепра отмечается превышение нормативов ПДК для водоемов рыбохозяйственного водопользования в 1,5-6,9 раза фосфатов (до 0,58 мг/дм<sup>3</sup>). Необходимо отметить, что неоргани-

ческие соединения фосфора составляют не более 10% от общего количества фосфора, содержащегося в воде поверхностных водоемов, а основная часть его запасов находится в органической форме и оседает на дно.

**Таблица 1.3.** – Концентрация фосфатов в сточных водах г. Кривой Рог за 2004 г.

| Сточные воды                | Содержание фосфатов в СВ различных станциях аэрации мг/дм <sup>3</sup> |          |       |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------|-------|
|                             | Центральная                                                            | Северная | Южная |
| До очистки                  | 8,0                                                                    | 8,8      | 7,6   |
| После биологической очистки | 6,0                                                                    | 6,0      | 5,2   |
| ПДС                         | 3,5                                                                    | 3,5      | 1,5   |

Система Криворожских станций аэрации была создана в 1960-х годах (как и большинство станций на Украине), существует более 40 лет, но проблема дефосфатизации возникла практически только в последнее время. Это объясняется двумя главными причинами:

- нормативы ПДС для фосфатов на уровне 3,5 мг/дм<sup>3</sup> были установлены сравнительно недавно;
- концентрация фосфатов в сточных водах, которые поступали на очистку в прошлые годы была меньшей, или сравнительно редко превышала 3,5 мг/дм<sup>3</sup>, что позволяло выдерживать нормативные показатели в оборотных водах с использованием на криворожских станциях технологий. Сейчас содержание фосфатов в хозяйственных стоках, которые поступают на очистку, значительно выросли и составляют 10-12 мг/дм<sup>3</sup>. Это обусловлено, главным образом, увеличением использования населением современных моющих средств.

В 2006 году институтом «Кривбаспроект» разработана рабочая проектная документация 3-го пускового комплекса реконструкции центральной станции аэрации, которая утверждена государственной санитарно-экологической экспертизой. Однако на стадии этого комплекса, стоимость около 30млн. гривен, проблема дефосфатизации остается нерешенной. В пояснительной записке проекту 3-го пускового комплекса 7-03071-ГХ.ПЗ (стр.46) в частности говорится: «Технологии по дефосфатизации биологически очищенных сточных вод проектом реконструкции на стадии 3-го пускового комплекса не предусмотрено по причине отсутствия проектных нормативов и практики использования в отечественных условиях. Поэтому концентрация

фосфатов в биологически очищенной воде будет составлять  $3,5 \text{ м}^2/\text{дм}^3$  и выше».

На южной станции аэрации (мощностью в 15 раз меньше ЦСА) в составе работ по её реконструкции, которые начались в конце 2006 года, Днепропетровским институтом «Днепрокоммун НИИ проект» предлагается проверить два варианта современных технологий дефосфатизации (Первая - с использованием инертной загрузки, вторая с биореакторами, работающих в аэробно-аноксидном режиме). Достаточного опыта использования таких технологий ещё нет. После их апробирования, намечено в ближайшие три года, определится с вопросом дальнейшего использования этих или других технологий на станциях аэрации города Кривой Рог.

Специалистами КП «Кривбасводоканал» на протяжении последних лет проводится работы по детальному изучению состояния проблемы на Украинских и Российских станциях аэрации, а также исследования в производственных условиях на Криворожских станциях аэрации.

Учитывая, что проблема дефосфатизации остро стоит на Украине, украинские станции аэрации на сегодня не имеют технических и технологических возможностей для их решения, ведущий харьковской научно-исследовательский институт «УкркоммунНИИпрогресс» занимается изучением условий нормирования обработанных сточных вод по показателю «фосфаты». КП «Кривбасводоканал» со своей стороны дал научным сотрудникам необходимую информацию, которая была ими запрошена. Мощности станций переработки сточных вод в г.Кривой Рог,  $\text{м}^3/\text{сут.}$ :

ЦСА-455000; ССА-36000; ЮСА-37500; ЦнСА-24000;

Содержание фосфатов в городских сточных водах, поступающих на отчистку находится в пределах  $5-40 \text{ мг}/\text{дм}^3$  (Табл.1.3-1.4), а после отчистки  $-3-5 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ; в производственных может быть  $200 \text{ мг}/\text{дм}^3$  и выше.

**Таблица 1.4.** - Концентрация фосфатов и АПАВ в сточных водах Левобережной станции аэрации г. Днепропетровска за апрель 2010г.

| Место отбора проб | Содержание фосфатов, $\text{мг}/\text{дм}^3$ |     |       |     | Содержание анион активных ПАВ, $\text{мг}/\text{дм}^3$ |     |       |     |
|-------------------|----------------------------------------------|-----|-------|-----|--------------------------------------------------------|-----|-------|-----|
|                   | max                                          | min | сред. | ПДС | max                                                    | min | сред. | ПДС |
|                   |                                              |     |       |     |                                                        |     |       |     |

|                                  |      |      |      |     |       |       |       |     |
|----------------------------------|------|------|------|-----|-------|-------|-------|-----|
| Сточная вода до очистки          | 13,2 | 9,17 | 11,3 | 3,5 | 0,53  | 0,38  | 0,45  | 0,1 |
| Сточная вода после очистки       | 2,96 | 0,19 | 1,61 | 3,5 | 0,050 | 0,027 | 0,036 |     |
| р. Самара<br>500м выше сброса СВ | 0,22 |      |      |     | 0,020 |       |       |     |
| р. Самара<br>ниже сброса СВ      | 0,33 |      |      |     | 0,023 |       |       |     |

Фосфор в воде находится в виде неорганических, органических, и органоминеральных соединений, а также входит в состав клеток гидробионтов. Его соединения в классификации примесей воды по фазовому состоянию и дискретности, разработанной в институте коллоидной химии и химии воды им. А. В. Думанского НАН Украины академиком Л. А. Кульским [9], могут быть в каждой из 4-х групп. В частности, к **первой** группе (взвеси, содержащие фосфор) можно отнести гидробионты или фрагменты их деструкции микроскопического размера, присутствующие в сточных и природных водах. Ко **второй** группе (примеси коллоидной дисперсности) относятся нерастворимые в воде фосфаты, а также вирусы, высокомолекулярные вещества, обуславливающие цветность воды. К **третьей** группе относятся молекулярно-растворимые фосфаты, содержащиеся, например, в моющих средствах. К **четвертой** группе примесей принадлежат фосфорная кислота, ее соли и другие растворимые фосфорные соединения, диссоциирующие в воде на ионы.

В городских сточных водах фосфор находится в виде кислых и нормальных ортофосфатов, полифосфатов и органофосфатов в растворимой и нерастворимой формах. Из фосфатов растворимыми являются только средние соли щелочных металлов и аммоний, все остальные катионы образуют практически нерастворимые соли. При этом возможно существование двойных и сложных солей с переменным составом. Кроме того фосфаты активно сорбируются на поверхности многих веществ.

Основным источником ортофосфатов в городских сточных водах являются синтетические моющие средства. Значительное количество стиральных порошков содержит тринатрий фосфат  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  в качестве щелочного агента с большой буферной емкостью. Некото-

рые полифосфаты (пирофосфат натрия -  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ , трифосфат натрия  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ; гексаметофосфат натрия –  $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{12}$  и другие) применяются в промышленности и быту в качестве умягчителей и могут присутствовать в сточных водах. Полифосфаты претерпевают ступенчатый гидролиз, переходя в ортофосфаты. На скорость гидролиза сильное влияние оказывает pH, температура и солевой состав воды. Присутствие бактерий ускоряет процесс гидролиза. [9]

Фосфор – важнейший биологический элемент необходимый для жизни, поэтому органофосфаты являются неотъемлемой частью любого организма. Органофосфаты легко гидролизуются особенно под влиянием ферментов в результате этого процесса также образуются ортофосфаты. Таким образом большая часть фосфорсодержащих соединений в водах гидролизуются, и конечным продуктом этих процессов являются кислые фосфаты.

Содержание фосфора и азота имеет особое значение при биологической очистке сточных вод. При их недостаточных количествах очистка сточных вод может затормаживаться, а при полном отсутствии становится вообще невозможной [2]. В соответствии с СНИП 2.03.04-85 соотношение  $\text{БПК}_\text{п}:\text{N}:\text{P}$  должно быть 100:5:1.

#### **Нормирование биогенных элементов.**

В Швеции, Финляндии, Германии нормы содержания общего фосфора в водах, сбрасываемых в водоемы, составляют 0,5-1 мг/дм<sup>3</sup> (по P), в Польше, Румынии, Венгрии ПДК на содержание фосфатов в водоемах равно 0,05-1 мг/дм<sup>3</sup> в зависимости от категории водоема. В СНГ концентрация фосфорсодержащих соединений в сточных водах при сбросе их в водоёмы устанавливаются из условия недопустимости эвтрофикации и зависят от природы соединений фосфора, степени разбавления сточных вод в водоеме, фоновой концентрации фосфора в нем, наличия прочих источников фосфатов и обычно принимается равными 0,01-0,1 мг/дм<sup>3</sup>. ПДК фосфатов для некоторых типов вод следующие, мг/дм<sup>3</sup>:

- вода питьевая – 3,5;
- вода водопроводная - 0,4;
- водоемы проточные – 0,1;
- озера, пруды – 0,05;
- вода в системе водооборота – 0,03;

Количество фосфатов, поступающих в городские сточные воды в результате деятельности человека, постоянно возрастает, и ожидается, что оно составит до 7г·чел/сут.. Сейчас по СНИП от 2.04.03-85 –

фосфаты – 3,3г·чел/сут., в том числе от моющих веществ – 1,6г·чел/сут., ПАВ - 2,5 г·чел/сут..

В настоящее время органы охраны природы требуют обеспечения установленных ПДК аммония солевого, нитритов, нитратов, и фосфатов в очищенных сточных водах, сбрасываемых в водные объекты (табл. 1.5)

**Таблица 1.5.** – ПДК биогенных элементов для сброса в водоемы различного назначения

| Биогенные элементы                               | ПДК, мг/дм <sup>3</sup>                         |                                                 |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                                  | Для водоемов культурно-бытового водопользования | Для водоемов рыбохозяйственного водопользования |
| Азот, аммиак                                     | 2                                               | 0.05                                            |
| Азот, аммонийный (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) | 1                                               | 0.39                                            |
| Азот нитритов                                    | 0.8                                             | 0.02                                            |
| Азот нитратов (NO <sub>3</sub> )                 | 10.2                                            | 9.1                                             |
| Фосфаты (P)                                      | 1.2                                             | 0.2                                             |

Еще одним мероприятием по ограничению сброса биогенных элементов в водоемы является Хельсинская конвенция «Хелком», которая предписала для сооружений обслуживающих более 100 тысяч человек максимальную концентрацию азота в очищенных сточных водах не более 10мг/дм<sup>3</sup>, минимальный уровень удаления азота 70-80%, максимальную концентрацию фосфора 1.5мг/дм<sup>3</sup>. [10,11]

Эти мероприятия странами «переходного состояния», т.е. странами СНГ, в том числе и Украиной должны быть выполнены до 2010 года.

По данным Всемирной организации здравоохранения суточная норма нитратов составляет 5мг NaNO<sub>3</sub> на 1кг массы тела человека или 300-325мг. [12]

При расчетах суточной нормы нитратов учитывают потребление продуктов питания и питьевой воды.

По стандарту в одном литре питьевой воды может содержаться до 45мг нитратов.

Не отвечает стандартам питьевая вода в Херсонской, Крымской, Донецкой, Луганской и других областях Украины [12]. Установлено что перенасыщение питьевой воды минеральными солями способствует развитию гипертонической болезни, язвы желудка, двенадцатиперстной кишки, заболеванию почек и печени.

От 58.7 до 86% суточного потребления нитратов в организм человека поступает от использования овощей.

Сами нитраты не токсичны. Потенциальная токсичность их обусловлена тем, что в чрезмерных количествах в организме человека они преобразуются в нитриты, которые изменяют состояние здоровья. Преобразование нитратов в нитриты происходит под действием ферментов микроорганизмов щитовидной железы, желудка и кишок, откуда они поступают в кровь и ткани. Нитриты действуют на гемоглобин крови, который за тем превращается в метгемоглобин. Особенно опасны для организма человека – нитрозоамины, которые способствуют образованию злокачественных опухолей, заболеванию печени. Нитрозоамины - это соединение нитратов и нитритов с аминокислотами, которые образуются в желудке людей, а также находятся в воздухе и продуктах питания. Опасность увеличивается от того, что раковые опухоли образуются от постоянного поступления в организм человека даже очень незначительных количеств нитратов и нитритов. Из 100 апробированных на животных нитрозоаминов 80 оказывают канцерогенное действие.

Токсичная доза нитратов для взрослых составляет 600мг, для детей раннего возраста – 100, для грудных детей – 10мг.

Чувствительны к нитратам люди преклонного возраста, больные на анемию, сердечнососудистую и дыхательную систему.

Установлено, что при достаточном содержании витаминов С (аскорбиновая кислота) и Е (токоферол), пектиновых веществ, полифенолов в продуктах питания, они действуют как ингибиторы образования метгемоглобина, таким образом можно предотвратить развитие злокачественных опухолей. Овощи, собранные утром и вечером, содержат нитратов меньше чем собранные в другое время суток. Так содержание нитратов в буряках, собранных около 8 часов утра, в 2 раза меньше, чем у собранных около 16-ти часов.

Таким образом, в процессе традиционной биологической очистки максимально возможно изъять 2-3.8г азота и 0.4-0.75г фосфора в пересчете на загрязнение, поступающее от одного жителя. В очищенной сточной воде при полной биологической очистке останется 4.2-6г азота и 2.55-2.9г фосфора на одного жителя. При расчете концентрации указанных загрязнений в очищенных сточных водах при норме водопотребления 250-300 л/чел.сут., суммарная концентрация соединений азота и фосфора составляет 15-20 и до 10мг/дм<sup>3</sup> соответственно.

Таким образом, фактическая концентрация соединений азота и фосфора оказывается в 2-10 раз выше ПДК.

Глубокое удаление азота и фосфора из городских сточных вод становится неотъемлемой задачей на уже существующих сооружениях канализаций, т.к. они, запроектированные и построенные в то время, когда загрязнения воды биогенными элементами ещё не было таким интенсивным, в настоящее время не справляются с задачей очистки сточных вод от этих веществ. Поэтому сейчас во многих странах разрабатываются методы по удалению биогенных элементов на уже используемых сооружениях. Реконструкция таких сооружений, в частности аэротенков, выгодно и в экономическом плане, т.к. стоимость доочистки  $1\text{ м}^3$  сточных вод на дополнительных сооружениях очистки в 1.5-2 раза выше, чем сама очистка, а удельные затраты на удаление массы загрязнений возрастают в 20-50 раз. Поэтому первым шагом к выполнению программы по удалению биогенных элементов из стоков является реконструкция аэротенков с оборудованием необходимых сооружений.

Исследования по разработке методов реконструкции и модернизации аэротенков, создания новых сооружений и биореакторов по снижению биогенных элементов в городских и производственных сточных водах проводятся различными организациями как в нашей стране, так и за рубежом. В современной литературе можно найти множество примеров таких разработок, а эта книга пытается собрать их воедино, проанализировать и дать обобщающие выводы и предложения для их практического применения.

## Глава 2. Краткая характеристика известных методов очистки сточных вод от биогенных элементов.

*Цена чистой воды:  
Здоровье человека,  
Благополучие нации,  
Вода – главная составляющая  
Жизни на Земле, одна из составляющих  
здоровья человека.*

Основные вопросы защиты окружающей среды необходимо решать на основе следующих принципов:

- ❖ Форма и масштабы человеческой деятельности должны быть соизмеримы с запасами невозобновляемых природных ресурсов;
- ❖ Неизбежные отходы производства должны попасть в окружающую среду в форме и концентрации, безвредных для жизни. Особенно это относится к водным ресурсам.

Для правильного подхода к решению актуальных задач в области окружающей среды необходимы определённые знания в этой области. Учебные программы, разработанные во многих университетах и институтах можно разбить на две крупные группы:

- ❖ Решение экологических вопросов в политическом, юридическом, экономическом и других гуманитарных направлениях;
- ❖ Решение экологических вопросов в техническом аспекте, где решаются общетехнические задачи или частные задачи отдельной или близких отраслей промышленности.

Для очистки сточных вод от биологических элементов используются следующие методы. [2,13,14]

физико-химические;  
химические;  
биологические;  
комбинированные.

## 2.1 Краткая характеристика методов очистки сточных вод от азотосодержащих веществ.

*Збережена природа зберігає дух нації.  
Минуле змінити не можна,  
А майбутнє залежить від нас.*

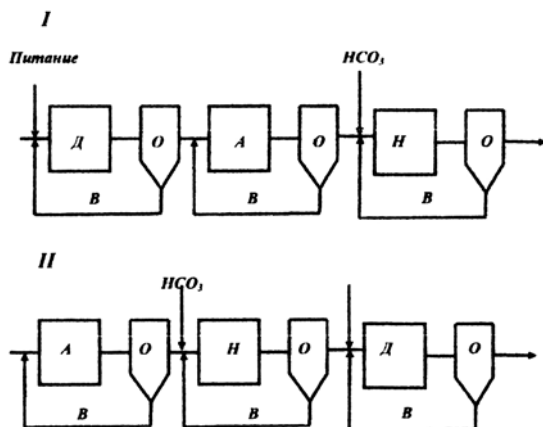
Биологический метод очистки сточных вод от соединений азота основан на процессах нитрификации и денитрификации. Процесс нитрификации представляет собой совокупность реакций биологического окисления аммонийного азота до нитритов и далее до нитратов. В ходе денитрификации происходит окисление органических веществ при восстановлении азота нитратов до свободного азота.

Для денитрифицирующих бактерий характерной особенностью является возможность использовать источники энергии или в присутствии кислорода или без него с восстановлением нитратов и образованием азота ( $N_2$ ). Биологический метод удаления аммонийного азота из сточных вод является наиболее приемлемым в современных условиях. Биологические процессы глубокой очистки сточных вод от соединений азота можно осуществить двумя способами:

- с использованием биомассы (активного ила), находящейся во взвешенном состоянии;

- с использованием прикрепленной активной биомассы.

В обоих способах могут быть использованы комбинированные и раздельные системы очистки. В комбинированных системах в одном сооружении предусматривается проведение нитрификации и денитрификации, а в раздельных - только нитрификации или денитрификации. В раздельных системах с использованием взвешенной культуры процессы очистки сточных вод от органических веществ, нитрификация и денитрификация осуществляется специфическими илами; после каждой ступени имеется свой вторичный отстойник. Наиболее часто встречающиеся схемы удаления азота - с различным расположением денитрификационных зон (рисунок). Процесс очистки по данным схемам характеризуется высокими скоростями, легкостью управления и устойчивостью на каждой стадии. Недостатком раздельных систем является наличие дополнительных вторичных отстойников, требующих насосных станций для перекачивания циркулирующего ила из-за перепадов высот.



**Рисунок 2.1** - Схема удаления азота с различным расположением денитрификационных зон: I- с денитрификатором в начале процесса; II- с денитрификатором в конце процесса; А - азротенк; Н - зона нитрификации; Д- зона денитрификации; О - отстойник; В - возвратный активный ил.

В комбинированных системах с использованием взвешенной культуры процессы очистки сточных вод от органических соединений, нитрификация и денитрификация осуществляются в одном сооружении смешанной популяцией микроорганизмов. В некоторых случаях, особенно при очистке концентрированных азотсодержащих сточных вод, комбинированную систему разделяют на две ступени очистки.

Одним из возможных методов очистки сточных вод от азота является очистка в биологических прудах с массовым развитием водорослей. В результате жизнедеятельности зеленых водорослей в прудах осуществляется непосредственное потребление соединений азота из сточных вод, а также значительное снижение концентраций других остаточных загрязнений.

Введение в биологических прудах искусственной аэрации позволяет не только существенным образом повысить производительность этих сооружений, но и обеспечить в течение всего года стабильность качества очищенных вод и практически исключить влияние климатических условий на процессы очистки [16, 54].

Для очистки сточных вод от азотистых соединений с применением прикрепленной культуры ила используют фильтры с движением воды относительно неподвижного материала загрузки, а также с движением загрузки относительно воды.

На многих предприятиях азотной промышленности и нефтехимии остро стоит проблема закисления оборотной воды вследствие биохимической нитрификации – процесса превращения аммиака, карбамида и аммонийных солей в азотистую и азотные кислоты, образования нитритов и нитратов. При этом величина pH оборотной воды снижается до значения 5,5-6,0 ед. pH и вследствие этого - интенсификация процесса коррозии до величин 0,5-1,0 мм в год и более. НИИ «Водоочистные технологии» разработан ингибитор нитрификации «СВОД® - ИН» . [53]

На практике также применяются физико-химические методы удаления азота.

- Хлорирование сточных вод в соотношении 8:1 или 10:1 при pH 6,5-7,5 может дать 95%-ное удаление аммиака, но недостаток чрезмерного хлорирования состоит в том, что почти весь вводимый хлор восстанавливается в ионы хлорида, что приводит к повышению концентрации растворенных солей в очищенной сточной воде. - Применение полупроницаемых мембран при обратном осмосе позволяет достигать эффекта очистки от азотсодержащих соединений до 98,5%. Но процесс, основанный на свободном пропуске молекул растворителя при фильтровании сквозь мембрану и задержке молекул или ионов растворенных веществ, требует тщательной предварительной очистки и умягчения воды.

- Применение озонирования целесообразно лишь в случаях перехода аммонийного азота в нитратную форму. Аммиак полностью окисляется в нитрат, в результате устраняется расход кислорода на окисление азота в отходах. Эффективного удаления аммиака можно достичь только при поддержании щелочной среды.

Применение сорбционных методов на бурых углях и нанесенного  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  на углях в качестве катализатора, приводит к уменьшению концентрации ионов аммония почти в четыре раза [51]. Для очистки вод от ионов аммония и других токсичных ионов можно использовать сорбенты из опок [52].

Метод отдувки основан на отдувке аммиака из раствора воздухом при pH — 11. Простота этого метода делает его наиболее дешевым методом удаления азота в тех случаях, когда предварительно удаляется фосфор путем обработки сточной воды известью. Таким образом, с помощью воздушной отдувки можно добиться 95%-ного удаления аммиака. Но при отдувке воздухом возникают следующие проблемы:

- на загрузке башен образуются отложения карбоната кальция,

которые необходимо часто удалять промывкой кислотами или механической очисткой;

- зимой в башне образуется лед;

- аммиак хорошо растворяется при низких температурах, что снижает эффективность его удаления;

- нитратный азот, образующийся в процессе очистки, не подлежит отдувке.

В отличие от процесса отгонки аммиака, эффективность процесса ионообмена не зависит от температуры сточных вод, поступающих на очистку. К тому же эффективность удаления аммиака при ионном обмене значительно выше, и он применяется, когда необходимо обеспечить очень низкую концентрацию азота в воде после очистки. Для обеспечения экономичности процесса ионного обмена необходимо применять материалы, обладающие высокой избирательной способностью по отношению к неорганическому азоту.

Электрохимический метод основан на электролизе морской воды, в результате которого выделяющаяся гидроокись магния вступает в реакцию с содержащимися в сточных водах ионами фосфора и аммиаком с образованием нерастворимой комплексной соли. Одновременно из-за выделения на аноде  $\text{Cl}_2$  происходит обеззараживание сточных вод и частичное окисление органических загрязнений. Установлено, что наиболее эффективная и стабильная очистка с удалением 80-85% аммонийного азота и до 90% ортофосфатов достигается при добавлении в обрабатываемую сточную воду 20% морской воды.[16]

## 2.2. Краткая характеристика методов очистки сточных вод от фосфорсодержащих веществ.

*О, ты, живущий при водах великих,  
Изобилующий сокровищами!  
Пришел конец твоей, мера жаждности твоей.  
/Библия. Иеремия 51:13/*

*Воздай им, Господи, не делай рук их.  
/Библия. Плач Иеремии 3:64/*

Фосфаты из сточных вод удаляются химическими, физико-химическими и биологическим (за счет модификации биологического процесса включением фосфора в клеточное вещество) методами.

При адсорбционном методе фосфор поглощается поверхностью сорбента, который может быть приготовлен из гранулированного оксида алюминия активированным оксидом алюминия и сульфатом алюминия.

При обработке сточных вод магнитным полем фосфаты связывают реагентом в нерастворимые соединения, после чего вводят магнитный материал и воздействуют магнитным полем, в результате чего выделяется фосфатосодержащий осадок.

При осуществлении электро-коагуляционно-флотационного метода используются алюминиевые и железные электроды.

Метод кристаллизации основан на выращивании кристаллов фосфатов в сточных водах на центрах кристаллизации с последующим удалением их из системы. Кристаллизация осуществляется на фильтрах или во взвешенном слое.

При использовании химических методов обработки сточных вод ионы реагента взаимодействуют с растворимыми солями ортофосфорной кислоты, вследствие чего происходит образование мелкодисперсного коллоидного осадка фосфата. В то же время химический реагент реагирует со щелочами, содержащимися в воде, образуя осадок из крупных хлопьев. Этот осадок вызывает коагуляцию мелкодисперсного коллоидного осадка фосфата и взвешенных веществ, а также адсорбирует некоторую часть органических соединений, содержащих фосфор, далее этот осадок выводится из системы.

Удаление фосфора химическими и физико-химическими способами в настоящее время ограничено. Эти методы имеют ряд недостатков: высокая стоимость реагентов, необходимых для реализа-

ции этих методов; вторичные загрязнения, образующиеся после применения коагулянта.

На современном этапе наибольшее распространение получает биологический метод удаления фосфора. Но в большинстве случаев не удастся добиться стабильного удаления фосфатов из сточной жидкости до нормативных требований ПДК водоемов рыбохозяйственного значения, так как не обеспечивается правильное проведение процесса.

Основным методом биологического изъятия фосфора является метод с анаэробной обработкой возвратного рециркулирующего активного ила. Применение такой технологии позволяет извлекать фосфаты с эффективностью примерно 90%. В данной системе удаление фосфора происходит с избыточным илом и иловой водой, образующейся в сооружении для анаэробной обработки ила.

При использовании поочередной аэробной и анаэробной обработки смеси сточной жидкости и активного ила эффект изъятия соединений фосфора достигает 70%.

Сегодня на практике применяются различные схемы, сочетающие биологический процесс и химическое осаждение. Такое совмещение процессов позволяет добиться более высокого качества очищаемой воды, чем при применении одного из них.

В мировой практике для глубокого удаления соединений фосфора применяется химическая обработка сточных вод в сочетании с биологической очисткой. Однако совершенствование таких технологических схем продолжается и в настоящее время. Основными направлениями выполняемых работ являются: изыскание способов повышения эффективности применения реагентов; испытание новых и более дешевых реагентов, в том числе отходов промышленности; определение влияния введения реагента на биологические процессы очистки сточных вод. [17, 18]

Исследования на лабораторных установках схем биохимической очистки городских сточных вод с введением реагента [19] показали, что эффективность изъятия фосфатов обусловлена дозой вводимого реагента и его видом (рисунок 2.2)

Качество очистки сточных вод по общему фосфору, помимо дозы реагента и его вида, зависит от содержания взвешенных веществ в очищенных сточных водах. Так, при введении  $25 \text{ мг/дм}^3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$  после вторичных отстойников достигается удаление общего фосфора 75-80% при остаточном содержании взвешенных веществ  $10-15 \text{ мг/дм}^3$ .

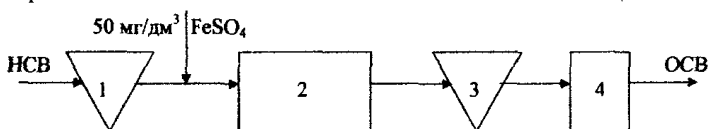
Более высокие концентрации взвешенных веществ в очищенной воде ( $30-36 \text{ мг/дм}^3$ ) обуславливают снижение эффективности удаления

соединений фосфора до 55-60% при той же дозе реагента. Фильтрация сточной воды через песчаные фильтры после вторичных отстойников приводит к повышению эффективности удаления общего фосфора в целом до 90%. [19]

Такое влияние взвешенных веществ на эффективность удаления фосфатов из очищенных сточных вод связано со значительным содержанием фосфора во взвешенных веществах (активном иле).

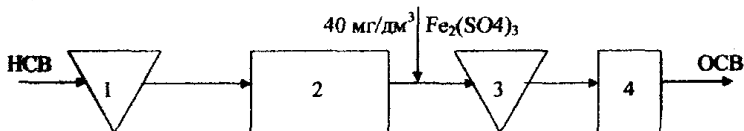
Как видно из приведенных выше вариантов введения реагента (рисунок 2.2), биохимическая очистка сточных вод совместно с реагентной обработкой весьма эффективна, но имеет ряд недостатков при практическом применении. Если внедрять такие технологические схемы на очистных сооружениях большой производительности, то для обработки такого количества сточных вод потребуются большие расходы реагентов, соответственно затраты на реагент, на строительство реагентного хозяйства, дополнительные энергозатраты.

**Вариант 1**



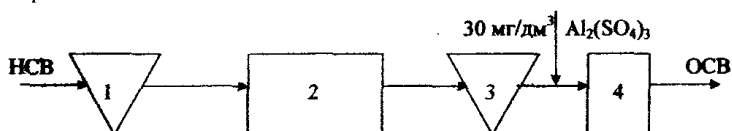
| Параметры, мг/дм <sup>3</sup> | После вторичного отстойника | После песчаного фильтра |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| БПК                           | 10-15                       | 3,3                     |
| Взвешенные вещества           | 10                          | 2,0                     |
| Общий фосфор                  | 0,8                         | 0,6                     |
| Ортофосфаты-Р                 | 0,1                         | 0,1                     |

**Вариант 2**



| Параметры, мг/дм <sup>3</sup> | После вторичного отстойника | После песчаного фильтра |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| БПК                           | 10                          | 2,5                     |
| Взвешенные вещества           | 10-20                       | 2,0                     |
| Общий фосфор                  | 1,0                         | 0,7                     |
| Ортофосфаты-Р                 | 0,3                         | 0,3                     |

*Вариант 3*



| Параметры, мг/дм <sup>3</sup> | После вторичного отстойника | После песчаного фильтра |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| БПК                           | 10                          | 1,0-1,5                 |
| Взвешенные вещества           | 10-15                       | 10                      |
| Общий фосфор                  | 2,5-3,0                     | 0,5                     |
| Ортофосфаты-Р                 | 2                           | 0,2-0,3                 |

**Рисунок 2.2** - Реагентное удаление соединений фосфора:

1 - первичный отстойник; 2 - аэротенк; 3 - вторичный отстойник; 4 - песчаный фильтр;  
НСВ - неочищенные сточные воды; ОСВ - очищенные сточные воды.

Для удаления биогенных элементов совместно с реагентами также возможно использовать флокулянты, которые позволяют в некоторой степени снизить расход реагента и улучшить процесс коагуляции загрязнений. Экспериментальные исследования которые были проведены для изучения процесса удаления из сточных вод биогенных элементов, показали некоторые позитивные результаты. При концентрации флокулянта DASF 2-3 мг/л можно достигнуть эффекта очистки до 17% от солей аммония и до 48% - от фосфора по фосфатам. При использовании реагента совместно с флокулянтom эффект очистки может достигать 80-90%.

Одним из способов интенсификации процесса очистки сточных вод с помощью реагентов является магнитная активация раствора реагента. При использовании активированного раствора реагента при очистке сточных вод уменьшается расход реагента, соответственно уменьшается площадь реагентного хозяйства, уменьшаются затраты,

при этом качество очищенных вод остается таким же, как при использовании обычного коагулянта.

Исследования, выполненные на сточной воде Комплекса биологической очистки «Диканевский» г.Харькова, показали возможность интенсификации процесса удаления биогенных элементов при использовании активированного раствора коагулянта в 1,5-2 раза по сравнению с использованием раствора обычного коагулянта. При этом возможно снижение расхода коагулянта не менее чем на 25-30% без ухудшения качества очистки сточных вод по биогенным элементам, позволяя сбрасывать сточные воды в водоемы, а также использовать такие сточные воды в оборотных системах водоснабжения для технических нужд. [17]

### Глава 3. Реконструкция аэротенков с целью интенсификации извлечения биогенных элементов из сточных вод.

*Якщо ти володієш інформацією –  
знайши, володієш ситуацією.*

*Старе журналістське прислів'я.*

*Ми живемо у світі інформації та  
знань, тому передай країні  
стимулюючі навівання своїх громадян  
проти цього усього життєвого.*

*Юрій Левикін, журналіст.*

Как уже отмечалось ранее, очистка сточных вод от биогенных элементов является очень важной и актуальной задачей, так как биогенные вещества – причина многих нежелательных явлений. И первый шаг к решению этой проблемы можно осуществить путем реконструкции уже действующих биологических очистных сооружений, в частности аэротенков. [21-32] В последние годы наметился устойчивый интерес к реализации проектов реконструкции существующих сооружений глубокой очистки сточных вод по биогенным веществам. Потому еще с 80-х годов прошлого столетия МГП «Мосводоканал» и другие организации начали заниматься проблемами удаления биогенных элементов из сточных вод и сейчас накоплен определенный опыт.

Основой себестоимости очистки сточных вод являются издержки на энергоресурсы, утилизацию ила, подготовку и содержание квалифицированного персонала. Поэтому требованиями, предъявленными к современным технологиям, являются:

1. Снижение капитальных вложений за счет:

- интенсификации процесса;
- использования технологий без первичного отстойника;
- использование технологий с отсутствием прироста активного

ила.

2. Снижение эксплуатационных издержек за счет:

- минимального использования энергоресурсов;
- минимальных затрат на утилизацию осадков и ила;
- простых процессов, не требующих высококвалифицированного

и многочисленного обслуживающего персонала.

### 3. Повышение эффективности очистки:

- по азоту;
- по фосфору.

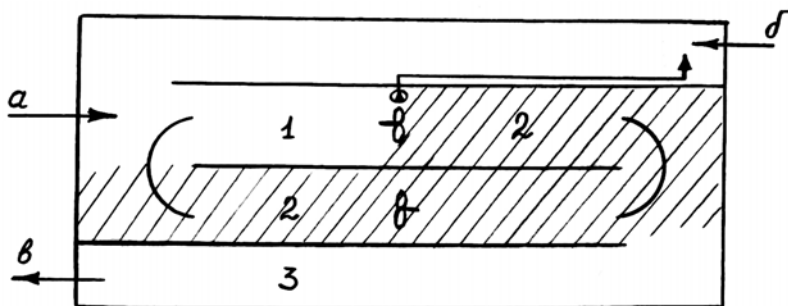
### 4. Повышение устойчивости очистки за счет:

- поддержания низкого илового индекса;
- снижения влияния изменений состава стока и его параметров.

Реконструкция аэротенков возможна следующими способами: устройство перегородок с рециклом ила, замена традиционных аэраторов – фильтросных пластин – на современные аэрационные системы с мембранными аэраторами, устройство в аэротенке аэробных, анаэробных и аноксидных условий с рециркуляцией ила.

В 1995 году была разработана технология удаления биогенных элементов, которая является модификацией процесса (рис. 3.1.) [2, 21]

### BARDENPHO



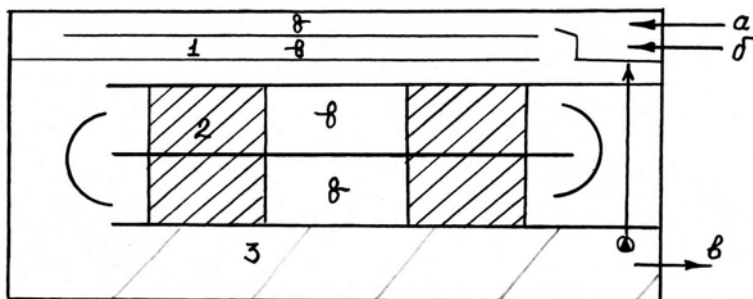
**Рисунок 3.1.** – Схеме реконструкции аэротенка по модификации процесса BARDENPHO:

1 – зона без аэрации; 2 – зона переменной (регулируемой) аэрации; 3 – зона постоянной аэрации; а – возвратный ил; б – осветленная сточная вода; в – иловая смесь на вторичные отстойники.

По заложенной в проект технологии в анаэробной секции аэротенка происходит потребление летучих жирных кислот и легкоокисляемой органики микроорганизмами полифосфатной группы, что в последующем в аэробной зоне обеспечивает процесс биологического удаления фосфора. Для обеспечения отсутствия как свободного, так и связанного кислорода, иловая смесь подается в данную секцию из конца денитрификатора. Процесс нитрификации основывается на карусельном принципе перемешивания, позволяющем не только сэкономить до 40% электроэнергии, но и организовать рецикл денитрификации до 500% без дополнительных энергозатрат. В

предлагаемой технологической схеме для более полного снижения концентраций аммонийного азота (до 0,5 мг/л) в последнем коридоре, работающем в режиме вытеснителя, проводится дополнительная нитрификация.

В результате сотрудничества МГП «Мосводоканал» и фирмы «Ковиконсалт» был разработан технический проект по реконструкции аэротенков (рис. 3.2.), основным конструктивным отличием которой является устройство перегородок в первом коридоре, что обеспечивает достаточную скорость потока (около 0,3 м/с) в аноксидной зоне\*, а также облегчает перемешивание в анаэробной зоне по принципу «карусели». Два средних коридора аэротенка оборудуются под проведение процессов нитри-денитрификации по карусельному типу. Ожидаемые концентрации на выходе:  $N_{\text{общ}} < 6 \text{ мг/л}$ ,  $N - NH_4 < 1 \text{ мг/л}$ ,  $P_{\text{общ}} < 1 \text{ мг/л}$ .

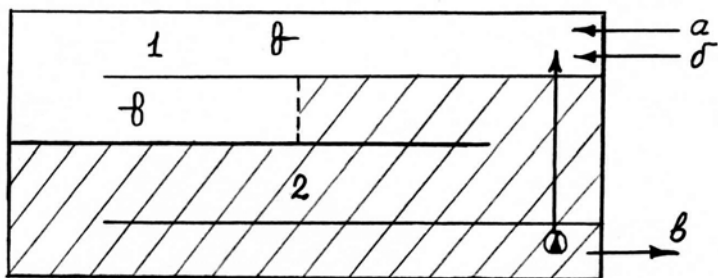


**Рисунок 3.2.** – Реконструкция аэротенка с устройством перегородок по проекту фирмы «COWI» (Дания):

1 – зона без аэрации; 2 – зона переменной аэрации; 3 – зона постоянной аэрации;; а – осветленная сточная вода; б – возвратный ил; в – иловая смесь на вторичные отстойники.

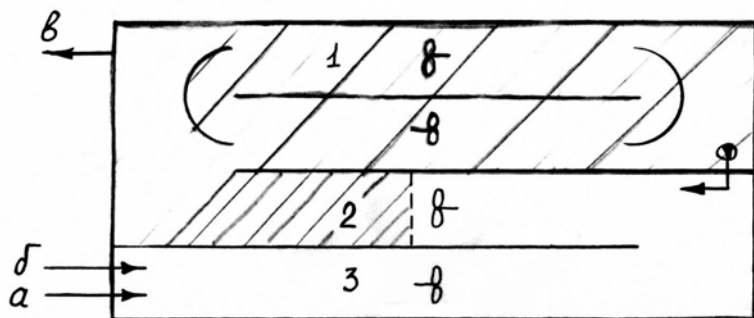
Разработаны еще схемы реконструкции аэротенков для удаления азота и фосфора фирмой «Ковиконсалт» и «SHW». Первая – по предвключенной денитрификации (рис. 3.3.), вторая – новейшая концепция, предусматривающая использование симультанной (одновременной) нитри-денитрификации при концентрации растворенного кислорода 0,3-0,6 мг/л (рис. 3.4.)

\* Аноксидная зона или аноксичная зона аэротенка, в которой присутствуют органические вещества, нитриты и нитраты и отсутствует молекулярный кислород (растворенный кислород).



**Рисунок 3.3.** – Реконструкция аэротенка по технологии с предвключенной денитрификацией: 1 – зона без аэрации; 2 – зона постоянной аэрации;  $a$  – осветленная сточная вода;  $б$  – возвратный ил;  $\theta$  – иловая смесь на вторичные отстойники.

Регулирование подачи кислорода должно выполняться с учетом показаний системы «Био-Баланс», основанной на принципе прямого измерения ферментативной активности ила. Ожидаемые концентрации загрязнений на выходе: ХПК < 40 мг/л, БПК<sub>5</sub> < 3 мг/л, N – NH<sub>4</sub> < 8 мг/л, Р<sub>общ.</sub> < 0,5 мг/л. Для гарантированного снижения фосфора предусматривается реагентное осаждение.



**Рисунок 3.4.** – Реконструкция аэротенка по технологии «Sim-Bio» (фирма «SHW», Германия): 1 – зона постоянной (регулируемой) аэрации (концентрация O<sub>2</sub> поддерживается в пределах 0,3–0,8 мг/л); 2 – зона переменной аэрации; 3 – зона без аэрации;  $a$  – осветленная сточная вода;  $б$  – возвратный ил;  $\theta$  – иловая смесь на вторичные отстойники.

Используемые для реконструкции эти технологические схемы предполагают сохранение существующей производительности сооружений. За счет современных аэрационных систем с мембранными аэраторами и других факторов планируется получить экономию электроэнергии. В настоящее время создана модель, где используется

технология, отличающаяся от вышеописанных отсутствием первичных отстойников и выделением анаэробной зоны в отдельный заблокированный биореактор. Для анаэробной зоны (реактора) можно использовать уже построенные первичные отстойники.

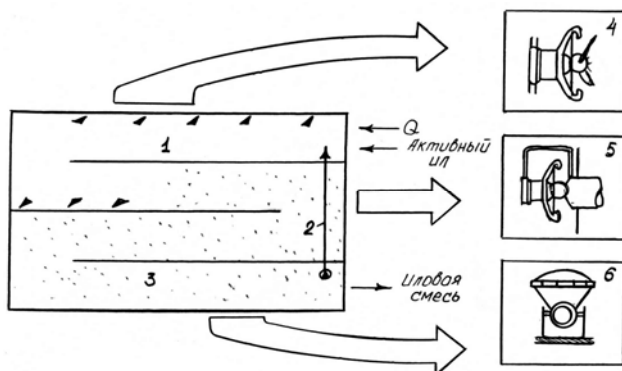
Необходимость снижения эксплуатационных затрат на очистку сточных вод обуславливает важность скорейшего решения актуальной задачи – внедрения энергосберегающих аэрационных систем. Традиционно на станциях аэрации в качестве аэраторов применялись керамические фильтросные пластины. Однако невысокий коэффициент использования кислорода воздуха, а также практическое прекращение выпуска фильтросных пластин потребовали поиска новых технических решений. Пионером этого направления стала Курьяновская станция аэрации (Россия), на которой начиная с 1995г. Внедряются аэрационные системы различных типов. По состоянию на июль 1998г. На четырех аэротенках использованы дисковые аэраторы с пористыми диспергаторами фирмы «Грин Фрог» (Москва), по одному аэротенку оборудовано трубчатыми аэраторами с жестким синтетическим высокопористым диспергирующим элементом фирмы «Экополимер» (Белгород) и мембранными резиновыми аэраторами фирмы «Патфил» (Казань).

Обследование работы старых и переоснащенных аэрационных систем показало, что в условиях низкой загрязненности сточных вод по БПК нижний предел снижения интенсивности аэрации определяется не столько кислородным режимом аэротенка, сколько удельной поверхностной нагрузкой по воздуху. Сделан вывод, что полностью преимущества энергоэффективных аэрационных систем могут быть использованы при реализации функций аэрации и перемешивания различными системами. Другой резерв экономии электроэнергии связан с низкой концентрацией БПК, позволяющей аэротенкам работать с высокой степенью нитрификации. Использование денитрификации позволяет вернуть значительную часть кислорода, израсходованного на окисление аммонийного азота, и таким образом дополнительно сократить требуемое количество подаваемого кислорода.

Технико-экономические расчеты показали, что при современной стоимости электроэнергии, решающее значение имеет величина процента использования кислорода воздуха. При этом капиталовложения в дорогостоящие, но высокоэффективные аэрационные системы окупаются значительно быстрее, чем дешевые аэраторы средней эффективности.

Экономическое преимущество получают аэраторы с использованием эластичной мембраны с комбинированными отверстиями. Другим преимуществом мембран аэраторов по сравнению с пористыми волокнистыми диспергаторами является их способность работать в технологиях нитри-денитрификации, основанных на периодической аэрации, без риска забивания диспергаторов. Для внедрения новой аэрационной системы можно применить оборудование фирмы «Flygt», т.е. аэрационную систему с использованием мелкопузырчатых мембранных диффузоров Flygt-Sanitare, а также систему перемешивания и рециркуляции для зон денитрификации на основе погружных мешалок Flygt типа SR4660 и рециркуляционных насосов PP4660. Схема реконструкции аэротенка приведена на рис. 3.5. Требуемый расход воздуха после реконструкции сокращается в 2,3 раза благодаря применению высокоэффективных аэраторов мембранного типа, а также проведению процесса денитрификации, позволяющему использовать кислород нитратов для окисления органических веществ.

Использование современных аэрационных систем, характеризующихся высокой однородностью гидравлических параметров диспергаторов, позволяет осуществлять регулирование концентрации растворенного кислорода в аэротенке с помощью общей задвижки на воздуховоде. Обеспечение необходимых потребностей в кислороде по длине аэротенка достигается раскладкой аэраторов с различной плотностью. Все это обеспечивает быструю наладку таких систем и позволяет существенно упростить эксплуатацию аэротенков.



**Рисунок 3.5.** Схема реконструкции аэротенка с применением новой системы аэраторов:  
1 – зона денитрификации; 2 – рециркуляционный трубопровод; 3 – зона аэрации; 4 – мешалки; 5 – рециркуляционные насосы; 6 – мембранные аэраторы.

Отечественные фирмы-производители аэрационных систем быстро совершенствуют свою продукцию. Это относится не только к поиску оптимальной конструкции самого аэратора, но и к техническим решениям крепления к днищу аэротенка, сочленения с воздухораспределительной системой к проработкам, направленным на обеспечение гибкости изменения конфигурации аэрационной системы.

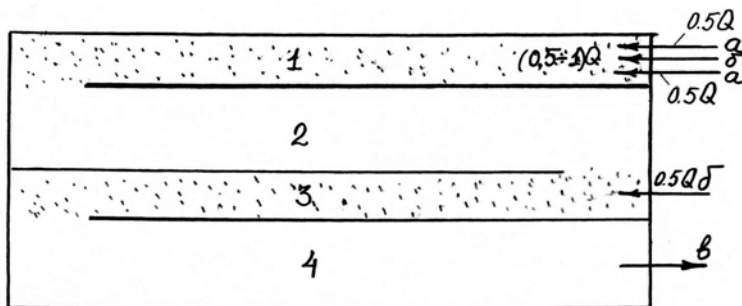
Данные по качеству очистки и расходу воздуха при реконструкции аэротенка (рис. 3.5.) можно привести на примере аэротенков Люберецкой станции аэрации (табл. 3.1.)

Таблица 3.1.

| Показатель                                                 | Аэротенк        |                    | ПДК                     |
|------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------------|
|                                                            | до<br>реконстр. | после<br>реконстр. |                         |
| Исходная осветленная вода                                  |                 |                    |                         |
| 1. Расход воды, м <sup>3</sup> /сут.                       | 220 000         | 220 000            |                         |
| 2. БПК <sub>5</sub> , мг/дм <sup>3</sup>                   | 60-100          | 60-100             |                         |
| 3. N-NH <sub>4</sub> , мг/дм <sup>3</sup>                  | 15-23           | 15-23              |                         |
| Очищенная вода                                             |                 |                    |                         |
| 1. БПК <sub>5</sub> , мг/дм <sup>3</sup>                   | 4,8             | 3,1                | БПК <sub>полн.</sub> =3 |
| 2. N-NO <sub>4</sub> , мг/дм <sup>3</sup>                  | 9,1             | 0-0,1              | 0,4                     |
| 3. N-NO <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>                  | 0,44            | 0,004-0,006        | 0,02                    |
| 4. N-NO <sub>3</sub> , мг/дм <sup>3</sup>                  | 7,71            | 8-8,5              | 9,1                     |
| Технологические показатели                                 |                 |                    |                         |
| 1. Доза ила, г/дм <sup>3</sup>                             | 1,5             | 2-2,3              |                         |
| 2. Расход воздуха, тыс. м <sup>3</sup> /ч                  | 18-20           | 8-9                |                         |
| 3. Удельный расход воздуха, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> | 3,9-4,4         | 1,4-1,5            |                         |
| 4. Эффективность использования кислорода воздуха, %        | 7               | 18                 |                         |

Еще одним примером реконструкции аэротенков служит Ново-Люберецкая станция аэрации. [26] Проектом реконструкции предусмотрена одноиловая двухступенчатая схема нитри-денитрификации в четырехкоридорных аэротенках. Для обеспечения необходимых условий в зонах денитрификации ширину денитрификационных коридоров уменьшили в 2 раза по сравнению с шириной коридоров нитрификации, а для перемешивания использовали воздух, подающийся через обычные дырчатые трубы. Сточные воды и возвратный ил подаются в аэротенки по открытым прямоугольным лоткам. Подача возвратного

ила в полном объеме (100% расхода сточной воды) осуществляется в первый коридор; подача сточной воды ступенчатая – в первый и третий коридоры с возможной вариацией (регулированием) расходов (рис. 3.6.)



**Рисунок 3.6.** Технологическая схема реконструкции аэротенка:

1,3 – зона денитрификации; 2,4 – зона нитрификации;  $a$  – возвратный ил;  $b$  – осветленная вода;  $в$  – иловая смесь.

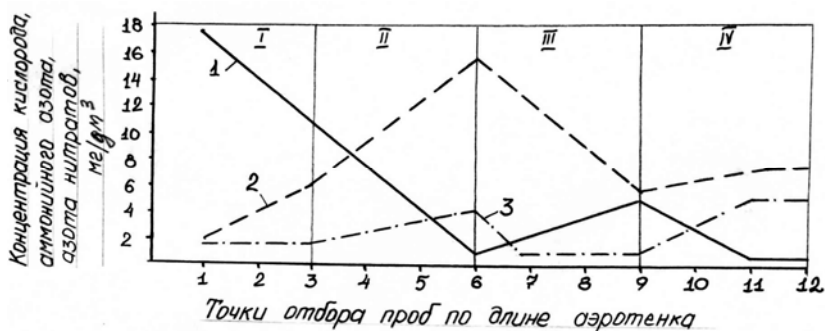
Система аэрации в нитрификаторах пневматическая через фильтросные пластины, уложенные в железобетонные каналы вдоль стен, а денитрификационные коридоры аэрируются продольными дырчатыми трубами только для поддержания иловой смеси во взвешенном состоянии. Усредненные технологические характеристики работы представлены в таблице 3.2.

**Таблица 3.2.**

| Технологический показатель                                 | до очистки | после очистки |
|------------------------------------------------------------|------------|---------------|
| 1. Количество сточных вод, тыс. м <sup>3</sup> /сут        | 484        | -             |
| 2. Период пребывания в сооружениях, час:                   | 14,2       | -             |
| в нитрификаторах                                           | 11,8       | -             |
| в денитрификаторах                                         | 2,4        | -             |
| 3. Удельный расход воздуха, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> | 4,2        | -             |
| 4. Рецикл активного ила, %                                 | 80,2       | -             |
| 5. Доза возвратного ила, г/дм <sup>3</sup>                 | 7,2        | -             |
| 6. Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup>                 | 105        | 6,8           |
| 7. БПК <sub>5</sub> , мг/дм <sup>3</sup>                   | 87         | 2,6           |
| 8. N-NH <sub>4</sub> , мг/дм <sup>3</sup>                  | 17,5       | 0,24          |
| 9. N-NO <sub>3</sub> , мг/дм <sup>3</sup>                  | -          | 9,51          |
| 10. N <sub>общ.</sub> , мг/дм <sup>3</sup>                 | 27,5       | 8,4           |

|                                            |     |     |
|--------------------------------------------|-----|-----|
| 11. Фосфаты (по Р), мг/дм <sup>3</sup>     | 2,2 | 1,5 |
| 12. Р <sub>общ.</sub> , мг/дм <sup>3</sup> | 5,2 | 2,8 |
| 13. Время отстаивания, час.                | 3,1 | -   |

Результаты длительной эксплуатации НЛБСА в режиме глубокой биологической очистки открывают широкие возможности модернизации обычных четырехкоридорных аэротенков с обеспечением процессов нитри-денитрификации и дефосфотации без механических или гидравлических перемешивателей анаэробных зон и без дополнительного устройства внутренних рециклов. Ориентировочно основные технологические параметры работы сооружений в таком режиме должны быть следующими: концентрация (доза) возвратного активного ила 5,5-7,5 г/л; доза активного ила в конце четвертого коридора аэротенка 2,5-3,5 г/л; возраст активного ила 20-25 суток; концентрация кислорода в зонах денитрификации не должна превышать 1 мг/л в любой точке, а в концах зон нитрификации не должна превышать 4 мг/л. Примерный профиль концентрации кислорода, аммонийного и нитратного азота в четырехкоридорном аэротенке, обеспечивающем ПДК по формам азота в водоемах рыбохозяйственного назначения, показан на рис. 3.7.

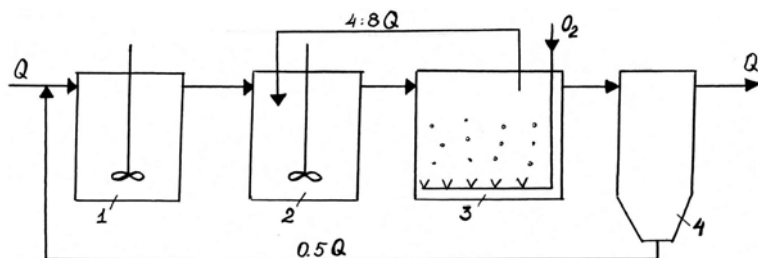


**Рисунок 3.7.** Профиль концентраций кислорода, аммонийного азота и азота нитратов в аэротенке:  
 1 – N-NH<sub>4</sub>; 2 – N-NO<sub>3</sub>; 3 – O<sub>2</sub>; I – первый коридор; II – второй коридор; III – третий коридор; IV – четвертый коридор.

Фирмой «Комплект экология» для биологического удаления азотсодержащих соединений и фосфора предлагается технология [36] приведенная на рис. 3.8. Сущность этой технологии заключается в

том, что сточные воды последовательно очищаются в анаэробных, анакисдных и аэробных условиях. Соответствующие процессы очистки – гидролиз растворенной органики, денитрификация и нитрификация. Активный ил из вторичного отстойника возвращается в анаэробную зону. Между нитрификатором и денитрификатором имеется рецикл.

Фирмой «Комплект экология» также разработана новая технология, отвечающая требованиям, указанным в начале раздела и которая применима к существующим аэротенкам.



**Рисунок 3.8.** Схема биологического удаления азотсодержащих соединений и фосфора:  
1 – анаэробная зона; 2 – анакисдная зона; 3 – аэробная зона; 4 – вторичный отстойник.

Сточные воды без предварительного отстаивания последовательно очищаются:

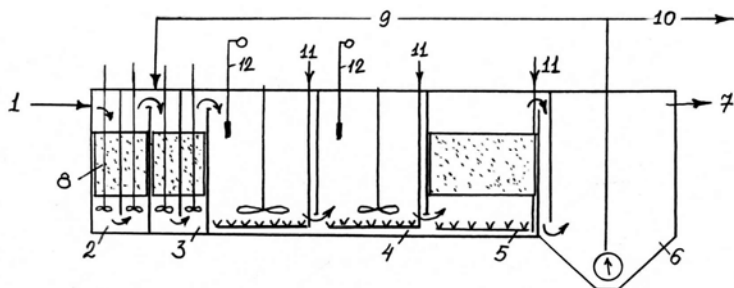
1. в анаэробных условиях (гидролиз);
2. в условиях сорбции загрязнений (сорбция);
3. в аэробно-анаэробных условиях (нитри-денитрификация);
4. в аэробных условиях (постэрация).

Регенерация ила проходит в выделенном отделении аэротенка (восстановление окислительной способности ила и ассимиляция взвешенного ила).

Рассмотрим четыре схемы реконструкции аэротенков, разработанные фирмой «Комплект экология».

Схема №1 с использованием иммобилизованного и взвешенного ила представлена на рис. 3.8. Гидролиз основной части растворенной органики протекает с участием экзоферментов облигатных и факультативных анаэробов, иммобилизованных на носителе. Продуктами гидролиза являются мономеры низших кислот и спиртов. Установленное время гидравлической задержки достаточно для максимально полной ферментации органики, но не достаточно для развития ацетогенных бактерий. Поскольку время гидравлической задержки

невелико, а объемная нагрузка на биоценоз по органическим веществам очень высокая, то условия процесса приближены к условиям чистой ферментации. Поэтому только незначительная часть органики ассимилируется гидролитическими бактериями в целях обеспечения жизнедеятельности и синтеза клетки. Для предотвращения «проскока» гидролизер делается многокамерным. Перемешивание – механическое.



**Рисунок 3.9.** Схема с использованием иммобилизованного и взвешенного ила:

1 – подача исходной воды; 2 – анаэробная зона; 3 – сорбционная зона; 4 – зона нитриденитрификации; 5 – аэробная зона; 6 – отстойник; 7 – очищенная вода; 8 – загрузка ила; 9 – возвратный ил; 10 – лишний активный ил; 11 – подача воздуха; 12 – управление аэрацией.

Из вторичного отстойника в биосорбер подается активный ил. Время гидравлической задержки устанавливается достаточным для высокой объемной нагрузки и максимальной сорбции продуктов гидролиза. Такой прием предотвращает возникновение условий для развития нитчатых форм бактерий. Это, в свою очередь, позволяет существенно увеличить дозу ила и соответственно снизить нагрузку на ил. Для обеспечения максимальной скорости и полноты изъятия используется микротурбулизация механически перемешиваемого потока за счет специальной конструкции носителя. В свою очередь, благодаря иммобилизованному на носителе биоценозу, биосорбер одновременно выполняет роль второй ступени гидролизера, что обеспечивает более полную ферментацию растворенной органики. Наличие растворенного кислорода, привнесенного в гидролизер-биосорбер рециклом активного ила из вторичного отстойника, не снижает ферментативную активность факультативных анаэробов, благодаря специфике условий, возникающих в толще биопленки. Для предотвращения «проскакивания» гидролизер делается многокамерным. Перемешивание – механическое.

Для глубокой биологической очистки сточных вод необходим ряд последовательных реакций. Один из факторов, от которого зависят эти реакции в питательной среде, является окислительно-восстановительный потенциал, выражающий количественную характеристику степени аэробности. Он становится минимальным при насыщении среды водородом и максимальным при насыщении среды кислородом. М. Кларк предложил величину окислительно-восстановительного потенциала обозначать:  $gH_2$  – отрицательный логарифм парциального давления газообразного водорода. Диапазон  $gH_2$  от 0 до 42,0 характеризует все степени насыщения водного раствора водородом и кислородом.

Микроорганизмы, осуществляющие глубокую очистку сточных вод, по типу дыхания подразделяются на облигатные аэробы, микроаэрофилы, факультативные анаэробы, облигатные анаэробы. Аэробы растут в пределах  $gH_2$  14-30, факультативные анаэробы – 0-20, анаэробы – 0-12.

Современные представления о технологии глубокой нитрификации, денитрификации и ассимиляции фосфора, показывают возможность одновременно протекания указанных процессов. Условием такого процесса очистки является оптимальный окислительно-восстановительный потенциал. Величина оптимального потенциала  $gH_2$  является характерной для каждого стока и условий очистки. Поддержание оптимального значения  $gH_2$  осуществляет аэрация. Количество растворенного кислорода обычно находится в пределах 0,1-0,5 мг/л. Интенсивность аэрации при таких значениях является недостаточной для эффективного перемешивания, поэтому используется механическое. Такие условия благоприятны для развития в основном факультативных аэробов и анаэробов.

Нитрификация осуществляется в основном гетеротрофными микроорганизмами наряду с хемоавтотрофными. Денитрификация осуществляется микроорганизмами, ассимилирующими фосфор. Таким образом, за счет регуляции подачи воздуха с обратной связью, создаются условия для одновременной нитри-денитрификации, биологической ассимиляции фосфора и поддержания бактерий активного или в стационарной фазе роста. Лимитируя доступ к кислороду, бактерии биоценоза микроорганизмов поддерживаются в стационарной фазе роста, когда процесс размножения уравнивается процессом гибели клеток. Интенсивность обменных процессов в стационарной фазе роста (поглощение кислорода, синтез белка и др.) снижается. Однако, ферментативная активность и синтез ферментов не снижается,

благодаря участию в транспорте электронов, наряду с кислородом, альтернативных акцепторов ( $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $SO_4^{-2}$  и др.). Микроорганизмы в стационарной фазе роста характеризуются значительно большей устойчивостью к изменению таких параметров стока, как pH, температура, изменение концентрации и его сбалансированность. Это происходит потому, что значительная часть ила минерализована. Экзо- и эндоферменты лизированных клеток еще длительное время сохраняют высокую активность. Поэтому процесс очистки в большей степени носит ферментативный характер, чем сорбционно-окислительный.

Многократное снижение количества потребляемой электроэнергии происходит, исходя из следующих факторов:

1. Потребление кислорода на синтез клеток минимальное, т.к. бактерии взвешенного биоценоза ила поддерживаются в основном в стационарной фазе роста, происходит лишь небольшой линейный рост.

2. Потребление кислорода на нитрификацию отсутствует в связи с тем, что процесс нитри-денитрификации происходит одновременно.

3. Потребление кислорода на эндогенное дыхание микроорганизмов в стационарной фазе роста снижается за счет перехода на альтернативные пути дыхания с использованием различных акцепторов электронов ( $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $Fe^{+3}$ ,  $SO_4^{-2}$  и др.)

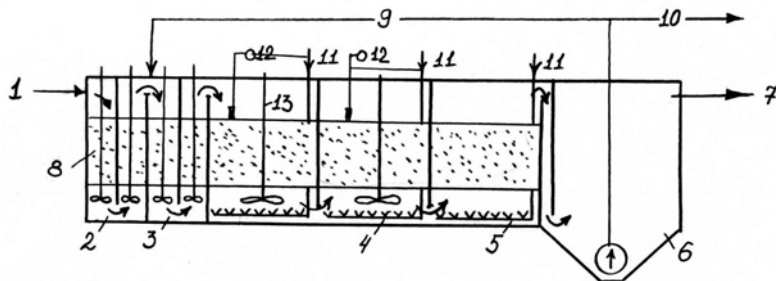
4. Поддержание ила во взвешенном состоянии происходит в основном за счет механического перемешивания, что по капитальным затратам и себестоимости многократно дешевле аэрационного перемешивания.

Зона нитри-денитрификации оборудуется донными эжекторными аэраторами – мешалками. Подача воздуха осуществляется автоматически – электромагнитными клапанами, управляемыми блоком автоматики в зависимости от заданных значений редокс-потенциала  $gH_2$ .

Интенсивная аэрация обеспечивает дегазацию флоккул ила, а также предотвращает возникновение дефицита кислорода в отстойниках. Таким образом, предотвращается биофлотация и восстановительные процессы. Аэрация должна обеспечить количество растворенного кислорода, достаточное для развития и поддержания простейших в иммобилизованном иле. Как известно, иммобилизованные биоценозы содержат во много раз больше простейших, а также более разнообразный видовой состав по сравнению с взвешенным илом. Биопленка захватывает флоккулы ила, таким образом обеспечи-

вая прикрепленных простейших пищей. Биопленка также является инкубатором свободно плавающих простейших, которые существенно улучшают седиментацию ила, освещение воды, удаление патогенных бактерий.

Зона постаэрации оборудуется мембранными аэраторами и специальным пластмассовым носителем.



**Рисунок 3.10.** Схема с использованием прикрепленного и взвешенного ила:

1 – подача исходной воды; 2 – анаэробная зона; 3 – сорбционная зона; 4 – зона нитрификации с носителем для иммобилизации ила; 5 – аэробная зона; 6 – отстойник; 7 – очищенная вода; 8 – загрузка ила; 9 – возвратный ил; 10 – лишний активный ил; 11 – подача воздуха; 12 – управление аэрацией; 13 – механическое перемешивание.

Рассмотрим схему №2 с использованием прикрепленного и взвешенного ила (рис. 3.10.). Особенностью этой схемы является то, что нитрификатор-денитрификатор может быть дополнительно оборудован носителем для иммобилизации ила. По сравнению с базовой схемой, это поможет увеличить:

1. производительность;
2. эффективность;
3. снизить прирост ила;
4. устойчивость к изменениям pH, температуры, концентраций и несбалансированности стока;
5. устойчивость к токсическим воздействиям, эффективность работы в условиях низких температур стока.

Зонирование нитри-денитрификатора способствует развитию многоступенчатой трофической системы, в которой по мере перехода от более низких к более высоким уровням питания, биомасса организмов активного ила, как обычно в пищевых пирамидах, сохраняется.

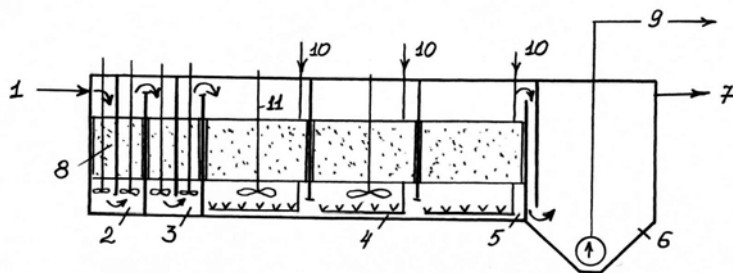
Установлено, что прикрепленные биоценозы поддерживают качество и количество бактериальной массы активного ила в пределах, обеспечивающих максимально эффективную очистку стока. Следова-

тельно, отличительным признаком предполагаемого метода является саморегуляция с предельно минимальным приростом ила.

Иммобилизация биоценозов на носителе позволяет поддерживать очень высокий возраст ила, который является главным лимитирующим фактором, обеспечивающим высокий эффект нитрификации. Высокий возраст ила и многоступенчатость позволяет производить очистку стоков, содержащих трудно окисляемые соединения.

Благодаря использованию в нитри-денитрификаторе носителя для иммобилизации ила, а также разделению процесса на ступени:

- увеличивается скорость и эффективность очистки стока по всем параметрам, в связи с увеличением дозы и возраста ила;
- возникает возможность эффективной очистки низкоконтрированных, токсичных, трудноокисляемых стоков;
- увеличивается устойчивость к изменению параметров стока;
- происходит многократное снижение прироста ила за счет трофической саморегуляции;
- возникает возможность очистки стоков с низкой температурой.



**Рисунок 3.11.** Схема с использованием прикрепленного ила:

1 – подача исходной воды; 2 – анаэробная зона; 3 – сорбционная зона; 4 – зона нитриденитрификации; 5 – аэробная зона; 6 – отстойник; 7 – очищенная вода; 8 – загрузка ила; 9 – лишний ил; 10 – подача воздуха; 12 – механическое перемешивание.

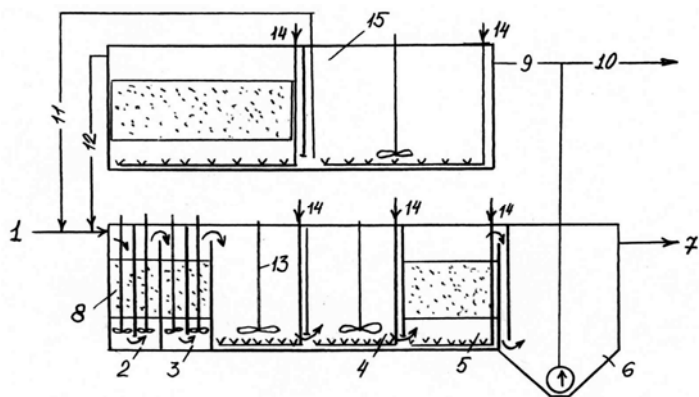
Рассмотрим следующую схему №2а (рис. 3.11.), которая может быть использована без взвешенного ила. Очистка сточной воды осуществляется только при участии иммобилизованного ила. Применение этой схемы возможно для стоков:

- низкой концентрации;
- токсичных и трудноокисляемых;
- с высокой гидравлической нагрузкой и низкой концентрацией.

Прикрепленный биоценоз характерен тем, что в биологической пленке последних камер формируется богатый и разнообразный видо-

вой состав простейших. Простейшие, а также многоклеточные организмы (нематоды, коловратки, малощетинковые черви), как известно, являются регуляторами прироста ила. Таким образом, благодаря балансу между бактериальным приростом ила и этими микроорганизмами, установка работает без лишнего ила.

Небольшое количество взвешенных веществ (в пределах, установленных нормативами) в сбрасываемом очищенном стоке состоит из гидробионтов второго и третьего трофического уровня. При сбросе в естественные водоемы эти гидробионты включаются в пищевые цепи, не нарушая естественного баланса. Хищные коловратки, нематоды, малощетинковые черви и тихоходки – представители третьего трофического уровня – являются отличным кормом для рыб. Инфузории, бактериядные нематоды и коловратки – представители второго трофического уровня – потребляют бактерии планктона, перифитона, бентоса, тем самым улучшая санитарное состояние водоема.



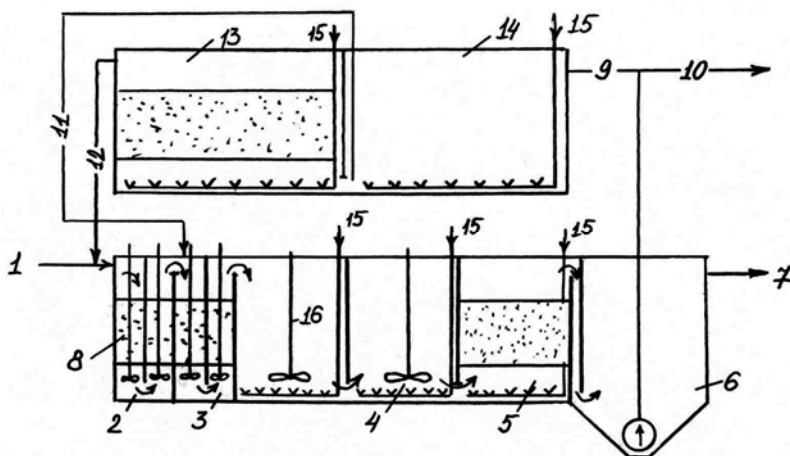
**Рисунок 3.12.** Схема с использованием иммобилизованного и взвешенного ила:

1 – подача сточной воды; 2 – анаэробная зона; 3 – сорбционная зона; 4 – зона нитрификации; 5 – аэробная зона; 6 – отстойник; 7 – очищенная вода; 8 – загрузка ила; 9 – активный ил; 10 – лишний ил; 11 – регенерированный ил; 12 – иловая вода; 13 – механическое перемешивание; 14 – подача воздуха; 15 – регенератор ила.

Базовая схема (рис. 3.8.) может быть дополнена отдельной регенерацией активного ила (рис. 3.12.; 3.13.). Регенератор разделяется на несколько последовательных, аэрируемых зон. Регенератор может быть оборудован носителем для иммобилизации ила (простейших и др.). Количество носителя определяется, исходя из поддержания оптималь-

ного количества и качества взвешенного ила. Обводная линия позволяет управлять величиной ассимиляции лишнего ила.

Данная схема позволяет сократить прирост ила в десятки раз.



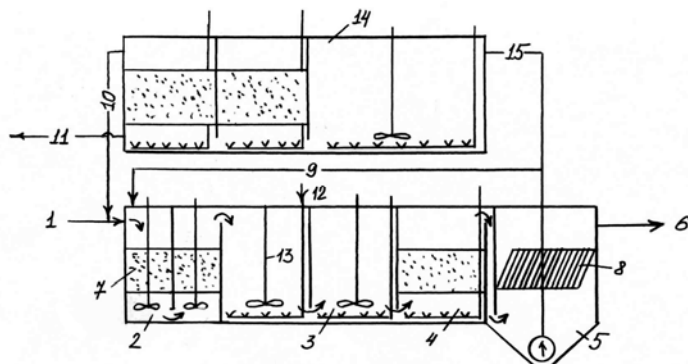
**Рисунок 3.13.** Схема с использованием иммобилизованного и взвешенного ила (с отдельной регенерацией ила):

1 – подача сточной воды; 2 – анаэробная зона; 3 – сорбционная зона; 4 – зона нитриденитрификации; 5 – аэробная зона; 6 – отстойник; 7 – очищенная вода; 8 – загрузка ила; 9 – активный ил; 10 – лишний ил; 11 – регенерированный ил; 12 – иловая вода; 13 – регенератор, где происходит ассимиляция взвешенного ила; 14 – регенератор, где происходит восстановление окислительной способности ила; 15 – подача воздуха; 16 – механическое перемешивание.

Также базовая схема (рис. 3.8.) может быть дополнена отдельным минерализатором ила (рис.3.14.). Минерализатор разделяется на несколько последовательных аэрируемых зон. Минерализатор может быть оборудован носителем для иммобилизации ила. Количество носителя определяется, исходя из нагрузки по лишнему илу и осадку первичных отстойников на минерализатор. Данная схема позволяет сократить выход минерализованного ила в десятки раз, обеспечить высокое качество минерализации и сократить себестоимость.

В регенераторе происходит восстановление окислительных свойств и значительное снижение прироста ила. Восстановленный ил направляется в камеру сорбции гидролизера. Лишний ил направляется в зону регенератора, оборудованную пластмассовым носителем. Благодаря носителю и условиям, поддерживаемым в регенераторе, возникает значительное снижение массы лишнего активного ила. Продолжительные исследования и практика показывают, что биоплен-

ка иммобилизованных микроорганизмов содержит в 2-3 раза больше простейших и многоклеточных, чем взвешенный ил. Таким образом, формируются второй и третий трофические уровни пищевой пирамиды.



**Рисунок 3.14.** Схема с использованием иммобилизованного и взвешенного ила (с отдельной минерализацией):

1 – подача сточной воды; 2 – гидролизер; 3 – зона нитри-денитрификации; 4 – зона аэрации; 5 – отстойник; 6 – очищенная вода; 7 – загрузка ила; 8 – тонкослойный модуль; 9 – активный ил; 10 – иловая вода; 11 – минерализованный ил; 12 – подача воздуха; 13 – механическое перемешивание; 14 – минерализатор ила; 15 – возвратный ил.

Количество и биомасса активного ила от уровня к уровню уменьшается в 7-10 раз. Биопленка в режиме эндогенного дыхания содержит большое количество экзополимеров, благодаря которым происходит захват флоккул ила взвешенных веществ. Таким образом происходит обеспечение простейших и многоклеточных организмов пищей. Зона регенерации и ассимиляции ила оборудуется мембранными аэраторами.

Пример технологических и технических параметров приведен в таблице 3.3.

Отсутствие прироста ила в целом происходит, благодаря следующим факторам:

- снижению нагрузки на ил, благодаря высоконагруженному процессу снятия БПК (до 40%) иммобилизованным биоценозом микроорганизмов в гидролизере, а также повышению дозы взвешенного ила, благодаря снижению илового индекса;

- поддержанию биоценоза взвешенного ила в стационарной фазе роста;

- использованию развитых трофических взаимоотношений микроорганизмов, иммобилизованных на носителе, на стадии постаэрации и регенерации ила.

Таблица 3.3.

| № п/п | Наименование                         | Ед. измер.           | Параметры   |                 |
|-------|--------------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|
|       |                                      |                      | до реконстр | После реконстр. |
| 1.    | Объем аэротенка                      | м <sup>3</sup>       | 31 400      | 15 200          |
| 2.    | Количество аэротенков                | шт.                  | 4           | 2               |
| 3.    | Расход:                              |                      |             |                 |
|       | суточный                             | м <sup>3</sup> /сут. | 75 000      | 75 000          |
|       | часовой                              | м <sup>3</sup> /час  | 3 478       | 3 478           |
| 4.    | Нагрузка по БПК <sub>5</sub> :       |                      |             |                 |
|       | суточная                             | мг/дм <sup>3</sup>   | 18 750      | 18 750          |
|       | часовая                              | мг/дм <sup>3</sup>   | 870         | 870             |
| 5.    | Иловый индекс                        |                      | 101         | 60-70           |
| 6.    | Доза ила:                            | г/дм <sup>3</sup>    |             |                 |
|       | - взвешенного в аэротенке            |                      | 3,4         | 7               |
|       | - взвешенного в регенераторе         |                      | 7           | 17-21           |
|       | - иммобилизованного в гидролизере    |                      | -           | 7               |
| 7.    | Количество активного ила:            |                      |             |                 |
|       | взвешенного                          | кг                   | 115 000     | 160 000         |
|       | иммобилизованного                    | кг                   | -           | 18 500          |
| 8.    | Нагрузка на ил:                      | г/г                  |             |                 |
|       | взвешенный                           |                      | ≈0,2-0,23   | ≈0,1-0,12       |
|       | иммобилизованный                     |                      | -           | ≈0,6            |
| 9.    | Прирост активного ила                | кг/сут.              | 42 000      | отсутств.       |
| 10.   | Установленная мощность               | кВт                  |             | 440             |
| 11.   | Потребляемая мощность                | кВт·час              |             |                 |
|       | общая                                |                      |             | 350             |
|       | на 1 кг снятого БПК <sub>полн.</sub> |                      |             | 0,44            |
|       | на 1 м <sub>3</sub> очищенного стока |                      | 0,4-0,5     | 0,1             |

Предлагаемые технологии отвечают предъявленным требованиям:

1. Снижение капитальных затрат (переоборудование двух аэротенков; отпадает необходимость технически переоборудовать первичные отстойники и системы утилизации осадка и лишнего ила; значительно сокращаются затраты на техническое перевооружение компрессорной станции).

2. Снижение эксплуатационных затрат (экономия электроэнергии за счет отключения оборудования утилизации осадка и лишнего ила; многократная экономия электроэнергии за счет применения анаэробных процессов на первой стадии очистки, управления процессом нитри-денитрификации с обратной связью, благодаря высокой устойчивости и саморегуляции системы очистки, значительно снижаются затраты на обслуживание).

3. Повышение эффективности очистки.

4. Повышение устойчивости очистки (снижение илового индекса, предотвращение развития нитчатых бактерий, снижение нагрузки на ил, использование иммобилизованного биоценоза, автоматическое управление процессом с обратной связью).

Многообразие реализуемых в настоящее время технологических схем по реконструкции существующих очистных сооружений, в частности аэротенков, имеет целью поиск наиболее экономически выгодной и технологически надежной системы удаления биогенных веществ. Это позволяет рассчитывать на выполнение одной из основных задач – перевод всех мощностей станции аэрации на очистку сточных вод с удалением биогенных элементов.

### 3.1. Перспективные технологии и схемы биологической очистки сточных вод от азота и фосфора.

*Нісля таких досягнень науково-технічного прогресу ніхто не сумнівається, що панування людини над навколишнім середовищем не веде обов'язково до щастя і соціального добробуту. Люди пізнали, що без Бога науковий і технічний прогрес став засобом руйнації природи і соціального життя.*

*Єпископ Переяслав Хмельницький  
Димитрій – ректор Київської Духовної  
Академії і семінарії.*

Среди различных методов удаления азота и фосфора наиболее предпочтительными с экономической точки зрения являются биологические. Однако в традиционных системах биологической очистки, работающих в режиме нитрификации (рис.3.15-а) - удаляется 10—30% азота и фосфора, что не позволяет обеспечить норматив предельно допустимого сброса (ПДС).

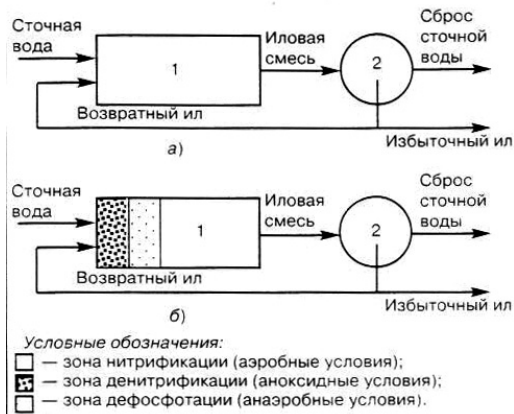
Эффективности очистки 70 — 90 % можно достичь, если использовать биотехнологии нитри-денитрификации и биологической дефосфотации. Указанные методы могут совмещаться с традиционной очисткой в аэротенках путем создания в них наряду с аэробными зонами дополнительных аноксидных и анаэробных зон (рис 3.15-б.).

Данная биотехнология позволяет удалять соединения азота и фосфора из бытовых, городских и промышленных сточных вод. Качество очищенной воды по содержанию азота и фосфора удовлетворяет самым жестким требованиям на сброс для водоемов рыбохозяйственной категории водопользования. Одновременно достигается эффективная очистка от органических веществ, сокращение расхода воздуха на аэрацию и уменьшение количества образующегося избыточного ила.

Реализация этой биотехнологии связана с созданием в аэротенке трех зон:

- аэробной (высокая концентрация растворенного кислорода  $C_o > 2 \text{ мг/л}$ ). где протекают процессы аэробной очистки от органических веществ, нитрификации (биоокисление аммонийного азота до нитратного) и дефосфотации (быстрое потребление фосфатов фосфорными бактериями);

- аноксидной (растворенный кислород практически отсутствует, но есть нитраты, а также органические вещества), где происходит процесс денитрификации; анаэробной (нет растворенного кислорода, нитратов и нитритов, но есть органические вещества), где идет сбраживание органических веществ до ацетата, который потребляется фосфорными бактериями с выделением в среду фосфатов.



**Рисунок 3.15.** Схемы биотехнологической очистки в системе аэротенк – вторичный отстойник:

а – традиционная; б – в режиме денитрификации и биологической дефосфатации: 1 - аэротенк; 2 – вторичный отстойник.

Аноксидные условия создаются в результате замены аэрации на механическое перемешивание, обеспечивающее поддержание активного ила во взвешенном состоянии. Механическое перемешивание энергетически выгоднее аэрации, поэтому при использовании нитратов вместо молекулярного кислорода на биоокисление органических веществ не только повышается эффективность очистки от азота, но и сокращаются затраты энергии на биологическую очистку.

Реконструкция аэротенка с переводом его в режим нитриденитрификации и биологической дефосфотации может производиться одновременно с заменой системы аэрации, не требует больших дополнительных затрат и включает выделение анаэробных, аноксидных и аэробных зон с помощью поперечных перегородок, монтаж аэрационного оборудования, создающего необходимый кислородный режим в зонах, и введение рецикла иловой смеси.

Аэрационное оборудование, применяемое в указанной биотехнологии, должно отвечать следующим требованиям:

\* высокая эффективность использования кислорода аэрирующего воздуха (высокий коэффициент типа аэратора), что необходимо для интенсификации аэробных процессов, в частности, нитрификации, и возможности сокращения объема аэробных зон с выделением части объема аэротенка под анаэробные и аноксидные зоны;

\* широкая аэрируемая полоса (не менее 70 % площади зеркала аэротенка), позволяющая снижать интенсивность аэрации в аэротенке до  $2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  без риска осаждения активного ила;

\* возможность изменения интенсивности аэрации в широких пределах для создания по длине аэротенка зон с различными кислородными режимами.

Перечисленным требованиям отвечает аэрационное оборудование фирмы "КРЕАЛ", эффективность которого втрое выше эффективности аэраторов из перфорированных труб. Оно не уступает дорогостоящим зарубежным аналогам.

При нитрификации аммонийный азот в аэробных условиях превращается в нитратный. При этом не происходит удаления азота общего: азот всего лишь из одной формы переходит в другую. Если в схему биологической очистки включить дополнительную аноксидную зону (см. рис.б), то параллельно с процессом нитрификации будет идти процесс денитрификации — биовосстановление нитратного азота в азот молекулярный, отдуваемый при аэрации в атмосферу.

На стадии денитрификации биовосстановление органических веществ осуществляется не кислородом, а нитратами, что позволяет сократить расход аэрирующего воздуха и затраты на аэрацию. По окислительной способности 1 г нитратного азота эквивалентен 2,86 г молекулярного кислорода.

Аноксидные зоны служат не только для биовосстановления нитратов, но и для частичной очистки от органических веществ. Расход внешнего окислителя органических веществ в аноксидных зонах, в которые, как правило, подается исходная сточная вода, составляет 0,6 — 0,8 г молекулярного кислорода на 1 г удаляемых органических веществ по БПК, что соответствует расходу азота нитратов в количестве 0,2 — 0,3 г на 1 г по БПК -т.е. для удаления 1 г нитратного азота требуется 3 — 5 г БПК.

В традиционной схеме биологической очистки изымающийся из сточной воды фосфор идет на построение клеточного вещества активного ила, фосфаты используются для обеспечения энергетических потребностей клеток. Поэтому рост потребления фосфора может быть достигнут в процессе биологической очистки сточных вод с повышен-

ным приростом ила. Однако возможность увеличения прироста ила ограничена.

Повышение прироста ила в системе аэротенк — вторичный отстойник достигается за счет снижения концентрации активного ила и его возраста. Результат — снижение эффективности очистки от органических веществ и азота (в случае наличия схем нитриденитрификации). Поэтому при эксплуатации очистных сооружений в традиционном режиме можно достичь лишь незначительного изъятия фосфора фосфатов и не удастся обеспечить требования норматива ПДС, наряду с ухудшением очистки по остальным показателям.

Для глубокого изъятия фосфора по технологии биологической дефосфатации процесс модифицируют путем включения ступени анаэробной обработки активного ила в традиционную схему (см. рис.3.15-б). В этом случае в системе биологической очистки создаются условия, когда активный ил поочередно проходит анаэробную и аэробную зоны, что стимулирует развитие в нем фосфорных бактерий, относящихся к факультативным анаэробам.

Для успешного применения этой биотехнологии недопустимо длительное пребывание активного ила в бескислородных условиях на стадиях его обработки во избежание выхода фосфора из клеток в раствор и его возврата на вход очистных сооружений.

В анаэробной зоне нефосфорные гетеротрофные бактерии сбраживают органические вещества (преимущественно взвешенные) до ацетата, являющегося субстратом фосфорных бактерий (рис. Фосфорные бактерии потребляют ацетат и синтезируют из него поли-β-оксибутират, используя для синтеза энергию, выделяющуюся при гидролизе клеточных полифосфатов. Образующиеся при гидролизе полифосфатов ортофосфаты выделяются в среду.

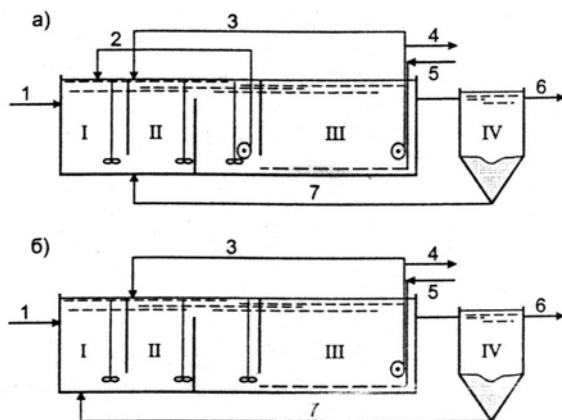
В аэробных условиях фосфорные бактерии синтезируют биомассу, используя в качестве источника углерода поли-β-оксибутират, запасенный в анаэробных условиях. Поли-β-оксибутират одновременно служит энергетическим субстратом: часть его окисляется молекулярным кислородом до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , а выделяющаяся энергия идет на синтез АТФ и полифосфатов. Энергия аденозин-5'-трифосфата (АТФ) сразу используется на синтез биомассы (АТФ гидролизруется до аденозин-5'-дифосфата (АДФ)), а полифосфаты запасаются в клетках в виде гранул, что и обеспечивает высокое потребление фосфора из среды (сточной воды).

В соответствии с механизмом биологической дефосфотации удаление фосфора из сточной воды пропорционально приросту фосфорных бактерий, который в свою очередь пропорционален количеству образовавшегося в анаэробной зоне ацетата.

**Рисунок 3.16.** Схема удаления фосфора по технологии денитрификации и биологической дефосфотации.

Содержание фосфора в обычном активном иле при традиционных схемах биологической очистки составляет 0,01-0,015 г/г, вследствие чего снижение концентрации фосфора в осветленной воде составляет 25-30 % исходной концентрации. Более глубокое удаление фосфора можно было бы осуществить за счет увеличения прироста ила, однако это противоречит условиям нитрификации, требующим снижения прироста для существования нитробактерий. Увеличить содержание фосфора в иле можно путем создания чередующихся анаэробно-аэробных условий в ходе биологической очистки.

образование летучих жирных кислот и выделение фосфора из клеток ила в раствор.



**Рисунок 3.17.** Технологические схемы биологического удаления соединений азота и фосфора из сточных вод.

а – схема UCT; б – схема АА/О; I – анаэробная зона; II – аноксидная зона; III – аэробная зона; IV – вторичный отстойник; 1 – поступающие сточные воды; 2 – аноксидный рецикл; 3 – рециркуляция нитратов; 4 – избыточный ил; 5 – воздух; 6 – очищенные сточные воды; 7 – возврат ила.

Миграция фосфора обусловлена необходимостью поддержания жизнедеятельности ила в условиях анаэробно-аэробных условий. Затем, когда активный ил вновь оказывается в аэробных условиях, наблюдается интенсивное накопление фосфора клетками, причем содержание фосфора в иле возрастает до 0,025-0,035 г/г. Повторение цикла смены анаэробно-аэробных условий приводит к устойчивому повышенному содержанию фосфора в иле, и если выводить его из аэротенка в таком виде, то содержание фосфора в очищенной воде снизится до 1-1,5 мг/л, и эффект биологического удаления фосфора возрастет до 60-70%.

**Таблица 3.4.**

| Параметр                                                 | Этапы очистки |    |    |    |
|----------------------------------------------------------|---------------|----|----|----|
|                                                          | 1             | 2  | 3  | 4  |
| Степень рециркуляции нитрифицированной иловой смеси, %*. | 100           | 50 | 50 | 50 |
| Степень рециркуляции возвратного ила из вторичных        | 100           | 50 | 50 | 50 |

|                                                               |           |           |          |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|
| отстойников, %                                                |           |           |          |           |
| Степень рециркуляции иловой смеси в анаэробную зону, %        | 70        | 55        | 55       | -         |
| Доза ила, г/л                                                 | 2,4-3,8   | 1,5-2,9   | 2,3-3,2  | 2,1-2,5   |
| Прирост ила, г/м <sup>3</sup>                                 | 0.11-0,14 | 0,04-0,07 | 0,05-0,1 | 0,03-0,06 |
| Возраст ила, сут                                              | 6-10      | 6-15      | 20-40    | 10-15     |
| Иловый индекс, см <sup>3</sup> /г                             | 70-120    | 80-130    | 100-150  | 90-120    |
| * В процентах от расхода сточных вод, поступающих на очистку. |           |           |          |           |

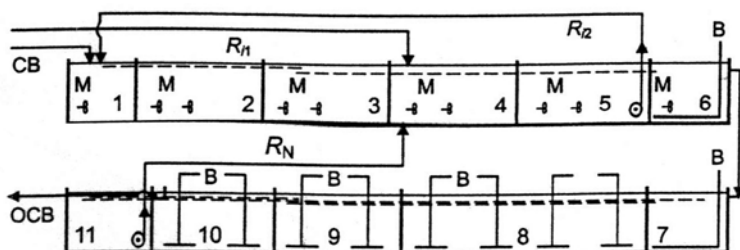
Испытание процесса биологического дефосфатирования и денитрификации проводилось в течение трех лет на опытной производственной установке Красносельской станции аэрации (КрСА) производительностью до 3600 м<sup>3</sup>/сут. Создание установки и испытания осуществлялись в рамках российско-финского сотрудничества.

Таблица 3.5.

| Компонент, мг/л                    | Этапы очистки             |                           |                         |                           |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
|                                    | 1                         | 2                         | 3                       | 4                         |
| Взвешенные вещества                | <u>140-190</u><br>5-8     | <u>50-90</u><br>5-15      | <u>50-70</u><br>7-16    | <u>40-60</u><br><5        |
| БПК <sub>5</sub>                   | <u>100-130</u><br>2-5     | <u>40-70</u><br>5-9       | <u>50-60</u><br>9-12    | <u>30-60</u><br>3-3,2     |
| ХПК                                | <u>260-320</u><br>40-80   | <u>100-200</u><br>30-70   | <u>140-160</u><br>70-80 | <u>130-150</u><br>30-60   |
| ХПК (фильтрованная проба)          | <u>90-150</u><br>20-50    | <u>50-90</u><br>30-60     | <u>90-100</u><br>40-60  | <u>70-80</u><br>30-50     |
| Азот общий                         | <u>25-29</u><br>8-11      | <u>19-25</u><br>10-15     | <u>19-20</u><br>7-9     | <u>15-16</u><br>5-6       |
| Азот общий (фильтрованная проба)   | <u>18-23</u><br>8-10      | <u>15-22</u><br>8-12      | <u>17-22</u><br>6-7     | <u>11-13</u><br>5-6       |
| Азот аммонийный                    | <u>17-19</u><br>0.2-1.3   | <u>13-19</u><br>2.2-9.8   | <u>14-17</u><br>0.3-2.9 | <u>10-12</u><br>0.2-0.3   |
| Фосфор общий                       | <u>3.5-4.7</u><br>1 - 1.6 | <u>2.7-5.3</u><br>0.6-1.8 | <u>2.5-3</u><br>1.2-1.8 | <u>2-2.6</u><br>1.2-1.4   |
| Фосфор общий (фильтрованная проба) | <u>1.9-2.6</u><br>0.9-1.6 | <u>1.7-2.1</u><br>0.3-1.7 | <u>1.6-2</u><br>0.7-1.6 | <u>1.3-1.6</u><br>1.2-1.4 |

|                                                                          |                         |                         |                           |                         |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Фосфор минеральный                                                       | $\frac{1,5-2}{0,9-1,4}$ | $\frac{1,2-2}{0,2-1,4}$ | $\frac{1,5-1,7}{0,6-1,5}$ | $\frac{1-1,4}{1,1-1,4}$ |
| Примечание. Числитель - качество исходной воды, знаменатель - очищенной. |                         |                         |                           |                         |

На установке испытывались различные варианты технологии по двум схемам. Первая схема, показанная на рис. 3.17-а, представляет собой анаэробно-аноксидно-оксидную цепочку блоков биологической очистки с двумя перекачками иловой смеси: первая — из вторичного отстойника в аноксидную часть для денитрификации ила, вторая - из конца аноксидной зоны в анаэробную часть. По второй схеме (рис. 3.17-б) возвратный активный ил сразу перекачивается в анаэробную зону вместе с содержащимися в нем нитратами. Первая схема известна под названием УСТ, вторая - АА/О. По первой схеме проведено три этапа испытаний, результаты которых показаны в табл. 3.4. и 3.5.



**Рисунок 3.18.** Технологическая схема секции аэротенка.

1-11 – отсеки; СВ – поступающие на очистку сточные воды; ОСВ – очищенные сточные воды;  $R_1$  – возвратный (циркулирующий) активный ил;  $R_2$  – аноксидный рецикл;  $R_N$  – возврат нитратсодержащей иловой смеси; В – воздух; М – мешалки.

На первом этапе на установку подавались неосветленные сточные воды. Качество очищенной воды было достаточно высоким однако проявились два негативных фактора: накопление в блоках отбросов и повышенный прирост активного ила ( $150-160 \text{ г/м}^3$ ).

Во время проведения второго и третьего этапов очистке подвергалась осветленная жидкость при этом был выявлен недостаток органических веществ в поступающих стоках. Вероятность достижения высокого качества очищенной воды (общий азот менее  $10 \text{ мг/л}$ , фосфор менее  $1,5 \text{ мг/л}$ ) составляла 80-85 %.

В течение четвертого этапа установка работала по схеме рис. 3.17-б. Более высокое содержание органических веществ в четвертом цикле позволило сохранить требуемое качество очистки.

Проведенный эксперимент показал возможность перевода аэротенков действующих станций на новый технологический режим при относительно меньшей пропускной способности (по отношению к нормам СНиП 2.04.03-85).

Подобные мероприятия были проведены на Северной станции аэрации. В одной секции трехкоридорного аэротенка пропускной способностью 100 тыс. м<sup>3</sup>/сут была реализована технология анаэробно-аноксидно-оксидной обработки сточных вод с двумя перекачками ила по аналогии со схемой работы опытно-промышленной установки. Секция разделена перегородками на 11 отсеков. Технологическая схема показана на рис. 3.18.

Сточные воды и денитрифицированный активный ил (линия циркуляции ила R) смешиваются в отсеке 1 и направляются в анаэробные отсеки 2 и 3, далее в анноксидные отсеки 4 и 5. В отсек 4 подается возвратный активный ил (линия циркуляции ила R) и нитратсодержащая иловая смесь из концевой части аэротенка (линия циркуляции нитратов R<sub>N</sub>). Отсек 6 снабжен мешалкой и аэраторами и мог использоваться как денитрификатор либо как часть аэробной зоны. В отсеках 7-10 установлены аэраторы с резиновыми диафрагмами. Отсек 11 состоял из двух камер с мешалками и двумя насосами для циркуляции нитратов R<sub>N</sub>. Наблюдения за работой блоков обнаружили типичные для данной технологии явления: в анаэробной зоне происходило выделение фосфатов из ила, количество минерального фосфора в жидкой фазе повышалось с 3-4 до 7-8 мг/л, в анноксидной зоне содержание нитратов снижалось до 0,1-0,3 мг/л, в оксидной зоне азот аммонийный окислялся до 0,2-0,5 мг/л, содержание нитратов достигало 4-6 мг/л. В аэробных условиях активный ил интенсивно извлекал фосфаты до уровня 0,1-0,3 мг/л (общий фосфор 0,4-1,4 мг/л). Благодаря повышенному содержанию органических веществ в осветленной воде осуществлялись глубокая денитрификация и интенсивное потребление илом фосфора. Технологические параметры работы секции приведены в табл. 3.6

Таблица 3.6.

| Параметр                                                                      | Режим очистки |              |              |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------|--------------|
|                                                                               | 1             | 2            | 3            |
| Расход осветленных сточных вод, м <sup>3</sup> /ч                             | 3000          | 4000         | 4500         |
| Расход циркулирующего активного ила (R <sub>il</sub> ), м <sup>3</sup> /ч (%) | 3500<br>(117) | 3500<br>(88) | 3500<br>(78) |

|                                                                        |               |               |               |
|------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Расход нитратного рецикла<br>( $R_N$ ), м <sup>3</sup> /ч (%)          | 7000<br>(230) | 7000<br>(175) | 7000<br>(156) |
| Расход денитрифицированного ила<br>( $R_{i2}$ ), м <sup>3</sup> /ч(%)  | 3500<br>(117) | 3500<br>(88)  | 3500<br>(78)  |
| Доза активного ила, г/л:                                               |               |               |               |
| зона 2                                                                 | 3,1           | 1,6           | 1,3           |
| зона 9                                                                 | 4,5           | 3,4           | 2,7           |
| средняя                                                                | 4,2           | 3             | 2,5           |
| Нагрузка на активный ил, кг·БПК <sub>5</sub> /кг                       | 0,06          | 0,12          | 0,2           |
| Прирост активного ила, кг/м <sup>3</sup>                               | 0,066         | 0,073         | 0,078         |
| Возраст активного ила, сут                                             | 21            | 10            | 7             |
| Иловый индекс, см <sup>3</sup> /г:                                     |               |               |               |
| зона 2                                                                 | 210           | 120           | 100           |
| зона 9                                                                 | 180           | 220           | 185           |
| Концентрация растворенного кислоро-<br>да, мг/л:                       |               |               |               |
| зона 7                                                                 | 2,8           | 2,7           | 5             |
| зона 8                                                                 | 2,8           | 2,8           | 6,1           |
| зона 10                                                                | 5,3           | 3,9           | 4,9           |
| Примечание. В процентах от расхода поступающих на очистку сточных вод. |               |               |               |

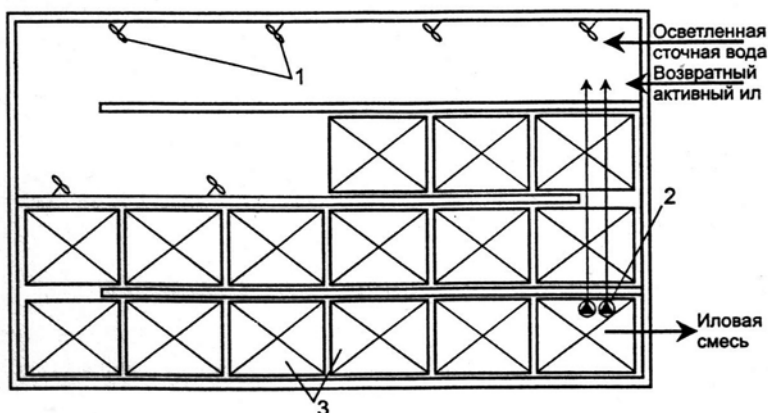
Качество очищенной воды оценивалось в пробах осветленной иловой смеси на выходе жидкости из секции аэротенка. Показатели состава сточных вод на входе и выходе приведены в табл. 3.7.

**Таблица 3.7.**

| Показатель загрязняющих<br>компонентов | Средние концентрации загрязняющих<br>компонентов, мг/л |           |           |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|-----------|
|                                        | 1 этап                                                 | 2 этап    | 3 этап    |
| Взвешенные вещества                    | 294*/-                                                 | 252*-     | 247*/-    |
| БПК <sub>5</sub>                       | 111/3,6                                                | 137/4,3   | 134/7,7   |
| ХПК                                    | 390*/46**                                              | 425*/37** | 390*/52** |
| ХПК фильтрованной пробы                | 84/46                                                  | 93/33     | 103/37    |
| Азот:                                  |                                                        |           |           |
| общий                                  | 32*/6,3**                                              | 54*/6,8** | 36*/7,9** |
| аммонийных солей                       | 20,4/0,24                                              | 39,8/0,23 | 24,5/2,2  |
| нитратов                               | 0,11/5                                                 | 0,09/4,2  | 0,08/3    |
| нитритов                               | 0,06/0,01                                              | 0,06/0,02 | 0,1/0,68  |
| Фосфор:                                |                                                        |           |           |

|                                                                |             |             |             |
|----------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| общий                                                          | 8,4*/0,49** | 8.7*/0,76** | 7,7*/0,43** |
| минеральный                                                    | 2,8/0,02    | 3.7/0,1     | 4,7/0,03    |
| * С учетом вторичных загрязнений от узла обезвоживания осадка, |             |             |             |
| ** Концентрация загрязнений в отстаиванной пробе иловой смеси. |             |             |             |

Достигнутые результаты экспериментов по качеству очищенной воды в полной мере соответствуют требованиям Хель-синской комиссии, установленным на 2010 г. для С.-Петербурга. Снижение пропускной способности секции аэротенка при переходе от обычного режима работы на технологию удаления азота и фосфора составило около 20 %.

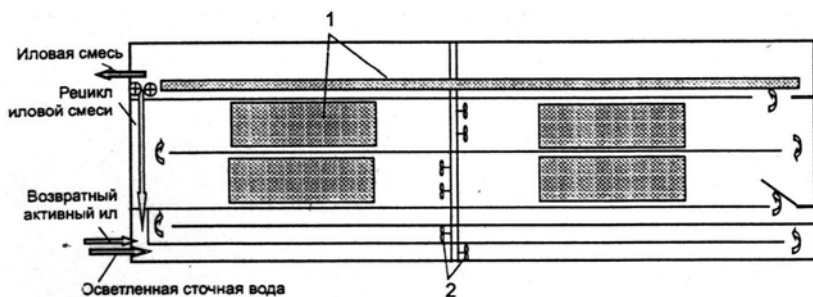


**Рисунок 3.19.** Технологическая схема модернизации аэротенка № 14 ЛбСА под технологию биологического удаления азота (с предвключенной денитрификацией)  
1 – мешалки; 2 - рециркуляционные насосы; 3 – аэрационные решетки.

Для изучения и отработки процесса денитри-фикаци в. про-мышленных условиях еще в 1998 г. два аэротенка третьей очереди ЛбСА производительностью 100 тыс. м<sup>3</sup>/сут каждый реконструировали под схему нитри-денитрификации (рис. 3.19.). Опыт эксплуатации данных аэротенков показал возможность не только успешной реконструкции типового сооружения под схему нитри-денитрификации без снижения производительности, но и получения существенной экономии энергозатрат.

Полученное снижение затрат на аэрацию объясняется использованием для окисления углерод-содержащих соединений в аэро-тенке связанного кислорода нитратов, который в схемах с глубокой нитри-фикацией теряется с очищенной водой, а также применением при

реконструкции современных аэрационных систем. На реконструируемых аэротенках в целях минимизации строительных работ была сохранена коридорная структура сооружений. Для аэротенков с большим соотношением длина/ширина, что характерно для других блоков московских станций аэрации, описанный подход требует использования значительного количества мешалок в зоне денитрификации для предотвращения расслоения иловой смеси. Это обуславливает интерес к использованию так называемых карусельных компоновок, в которых требуемая скорость потока обеспечивается циркуляцией смеси по замкнутому контуру низкооборотными мешалками с большим диаметром лопастей. Карусель создает внутренний дополнительный рецикл и поддерживает ил во взвешенном состоянии.



**Рисунок 3.20.** Схема аэротенка №3 КСА, работающего в режиме нитри-денитрификации:

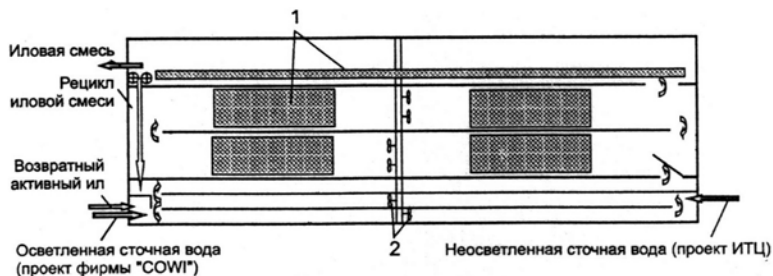
1 – аэрационные решетки; 2 – мешалки.

В ходе эксперимента при расходе сточной жидкости 30-33 тыс. м<sup>3</sup>/сут и заданном режиме управления системой аэрации (45 мин аэрация, 15 мин - отсутствие аэрации) концентрация общего азота в очищенной воде составляла до 6 мг/л, N-NH<sub>4</sub> -1-2 мг/л, Р<sub>общ</sub> - до 1 мг/л. Таким образом, выбранная датской фирмой технологическая схема, обеспечивая нормативы по азоту и фосфору, характерные для Западной Европы, не соответствовала российским требованиям к качеству очищенной воды рыбо-хозяйственного водоема.

На следующем этапе работ на Курьяновской СА по проекту фирмы «COWI» был реконструирован аэротенк № 3. Реализованная схема позволяет эксплуатировать данное экспериментальное сооружение не только в режиме нитри-денитрификации (рис. 3.20.) но и в режиме биологического удаления азота и фосфора (рис. 3.21.). При работе сооружения в режиме нитри-денитрификации четыре коридора

аэротенка разделены на три технологические зоны. Первая зона, расположенная в первом коридоре аэротенка, представляет собой денитрификатор. Для поддержания ила во взвешенном состоянии первый коридор аэротенка разделен на три коридора двумя продольными перегородками, что позволяет уменьшить площадь живого сечения и, как следствие, увеличить скорость потока до значений, обеспечивающих отсутствие расслоения иловой смеси. Кроме того, в первом и во втором «узких» коридорах первой зоны установлено по одной горизонтальной мешалке, что обеспечивает полное перемешивание иловой смеси.

Вторая (карусельная) зона образована из второго и третьего коридоров и предназначена для протекания процессов нитриденитрификации. Аэротенк оснащен отечественной аэрационной системой с дисковыми мембранными аэраторами (НПП «Пат-фил»), позволяющей работать в режиме частого включения-выключения подачи воздуха. Третья зона аэротенка (четвертый коридор) работает с постоянной аэрацией и является нитрификатором.



**Рисунок 3.21.** Схема аэротенка №3 КСА, работающего в режиме биологического удаления азота и фосфора:

1 – аэрационные решетки; 2 – мешалки.

Результаты работы аэротенка № 3 КСА в расчетном режиме по схеме биологического удаления азота подтвердили справедливость полученных авторами расчетных технологических параметров. Необходимо отметить, что перевод аэротенка с классической схемы удаления органических соединений в режим нитри-денитрификации не потребовал снижения производительности сооружения.

По окончании этапа отработки процесса нитри-денитрификации аэротенк № 3 КСА перевели в режим биологического удаления фосфора, запроектированный по модифицированной схеме Phoredox. Процесс биологического удаления фосфора основан на способности

микроорганизмов *Acinetobacter* аккумулировать больше фосфора, чем необходимо на прирост (так называемое «жадное поглощение»). В специально созданной анаэробной зоне аэротенка *Acinetobacter* потребляют легкоокисляемые органические вещества за счет энергии, которая образуется в их клетках при разрыве полифосфатных связей. В результате этой биохимической реакции в водную среду выделяются фосфаты. Как показали исследования, при реализации этого процесса на сточных водах московских станций аэрации концентрация P-PO<sub>4</sub> в анаэробной зоне может достигать 15-20 мг/л (при концентрации P-PO<sub>4</sub> в осветленной воде 1,5-3 мг/л).

В аэробной зоне в клетке *Acinetobacter* происходит восстановление полифосфатных связей, что сопровождается потреблением фосфатов из иловой смеси. Превышение количества потребленных фосфатов над количеством фосфатов, выделяемых в анаэробных условиях, объясняется приростом биомассы *Acinetobacter* и выводом избыточного активного ила после аэробной зоны.

При реализации схемы биологического удаления фосфора в аэротенке № 3 КСА первые два «узких» коридора сооружения работают как малая карусель, представляющая собой анаэробную зону, в которую поступают сточная вода и возвратный активный ил. Нитратный рецикл направляется в третий «узкий» коридор, который в данной схеме является денитрификатором. Аноксидно-аэробная зона (второй и третий коридоры аэротенка) и зона нитрификации (четвертый коридор) соответствуют аналогичным зонам аэротенка при реализации в нем схемы нитри-денитрификации.

С июля 2000 г. на ЛбСАст были производственные испытания другой технологии биологического удаления азота и фосфора - процесса УСТ. Первый коридор аэротенка № 15 (анаэробная зона) оборудовали высокооборотными мешалками, второй и третий коридоры реконструировали в карусель, состоящую из аэробной и аноксидной зон (рис. 3.22.). Для обеспечения требуемого внутреннего рецикла карусели в каждый коридор установили по три низкооборотных мешалки. Четвертый коридор аэротенка представляет собой нитрификатор с постоянной подачей воздуха. Рециркуляция иловой смеси из зоны нитрификации в денитрификатор осуществляется эрлифтами. Расчеты и конструирование данного сооружения выполнены специалистами МГП «Мосводоканал».

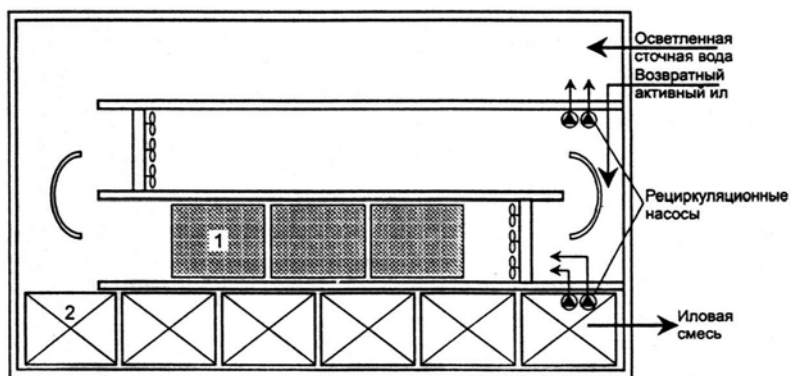
Используемая схема позволяет избежать подачи нитратов с возвратным активным илом в анаэробную зону, что характерно для аэротенка № 3 КСА. Возвратный активный ил подается в аноксидную

часть карусельной зоны аэротенка, где происходит его денитрификация. При запуске аэротенка период выхода в рабочий режим удаления фосфора составил всего 14 сут, что значительно меньше, чем для сооружений стран Западной Европы (30-40 сут).

В рабочем режиме эффективность удаления фосфора составила 97,8-98,6 %, концентрация  $P-PO_4$  снизилась с 1,35-2,35 до 0-0,25 мг/л, возраст ила поддерживался 13-14 сут, иловый индекс составил 110-130  $см^3/г$ .

Реконструкция аэротенка не снизила производительность сооружения, которая составила 100 тыс.  $м^3/сут$ .

Промышленные эксперименты, проведенные на аэротенке № 3 КСА и № 15 ЛбСА (табл. 3.8. показали возможность успешной реконструкции типовых аэротенков в биореакторы, осуществляющие биологическое удаление азота и фосфора без снижения производительности сооружений. При этом на низкоконтрированных бытовых сточных водах достигаются значения ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения.



**Рисунок 3.22.** Технологическая схема модернизации аэротенка №15 ЛбСА под технологию биологического удаления азота и фосфора (схема УСТ):

1 – зона переменной аэрации; 2 – зона постоянной аэрации.

Аэротенки № 3 КСА и № 15 ЛбСА представляют собой первый отечественный крупномасштабный производственный опыт внедрения процессов биологического удаления азота и фосфора на характерных для России низкоконтрированных городских сточных водах.

Таблица 3.8.

| Аэротенк                                             | Средние показатели, мг/л |       |                   |       |                   |       |
|------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
|                                                      | N-NH <sub>4</sub>        |       | N-NO <sub>3</sub> |       | P-PO <sub>4</sub> |       |
|                                                      | вход                     | выход | вход              | выход | вход              | выход |
| № 3 КСАст                                            | 18,1                     | 0,38* | 1,1               | 6,6   | 2,3               | 0,18  |
| № 15 ЛБСАст                                          | 17,6                     | 0,3   | 0,9               | 7,4   | 2                 | 0,1   |
| * Для режима аэрации во второй зоне 80 % по времени. |                          |       |                   |       |                   |       |

Из всех известных методов удаления азота из сточной воды наиболее эффективным, экологичным и достаточно легко осуществимым является биологический способ нитри-денитрификации, который может быть реализован по трем схемам. Согласно первой схеме, процесс нитри-денитрификации осуществляется в биореакторе, работающем в режиме контактной стабилизации. По второй схеме сточная вода последовательно проходит три зоны: анаэробную, бескислородную (денитрификатор) и аэробную (нитрификатор), при этом предусматриваются минимум три контура циркуляции активного ила: один внешний и два внутренних. К третьей, самой простой схеме относится модификация нитри-денитрификации, которая реализуется в биореакторе, состоящем из двух зон: денитрификатора и нитрификатора. Циркуляция активного ила производится по одному внутреннему и одному внешнему контурам.

Разработчики метода контактной стабилизации утверждают, что он высокоэффективен только по удалению азота, фосфор же удаляется незначительно. Принципиальное отличие биореактора, работающего в режиме контактной стабилизации, заключается в совмещении пяти последовательно протекающих в одном сооружении процессов: окисление органических веществ в бескислородных условиях, доокисление органических веществ в аэробных условиях, окисление аммонийного азота до нитритов и нитратов, отстаивание иловой смеси и спуск сточной воды из биореактора. Биореактор работает в периодическом режиме без рециркуляции нитрифицированного активного ила. Полный цикл перечисленных процессов совершается один или два раза за сутки.

Окисление органических веществ в бескислородных условиях происходит при поступлении в биореактор свежих порций осветленной сточной воды. В этот период активный ил поддерживается во взвешенном состоянии благодаря пульсирующему режиму подачи воздуха в биореактор. В этом режиме воздухоподкачка включается в ра-

боту через каждые 10 минут, продолжительность ее работы не превышает 10 секунд. Общая продолжительность пульсирующего периода составляет 3—5 часов. Благодаря такому режиму активный ил находится во взвешенном состоянии без устройства в био-реакторе мешалок. Микроорганизмы активного ила используют для дыхания связанный кислород нитритов и нитратов, которые восстанавливаются до  $N_2$ ,  $NO$  или  $N_2O$  в зависимости от величины рН. Концентрация растворенного кислорода в биореакторе при этом находится примерно на уровне 0–0,1 мг/дм<sup>3</sup>.

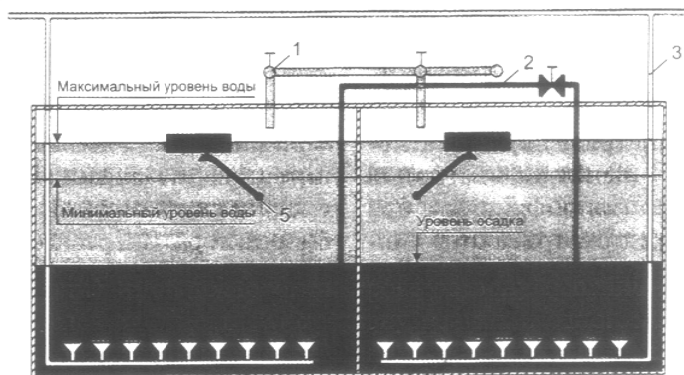
Доокисление неиспользованных на стадии денитрификации органических веществ протекает при непрерывной подаче воздуха в биореактор. Концентрация растворенного кислорода в этот период повышается до 2–2,5 мг/дм<sup>3</sup>. Доокисление органических веществ может завершаться в зависимости от начальных значений БПК<sub>полн</sub>, температуры сточной воды и дозы ила в биореакторе в течение 0,5—1 часа. При достижении БПК<sub>полн</sub> 20—30 мг/дм<sup>3</sup> в биореакторе начинает интенсивно развиваться процесс нитрификации.

Полное окисление аммонийного азота до нитритно-го и нитратного завершается за 3—4 часа. К концу периода нитрификации концентрация растворенного кислорода доводится в среднем до 6—8 мг/дм<sup>3</sup> чтобы на следующей стадии отстаивания избежать массового всплытия на поверхность биореактора активного ила, обусловленного развитием процесса денитрификации. К сожалению, в летний период добиться повышения концентрации растворенного кислорода в сточной воде перед ее отстаиванием даже до 6 мг/дм<sup>3</sup> крайне сложно из-за высоких значений температуры иловой смеси и скорости потребления кислорода. Следует заметить, что в теплый период года, особенно в жаркие дни, всплытие активного ила в пульсирующий период и во время отстаивания с образованием слоя пены 10—15 см — обычное явление.

Период отстаивания иловой смеси занимает 1—2 часа, примерно за такое же время завершается спуск из биореактора биологически очищенной сточной воды. Выпускаемая сточная вода характеризуется следующими показателями: БПК<sub>полн</sub> 5—7 мг/дм<sup>3</sup>, взвешенные вещества 4—6 мг/дм<sup>3</sup> аммонийный азот 0,1—0,2 мг/дм<sup>3</sup> нитритный азот 0,05—0,1 мг/дм<sup>3</sup> нитратный азот 7—9,5 мг/дм<sup>3</sup> фосфор в процессе очистки снижается незначительно, в некоторых случаях возможно даже некоторое увеличение его на 1–2 мг/дм<sup>3</sup>. Чаще всего наблюдается именно увеличение содержания фосфора, так как в периоды, когда в биореакторе устанавливаются анаэробные и бескислородные режимы,

сточная вода обогащается фосфатами. Этот процесс интенсифицируется при снижении рН иловой смеси на 0,3—0,6 и более единиц.

Основным достоинством метода контактной стабилизации является высокая степень очистки сточной воды практически по всем показателям, за исключением фосфора. К недостаткам описанной технологии очистки следует отнести сложность в организации пульсирующего режима в аэротенках крупных очистных сооружений канализации.



**Рисунок 3.23.** Фрагмент очистных сооружений канализации фабрики по производству кормов для домашних животных:

1 — подача осветленной сточной воды; 2 — отвод избыточного активного ила; 3 — подача воздуха; 4 — мембранный аэратор; 5 — отвод биологически очищенной сточной воды.

Такая технология апробирована в Новосибирской области на локальных очистных сооружениях канализации фабрики по производству кормов для домашних животных (рис. 3.32.), успешно функционирующих уже около двух лет. Благодаря проведенной на этом объекте реконструкции удалось добиться снижения содержания фосфора до 1 мг/л на стадии механической и биологической очистки. Доведение концентрации фосфора до ПДК (0,2 мг/л) Осуществляется доочисткой стоков на фильтрах путем связывания ион-фосфата в трудно растворимое соединение —  $AlPO_4$ .

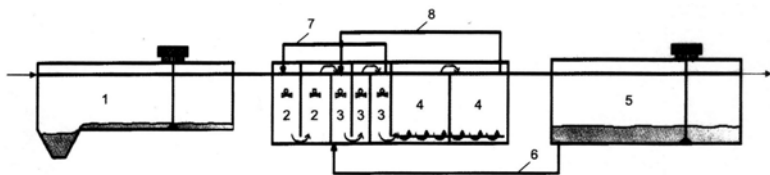
Особенностью удаления азота из сточной воды в биореакторе, состоящим из трех принципиально отличных зон (анаэробной, бескислородной, аэробной), заключается в предварительной аммонификации осветленной сточной воды перед ее подачей в бески-

слородную зону и наличием двух внутренних и одного внешнего контуров циркуляции активного ила. Такая технология внедрена на очистных сооружениях г. Якутска. Проект разработан итальянской фирмой «Pianim-pianti», объект возводился корпорацией «Mabetex». На сегодня очистные сооружения функционируют более двух лет, их расчетная производительность составляет 90 тыс. м<sup>3</sup>/сут, расчетные концентрации загрязнений в сточной воде оказались выше фактических почти вдвое. Так, на сооружения поступают стоки с концентрацией взвешенных веществ 140—160 мг/л, значением БПК 150-170 мг/л, концентрацией азота 15—18 мг/л, общего фосфора (в пересчете на Р) 4—6 мг/л. Активная реакция поступающей сточной воды слабощелочная (рН 7,1—7,6), расчетная температура стоков 15°С.

В состав очистных сооружений канализации включены два биореактора, каждый из которых состоит из семи зон (рис. 3.24.): две анаэробные зоны, далее следуют три бескислородные зоны (денитрификатор) и две аэробные зоны (нитрификатор).

Сточная вода проходит последовательно семь зон биореактора. Степень рециркуляции по внешнему контуру (вторичный отстойник — бескислородная зона — аэробная зона — вторичный отстойник) составляет 50-80%. Один внутренний контур предназначен для возврата нитрифицированного ила из конца аэробной зоны в начало бескислородной. Принятая степень рециркуляции — 200—400%. Второй внутренний контур со степенью рециркуляции 200% обеспечивает возврат ила из конца бескислородной зоны в начало анаэробной. В каждом биореакторе объем анаэробной зоны составляет 4429 м<sup>3</sup> (25,4% общего объема биореактора), бескислородной зоны — 4388 м<sup>3</sup> (25,2%), аэробной - 8592 м<sup>3</sup> (49,4%).

Поддержание активного ила во взвешенном состоянии в анаэробной и бескислородной зонах осуществляется постоянно работающими погружными мешалками. В аэробной зоне насыщение сточной воды кислородом производится диспергаторами. Разделение иловой смеси происходит во вторичных горизонтальных отстойниках, где сточная вода в часы максимального поступления стоков находится в течение 3,5—4 часов, а в часы минимального — более 8 часов.



**Рисунок 3.24.** Фрагмент очистных сооружений канализации г. Якутска:

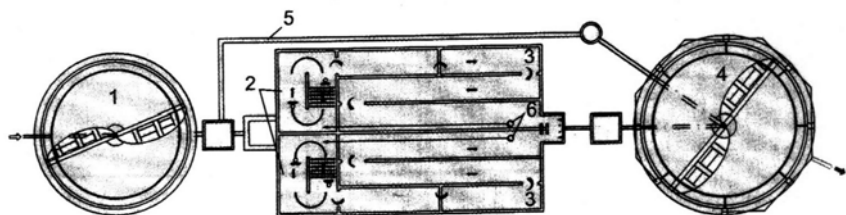
1 – первичный отстойник; 2 – анаэробные зоны; 3 – бескислородные зоны; 4 – аэробные зоны; 5 – вторичный отстойник; 6 – рециркуляция активного ила по внешнему контуру; 7 – рециркуляция активного ила из бескислородной зоны в анаэробную; 8 – рециркуляция активного ила из аэробной зоны в бескислородную.

В теплый период года в результате длительного нахождения сточной воды во вторичных отстойниках активный ил всплывает на поверхность. Несмотря на это, качество биологически очищенной сточной воды остается довольно высоким (содержание взвешенных веществ 4—5 мг/л, БПК<sub>полн</sub> 8-10 мг/л), так как отстойники оборудованы полупогружными перегородками, предотвращающими вынос ила из отстойников. Всплывший ил направляется в узел обработки осадка. Явление массового всплытия денитрифицированного активного ила наблюдается также в анаэробных и бескислородных зонах биореакторов. К сожалению, удаление всплывающего ила из биореакторов так же, как и система разрушения пены не предусмотрены. Слой пены со временем увеличивается, всплывший осадок подсыхает на поверхности и осложняет работу биореакторов. Периодически корка разрушается струей воды, подаваемой из шланга под давлением 2-2,5 атм.

Более чем двухлетняя эксплуатация канализационных очистных сооружений г. Якутска показала, что азот аммония в биореакторе может снижаться до 0,5 мг/л; однако достичь снижения нитратного азота до ПДК, установленной для рыбохозяйственных водоемов (9,1 мг/л), к которым относится р. Лена, пока еще не удастся. Концентрация фосфора после биореактора стабильно увеличивается на 1,5—2,5 мг/дм<sup>3</sup>. На этом объекте снижение основной массы фосфора предусматривалось в биореакторах, а доведение до ПДК предполагалось на фильтрах доочистки, перед которыми вводится хлорное железо ( $\text{FeCl}_3$ ). В перспективе хлорное железо придется, по-видимому, заменить оксихлоридом алюминия или сернокислым алюминием [ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ], так как остаточная концентрация железа будет затруднять работу узла обеззараживания сточной воды на установке ультрафиолетового облучения. Проектный вариант удаления фосфора из сточной воды,

предполагающий связывание ион-фосфата в труднорастворимую соль  $\text{FePO}_4$  или  $\text{AlPO}_4$ , на стадии доочистки, требует доработки, поскольку промывная вода фильтров, обогащенная кристаллами ортофосфорной кислоты, вводится перед первичными отстойниками. Вместе с сырым осадком кристаллы ортофосфорной кислоты попадают в метантенки, растворяются там и далее с фильтратом после фильтр-прессов вновь возвращаются в головные сооружения. С течением времени концентрация фосфатов на очистных сооружениях будет возрастать.

Наконец, третья, самая простая технология удаления азота и фосфора из сточной воды, реализуется в двух зонах биореактора (рис. 3.25.). В первой (бескислородной) зоне устраивается денитрификатор, во второй (аэробной) — нитрификатор. В нитрификаторе производится «симультанное» осаждение фосфора, т. е. связывание фосфора в труднорастворимую соль ортофосфорной кислоты ( $\text{FePO}_4$ ) благодаря введению в нитрификатор хлорного железа ( $\text{FeCl}_3$ ). Удаление фосфора обеспечивается откачке из биологической системы избыточного активного ила, обогащенного кристаллами ортофосфорной кислоты. Такая технология удаления азота и фосфора предложена немецкой проектно-конструкторской фирмой «Schlegel» для очистных сооружений г. Тараз (Республика Казахстан).



**Рисунок 3.25.** Фрагмент очистных сооружений канализации г. Тараз:

1 – первичный отстойник; 2 – денитрификатор; 3 – нитрификатор; 4 – вторичный отстойник; 5 – внешний контур рециркуляции активного ила; 6 – внутренний контур рециркуляции активного ила.

Биореактор имеет два контура циркуляции нитрифицированного активного ила: внешний и внутренний. Внешний контур организован между вторичными радиальными отстойниками, денитрификаторами и нитрификаторами. Внутренний контур предусматривает циркуляцию нитрифицированного активного ила между нитрификаторами и денитрификаторами. Степень рециркуляции активного ила по внешнему контуру составляет 85%, по внутреннему — 150%. Расчетная доза ила

в биореакторе составляет 3,5 г/дм<sup>3</sup>; продолжительность отстаивания иловой смеси во вторичных отстойниках при максимальном притоке — около 3,5 часов, при минимальном — более 6 часов. Вторичные отстойники на данном объекте оборудованы не только полупогружными перегородками, но и системами сбора и удаления всплывающего ила.

Предположительно требуемая степень удаления фосфора из сточной воды на этом объекте также не будет достигнута по многим причинам, главной из которых является обработка в метантенках избыточного активного ила, содержащего кристаллы ортофосфорной кислоты. В метантенках при повышенной температуре (33—35 °С) кристаллы будут растворяться, и при обезвоживании сброженного осадка в центрифугах фосфаты возвратятся на повторную очистку в виде ион-фосфатов. Со временем концентрация фосфатов будет нарастать.

Основным достоинством технологической схемы очистных сооружений канализации г. Тараз является включение в состав сооружений фильтров доочистки и глубоко проработанного узла обработки осадка, благодаря которым на стадии выполнения рабочих чертежей можно предусмотреть дополнительные сооружения и оборудование, позволяющие обеспечить снижение фосфора в очищенной сточной воде до 0,2 мг/л.

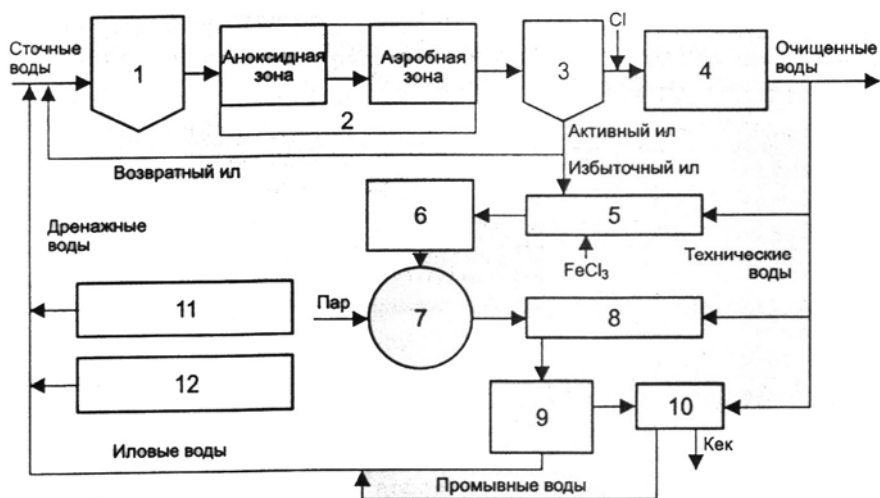
**Таблица 3.9.**

| Параметры                                      | Расчетное значение | ПДС  |
|------------------------------------------------|--------------------|------|
| Азот аммонийный, мг/дм <sup>3</sup>            | 0,1                | 0,39 |
| Азот нитритный + нитратный, мг/дм <sup>3</sup> | 8,3                | 9,04 |
| Фосфор фосфатов, мг/дм <sup>3</sup>            | 0,2                | 0,2  |
| Прирост, кг/сут                                | 5700               | -    |

Была исследована возможность применения четырех схем комбинированного биологического удаления азота и фосфора А<sup>2</sup>/О, VIP, UCT, Bardenpho [37]. Расчеты, проведенные при помощи программы «ЭкоСим», подтвердили, что до требуемого качества по соединениям азота и фосфора могут быть очищены сточные воды, не прошедшие первичное отстаивание. Вариантные расчеты показали, что для очистки сточных вод без первичного отстаивания наиболее подходящей

является схема  $A^2/O$ , причем без внутреннего рецикла иловой смеси из аэробной в анаэробную зону. Результаты моделирования работы аэротенков по схеме  $A^2/O$ -процесса приведены в табл. 3.9., из которой видно, что предлагаемый вариант технологической схемы позволяет достичь концентраций соединений азота и фосфора, меньших или равных нормативным показателям. Особенностью этого процесса является существенное снижение количества образующихся осадков, которые будут представлены только избыточным активным илом.

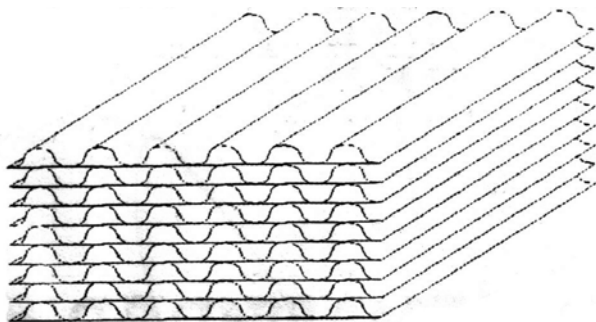
Проведенные расчеты позволяют предложить технологическую схему очистки сточных вод и обработки осадков (рис. 3.26.). Для минимизации воздействия возвратных потоков на качество сточных вод по соединениям фосфора потребуются предусмотреть его удаление, например, с использованием солей железа.



**Рисунок 3.26.** Схема очистки сточных вод и обработки осадков в Г. Ставрополь.

1 – анаэробная зона в существующих первичных отстойниках; 2 – аэротенки; 3 – вторичные отстойники; 4 – контактные резервуары; 5 – камера смешения; 6 – илоуплотнитель №1; 7 – метантенки; 8 – камера промывки; 9 – илоуплотнитель №2; 10 – цех механического обезвоживания осадка; 11 – песковые площадки.

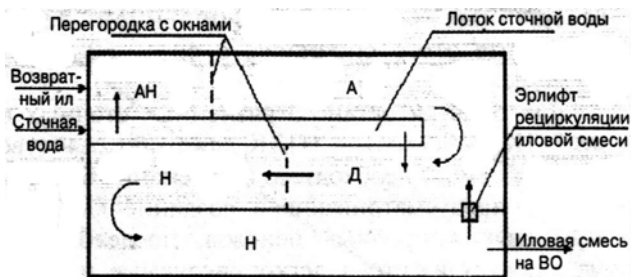
Для очистки сточных вод до нормативных требований фирмой "КРЕАЛ" разработаны и выпускаются очистные установки в модульном и блочно-модульном исполнении [38].



**Рисунок 3.27.** Блок плоскостной загрузки.

Существующие традиционные системы «аэротенк-вторичный отстойник» могут переводиться в режим глубокой очистки от органических веществ путем реконструкции, включающей оснащение аэротенка блоками плоскостной загрузки и размещения во вторичных отстойниках фильтров (реконструкция отстойников в отстойники-фильтры). Оснащение аэротенка блоками плоскостной загрузки позволяет:

- интенсифицировать и стабилизировать процесс биологической очистки за счет увеличения общей концентрации биомассы и более высокой устойчивости микроорганизмов биопленок к колебаниям уровня загрязненности поступающих сточных вод и их расхода (производительность аэротенка может быть увеличена в 1,5 — 2 раза);
- повысить эффект очистки от органических веществ благодаря формированию двух специфических микробных ценозов.
  - активного ила, который обеспечивает удаление из стоков в основном легкоокисляемых органических веществ;
  - биопленок, развивающихся на поверхности загрузки, который производит очистку стоков в основном от трудноокисляемых органических веществ;
- увеличить глубину очистки стоков от соединений азота в силу интенсификации процесса нитрификации, протекающего в поверхностном слое биопленок, и денитрификаций, развивающейся в глубине биопленок, где создаются аноксидные условия;
- улучшить способность избыточного ила к уплотнению и обезвоживанию за счет его обогащения обрывками биоплёнок.



**Рисунок 3.28.** Установка для нитри-денитрификации и биологической дефосфатации:

АН – нанэробная зона; А – аэробная зона; Д – денитрификатор (аноксидная зона); Н – нитрификатор (аэробная зона); ВО – вторичный отстойник.

Размещение блоков плоскостной загрузки производится таким образом, чтобы обеспечить оптимальный режим работы биопленок. Блоки изготавливаются из стойкого полимерного материала в виде плоских и гофрированных листов (рис. 3.27.)

Технические характеристики блока плоскостной загрузки "Креал" следующие: удельная поверхность —  $120 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ; пористость — 98%; масса  $1 \text{ м}^3$  загрузки — 30 кг.

Глубокую очистку сточных вод от азота и фосфора проводят с помощью биотехнологии нитриденитрификации и биологической дефосфатации (рис. 3.28.).

В результате нитри-денитрификации аммонийный азот превращается в нитратный, а затем в молекулярный азот, удаляемый при аэрации в атмосферу. На стадии денитрификации (биовосстановления нитратов до молекулярного азота) биоокисление органических веществ осуществляется не кислородом, а нитратами, что позволяет сократить расход аэрирующего воздуха и затраты на аэрацию.

Технология биологической дефосфатации приводит к сверхпотреблению фосфатов из сточной воды, которые выводятся из системы очистки вместе с иловой смесью (фосфор накапливается в клетках фосфорных бактерий в виде гранул полифосфатов);

Фирма "КРЕАЛ" проводит реконструкцию существующих аэротенков с переводом их в режим нитриденитрификации и биологической дефосфатации. Реконструкция может производиться одновременно с заменой системы аэрации, не требует больших дополнительных затрат и включает выделение анаэробных, аноксидных и аэробных зон в аэротенке с помощью поперечных перегородок и различной интенсивности, а также введение рецикла иловой смеси высокопроизводительным эрлифтом.

При отсутствии вторичного загрязнения сточной воды во вторичных отстойниках показатели очищенных стоков могут быть доведены до уровня ПДК для водоемов рыбохозяйственной категории водопользования с надежным выполнением норматива ХЕЛКОМа, мг/дм<sup>3</sup> азот аммонийный 0,4; азот нитритный 0,02; азот нитратный 6,0; фосфор фосфатов 0,2; фосфор общий 1,5.

Внедрение технологии нитриденитрификации и биологической дефосфотации требует выделения в аэротенке аноксидных и анаэробных зон при соответствующем объеме аэробных зон. Для достижения эффективной очистки от аммонийного и нитритного азота производится интенсификация процесса нитрификации в аэробных зонах путем повышения концентрации растворенного кислорода и приближения гидродинамического режима к идеальному вытеснению.

Увеличение концентрации кислорода обеспечивается применением трубчатых мелкопузырчатых аэраторов "КРЕАЛ", эффективность которых втрое выше аэраторов из перфорированных труб и не уступает дорогостоящим зарубежным аналогам.

Для объектов отведения малых объемов сточных вод (малых населенных мест, отдельных предприятий и зданий) характерны большая удаленность от хорошо налаженных транспортных коммуникаций, слабая строительная база, высокая удельная стоимость строительно-монтажных работ и отсутствие постоянных квалифицированных кадров. В этих условиях экономически целесообразно применение компактных очистных сооружений, монтируемых на месте эксплуатации целиком или из отдельных блоков, доставляемых автомобильным, железнодорожным или водным транспортом.

Специалистами фирмы "КРЕАЛ" разработаны модульные и блочно-модульные установки типа БТ и БТФ (с.м. таблицу 3.10.), которые работают в автоматическом режиме, предназначенные для очистки бытовых и близких к ним по составу производственных сточных вод объемом 1 — 3000 м<sup>3</sup>/сут. Применение современных технологий позволяет сократить габариты установок и довести качество очищенных сточных вод до экологических нормативов на сброс в водоемы, в том числе рыбохозяйственной категории водопользования. Показатели очистки сточных вод на установках БТ и БТФ при температуре сточной воды 15 — 30°C приведены ниже.

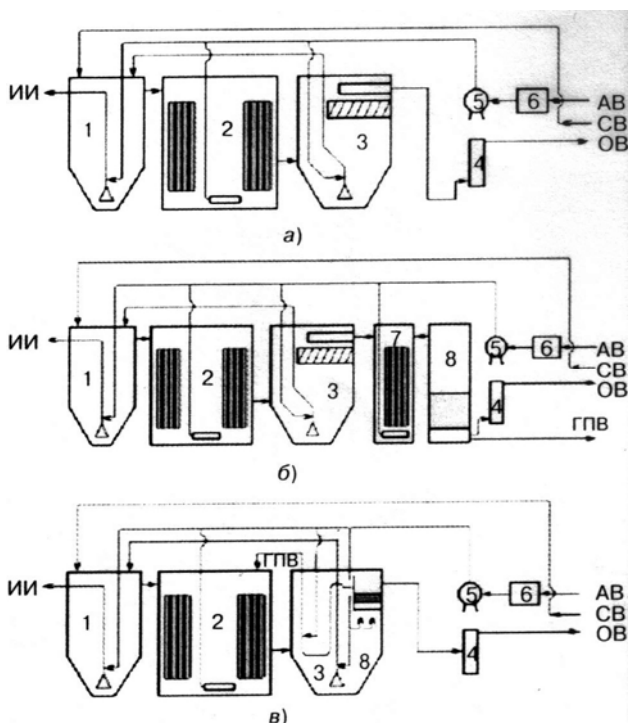
|                                                       | БТ       | БТФ      |
|-------------------------------------------------------|----------|----------|
| БПК <sub>полн</sub> , мг/л .....                      | 200/10   | 250/3    |
| Содержание загрязняющих веществ, мг/дм <sup>3</sup> : |          |          |
| взвешенных .....                                      | 200/10   | 200/4    |
| азота аммонийного .....                               | 20/0,4   | 30/0,4   |
| азота нитратного .....                                | 1/4      | 1/4      |
| азота нитритного .....                                | 0,5/0,02 | 0,5/0,02 |
| фосфора фосфатов .....                                | 3/0,2    | 6/0,2    |

**Примечание.** Числитель — показатели на входе, в знаменателе — на выходе.

**Таблица 3.10. Характеристики установок БТ и БТФ.**

| Установка                                                                                                                                    | Производи-<br>тельность | Расход<br>воздуха | Потребляемая<br>мощность, кВт,<br>не более |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------------------------|
|                                                                                                                                              | м³/сут                  |                   |                                            |
| БТ-25                                                                                                                                        | 10-25                   | 20-М              | 1,2                                        |
| БТФ-25                                                                                                                                       | 10-25                   | 25-30             | 2,5                                        |
| БТ-50                                                                                                                                        | 30-50                   | 35                | 1,5                                        |
| БТФ-50                                                                                                                                       | 30-50                   | 40                | 3,0                                        |
| БТ-100                                                                                                                                       | 60-100                  | 60                | 2,2                                        |
| БТФ-100                                                                                                                                      | 60-100                  | 65                | 4,0                                        |
| БТФ-150М2                                                                                                                                    | 100-150                 | 125               | 6,0                                        |
| Примечание. Установки БТ(Ф)-25 изготавливается в стандартных контейнерах 20ft; установки БТ(Ф)-50. БТ(Ф)-100 и БТФ-150М2-в контейнерах 40ft. |                         |                   |                                            |

Установка БТ (рис. 3.29.) работает по принципу биотенка-отстойника в режиме нитриденитрификации и биологической дефосфотации. Сточная вода, подаваемая от насосной станции (насосная станция не входит в комплект поставки), последовательно проходит три зоны. В зоне 1 обеспечивается предварительная механическая очистка, уплотнение и стабилизация осадка, который периодически откачивается. В зоне 2, оборудованной системой мелкопузырчатой аэрации и блоками плоскостной загрузки, протекают процессы биологической очистки в аэробно-аноксидных условиях. В зоне 3 происходит отделение активного ила в режиме тонкослойного отслаивания и его транспортировка в первую зону. Очищенная вода отводится через усреднительный лоток и обеззараживаются на УФ-установке.



**Рисунок 3.29.** Схема модульных установок типа БТ(а), БТФ М1(б) и БТФ М2(в):

1 – отстойник-уплотнитель; 2 – биотенк (аэротенк с блоками плоскостной загрузки); 3 – вторичный отстойник с блоками тонкослойного отстаивания; 4 – УФ-установка; 5 – воздуходувка; 6 – воздушный фильтр; 7 – затопленный аэрофильтр; 8 – фильтры; СВ – сточная вода; ОВ – очищенная вода; ИИ – уплотненный избыточный ил; АВ – атмосферный воздух; ГПВ – грязная промывочная вода.

Установки БТФ дополнительно содержат блок доочистки стоков, выполняемый в двух модификациях (БТФ М1 и БТФ М2)

В установке БТФ М1 (рис. 3.29-б) блок доочистки включает затопленный аэрофильтр и фильтр с плавающей загрузкой. В установке БТФ М2 (рис. 3.29-в) блок доочистки выполнен в виде фильтра с плавающей загрузкой, размещенного непосредственно во вторичном отстойнике (патентованная технология ООО "КРЕАЛ").

Обе установки имеют сухое отделение, в котором располагается пульт управления, запорно-регулирующая арматура, воздуходувки, электронагреватель воздуха сухого отделения и др. оборудование.

Со второй половины XX века проводились исследования по разделению органических загрязняющих примесей сточной воды, обладающих способностью биоразложения, на фракции различного

размера [39]. В результате было установлено, что только 25% ХПК обуславливается растворенной формой органического вещества, остальная часть ХПК на 15% - коллоидами (0,08—1 нм), на 25% - суперколлоидами (1-100 нм) и на 35% — осаждаемой органикой (> 100 нм). Такое соотношение ХПК по фракциям было подтверждено исследованиями, проведенными в лаборатории очистки сточных вод ГУП «Институт Мосводока-налНИИпроект» на Курьяновских очистных сооружениях Москвы. Это означает, что 75% органического вещества, состоящего из твердых взвесей (50%) и органических коллоидов (25%) может быть удалено осаждением. Органические вещества, присутствующие в виде коллоидов, должны быть переведены в осаждаемую форму, что осуществляется добавлением современных коагулянтов и флокулянтов. В частности, в России широко применяются различные виды коагулянтов «АКВА-АУРАТ» и флокулянтов Праестол.

Процесс коагуляции успешно сочетается с химическим удалением из воды фосфатов, что технологически значительно проще и дешевле, чем методы биологического удаления фосфатов. Анализ работы станций первичного, осаждения в Норвегии [40] показывает высокую эффективность физико-химической очистки сточных вод. Средние результаты по 23 объектам, характеризующимся поступлением сточных вод от более чем 2000 эквивалентных жителей (ЭЖ) и 35 объектам от менее чем 2000 ЭЖ, представлены в табл. 3.11.

Совместное использование коагулянтов и флокулянтов и их количество в [40] не указано, однако известно, что их дозы и сочетания подбирались из условия получения максимальной эффективности очистки от фосфора. Результаты подтверждают, что именно по удалению фосфора получена максимальная эффективность, а абсолютные остаточные концентрации общего фосфора близки к нормативным значениям, принятым в РФ.

**Таблица 3.11**

| Показатель,<br>мг/л    | Исходная вода |             | Очищенная вода |             | Эффективность<br>очистки, % |         |
|------------------------|---------------|-------------|----------------|-------------|-----------------------------|---------|
|                        | >2000ЭЖ       | <2600ЭЖ     | >2000ЭЖ        | <2000ЭЖ     | >2000ЭЖ                     | <2000ЭЖ |
| Взвешенные<br>вещества | 233 ± 171     | 226 ± 150   | 17,3 ± 10      | 22,3 ± 16,6 | 92,5                        | 90,1    |
| БПК,                   | 187 ± 143     | -           | 25,4 ± 11,7    | -           | 86,4                        | -       |
| ХПК                    | 505 ± 243     | 494 ± 90    | 108 ± 40       | 121 ± 72    | 78,6                        | 75,5    |
| P <sub>общ</sub>       | 5,04 ± 3,01   | 5,33 ± 2,26 | 0,28 ± 0,14    | 0,5 ± 0,46  | 94,8                        | 90,6    |

Получаемый первичным осаждением сырой осадок в большей степени состоит из твердых примесей и в меньшей — из скоагулированного органического вещества, содержащего значительное количество гидроокисей металла. Следовательно, с точки зрения последующей обработки осадка (в первую очередь обезвоживания) его свойства ухудшены — это значительный объем (плохое предварительное уплотнение из-за высокой влажности 97-98%) и затрудненная отдача воды (из-за высокого удельного сопротивления фильтрации). Однако высокая эффективность очистки воды по задержанию органических веществ позволяет получить существенные технологические преимущества при необходимости проведения последующих процессов биологической очистки и доочистки, включая значительное сокращение количества избыточного активного ила. В то же время качество первичного осадка можно улучшить, если подбор доз и сочетания реагентов осуществлять не с целью получения максимальной эффективности задержания фосфора, а с целью улучшения качества первичного осадка. В частности, дозу катионного коагулянта можно уменьшить, частично заменив его катионным флокулянт. Оптимальный результат достигается при сочетании низкомолекулярного катионного флокулянта (доза 2—2,5 мг/л) с хлорным железом (доза 2—3 мг/л по Fe), что позволяет удалить из воды не менее 80% органики в виде взвешенных веществ, суперколлоидов и коллоидов (т. е.  $75\% \times 0,8 = 60\%$  ХПК [40]). Подобные результаты получены авторами при применении коагулянта "АКВА-АУРАТ<sup>TM</sup>30» (5-6 мг/л) в сочетании с полимерными флокулянтами А-321 и Прае-стол 2540 (доза 0,5—1 мг/л). При этом объемная нагрузка на поверхность отстойника составляет 2—2,5 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч), а при интенсификации осаждения ламинарным устройством — 5 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч). Следовательно, глубокое удаление органического вещества может быть достигнуто оптимальным режимом проведения усиленной химической первичной очистки при значительном сокращении объема первичных отстойников.

Принимая во внимание, что удаление фосфора не является самоцелью, необходимые результаты как по количеству органических загрязнений в очищенной воде, так и по качеству осадка можно получить частичной заменой катионного коагулянта катионным флокулянт в виде анионного органического полимера. Итогом такой интенсивной первичной очистки является перевод большей части органического вещества (60-75% ХПК) в первичный осадок и отнесение

остаточной части (в основном растворенной органики) к нагрузке на последующую стадию биологической очистки.



**Рисунок 3.30.** Технологическая схема очистки сточных вод.

При наличии слабоконцентрированных сточных вод в централизованных системах водоотведения населенных пунктов можно утверждать, что показатель БПК<sub>5</sub> первично очищенной сточной воды будет находиться в интервале 50—75 мг/л. Это позволит значительно сократить капитальные и эксплуатационные затраты на вторичную биологическую очистку и минимизировать прирост избыточной биомассы. Большое количество первичного (сырого) осадка, содержащего в основном органическое вещество, можно использовать в качестве вторичного сырья (углерод, биогаз, биогенные элементы) и энергии. Технологическая схема очистки сточных вод представлена на рис.3.30.

В данной статье рассматривается только технология глубокой биологической очистки, как наиболее разработанная и имеющая практическое воплощение в виде сооружений модульного типа заводского изготовления, выпускаемых фирмой «RESETILOVS un CO" IK. Данные установки представляют собой биореакторы с прикрепленной микрофлорой, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с сооружениями биологической очистки сточных вод, использующих взвешенный активный ил. Биореакторы с иммобилизованной микрофлорой (биопленкой) требуют меньшего объема при одинаковых значениях гидравлической производительности и субстратной нагрузке. При этом процесс очистки значительно меньше зависит от отделения биомассы от жидкой фазы, не требуется рецикл рабочей

биомассы. Имеется возможность адаптации биомассы к определенным органическим загрязнениям, а также одновременного осуществления аэробных (окислительных) и анаэробных (восстановительных) процессов.

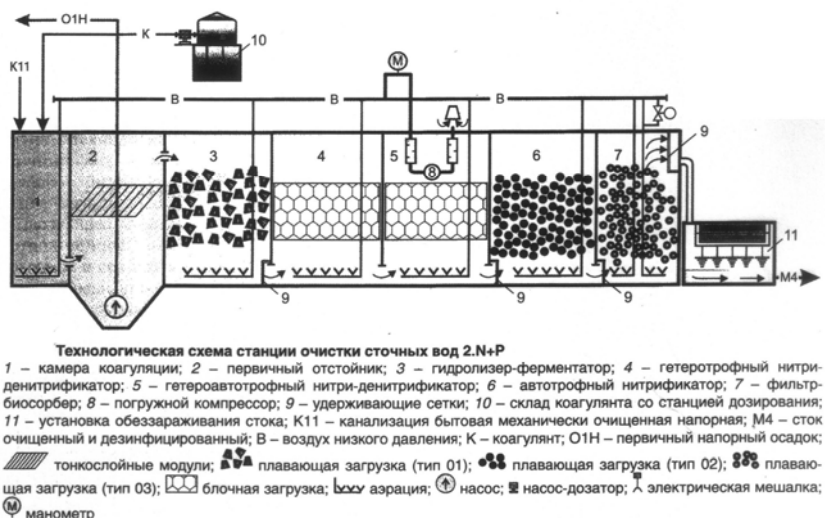


Рисунок 3.31.

На рис.3.31 представлена технологическая схема очистной станции, работающей по технологии 2.N+P (фирмой разработано значительное количество модификаций процессов в зависимости от состава сточных вод и требуемой степени очистки). Биологическая очистка предварительно осветленного в отстойнике стока осуществляется в пяти камерах, в трех из которых находится плавающая пластмассовая загрузка, а в двух - блочная. Такое разделение имеет смысл, поскольку биореакторы с постоянно перемешиваемой воздухом плавающей загрузкой (реактор псевдоожиженного слоя биопленки MBBR) наряду с преимуществами (в частности, для роста биомассы используется весь объем) имеют существенный недостаток — прикрепившаяся биопленка постоянно разрушается, что не дает возможность образования внутреннего анаэробного слоя.

Следовательно, для создания анаэробного реактора необходимо либо механическое перемешивание, как в обычном процессе с активным илом, либо другие технологические решения. В приведенной на рис. 3.31. схеме находящиеся в середине технологического процесса биореакторы с блочной загрузкой (камеры № 2 и 3) предотвращают

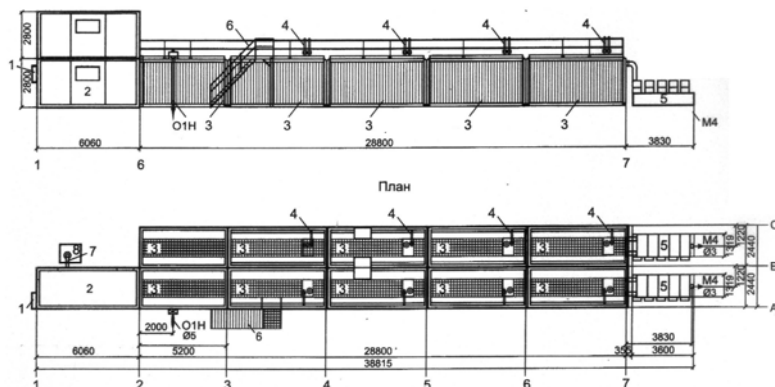
истирание биопленки, что позволяет накопить достаточное количество анаэробной биомассы для осуществления частичной денитрификации. Частичной, потому что в Российской Федерации, в соответствии с установленным нормативом на сброс очищенных сточных вод в водоем, допустимо наличие нитратного азота в количестве не более 9,1 мг/л, т. е. полного восстановления азота из нитратов не требуется.

Таблица 3.12.

| Показатель                                                                 | Модульные сооружения (технология № 5) | Железобетонные сооружения (классическая технология с доочисткой) |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут                                    | 7500                                  |                                                                  |
| Эквивалент жителей, чел.                                                   | 37 500                                |                                                                  |
| БПК <sub>полн</sub> , мг/л                                                 | 375/6*                                |                                                                  |
| ХПК, мг/л                                                                  | 500/25*                               |                                                                  |
| N-NH <sub>4</sub> , мг/л                                                   | 40/0,4*                               |                                                                  |
| N-NO, мг/л                                                                 | 0/9,1*                                |                                                                  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/л                                       | 16,5/0,2* по Р                        |                                                                  |
| Взвешенные вещества, мг/л                                                  | 200/5*                                |                                                                  |
| Нагрузка по БПК <sub>5</sub> на станцию, кг/сут                            | 2812                                  |                                                                  |
| Нагрузка по БПК <sub>5</sub> на биологическую очистку, кг/сут              | 562                                   | 1500                                                             |
| Нагрузка по N—NH <sub>4</sub> на биологическую очистку, кг/сут             | 300                                   | 300                                                              |
| Нагрузка по P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> на биологическую очистку, кг/сут | 11,6                                  | 58                                                               |
| Осадок из первичного отстойника (влажность 97%), м <sup>3</sup> /сут       | 66                                    | 40                                                               |
| Осадок из вторичного отстойника (влажность 97%), м <sup>3</sup> /сут       | -                                     | 42,5                                                             |
| Суммарный осадок (влажность 97%), м <sup>3</sup> /сут                      | 66                                    | 82,5                                                             |
| Объем первичных отстойников, м <sup>3</sup>                                | 165                                   | 470                                                              |
| Время пребывания в первичных отстойниках, ч                                | 0,5                                   | 1,5                                                              |
| Объем биореакторов (аэротенков), м <sup>3</sup>                            | 750                                   | 2500                                                             |
| Время пребывания в биореакторах, ч                                         | 2,5                                   | 8                                                                |
| Объем вторичных отстойников, м <sup>3</sup>                                | -                                     | 625                                                              |

|                                                                                                         |     |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|
| Время пребывания во вторичных отстойниках, ч                                                            | -   | 2    |
| Удельный расход электроэнергии, кВт/кг БПК <sub>полн</sub>                                              | 1,4 | 1,63 |
| Расход коагулянта «АКВА-АУРАТ™30», кг/сут                                                               | 40  | -    |
| Расход флокулянта Праестол, кг/сут                                                                      | 5   | -    |
| * В числителе приводится значение показателя на входе в очистные сооружения, в знаменателе — на выходе. |     |      |

В первой камере осуществляется процесс ферментативного гидролиза оставшегося после осаждения органического вещества, во второй и третьей — нитри-денитрификация смешанным биоценозом гетеро- и автотрофных микроорганизмов, в четвертой — доокисление оставшейся части растворенной органики и продуктов метаболизма (в основном автотрофными микроорганизмами), и наконец, пятая камера работает как плавающий биофильтр-биосорбер. Такая функциональная последовательность камер глубокой биологической очистки позволяет исключить вторичное отстаивание, получить минимально возможный объем сооружений и максимально компактное размещение оборудования. Последняя камера работает в режиме биосорбции, барботируется воздухом только при регенерации загрузки, а в остальное время фильтрация проводится через плавающую загрузку. Регенерация последней секции осуществляется в автоматическом режиме во время прекращения подачи сточных вод на установку с отводом загрязненной промывной воды как в первичный отстойник (на установках малой производительности), так и на насосную станцию подачи стока.



**Рисунок 3.32.** Боковой фасад и план одной очереди очистной станции производительностью 15 м<sup>3</sup>/сут.

Как правило, плавающий носитель биопленки изготавливается из полиэтилена высокой плотности ( $0,95 \text{ г/см}^3$ ), что в первую очередь важно с точки зрения плавучести. Более легкие носители сложнее перемешивать воздухом, так как их трудно вовлечь в нижние слои биореактора. Кроме того, для обеспечения оптимальных условий процессов массопередачи объем загрузочного материала не должен превышать 70% общего объема биореактора. Практика показала, что оптимальная площадь носителя составляет  $350\text{—}400 \text{ м}^2/\text{м}^3$  объема биореактора, из которой эффективной площадью (имеющей прикрепленный биоценоз) следует считать  $220\text{—}250 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Для расчета биореактора с псевдоожиженной загрузкой, работающего в режиме углеродного окисления (C) и частичного удаления азота (N) следует принимать нагрузку на поверхность носителя по БПК<sub>5</sub>  $15 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$  и по  $\text{N-NH}_4$  -  $3\text{--}4 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ . При этом соотношение C/N (что в случае предварительного физико-химического изъятия осаждаемой органики является соотношением ХПК растворенной органики к  $\text{N-NH}_4$ ) должно быть не менее 7. Вышеприведенные расчетные данные действительны при температуре сточной воды более  $15^\circ\text{C}$  и наличии растворенного кислорода не менее  $3 \text{ мг/л}$ .

Блочная загрузка также изготавливается из полиэтилена высокой плотности ( $0,95 \text{ кг/м}^3$ ) в виде кубов размером  $55 \times 55 \times 55 \text{ см}$ . Кубический блок сваривается из сетчатых трубок диаметром  $55 \text{ мм}$ , сделанных из витых спиралей, что создает уникальную структуру поверхности. В частности, используемая в указанных установках блочная загрузка BIO-BLOCK-200 имеет удельную поверхность  $200 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . Соответственно для расчета биореакторов с такой загрузкой, работающих в режиме полной нитрификации и частичной денитрификации, можно принимать значение нагрузки на биопленку по органическому веществу (БПК<sub>5</sub>), равное  $2,8\text{—}3 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ .

В качестве примера приведем сравнительные характеристики станции биологической очистки бытовых сточных вод производительностью  $5000 \text{ м}^3/\text{сут}$  с последующим увеличением до  $7200 \text{ м}^3/\text{сут}$  (табл.3.12). Емкостные сооружения станции состоят из шести технологических линий производительностью  $1250 \text{ м}^3/\text{сут}$  каждая, сблокированных в три отдельные очереди по две линии. Каждая линия имеет установку УФ-обеззараживания лоткового типа, а каждая очередь (рис. 3.32. - контейнерный блок механической очистки, включающий песколовку с установкой обезвоживания песка и решетку (размер ячеек  $3 \text{ мм}$ ), расположенные в стационарных двухъярусных

отдельно стоящих отапливаемых контейнерах. Такой же контейнер представляет собой станция обезвоживания осадка с фильтр-прессом.

На рис. 3.32 показаны боковой фасад и план одной очереди сооружений производительностью 2500 м<sup>3</sup>/сут (без установки обезвоживания осадка). Общая длина емкостных сооружений (контейнерных модулей) составляет 28 800 мм, ширина одной линии - 2440 мм. В осях 2, 3 расположены камера коагуляции и первичный отстойник, в осях 3, 4, 5, 6 — камеры биореакторов с плавающей и блочной загрузками, в осях 6, 7 — фильтр-биосорбер. Общая рабочая (расчетная) глубина емкостных сооружений составляет 2,2 м. Стандартные размеры контейнеров, где расположены решетки и песколовки, 6060x2440x2800 мм полностью соответствуют транспортным габаритам. Производитель также осуществляет поставку контейнерных бытовых помещений, лабораторий, мастерских, помещений операторов, что позволяет быстро и оперативно на отдельных фундаментах смонтировать необходимое оборудование в зависимости от потребностей и наличия места на промышленной площадке. Все емкостные сооружения изготавливаются из нержавеющей стали. Оптимизация технологических процессов и управление работой оборудования осуществляются автоматически.

Выполненный фирмой «RESETELOVS un CO» ИК совместно с проектным институтом г. Якутска расчет капитальных затрат на строительство очистных сооружений производительностью 4000 м<sup>3</sup>/сут, расположенных в ангаре в условиях вечной мерзлоты, показывает, что их можно снизить в 3 раза при использовании модульных установок. В первую очередь такое сокращение затрат связано со значительным уменьшением объемов строительно-монтажных работ и сроков строительства, так как каждую станцию можно построить за один сезон, что в условиях Якутии крайне важно. Другим положительным фактором является возможность поэтапного строительства (отдельными очередями) при развитии вновь создающихся и реконструируемых промышленных и социально-бытовых объектов. Как видно из указанных в табл. 3.12 данных по количеству осадков сточных вод, расходу электроэнергии и реагентов, эксплуатационные расходы для сравниваемых вариантов следует считать одинаковыми. Положительными моментами при эксплуатации следует считать отсутствие рецикла биомассы, исключение ее прироста в биореакторах и самое главное — стабильное качество очищенных сточных вод, позволяющее использовать их повторно для любых (кроме питьевых) целей. К недостаткам

следует отнести ухудшенные характеристики осадка (с точки зрения последующего процесса обезвоживания).

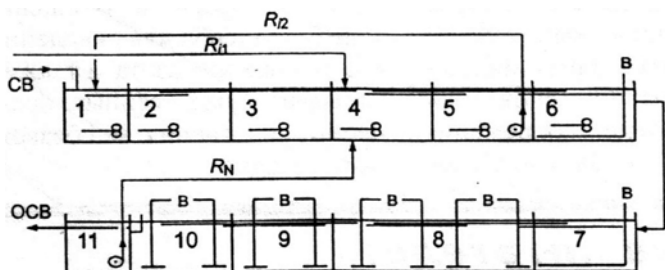
### **3.2. Реализация технологии удаления азота и фосфора на различных стадиях аэрации.**

*Ученые страны! Наш путь единый.  
Нека не прервалась націй життя,  
Во имя будущего Украины  
Мы все усилия должны объединить!*

*Ю. Полиський – учений и поэт  
г. Днепропетровска*

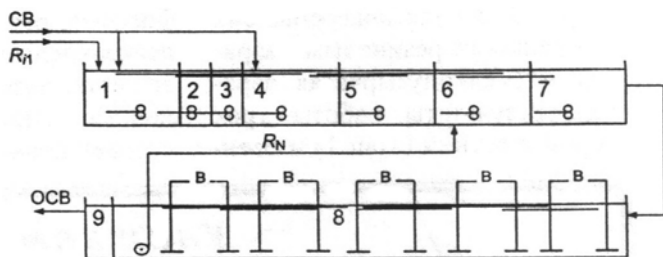
Из многочисленных схем и способов биологического удаления азота и фосфора обычно выбирают наиболее надежные, в особенности для систем общесплавной канализации, отличающейся поступлением больших масс холодной воды в период снеготаяния. Устойчивая работа очистных сооружений в периоды выпадения дождей и паводка, возможность изменения качества очищенной воды в зависимости от сезона года и других факторов заставляют выбирать маневренные и в то же время надежные схемы работы сооружений биологической очистки сточных вод [41].

В С.-Петербурге в 1997-1999 годах на Красносельской и Северной очистных станциях была проверена схема очистки с анаэробно-аноксидно-аэробными зонами и двойной перекачкой возвратного активного ила (рис. 3.33.). Активный ил из вторичных отстойников направлялся в денитрификатор (аноксидную зону) и затем в анаэробную зону, что позволяло поддерживать в ней кислое брожение загрязнений (окислительно-восстановительный потенциал минус 300 мВ). Нитрификация и дефосфатирование являются конкурирующими процессами, в связи с чем возникает вопрос о предпочтительности достижения глубокой очистки либо по азоту, либо по фосфору или сбалансированного результата по обоим показателям. Для бактерий - нитрификаторов критическим периодом было весеннее снеготаяние, для активного ила с повышенным содержанием в клетках полифосфатов - теплый период года (июль-август). Если учесть интенсивное эвтрофирование водоемов в летнее время, то проблема поддержания низкой концентрации фосфора в этот период становится трудноразрешимой.



**Рисунок 3.33.** Схема очистки с анаэробно-аноксидно-аэробными зонами и двойной перекачкой возвратного активного ила

1-3 - анаэробная зона; 4-5 - аноксидная зона; 6 - переходная зона; 7-10 - аэробная зона; 11 - вторичный отстойник; В - воздух; СВ - осветленные сточные воды; ОСВ - очищенные сточные воды;  $R_{11}$  - возвратный (циркулирующий) активный ил;  $R_{12}$  - аноксидный рецикл;  $R_N$  - рециркуляция нитратсодержащей иловой смеси



**Рисунок 3.34.** Схема нитри-денитрификации и дефосфатирования с дробным впуском сточных вод

1 - предденитрификационная зона; 2-3 - селекторы; 4-5 - анаэробная зона; 6-7 - аноксидная зона; 8 - аэробная зона; 9 - вторичный отстойник; В - воздух; СВ - осветленные сточные воды; ОСВ - очищенные сточные воды;  $R_{11}$  - возвратный (циркулирующий) активный ил;  $R_N$  - рециркуляция нитратсодержащей иловой смеси.

Производственные испытания на очистных станциях доказали жизнеспособность технологии удаления азота и фосфора. Концентрация общего азота снижалась с 25-60 до 10-12 мг/л азота аммонийных соединений до 1-2 мг/л, общего фосфора до 1,4-1,8 мг/л, глубокое окисление аммонийного азота сопровождалось снижением БПК<sub>5</sub> до величины 4-5 мг/л. Следует обратить внимание не повышенный вынос ила из вторичных отстойников в летнее время, по-видимому, вследствие денитрификации и всплывания частиц активного ила. Интересный факт выявился на Северной станции аэрации: в летнее время, благодаря закисанию сточных вод в коллекторе глубокого заложения, концентрация фосфора снижалась до 0,6-1 мг/д; в холодный период из-за ослабления кислого брожения повышалась до 1,5-2 мг/л.

Испытания продолжались в течение 2002 г. на очистной станции г. Пушкина. В трех секциях аэротенков была реализована схема нитриденитрификации и дефосфатирования с дробным впуском сточных вод (рис. 3.34.). Примерно 20 % расхода сточных вод и весь объем возвратного ила направлялись в первую (по ходу движения иловой смеси) зону для удаления растворенного кислорода и нитратов из возвратного активного ила. Другая часть сточных вод поступала в селектор, где перемешивалась с иловой смесью из первой зоны. Назначение селектора - подавление деятельности нитчатых бактерий, вызывающих вспухание ила путем шокового воздействия массой загрязнений в анаэробных условиях. После селектора иловая смесь поступает в анаэробную зону, состоящую из двух расположенных последовательно отсеков.

**Таблица 3.13.**

| Параметр                                                                                                                                                                                                                | Этап                   |                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|
|                                                                                                                                                                                                                         | 1                      | 2                     |
| Расход сточных вод, %                                                                                                                                                                                                   | 100                    | 100                   |
| Рециркуляция нитратов, %                                                                                                                                                                                                | 70                     | 60                    |
| Возврат активного ила, %                                                                                                                                                                                                | 50                     | 55                    |
| Средняя температура сточных вод, °С                                                                                                                                                                                     | 20                     | 13,5                  |
| Средняя доза активного ила в аэробной зоне, г/дм <sup>3</sup> *                                                                                                                                                         | <u>0.97-3.6</u><br>2,4 | <u>2.2-3.3</u><br>2,9 |
| Концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне в часы среднего расхода, мг/дм <sup>3</sup>                                                                                                                        | 3,3                    | 3,8                   |
| Нагрузка на активный ил по БПК <sub>5</sub> , кг/(кг-сут)                                                                                                                                                               | 0,15                   | 0,14                  |
| Концентрация общего азота, мг/дм <sup>3</sup> **                                                                                                                                                                        | <u>21.2</u><br>9,1     | <u>19</u><br>11,2     |
| Концентрация общего фосфора, мг/дм <sup>3</sup> **                                                                                                                                                                      | <u>3.6</u><br>1,33     | <u>3.6</u><br>2,1     |
| Возраст ила в целом / в зоне нитрификации, сут                                                                                                                                                                          | 9/5                    | 9/5                   |
| Иловый индекс, мл/г*                                                                                                                                                                                                    | <u>133-255</u><br>207  | <u>165-253</u><br>201 |
| * В числителе - границы интервала изменения параметров, в знаменателе - среднее значение.<br>** В числителе - концентрации загрязняющих компонентов сточных вод, поступающих на очистку, в знаменателе - после очистки. |                        |                       |

В анаэробной зоне происходило активное вытеснение фосфора из клеток бактерий, и концентрация фосфатов возрастала с 3-4 до 6-8 мг/дм<sup>3</sup>. Затем иловая смесь направлялась в аноксидную зону (также два отсека), где перемешивалась с нитратсодержащей иловой смесью,

перекачиваемой насосом из концевой части аэробной зоны (нитрификатора). Аэробная зона оснащена мембранными резиновыми аэраторами (мелкопузырчатая аэрация). Результаты работы трех секций в летний (этап 1) и осенне-зимний (этап 2) периоды представлены в таблице 3.13. Две оставшиеся секции аэротенков будут реконструированы позже.

Затраты электроэнергии на очистку сточных вод по удельной величине БПК<sub>5</sub> составили примерно 1,5 кВт·ч/кг при неполной очистке до начала нитрификации, 2-2,5 кВт·ч/кг - в процессах с нитрификацией, 2,5—3,2 кВт·ч/кг - в условиях нитри-денитрификации и дефосфатирования. Мелкое дробление аэротенков на отсеки повлекло за собой большой расход электроэнергии на перемешивание иловой смеси, что можно было бы избежать при укрупнении отсеков.

В процессах удаления азота и фосфора, ограниченных запасом легкоокисляемых органических веществ, возврат биогенов в головные очистные сооружения создает новые проблемы. Существенное влияние на количество загрязнений, возвращаемых в головные очистные сооружения, оказывает схема обработки сырого осадка первичных отстойников и избыточного активного ила. Натурные наблюдения за работой уплотнителей показали, что уплотнение одного сырого осадка создает низкий фон загрязненности сливной воды с уплотнителя. Значительно большее количество фосфатов продуцирует уплотнитель избыточного активного ила. Совместное уплотнение осадка и ила в уплотнителях повышает вынос азота и фосфора; концентрация фосфора фосфатов в сливной воде возрастает с 15-20 до 30 мг/дм<sup>3</sup>.

Количество загрязнений, возвращаемых с фугатом, зависит от режима обезвоживания. При обезвоживании осадка на центрифугах ОГШ количество возвращаемых загрязнений составило: по взвешенным веществам менее 500 мг/дм<sup>3</sup>, ХПК не более 2 г/дм<sup>3</sup> азоту аммонийных солей 75 мг/дм<sup>3</sup>, фосфору фосфатов 120 г/дм<sup>3</sup>.

В 2002г. в г. Пушкин завершен первый, а в 2005 г. - второй этап реконструкции комплекса сооружений биологической очистки по технологии А<sup>2</sup>/О<sup>™</sup>.

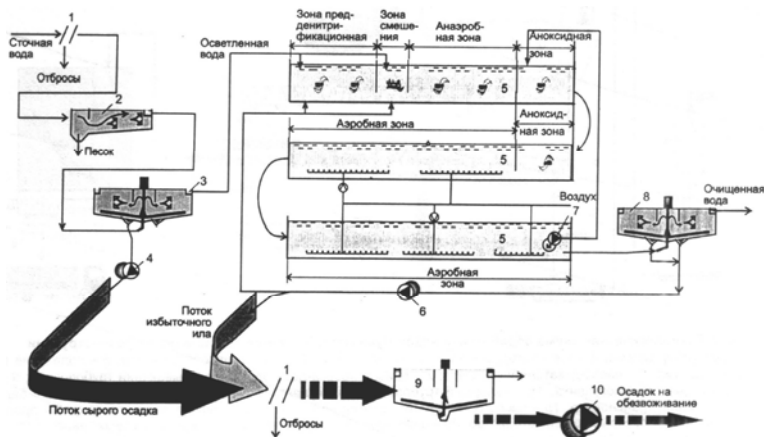
Работы выполнялись по проекту датской фирмы «Крюгер Интернешнл Консалтинг». В реконструкции принимали участие Министерство экологии и энергетики Дании, Министерство окружающей среды Финляндии. [42]

В результате все пять секций аэротенка переоборудованы по технологии А<sup>2</sup>/О<sup>™</sup> глубокого удаления биогенных I элементов - соединений азота и фосфора (рис. 3.35.). Кроме того, произведена

модернизация воздуходувной и насосной станций циркулирующего ила. Каждая секция аэротенка была разделена на ряд последовательно расположенных зон: преднитрификационную, смешения, анаэробную, аноксидную и аэробную. Для проведения технологического процесса из конца аэробной зоны в аноксидную осуществляется рециркуляция нитратсодержащего потока.

Выполненные работы позволили значительно сократить сброс загрязняющих веществ, включая азот и фосфор, в р. Славянку. Сброс общего азота сократился на 39 % по сравнению с показателями пятилетней давности, полученными до начала реконструкции. Реальное снижение сброса общего фосфора составило 59 % за тот же промежуток времени. Для новой технологии разработан и внедрен проект АСУ ТП.

В результате реконструкции и модернизации очистных сооружений г. Пушкина достигнуты показатели очищенных сточных вод в соответствии с требованиями ХЕЛКОМ: взвешенные вещества  $11,3 \text{ мг/дм}^3$ ; БПК<sub>5</sub>  $3,7 \text{ мг/дм}^3$ ; общий азот  $8,9 \text{ мг/дм}^3$ ; общий фосфор  $1 \text{ мг/дм}^3$ .



**Рисунок 3.35** Технологическая схема очистки сточных вод на Пушкинской станции аэрации:

1 - решетки; 2 - песколовки; 3 - первичные отстойники; 4 - насосная станция осадков первичных отстойников; 5 - секции аэротенков; 6 - насосная станция рециркуляции активного ила; 7 - насосная станция рециркуляции нитратсодержащего илового смеси; 8 - вторичные отстойники; 9 - уплотнители; 10 - насосная станция уплотненных осадков.

Система коммунальной канализации Москвы в своем развитии сложилась как полураздельная, т. е. в нее осуществляется прием только хозяйственно-бытовых, коммунальных и промышленных сточных

вод. Поверхностные сточные воды отводятся по самостоятельной водосточной системе [43].

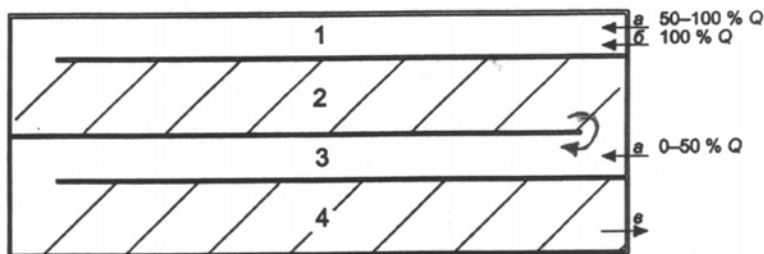
Все сточные воды подвергаются полной биологической очистке на четырех городских очистных сооружениях. Очистные сооружения района Южное Бутово (ОСЮБ) и Зеленограда (ОСЗ) общей производительностью 220 тыс. м<sup>3</sup>/сут построенные по современным технологиям, полностью соответствуют требованиям ЕС, а также санитарно-гигиеническим нормативам по обеззараживанию. Люберецкие (ЛОС) и Курьяновские (КОС) очистные сооружения общей производительностью 6,125 млн. м<sup>3</sup>/сут (проектировались и строились в середине прошлого века) являются крупнейшими в Европе. Качество очистки сточных вод на них соответствует требованиям, предъявляемым к воде водных объектов культурно-бытового назначения, за исключением содержания биогенных элементов (азота и фосфора) и микробиологических загрязнений (табл. 3.14. данные за первое полугодие 2006 г.).

**Таблица 3.14.**

| Показатель,<br>мг/л                           | Поступающая сточная вода |      |      |      | Очищенная вода |         |                     |      |      |
|-----------------------------------------------|--------------------------|------|------|------|----------------|---------|---------------------|------|------|
|                                               | КОС                      | ЛОС  | ОСЗ  | ОСЮБ | КОС            | ЛОС     |                     | ОСЗ  | ОСЮБ |
|                                               |                          |      |      |      |                | в целом | в том числе НЛОС-2* |      |      |
| Взвешенные вещества                           | 254                      | 220  | 241  | 149  | 11,6           | 7       | 5,9                 | 0,9  | 1    |
| БПК <sub>5</sub>                              | 178                      | 148  | 147  | 167  | 6,1            | 3,7     | 2,2                 | 1    | 1,5  |
| Азот аммонийных солей                         | 25,4                     | 24,4 | 19,7 | 31,2 | 8,9            | 5,1     | 0,7                 | 0,1  | <0,1 |
| Азот нитритов                                 | Не определяются          |      |      |      | 0,41           | 0,32    | 0,01                | 0,01 | 0,01 |
| Азот нитратов                                 |                          |      |      |      | 9              | 12,5    | 11,9                | 3,5  | 2,2  |
| Фосфаты (по Р)                                | 1,67                     | 3,35 | 3,21 | 4,82 | 1,07           | 1,86    | 1,89                | 0,53 | 0,78 |
| Нефтепродукты                                 | 4,9                      | 8,2  | 3,4  | 2,2  | 0,08           | 0,12    | 0,11                | 0,01 | 0,05 |
| * НЛОС - Ново-Люберецкие очистные сооружения. |                          |      |      |      |                |         |                     |      |      |

В МГУП «Мосводоканал» в течение многих лет проводятся исследования влияния сброса очищенной воды с КОС и ЛОС на реку Москву в ее среднем и нижнем течении.

Наиболее выраженное влияние с заметным превышением фоновых концентраций в реке отмечается по соединениям азота и фосфора, а также бактериальной загрязненности. Так, в первом полугодии 2006 г. после сбросов КОС и ЛОС в речной воде увеличивалось содержание: аммонийного азота - с 0,25 до 3,4 мг/л; нитратов - с 1,8 до 6,7 мг/л (оставаясь в пределах нормативов), нитритов - с 0,08 до 0,32 мг/л; фосфатов (по Р) - с 0,1 до 1,3 мг/л. Прочие показатели при смешении очищенных вод с речной водой практически не изменялись.



**Технологическая схема азротенков второго блока НЛОС производительностью  $Q = 500 \text{ м}^3/\text{сут}$**   
 а – осветленная сточная вода; б – возвратный ил; в – очищенная сточная вода; зона постоянной аэрации; 1, 3 – зона денитрификации (перемешивание воздухом через дырчатые трубы); 2, 4 – зона нитрификации

Рисунок 3.36.

Таким образом, главной задачей повышения эффективности очистки сточных вод по химическим показателям является удаление азота и фосфора. МГУП «Мосводоканал» приступило к решению этой задачи еще в середине 80-х годов, когда началось строительство второго блока НЛОС. С 1998 г. эти сооружения производительностью 500 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут}$ , работающие по технологии нитри-денитрификации (рис. 3.36.), разработанной институтом «МосводоканалНИИпроект», осуществляют удаление всех соединений азота до нормативов сброса в водоемы рыбохо-зяйственного назначения [2].

Наряду со строительством новых очистных сооружений МГУП «Мосводоканал» начало подготовку к реконструкции КОС и ЛОС с удалением биогенных элементов. В Инженерно-технологическом центре по проблемам канализации МГУП «Мосводоканал» проведены комплексные лабораторные и пилотные эксперименты и технологические расчеты с применением современных программ моделирования, что позволило выбрать для производственных испытаний несколько альтернативных схем реконструкции действующих сооружений. Все

они основаны на процессах биологической нитри-денитрификации и биологической дефосфотации, осуществляемой путем поглощения фосфатов отдельной группой фосфораккумулирующих бактерий.

Для выбора оптимальной технологии очистки сточных вод, соответствующей условиям Москвы, на «старом» блоке ЛОС на базе трех реконструированных самостоятельных технологических линий производительностью по 100 тыс. м<sup>3</sup>/сут (аэротенки № 13, 14, 15) в 1998-2000 годах был создан крупномасштабный промышленный полигон, где в реальных условиях отрабатывались различные технологии биологической очистки сточных вод от биогенных элементов. Аналогичная работа проводилась на КОС на базе технологической линии производительностью 50 тыс. м<sup>3</sup>/сут [4].

По результатам проведенного комплекса лабораторных и промышленных экспериментов сделаны следующие выводы:

удаление биогенных элементов при очистке низкоконцентрированных по органическим веществам сточных вод, характерных для г. Москвы, возможно только биологическими методами, что значительно экономичнее, чем реагентное удаление фосфатов;

основными условиями, обеспечивающими эффективное протекание процессов биологической очистки от азота и фосфора, являются: поддержание аэробного возраста ила в заданных пределах, обеспечивающих одновременно протекание процессов нитрификации и дефосфотации; рациональное использование содержащегося в исходной сточной воде органического субстрата для обеспечения процессов денитрификации и дефосфотации;

наиболее эффективной для очистки низкоконцентрированных по органическим веществам городских сточных вод признана технологическая схема, особенностью которой является предварительная денитрификация иловой смеси перед ее подачей в анаэробную зону (рис. 3.37.) Реализация на двух из вышеупомянутых опытных объектах решений, не предусматривавших денитрификацию иловой смеси перед подачей в анаэробную зону, не позволила получить биологическую дефосфотацию, хотя на объектах в Западной Европе эти схемы обеспечивают эффективное безреагентное удаление фосфора.



Рисунок 3.37. Технологическая схема биологического удаления азота и фосфора.

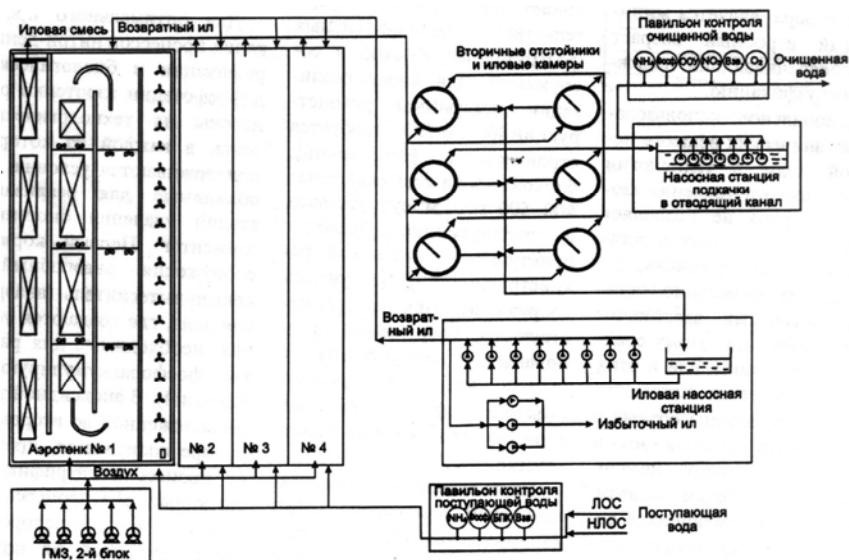


Рисунок 3.38. Технологическая схема нового блока ЛОС с удалением азота и фосфора.

Проведенные исследования и расчеты показывают, что для российских условий параметром, существенно влияющим на объемы сооружений биологического удаления азота и фосфора, является минимальный аэробный возраст ила, обеспечивающий надежную нитрификацию.

Рациональное использование органических веществ исходной воды в технологии биологического удаления азота и фосфора не позволяет осуществлять процесс в регенераторах - сооружениях, где происходит окисление органики обычными аэробными гетеротрофами, поэтому средняя концентрация ила в этих схемах снижается. Кроме того, около половины объема в сооружениях удаления азота и фосфора занимают неаэрируемые зоны. Таким образом, при переводе

имеющихся сооружений на технологию удаления биогенных элементов аэробный возраст ила в них существенно снижается. Однако в условиях ограниченной площади поверхности вторичных отстойников [проектная нагрузка на КОС и ЛОС в основном не менее  $2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ] для поддержания требуемого аэробного возраста ила требуются большие, по сравнению с традиционными схемами биологической очистки, объемы аэротенков.

Поскольку имеющиеся на КОС и ЛОС объемы аэротенков и площади вторичных отстойников недостаточны для поддержания необходимого аэробного возраста ила, возникает необходимость строительства дополнительных (разгрузочных) блоков и сооружений. Для начала реализации программы реконструкции КОС и ЛОС требуется строительство разгрузочных блоков производительностью 400-500 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут.}$  Их ввод в эксплуатацию позволит приступить к поэтапной реконструкции действующих сооружений. При этом существующие сооружения предполагается использовать с учетом их гидравлических объемов и фактического состояния строительных конструкций.

Первым шагом в реализации этой программы стало строительство нового блока на ЛОС производительностью 500 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут.}$  с удалением биогенных элементов (соединений азота и фосфора). Технология блока разработана специалистами МГУП «Мосводоканал», проект - ГУП «МосводоканалНИИпроект» в тесном сотрудничестве со специалистами МГУП «Мосводоканал».

В состав сооружений нового блока входят: четыре аэротенка, семь вторичных отстойников, насосная станция возвратного активного ила, насосная станция подкачки очищенных вод (рис. 3.38.).

Для оптимального протекания процессов нитри-денитрификации и биологической дефосфотации аэротенки разделены на технологические зоны, в каждой из которых поддерживаются условия, необходимые для реализации стадий удаления биогенных элементов. Первый коридор сооружения - анаэробный селектор-вытеснитель (анаэробная зона, где создаются условия, необходимые для развития фосфоракумулирующих бактерий). В аноксидной зоне, расположенной во втором коридоре сооружения, протекает процесс денитрификации. Поскольку оба процесса происходят в бескислородной среде, активный ил поддерживается во взвешенном состоянии с помощью мешалок. При этом в двух центральных коридорах при помощи погружных мешалок осуществляется круговое движение иловой смеси из неаэрируемой зоны в аэрируемую (так называемая «кару-

сель»). Скорость потока 0,25-0,3 м/с поддерживается низкооборотными погружными мешалками, установленными в этих коридорах. В третьем и четвертом (последнем) коридорах аэротенка в условиях интенсивной аэрации происходят нитрификация и окисление органических загрязнений. Иловая смесь после аэротенка разделяется во вторичных отстойниках традиционной конструкции.

Впервые в отечественной практике строительства очистных сооружений все металлические конструкции (воздуховоды, илоскребы, затворы, ограждения) выполнены из нержавеющей стали либо оцинкованы. Это позволит впоследствии значительно уменьшить эксплуатационные затраты на ремонт и защиту от коррозии.

Работа сооружений нового блока полностью автоматизирована. Для контроля технологического процесса очистки воды в каждом аэротенке установлены современные приборы: датчики окислительно-восстановительного потенциала, анализаторы аммонийного азота, нитратов, взвешенных веществ, кислородомеры. Для стабильности глубокой биологической очистки с удалением соединений азота и фосфора до требуемых нормативов используется автоматическое регулирование всех технологических процессов: соотношение аэрируемых и неаэрируемых зон, расход подаваемого воздуха и внутренних рециркуляционных потоков иловой смеси.

Управление подачей воздуха в технологиях удаления азота и фосфора является необходимым не только для экономии энергозатрат, но и как средство обеспечения требуемого баланса между окислителем (кислородом воздуха) и восстановителями (органическими загрязнениями), и соответственно между протекающими в аэротенках аноксидными и окислительными процессами. По проекту управление подачей воздуха должно осуществляться от датчиков растворенного кислорода, которые установлены в каждом аэротенке. По их показаниям автоматически производится частичное открытие-закрытие дисковых поворотных затворов, установленных на каждом из подводящих к коридору аэротенка воздуховоде, в результате чего изменяется давление воздуха в подводящем магистральном трубопроводе. В свою очередь по датчику давления в подводящем магистральном воздухопроводе осуществляется управление воздушными потоками.

Плавное регулирование подачи воздуха на новом блоке НЛОС представляло отдельную инженерную задачу. Обычно применяемое для насосных агрегатов частотное регулирование электропривода в данном случае не подходило. В результате уменьшения частоты тока

динамических машин, к которым относятся турбовоздуходувки, происходит одновременное уменьшение расхода и напора (сдвиг вниз характеристики Q-H). В отличие от регулирования работы насосов, у которых рабочее давление складывается из близких долей статического напора и динамических потерь, рабочее давление, требуемое для подачи воздуха в азротенки, на 80-85 % определяется потерями на преодоление столба воды (глубина азротенков 5-6 м), тогда как динамические потери невелики. В такой системе незначительное снижение давления, развиваемое турбовоздуходувкой, может привести к полному прекращению азрации, т. е. к неработоспособности агрегата. Кроме того, частотные регуляторы для столь мощных (1200 кВт) двигателей весьма дороги.

Альтернативой частотному регулированию для центробежных турбовоздуходувок большой производительности является динамическое регулирование посредством механических устройств (улучшенный вариант применяемого в отечественной практике дросселирования на всасывающей линии). Механическое регулирующее устройство устанавливается непосредственно перед рабочим колесом и представляет собой цилиндр с расположенными по внутреннему периметру лопастями. За счет изменения угла наклона лопастей осуществляется закручивание входящего потока воздуха перед рабочим колесом. В результате создаваемого сопротивления достигается регулирование расхода (приблизительно от 100 до 40 % номинала). При этом давление нагнетания в отличие от частотного регулирования не уменьшается, а снижение КПД агрегата незначительно. Такие агрегаты впервые в отечественной практике установлены на новом блоке ДОС.

Качество исходной и очищенной сточной воды на новом блоке ДОС контролируется в автоматическом режиме приборами непрерывного действия, кроме того предусмотрено измерение концентрации аммонийного азота, органических загрязнений и pH.-

Впервые в отечественной практике на новом блоке ДОС использован гидробиологический контроль хронической и острой токсичности очищенной воды с помощью высших водных организмов. В двух аквариумах объемом по 0,6 м (контрольном и опытном) содержатся стерляди - один из наиболее чувствительных к экологическому состоянию; видов рыб. Видеоизображение аквакомплекса передается в центральный диспетчерский пункт ЛОС. Промышленному внедрению этого метода биотестирования предшествовала его отработка в Инженерно-технологическом центре по проблемам канализации.

Проектные показатели нового блока обеспечивают выполнение как норм ЕС, так и российских нормативов для водоемов культурно-бытового назначения (табл. 3.15.)

12 августа 2006 г. в торжественной обстановке мэром Москвы Ю. М. Лужковым осуществлен пуск нового блока ЛОС. Созданные российскими инженерами и строителями сооружения биологической очистки с удалением азота и фосфора производительностью 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут являются одним из крупнейших подобных объектов, построенных в последние годы в мире, и крупнейшим в России.

**Таблица 3.15.**

| Показатель, мг/л                  | Фактические данные ЛОС | Проектные данные нового блока ЛОС | Норматив                                   |                         |
|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
|                                   |                        |                                   | для водоемов культурно-бытового назначения | ЕС                      |
| Взвешенные вещества               | 10,75                  | 8                                 | 13                                         | 35                      |
| БПК <sub>5</sub>                  | 4                      | 4                                 | 4                                          | 25                      |
| Аммонийный азот N-NH <sub>4</sub> | 5,4                    | 1                                 | 1,5                                        | 10 (сумма – общий азот) |
| Азот нитратов N-NO <sub>3</sub>   | 13,1                   | 9                                 | 10,2                                       |                         |
| Фосфаты (по Р)                    | 2                      | 0,9                               | 1,14                                       | 1 (общий фосфор)        |

В результате ввода нового блока ЛОС снизилась гидравлическая нагрузка на действующие сооружения, что позволит начать их поэтапную реконструкцию. Опыт проектирования и строительства нового блока будет использован в дальнейшем при реконструкции действующих блоков ЛОС и КОС. В настоящее время ведется разработка проектов реконструкции экспериментального блока КОС со строительством дополнительного блока общей производительностью 400 тыс. м<sup>3</sup>/сут, который также выполнит функцию разгрузочного блока, и ЛОС (первая-третья очереди) производительностью 600 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Согласно Генеральной схеме развития канализации, все очистные сооружения должны быть переведены на технологию с удалением азота и фосфора. Современные требования к качеству очищенной сточной воды, а также значительная степень амортизации сооружений и оборудования диктуют необходимость комплексной реконструкции КОС и ЛОС. Учитывая объективные сложности (масштаб сооружений,

дефицит земельных площадей, необходимость совмещения реконструкции и эксплуатации сооружений), решение этой задачи рассчитано на ближайшие 15 лет и будет осуществляться поэтапно.

В 2004 г. институтом «Гипрокоммунводоканал» был разработан проект Технико-экономического обоснования (ТЭО) «Реконструкция Щелковских межрайонных очистных сооружений» [44]. Одна из задач проекта — доведение качества очистки сточных вод по биогенным элементам до норм, соответствующих требованиям на сброс в водоем рыбохозяйственного назначения. Рекомендации и аппаратурное оформление процесса механической и биологической очистки сточных вод разрабатывались специалистами ГК «Экополимер». К началу 2009 г. эти технические решения полностью реализованы.

Щелковские межрайонные очистные сооружения канализации представлены двумя комплексами, различающимися по времени введения в эксплуатацию, конструкции и составу сооружений и оборудования.

Первый комплекс очистных сооружений введен в эксплуатацию в 1966 г. Проектный расход сточных вод составлял 200 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Второй комплекс введен в эксплуатацию в 1982 г, проектный расход сточных вод — 120 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Таблица 3.16.

| Показатель                              | Исходная вода   |                 | Очищенная вода  |                 |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                         | первый комплекс | второй комплекс | первый комплекс | второй комплекс |
| Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup> | 224             | 214             | 17              | 19              |
| ХПК, мг/дм <sup>3</sup>                 | 282             | 290             | 43              | 49              |
| БПК <sub>5</sub> , мг/дм <sup>3</sup>   | 189             | 176             | 13              | 13,9            |
| Азот аммонийный, мг/дм <sup>3</sup>     | 24,5            | 27,3            | 2,8             | 12,5            |
| Азот нитритов, мг/дм <sup>3</sup>       | 0               | 0               | 0,12            | 0,13            |
| Азот нитратов, мг/дм <sup>3</sup>       | 0               | 0               | 3,7             | 4,3             |
| Фосфор ортофосфатов, мг/дм <sup>3</sup> | 2,4             | 2,3             | 0,9             | 1,1             |

В табл. 3.16 приведены фактические данные о концентрации загрязняющих примесей в поступающих и очищенных сточных водах до

реконструкции (первое полугодие 2004 г, т. е. начало реализации проекта ТЭО).

Как видно из табл.3.16. наиболее существенные отклонения показателей качества биологической очистки от максимально достижимых значений наблюдались на втором комплексе, особенно по концентрации аммонийного азота. Это, безусловно, было связано с тем, что на второй комплекс подавались дренажные воды с иловых полей.

В процессе разработки проекта ТЭО было определено, что вместимость существующих аэротенков первого и второго комплексов достаточна для организации процесса нитри-денитрификации. Детальные расчеты, проведенные по программе «ЭкоСим», показали, что наиболее эффективной является модифицированная схема Лудзака-Эттингера с размещением зоны механического перемешивания перед зоной аэрации и дополнительным рециклом из конца зоны аэрации в начало зоны механического перемешивания[46]. При этом соотношение вместимости зоны денитрификации к общей вместимости аэротенка составляет  $V_D/V_{AT}$ . В связи с этим в четырехкоридорных аэротенках второго комплекса один коридор (первый) был отведен под зону денитрификации с механическим перемешиванием. Восемь двухкоридорных аэротенков первого комплекса были реконструированы в четыре четырехкоридорных аэротенка. Причем один коридор каждого аэротенка был отведен под зону денитрификации. Характеристика аэротенков с нитри-денитрификацией первого и второго комплексов приведены в табл. 3.17.

Аэротенки оснащены системами аэрации производства ГК «Экополимер» (АКБА-ПЛАСТ и АКБА-ПРО М), мешалками и насосами компаний ABS и GRUNDFOS для рецикла из конца зоны аэрации в начало зоны перемешивания. Для реализации внутреннего рецикла начало первого коридора и конец четвертого коридора каждого аэротенка соединены между собой трубой с внутренним диаметром 500 мм, в которую устанавливается погружной насос требуемой производительности.

**Таблица 3.17.**

| Показатель                                    | Первый комплекс | Второй комплекс |
|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| Количество аэротенков, шт.                    | 4               | 4               |
| Вместимость аэротенков, тыс. м <sup>3</sup>   | 92              | 59,5            |
| Общая производительность, м <sup>3</sup> /сут | 200             | 120             |

|                                               |      |      |
|-----------------------------------------------|------|------|
| Соотношение $V_D/V_{AT}$                      | 0,25 | 0,25 |
| Степень рециркуляции из вторичных отстойников | 0,5  | 0,5  |
| Степень рециркуляции из конца аэротенка       | 0,7  | 1,2  |

Первые аэротенки на первом и втором комплексах были введены в эксплуатацию после реконструкции в начале 2006 г. Это сопровождалось дальнейшим улучшением качества очистки по аммонийному азоту и фосфору ортофосфатов. Концентрация азота нитратов в очищенной воде обоих комплексов несколько возросла, но до конца периода наблюдений находилась в пределах норматива для водоемов рыбохозяйственного назначения (9 мг/дм<sup>3</sup>). К началу 2009 г. все секции аэротенков после реконструкции введены в эксплуатацию. Характеристика поступающих и очищенных сточных вод после реконструкции очистных сооружений (вторая половина 2008 г.) приведена в табл. 3.18.

**Таблица 3.18.**

| Показатель                              | Исходная вода   |                 | Очищенная вода  |                 |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                         | первый комплекс | второй комплекс | первый комплекс | второй комплекс |
| Взвешенные вещества, мг/дм <sup>3</sup> | 261             | 617             | 11              | 12              |
| ХПК, мг/дм <sup>3</sup>                 | 604             | 909             | 39              | 40              |
| БПК <sub>5</sub> , мг/дм <sup>3</sup>   | 263             | 334             | 5               | 6,7             |
| Азот аммонийный, мг/дм <sup>3</sup>     | 19,9            | 20,1            | 1,06            | 1,03            |
| Азот нитритов, мг/дм <sup>3</sup>       | < 0,006         | < 0,006         | 0,02            | 0,02            |
| Азот нитратов, мг/дм <sup>3</sup>       | 0,03            | 0,07            | 7,4             | 8,6             |
| Фосфор ортофосфатов, мг/дм <sup>3</sup> | 1,83            | 4,8             | 0,2             | 0,19            |

Эвтрофикация остается наиболее важной экологической проблемой Балтийского моря, и особенно Финского залива. Одним из признаков эвтрофикации (заболачивания) является массовое развитие сине-зеленых водорослей, для которых азот и фосфор служат основными питательными компонентами. Поэтому снижение содержания биогенных элементов можно считать ключевой задачей в борьбе с эвтрофикацией акватории Балтийского моря. 75% азота и 95% фосфора

поступают в Балтику через реки, принимающие неочищенные городские и промышленные сточные воды.[47]

15 ноября 2007 г. Хельсинкской комиссией (ХЕЛКОМ) был принят «План действий по Балтийскому морю», в котором даны подробные рекомендации по уровню очистки сточных вод. Так, хозяйственно-бытовые сточные воды от населенных пунктов должны обрабатываться на станциях очистки до снижения содержания фосфора на 90%, азота - на 70-80%. В соответствии с ратификацией плана спасения Балтики в рамках ХЕЛКОМ, к 2010 г. Россия должна принять национальный план действий по защите Балтийского моря от загрязнений (прежде всего азота и фосфора). Поскольку Санкт-Петербург расположен в зоне водосборного бассейна Балтийского моря, обязательно соблюдение рекомендаций ХЕЛКОМ наряду с российскими нормативами. Сложившаяся ситуация требует разработки и внедрения на очистных сооружениях Санкт-Петербурга более современных технологий, которые позволят сократить концентрацию азота и фосфора в стоках и снизить антропогенную нагрузку на Финский залив.

Центральная станция аэрации (ЦСА) является самой крупной в Санкт-Петербурге и одной из крупнейших в России. Ее производительность составляет 1,5 млн. м<sup>3</sup>/сут.

Разработка и внедрение на ЦСА биотехнологии очистки от азота начались в 1994 г. За период с 1994 по 2003 г. поэтапная реконструкция аэротенков позволила вдвое сократить расход сжатого воздуха и почти в 2 раза снизить содержание азота в очищенных водах, что соответствует требованиям ХЕЛКОМ ( $N_{\text{общ}} \leq 10 \text{ мг/л}$ ).

Биотехнология удаления азота, разработанная ЗАО «Креал» совместно с ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», основана на процессах нитри-денитрификации (рис. 3.39.). При этом в аэробных зонах аэротенка размещалась широкополостная мелкопузырчатая система аэрации с применением пористых аэраторов «Креал», а в аноксидных зонах необходимый уровень перемешивания достигался с помощью узкополостной крупнопузырчатой аэрации с использованием перемешивающих аэраторов «Креал». Для проведения нитратного рецикла был внедрен высокоэффективный эрлифт с низким удельным расходом воздуха (до 0,2 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>). Отказ от механических перемешивающих устройств и циркуляционных насосов позволил значительно сократить затраты на реконструкцию и повысить надежность работы аэротенков.

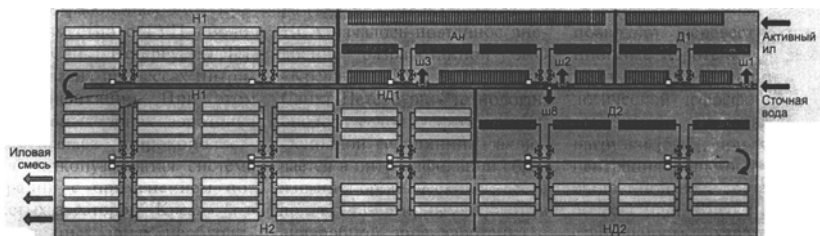


Схема очистки сточных вод от азота и фосфора (секции аэротенка первой очереди Центральной станции аэрации)

— перегородка; — — граница зон; ↑ выпускной шибер в лотке; ■ задвижка; □ фильтр тонкой очистки воздуха; А<sub>1</sub> — аноксидная зона; НД<sub>1</sub>, НД<sub>2</sub> — зоны нитри-денитрификации; Н<sub>1</sub>, Н<sub>2</sub> — зоны нитрификации; ■ аэрационный модуль с перфорированными аэраторами «Креал»; □ аэрационный модуль с пористыми аэраторами «Креал»; ■ блоки плоскостной загрузки «Креал»

Рисунок 3.39.

После достижения норматива по содержанию общего азота основное внимание было сосредоточено на проблеме снижения концентрации соединений фосфора в очищенных сточных водах. Для выполнения действовавших в тот период требований ХЕЛКОМ по содержанию фосфора ( $P_{\text{общ}} \leq 1,5 \text{ мг/л}$ ) в 2005 г. на ЦСА началось поэтапное внедрение разработанной ЗАО «Креал» и ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» технологии биологической дефосфотации. Основной ее принцип заключается в интенсификации сбраживания органических веществ до летучих жирных кислот в анаэробной зоне аэротенка с помощью плоскостного загрузочного материала.

В 2005-2006 годах технология поэтапно внедрена на ЦСА в трех секциях аэротенка первой очереди с реализацией технологической схемы, приведенной на рисунке. В результате эффективность очистки по фосфору фосфатов в сентябре 2006 г. составила 72% (табл.3.19.) что соответствовало действовавшим на тот период требованиям ХЕЛКОМ ( $P_{\text{общ}} \leq 1,5 \text{ мг/л}$ ). Была также достигнута нормативная концентрация общего азота ( $N_{\text{общ}} \leq 10 \text{ мг/л}$ ). В табл.3.19. приведены данные по некоторым месяцам, так как в период 2005-2006 годов на ЦСА проводилась масштабная реконструкция сооружений, из-за чего не всегда обеспечивался необходимый технологический режим.

Практика показала, что применение плоскостной загрузки позволяет перевести традиционные аэротенки в режим нитри-денитрификации и биологической дефосфотации без сокращения гидравлической нагрузки, при этом концентрация общего фосфора в очищенной воде составляет не более 1 мг/л. Вместе с тем нестабильность характеристик сточных вод, поступающих в аэротенки (в частности соотношения БПК<sub>5</sub>:N:P), периодически обуславливает недостаток органических веществ, необходимых для процесса

биологической дефосфотации, и соответствующее повышение концентрации фосфатов на выходе из очистных сооружений.

По результатам 2006 г., после переоборудования 30% секций аэротенка, годовая концентрация общего фосфора составила 1,4 мг/л (табл. 3.20., что было меньше действовавшего на тот период норматива ХЕЛКОМ (1,5 мг/л). Однако обеспечить стабильное выполнение требований ХЕЛКОМ 28/1, принятых 15 ноября 2007 г. (0,5 мг/л по общему фосфору), используя только процесс биологической очистки, невозможно. Поэтому за рубежом для химического осаждения ортофосфатов с образованием металлов широко используются неорганические реагенты.

В 2006 г. на ЦСА ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» совместно с организациями «Фонд Нурминена», «План-центр» и фирмой «Кемира» (Финляндия) были начаты лабораторные испытания различных образцов реагентов для химического осаждения фосфора, а в 2007 г. — промышленные испытания выбранного образца реагента «Ферикс-3» фирмы «Кемира».

**Таблица 3.19.**

| Период        | Фосфор фосфатов, мг/л                         |                                                           |          | Эффек-<br>тивность<br>очистки<br>по PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ,<br>% | Количество рабочих секций<br>аэротенка |                                               |    |
|---------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|----|
|               | исходная<br>вода<br>(прием-<br>ная<br>камера) | очищен-<br>ная вода<br>(вторич-<br>ный<br>отстой-<br>ник) | удаление |                                                                          | всего                                  | переоборудованных<br>по технологии<br>«Креал» |    |
|               |                                               |                                                           |          |                                                                          |                                        | шт.                                           | %  |
| 2005 г.:      |                                               |                                                           |          |                                                                          |                                        |                                               |    |
| Февраль       | 2,1                                           | 1,9                                                       | 0,2      | 10                                                                       | 6                                      | 0                                             | 0  |
| Апрель        | 1,7                                           | 1,3                                                       | 0,4      | 24                                                                       | 6                                      | 1                                             | 17 |
| Май           | 2,1                                           | 1,6                                                       | 0,5      | 24                                                                       | 6                                      | 1                                             | 17 |
| 2006 г.:      |                                               |                                                           |          |                                                                          |                                        |                                               |    |
| Апрель        | 1,8                                           | 1,2                                                       | 0,6      | 33                                                                       | 6                                      | 2                                             | 33 |
| Май           | 2,1                                           | 1,2                                                       | 0,9      | 43                                                                       | 6                                      | 2                                             | 33 |
| Июнь          | 2,3                                           | 1,07                                                      | 1,23     | 53                                                                       | 4,3                                    | 2                                             | 47 |
| Июль          | 2,5                                           | 1,11                                                      | 1,39     | 56                                                                       | 4                                      | 2                                             | 50 |
| Сен-<br>тябрь | 2,7                                           | 0,76                                                      | 1,94     | 72                                                                       | 4                                      | 2                                             | 50 |

В 2007 г доля переоборудованных аэротенков достигла 40%, а в 2008 г - 70% всех работавших секций, что позволило в 2007 г снизить концентрации общего фосфора до значений менее 1 мг/л (табл. 3.20.). Принятие в 2008 г новых нормативов ХЕЛКОМ ( $P_{\text{общ}} \leq 0,5$  мг/л) потребовало ускорить внедрение реагентного удаления фосфатов.

**Таблица 3.20.**

| Период  | Фосфор общий, мг/л |                | Азот общий, мг/л |                |
|---------|--------------------|----------------|------------------|----------------|
|         | исходная вода      | очищенная вода | исходная вода    | очищенная вода |
| 2005 г. | 4                  | 1,9            | 21               | 9              |
| 2006 г. | 4,1                | 1,4            | 19               | 8,7            |
| 2007 г. | 4,4                | 0,94           | 22               | 8,94           |
| 2008 л  | 4,8                | 0,78           | 23               | 8,97           |

На этапе промышленных испытаний химического осаждения фосфатов использовались специальные установки фирмы «Кемира», укомплектованные насосным оборудованием и системой автоматизации для приема и дозирования реагента. Были выбраны следующие точки ввода реагента:

фугат после центрифугирования смешанного осадка;

бак смешения осадка (подаваемая на центрифуги смесь уплотненного избыточного ила и первичного осадка);

внутренняя канализация (в этот поток входят фугат, сливная вода илоуплотнителей, хозяйственно-бытовые стоки от ЦСА, а также охлаждающая вода от теплообменников и другого оборудования);

иловая смесь перед вторичными отстойниками;

сточная вода перед первичными отстойниками.

Результаты промышленных, испытаний, выполненных в 2007—2008 годах, приведены в табл. 3.21. Наиболее экономически выгодной оказалась подача реагента в фугат, которая обеспечила минимальный удельный расход «Ферикс-3» (1,18 моль/моль удаленного  $PO_4^{3-}$ ) при высокой эффективности очистки от фосфора (80%). Однако с технологических позиций, возможность удаления фосфатов при подаче реагента в фугат очень ограничена — не более 285 кг фосфора фосфатов, или 0,2—0,3 мг фосфора в расчете на 1 л потока сточных вод, поступающих на ЦСА. Подача реагента перед первичными отстойниками позволяет удалить 954 кг фосфора, т. е. до 50% фосфатов, поступающих со сточными водами.

**Таблица 3.21.**

| Точка ввода реагента                         | Концентрация фосфатов в обрабатываемом потоке, мг/л |                         | Эффективность удаления фосфатов, % | Расход, м/сут | Количество удаленных фосфатов, кг/сут | Доза реагента, кг/мз | Удельный расход реагента, моль/моль осажденного $\text{PO}_4^{3-}$ |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                                              | до введения реагента                                | после введения реагента |                                    |               |                                       |                      |                                                                    |
| Фугат                                        | 94                                                  | 19                      | 80                                 | 3800          | 285                                   | 1,6                  | 1,18                                                               |
| Бак смешения осадка                          | 151                                                 | 64                      | 60                                 | 4100          | 356                                   | 2,1                  | 1,34                                                               |
| Внутренняя канализация                       | 6,2                                                 | 0,5                     | 92                                 | 38400         | 218                                   | 0,44                 | 4,27                                                               |
| Перед вторичными отстойниками (иловая смесь) | 0,6                                                 | 0,37                    | 38                                 | 1640000       | 277                                   | 0,035                | 8,42                                                               |
| Перед первичными отстойниками                | 2,05                                                | 1,235                   | 40                                 | 1171000       | 954                                   | 0,027                | 1,83                                                               |

После всестороннего анализа полученных данных была принята схема дозирования реагента с подачей его в сточную воду перед первичными отстойниками. Дополнение биотехнологии «Креал» химическим осаждением части фосфатов в первичных отстойниках позволило с декабря 2008 г. стабилизировать концентрацию общего фосфора на выходе очистных сооружений в пределах нового норматива ХЕЛКОМ ( $P_{\text{общ}} < 0,5$  мг/л).

Накопленный на ЦСА опыт позволяет рекомендовать совмещение современных биотехнологий и химического осаждения фосфатов для решения задач нормативной очистки городских сточных вод от азота и фосфора. Биотехнология нитри-денитрификации и биологической дефосфотации обеспечивает удаление из сточных вод всего азота и основной части фосфора, а введение реагента - выполнение жестких требований ХЕЛКОМ и российских нормативов по содержанию фосфора в очищенных сточных водах, сбрасываемых в водоемы.

### 3.2.1. Реализация технологии удаления азота и фосфора на различных станциях аэрации Украины.

*Найголовніший закон життя – закон бумеранга:*

*Що людина посілає вперед, те отримує назад.*

*І ніщо не минає даремно.*

*Антоніна Листопад (з книги «Соловки», 2009)*

На Северной станции аэрации г. Кривого Рога сложилась ситуация, аналогичная описанному выше, поэтому было принято решение при расширении и реконструкции станции использовать полиэтиленовые мелкопузырчатые аэротенки НПФ «Экополимер», а после введения аэротенков в эксплуатацию с целью удаления азотсодержащих соединений осуществить оптимизацию технологических режимов, обеспечив параметры процессов нитри-денитрификации[48].

На Северную станцию аэрации поступают сточные воды в пределах проектной производительности станции 44 тыс. м<sup>3</sup>/сут с БПК<sub>5</sub> 117 мг/л (БПК<sub>20</sub> - 154 мг/л), содержание аммонийного азота составляет 16 мг/л. До выполнения работ по расширению и реконструкции станции качество очистки по БПК<sub>5</sub> составляло около 8,9 мг/л, содержание аммонийного азота в очищенной воде - 4,6 мг/л, азота нитратов - 2,8 мг/л. Доза активного ила в аэротенках поддерживалась не выше 1—1,5 г/л, возраст ила не превышал 4-6 сут. В качестве аэротенков использовались фильтросные пластины.

При реконструкции станции в старом четырехкоридорном аэротенке сохранили фильтросные пластины, блок из трех секций трехкоридорных аэротенков остановили на капитальный ремонт. В двух новых четырехкоридорных аэротенках размером 48х36х3,2 м смонтировали полиэтиленовые аэротенки (по два ряда в первых двух коридорах, по одному - в третьем и четвертом коридорах).

Учитывая невысокую концентрацию органических загрязнений в сточных водах, возраст ила 10-12 сут и выше удавалось обеспечивать при невысокой средней дозе активного ила - не более 2,5-3 г/л. Объем регенератора приняли равным 25% (в данном случае коридор с повышенной концентрацией активного ила называют регенератором условно, по традиции). Нагрузка по БПК<sub>5</sub> на единицу биомассы активного ила составляла 100-120 мг/(г·сут), что позволило снизить содержание аммонийного азота в биологически очищенной воде до 1 мг/л, азота нитратов - до 2,2 мг/л. В сточных водах после аэротенков,

оснащенных полиэтиленовыми мелкопузырчатыми аэраторами, содержание аммонийного азота составляло 0,3-0,5 мг/л, что соответствует требованиям рыбохозяйственных водоемов.

Использование технологий биологического удаления азота и фосфора из сточных вод на очистных сооружениях Одесского припортового завода позволило довести качество очистки вод до требований водоемов рыбохозяйственного назначения (аммонийный азот до  $\sim 0,42$  мг/дм<sup>3</sup>; нитратный азот – до  $\sim 0,9$  мг/дм<sup>3</sup>; фосфор фосфатов до  $\sim 1,2$  мг/дм<sup>3</sup>) [49].

Разработаны два варианта реконструкции аэротенков Супруновских очистных сооружений г. Полтавы [49] для работы в режиме нитри-денитрификации, а также их технико-экономическое обоснование.

## Глава 4. Удаление из сточных вод соединений фосфора.

*Самостоятельно растет только бурьян, сама по себе распространяется только грязь. Современное экологическое мышление нам необходимо выращивать, как выращивают культурный злак. Выращивать, беря все лучшее от мировоззрения наших предков и других народов. А недоимыслие их видеть и прощать. Это и будет залогом нашей дружбы с природой в будущем.*

*Владимир Борейко – украинский эколог.*

Содержание азота и фосфора в поступающих и осветленных сточных водах, осадках, возвратных иловых водах от сооружений по обработке осадков исследовалось на Центральной, Северной, Красносельской, Кронштадской, Петрод-ворцово-вой станциях аэрации С.-Петербурга, Объединенной Курьяновской и Люберецкой станциях аэрации Москвы, Центральной станции аэрации Сочи, на опытной очистной станции Суомеоя (сточные воды г. Эспу, Финляндия), работающей в режиме глубокого удаления азота и фосфора биологическим методом [58].

Достоверность измерений проверялась составлением их массового баланса по сооружениям очистки воды и обработки осадков очистной станции. Расход иловых вод вычислялся по формулам, полученным из уравнений материального баланса.

В табл. 4.14. приведены значения эффекта задержания фосфора общего Р и азота общего N (по Кьельдалю) в первичных отстойниках, уплотнителях, центрифугах и центрипрессах (% от массы Р и N, поступающих в сооружения), полученные в результате исследований и рекомендуемые в качестве расчетных.

Таблица 4.1.

| Параметр | Эффект задержания в первичных отстойниках, %, при продолжительности отстаивания, ч |       |       |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
|          | 1-1,5                                                                              | 1,5-2 | 2-2,5 |
| Р        | 15-18                                                                              | 18-22 | 22-25 |
| N        | 6-8                                                                                | 8-10  | 10-12 |

Таблица 4.2.

| Условия уплотнения и обработки ила и осадков                        | Эффект задержания в илоуплотнителях, % |        |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------|
|                                                                     | P                                      | N      |
| Совместное уплотнение активного ила с осадком первичных отстойников | 68-73                                  | 75-80  |
| То же, с подачей флокулянтов                                        | 85-88                                  | 88-92  |
| Уплотнение активного ила из вторичных отстойников                   | 85-88                                  | 86-91  |
| Уплотнение сброженных промытых осадков                              | 60-70*                                 | 30-40* |
| * Процент от массы в осадках, загружаемых в метантенки.             |                                        |        |

Таблица 4.3.

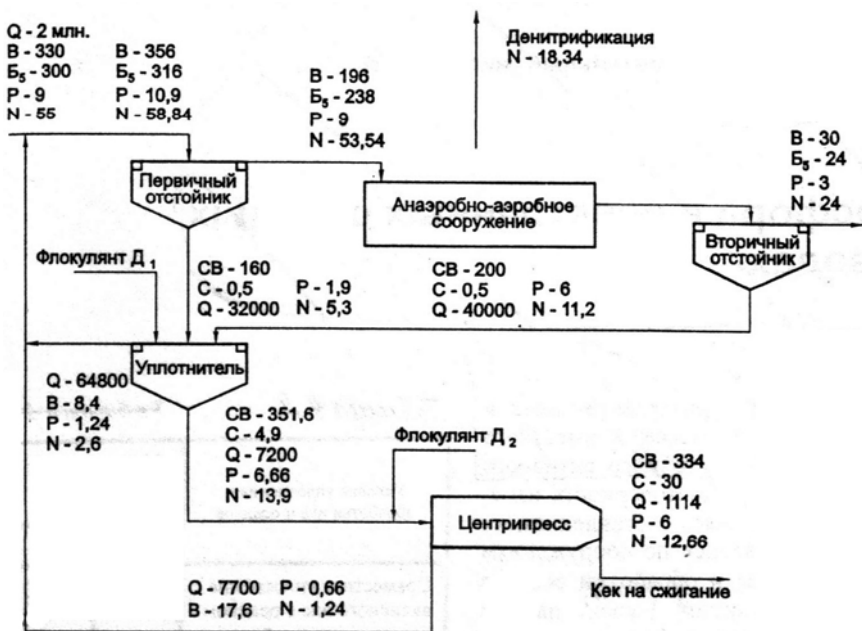
| Вид осадков                                            | Показатель | Эффект задержания в центрифугах при обезвоживании уплотненной смеси активного ила и осадков, %, при эффекте задержания массы сухого вещества, % |       |       |
|--------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
|                                                        |            | 90                                                                                                                                              | 95    | 97-98 |
| Сырая смесь ила и осадков                              | P          | 86-89                                                                                                                                           | 90-94 | 93-97 |
|                                                        | N          | 82-86                                                                                                                                           | 88-92 | 90-94 |
| Сброженная смесь ила и осадков, промытая и уплотненная | P          |                                                                                                                                                 | 90    | 92-95 |
|                                                        | N          | -                                                                                                                                               | 70    | 75-80 |
| То же, неуплотненная из метантенков.                   | P          | —                                                                                                                                               | 85    | 88-92 |
|                                                        | N          | -                                                                                                                                               | -     | 15-19 |

Учитывая специфику возвратных загрязнений, приведенные в табл. 4.1. данные рекомендуется уточнять экспериментально на стадии предпроектных проработок по расширению каждой конкретной, в особенности крупной очистной станции. Например, по данным эксплуатации первичных отстойников Центральной станции аэрации за 1994-1996 гг., эффект задержания в них фосфора составлял 30 %, азота -19 %, т. е. был достаточно высок. В зарубежной же практике проектирования расчетные значения эффекта задержания азота и фосфора в первичных отстойниках принимают значительно ниже - 8-10 %, а уве-

личение массы на входе в аэротенк за счет возвратных загрязнений оценивают приблизительно до 20 %.

Данные табл.4.3. могут быть использованы и для центрипрессов. Эффект задержания фосфора при обезвоживании сброженных промытых осадков на вакуум-фильтрах можно принимать 99 %, азота -80-85%.

На рисунке 4.1. представлен один из вариантов балансовой схемы Северной станции аэрации С.-Петербурга по фосфору, азоту, сухой массе и расходам иловых вод и осадков. Схема составлена Ленгипроинжпроект на основании приведенных выше рекомендаций при разработке проекта расширения станции с учетом изъятия азота и фосфора. Масса возвратных загрязнений значительно возрастает при наличии в составе сооружений по обработке осадков метантенков, уплотнения и промывки сброженного осадка.



**Рисунок 4.1.** Балансовая схема Северной станции аэрации С.-Петербурга по фосфору, азоту, сухой массе и расходам иловых вод и осадков

$B$  - взвешенные вещества, т/сут;  $B_5$  - БПК<sub>5</sub>, т/сут;  $P$ ,  $N$  - общий фосфор, общий азот (в  $P$  и  $N$ ), т/сут;  $CB$  - сухая масса осадков, т/сут;  $Q$  - расход иловых вод, осадков, м<sup>3</sup>/сут;  $C$  - концентрация осадков по сухой массе, %;  $D_1 = 1 \text{ кг/т}$  - доза флокулянта перед уплотнителями;  $D_2 = 5-6 \text{ кг/т}$  - доза флокулянта перед центрипрессами

Для доочистки сточных вод от соединений фосфора применяются модифицированные биологические, биохимические, реагентные и электрохимические методы.

#### *Биологические методы*

В НИИ КВОВ разработан модифицированный биологический метод глубокой очистки сточных вод, содержащих фосфор, заключающийся в чередовании аэробных и анаэробных условий пребывания активного ила. При этом в аэробных условиях активный ил интенсивно потребляет фосфаты из очищенной сточной воды, в анаэробных условиях связанный илом фосфор выделяется в жидкую фазу, которая после отстаивания ила сливается в отдельную емкость. Растворимые фосфаты затем могут переводиться в осадок известью. На эффективность высвобождения соединений фосфора из рециркулирующего активного ила влияют продолжительность его пребывания в анаэробных условиях, доза и возраст ила. По этой технологии достигаются остаточные концентрации фосфатов (в пересчете на фосфор) 0,3-0,4 мг/л при их исходном содержании 1,8-2,9 мг/л.

Перспективным направлением для разработки глубокой очистки являются биологические методы, основанные на сочетании прикрепленных (иммобилизованных) и взвешенных культур микроорганизмов, находящихся в аэробных и анаэробных условиях. Одна из технологий также разработана в НИИ КВОВ. Она позволяет практически в тех же объемах сооружений осуществлять глубокую очистку сточных вод. На основе предложенной технологии для очистки сточных вод малых населенных пунктов разработаны установки заводского изготовления «Ручей» и «Нептун» в виде блок-контейнеров производительностью 100-700 м<sup>3</sup>/сут.

Несмотря на имеющийся опыт работы, большинство биологических методов не может снизить концентрацию фосфора в очищенной сточной воде ниже 0,5 мг/л, а наличие трудно учитываемых факторов, влияющих на степень удаления фосфатов, является серьезным недостатком этих процессов.[60]

#### *Биологические и реагентные методы.*

Из всего многообразия известных методов глубокой очистки (доочистки) биологически очищенных сточных вод наибольшее практическое применение имеют биохимические и реагентные методы, позволяющие комплексно решать задачи осветления воды, снижения БПК и удаления фосфора. В биохимических и реагентных методах применяются химические реагенты и отличаются они местом введения реагентов в технологическую схему очистки. В биохимических мето-

дах химические вещества вводят на стадии биологической очистки, в реagentных их применяют до или после биологической очистки.

При реagentной обработке происходят различные физико-химические процессы, среди которых наибольшее значение имеют коагуляционные, сорбционные и осадительные.

Сточные воды чаще всего представляют собой слабokonцентрированные эмульсии или суспензии, содержащие коллоидные частицы размером 0,002-0,1 мкм, мелкодисперсные частицы размером 0,1-10 мкм и частицы размером 10 мкм и выше. В процессе механической очистки из сточных вод достаточно легко удаляются крупные частицы, а коллоидные и мелкодисперсные образуют устойчивую систему. Для таких стоков и применяют методы коагуляции, нарушающие агрегативную устойчивость вод, в которых происходит слипание частиц коллоидной системы при их столкновении в процессе теплового движения или перемешивания. В качестве коагулянтов используют соли металлов. Способность электролита вызывать коагуляцию коллоидной системы возрастает с увеличением заряда коагулирующего иона. Наибольшей коагулирующей способностью в сточных водах обладают двух- и трехвалентные катионы металлов, поэтому в качестве коагулянтов применяют соли алюминия и железа. При введении в сточную воду этих соединений в результате реакции гидролиза образуются малорастворимые в воде гидроксиды железа и алюминия, на развитой хлопьевидной поверхности которых сорбируются взвешенные, мелкодисперсные и коллоидные вещества. Параллельно с коагуляцией наблюдается образование нерастворимых фосфатов алюминия и железа, которые также сорбируются на поверхности гидроксидов и осаждаются.

Для очистки производственных сточных вод чаще всего применяют нормальные и основные сульфаты и хлориды алюминия, а также соли железа - сульфат железа (II) в присутствии окислителя и хлорид железа (III), несомненным преимуществом которых является образование плотных, тяжелых и быстро оседающих хлопьев. Коагулянтами также служат шламовые отходы и отработанные растворы отдельных производств: хлорид алюминия (производство этилбензола), сульфат двухвалентного железа (травильные растворы), известковый шлам; Для осаждения фосфатов используют соли и гидроксиды щелочноземельных металлов, в основном известь, редко — соли магния.

Для интенсификации процессов коагуляции и осаждения образующихся осадков широко используются органические природные и синтетические реagentы - высокомолекулярные вещества, называемые

флокулянтами. Они могут применяться как самостоятельно, так и в сочетании с коагулянтами. Флокулянты способствуют расширению оптимальных областей коагуляции (по pH и температуре), а также повышают плотность и прочность образующихся хлопьев осадка. Наибольшее распространение получили полиакриламид и активная кремниевая кислота. Скорость и эффективность процесса флокуляции зависят от состава сточных вод, их температуры, интенсивности перемешивания и последовательности введения реагентов. Дозы вводимых флокулянтов обычно составляют 0,5-1 г/м<sup>3</sup>

Рассмотрим более подробно биохимическую обработку сточных вод солями алюминия. При коагуляции этим электролитом происходит несколько сложных процессов - совместное осаждение гидроксида и фосфатов алюминия (гидратированных средних и основных), химическая адсорбция ортофосфатов на продуктах гидролиза коагулянтов.

Величина pH начала осаждения  $Al(OH)_3$ , по различным источникам, колеблется от 3 до 4,5, начала растворения - от 7,8 до 10. Малорастворимые фосфаты алюминия осаждаются в интервалах pH 5,5-6 и 7,5-8. Конкретно эти величины зависят от концентрации соли алюминия, катиона исходной соли и состава воды. В присутствии фосфат-ионов эти величины сдвигаются в щелочную область [9].

Наиболее широко применяется сернокислый алюминий. При его введении помимо удаления фосфора достигается более полное удаление бактерий, чем при применении других коагулянтов, содержащих алюминий. При этом для вод со средней щелочностью pH остается в пределах нормы для биологической очистки воды.

Основной сульфат алюминия является более эффективным коагулянтом в широком диапазоне условий (температура, концентрация примесей и т. д.), чем средний сульфат алюминия. Это относительно новый реагент, который изучался в качестве коагулянта для очистки вод с высоким щелочным резервом. Особенно эффективно его использование с флокулянтом - активной кремнекислотой, полученной из жидкого стекла и активированной сульфатом алюминия. В работах указано, что существенное значение в коагуляционной очистке воды имеет основность коагулянта - чем она выше, тем меньше мутность воды и ниже содержание остаточного алюминия, т. е. качество очистки воды возрастает. Вследствие более высокой основности его растворы менее агрессивны, поэтому снижается кислотная коррозия оборудования и коммуникаций.

Для обоих типов коагулянтов важную роль играет их концентрация в сточной воде. Например, при введении сернокислого

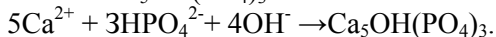
алюминия в количествах 9-14 мг/л наблюдалось эффективное удаление фосфатов (75-90 %), при дозах коагулянтов, превышающих 16 мг/л, концентрация взвешенных веществ в очищаемой воде возрастала до 36 мг/л, появлялась опалесценция, обусловленная мелкими, плохо оседающими хлопьями, количество фосфорсодержащих соединений в воде увеличивалось в 2-3 раза. Для уменьшения этих факторов при повышенной концентрации коагулянта подачу его в воду целесообразно переместить в конец аэротенка для избежания излишнего дробления хлопьев при аэрации. Кроме того, предложено повысить дозу активного ила до 4-5 мг/л для увеличения его сорбционной емкости и ввести полиакриламид. Расход основного сульфата алюминия на 20-30 % ниже, чем расход сернокислого алюминия.

Из хлорсодержащих соединений алюминия наибольшее применение при очистке воды нашли хлорид и особенно гидроксохлориды алюминия -  $Al_2(OH)_nCl_{6-n}$ , в частности пентагидроксохлорид алюминия  $Al_2(OH)_5Cl$ . При использовании этого коагулянта интенсифицируется хлопьеобразование и ускоряется осаждение коагулированной взвеси. Значительно уменьшается расход коагулянта при очистке воды с низким содержанием взвешенных частиц, существенно расширяется зона оптимальных значений pH. Соле содержание воды увеличивается в меньшей мере, уменьшается количество остаточного алюминия в обработанной воде, отпадает необходимость в использовании нержавеющих сталей и противокоррозионной защиты аппаратуры и трубопроводов. При хранении коагулянт не слеживается и не стареет.

Наряду с солями алюминия нерастворимые осадки фосфатов образуют и соли двух- и трехвалентного железа. Наиболее употребительны сульфат железа (II) и хлорид железа (III). Применяются также железосодержащие коагулянты, полученные хлорированием железной стружки в водной среде и анодным растворением железа в растворах хлорида натрия или серной кислоты. Соли железа предпочтительнее при очистке мутных жестких вод с высоким значением pH. Они позволяют устранять запах и привкусы, обусловленные присутствием сероводорода, удалять соединения мышьяка, марганца, меди, способствуют окислению органических соединений и удаляют из воды фосфаты. Образуется средняя соль  $FePO_4$ . Оптимальная область для осаждения фосфата железа - 5-6. При этом также образуются соединения  $Fe(OH)_3$  и  $FeOOH$ , и фосфаты необратимо сорбируются на этих осадках. Эти процессы приводят к очень низким значениям остаточного растворенного фосфата. Однако фосфат-ионы,

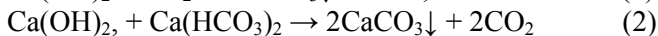
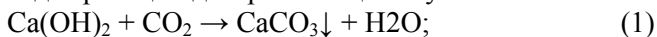
сорбированные на поверхности частиц, могут стабилизировать осадок в виде фосфорсодержащего коллоидного раствора. В этом случае в систему вводят флокулянты - полиакриламид или акриловую кислоту, известь. Гидроксид и фосфат железа не растворяются в щелочах, поэтому вместе с коагулянтами можно вносить большие дозы извести, вплоть до pH 11,5. При использовании в качестве коагулянтов солей железа (II) необходимо вводить хлор для окисления железа до трехвалентного, в противном случае хлопьеобразование сильно замедляется.

Наряду с коагуляцией солями металлов широко распространена обработка сточной воды известью. Об осаждении фосфатов известью существует обширная литература. Данные различных авторов сильно расходятся в дозе извести, эффективности осаждения и в описании механизма процесса. Это объясняется сложностью процессов и множеством факторов, влияющих на эффективность удаления фосфатов. Основной реакцией осаждения считают реакцию образования гидроксиапатита  $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ :



Осаждение происходит при pH 9,5-11,5, что требует последующей нейтрализации. Сначала часть фосфатов образует аморфную массу, постепенно кристаллизующуюся по типу апатита с различным количеством кристаллизационной воды. Особенностью осаждения гидроксиапатита является образование кристаллов исключительно малых размеров - порядка 200-800 Å, что обуславливает коллоидные свойства полученного раствора. Это приводит к завышению величин остаточного содержания фосфатов в обработанных известью сточных водах, так как микровзвесь проходит через поры фильтра. Следовательно, проблемой является не только связывание фосфатов, но и эффективное удаление взвеси гидроксиапатита.

При обработке сточной воды известью или ее заменителями образуется и осаждается карбонат кальция. Практически все сточные воды содержат бикарбонат-, карбонат- и гидроксид-ионы, определяющие общую щелочность воды. При внесении гидроксида кальция происходят реакции декарбонизации и умягчения:



В процессе обработки известью на связывание свободной углекислоты и бикарбонатов расходуется основная часть реагента. Так, при обработке известью воды с содержанием фосфатов 10 мг/л и бикарбонатной щелочностью 5 мг-экв/л на осаждение фосфатов требуется 10 мг CaO, а на нейтрализацию бикарбонатов - 140 мг CaO.

Кроме того, для осаждения гидроксиапатита необходим значительный избыток реагента для достижения pH 10,5-11,5. Наличие органических веществ в коллоидном и растворенном состоянии сильно искажает карбонатное равновесие и тормозит образование карбоната кальция. Этим объясняется повышенный расход извести по сравнению с солями железа и алюминия.

Упрощение общей схемы удаления соединений фосфора с помощью извести может быть достигнуто введением последней до аэротенков, что позволяет использовать основной микробиальный процесс для нейтрализации обрабатываемых сточных вод. В этом случае известь может быть введена до или после первичных отстойников. Несмотря на повышение pH до 10,5-11, процесс очистки сточных вод в аэротенках протекает достаточно успешно, и pH очищенных сточных вод снижается до 8. Однако в этих случаях возникают серьезные осложнения, связанные с образованием карбонатных отложений на стенках трубопроводов, в корпусе насоса, а при введении извести перед первичными отстойниками наблюдается коагуляция осадка.

Ионы магния, также постоянно присутствующие в водах, образуют в щелочной среде гидроксид магния  $Mg(OH)_2$ , начинающий осаждаться при pH 10,3-10,5. В отличие от карбоната кальция гидроксид магния осаждается в виде гелеобразных хлопьев. Авторы отмечают, что осаждение  $Mg(OH)_2$  при известковании воды улучшает коагуляцию взвешенных веществ. Необходимо также отметить, что ионы магния образуют с фосфат-ионами и ионами аммония нерастворимые соединения  $NH_4MgPO_4$  и  $Mg_3(PO_4)_2$ . Как самостоятельные реагенты соединения магния в настоящее время не применяются, однако эти процессы необходимо учитывать при сорбции фосфатов на поверхности минералов, содержащих магний, - талька, обожженного доломита, глины.[9]

Широко используется осаждение фосфатов смешанными осадителями - смесями солей железа, алюминия и известью. Так, в [9] приводятся примеры доочистки сточных вод от биогенных компонентов смесями различных составов. Например, введение определенного количества смеси извести и отработанного травильного раствора (основной компонент - хлорид трехвалентного железа) или смеси извести, едкого натра и сульфата или хлорида железа позволяет снизить содержание фосфора от 70 до 100%.

Разработан способ получения алюможелезного коагулянта из красных шламов - отхода производства глинозема из бокситовых руд. Он заключается в обработке красных шламов отработанными тра-

вильными растворами, содержащими 10-20 % HCl и 10-15 % FeCl<sub>2</sub>. При применении этого коагулянта расширяется область оптимальных значений pH благодаря разнообразию продуктов гидролиза. Хлопья оседают равномернее, наблюдается более полное осветление и быстрое отстаивание

Обработка сточных вод коагулянтами-осадителями и флокулянтами в процессе биологической очистки позволяет снизить содержание фосфатов до пределов, рекомендуемых санитарными нормами. В большинстве случаев при изменениях технологической схемы, установке дополнительных емкостей для приготовления растворов коагулянтов, фильтров, устанавливаемых после аэротенков, доочистку можно осуществить на действующем оборудовании. В то же время необходимость введения химических реагентов удорожает процесс, приводит к увеличению количества осадков и необходимости решать проблему их утилизации. Введение солей алюминия и железа приводит к возрастанию солесодержания, что нежелательно для вод, направляемых в системы оборотного водоснабжения. Кроме того, соли железа и алюминия гидролизуются, при этом pH раствора может сильно уменьшаться вплоть до 0, поэтому для вод с низкой щелочностью такая обработка не рекомендуется.

*Электрохимические методы очистки воды от соединений фосфора*

В последние годы разработан перспективный метод получения коагулянтов в электролизерах с растворимыми анодами, электрокоагуляция[9]. Сущность его заключается в анодном растворении металлов, преимущественно алюминия и железа, в водных средах под воздействием электрического тока с последующим образованием гидроксидов. Растворение в воде 1 г алюминия эквивалентно введению 6,3 г. сульфата алюминия, растворение 1 г железа - введению 2,9 г. хлорного железа или 3,6 г сернистого железа. Теоретический расход электроэнергии для растворения 1 г алюминия – 12 Вт·ч, а 1 г железа - 2,9 Вт·ч. Этот метод позволяет производить эффективную очистку воды от взвесей минерального, органического и биологического происхождения, коллоидов, веществ в молекулярном и ионном состояниях, хроматов, фосфатов. Электрокоагуляция обладает существенными преимуществами перед реагентными методами: компактностью установки, простотой обслуживания и возможностью полной автоматизации. Этот метод перспективен для использования на небольших автономных объектах (на судах, в поселках и т. д.).

Электрохимическое растворение металлов осуществляется как под воздействием внешнего тока - анодное растворение металла, так и за счет химической реакции при взаимодействии электродного металла с электролитом. Наличие в воде ионов-депассиваторов, интенсификация движения электролита и наложение постоянного электрического тока способствуют лучшему протеканию процесса химического растворения.

В природной воде при применении алюминиевых и железных электродов происходят анодное растворение металлов, а на катоде - электрохимическое восстановление мигрирующих ионов ( $H^+$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ) и нейтральных молекул ( $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $Fe_3O_4$ ), кислородная и водородная деполяризация, восстановление органических соединений, химическое взаимодействие алюминия с водой.

На скорость растворения анода значительно влияют природа и обработка электродного материала, природа сорбирующихся и восстанавливающихся на электродах веществ, состав электролита и электродная плотность тока. Так, образующиеся в процессе электролиза газообразные водород и кислород транспортируют вещество из жидкости на ее поверхность. При наличии в алюминии легирующих примесей анодное растворение его значительно ускоряется. Этот процесс также ускоряется при наличии в воде хлорид-ионов, которые разрушают оксидную пленку на поверхности металла и способствуют контакту алюминия с водой.

Процесс электрокоагуляционной очистки целесообразно осуществлять при высоких плотностях тока. Однако это увеличение вызывает пассивацию электродов и способствует возрастанию поляризации электродов. Для уменьшения поляризации можно менять полярность тока, что ведет к резкому уменьшению выхода алюминия по току. Количество растворенного металла можно повысить, увеличивая скорость воды в электролизере и уменьшая расстояние между электродами. Рекомендуемый режим электрокоагуляции: плотность тока  $\approx 10 \text{ А/дм}^2$  расстояние между электродами - не более 20 мм, скорость движения воды между электродами - не менее 0,5 м.

Выход по току металла определяется также составом очищаемой воды. Например, в присутствии хлорид-ионов выход приближается к 100 %, сульфат- и карбонат-ионы замедляют анодное растворение. Значительное количество  $SO_4^{2-}$  вызывает пассивацию электродов. При наличии хлоридов более 20 % суммы всех анионов происходит интенсивное химическое растворение алюминия.

Электрокоагуляция осуществляется в безнапорных пластинчатых электролизерах горизонтального или вертикального типа. Аноды чаще всего бывают железные или алюминиевые, устанавливаются в пакеты на расстоянии 0,003-0,02 м друг от друга и удерживаются изолирующими вставками. Использование в качестве анодов листового металла затрудняет широкое применение электрокоагуляции, поэтому более распространены электролизеры с засыпными электродами, где засыпкой служат стружка или отходы. Эти аппараты имеют ряд существенных недостатков: пассивация анодов и снижение выхода по току; накопление между стружкой оксидов металлов с адсорбированными на них загрязнениями; увеличение напряжения и расхода электроэнергии за счет повышения сопротивления ячеек и необходимость специальной очистки стружки.

Компактность установок, отсутствие реagentного и складского хозяйства, простота обслуживания являются несомненными достоинствами метода коагуляции. Однако значительные расходы электроэнергии и металла, поляризация электродов и уменьшение скорости растворения металлов вследствие образования окисной пленки на их поверхности, механическое загрязнение электродов примесями сточных вод, а также нагревание обрабатываемой воды ограничивают применение этого метода.

Одним из перспективных методов доочистки воды от фосфора может быть метод гальванокоагуляции [9]. Он с успехом используется во многих отраслях народного хозяйства - металлургии, радиоэлектронике, приборостроении, легкой и пищевой промышленности. Метод характеризуется принципиально новыми техническими решениями, обеспечивающими эффективность и простоту аппаратного оформления работы в непрерывном длительном режиме.

Этот способ основан на использовании эффекта работы короткозамкнутых гальванических пар Fe/C, Fe/Cu, Al/C, Al/Cu и др. и на образовании ферромагнитных оксидных форм железа, гидроксида алюминия. При этом более активные металлы (Al, Fe) являются анодами и в процессе коагуляции растворяются, переходя в ионное состояние и образуя затем конечные продукты окисления.

Компоненты скрапа, обладающие более положительным потенциалом, являются катодами, на которых концентрируются электроны, образующиеся в анодной реакции. Эти электроны взаимодействуют с компонентами воды и восстанавливают их. Катоды в процессе гальванокоагуляции практически не расходуются. Скрап, содержащий отходы железа, кокса, меди, алюминия, помещается в гальвано-

коагулятор, работающий в непрерывном режиме. Переменный контакт элементов гальванопары между собой, раствором и кислородом воздуха, обусловленный вращением барабана, увеличивает скорость растворения анодных компонентов в 5-10 раз, обеспечивает быстрое окисление железа без наложения тока от внешнего источника и создает условия для образования осажденных ферромагнитных форм железа: магнетита, гетита, лепи-докрокита и др[9].

Высокая эффективность способа в широком диапазоне исходных концентраций растворенных и эмульгированных примесей обеспечивается одновременным действием в рабочей зоне аппарата нескольких параллельных процессов очистки: электрохимическое восстановление катионов цветных металлов; образование ферритов металлов; образование соединений включений - клатратов; сорбция органических примесей на свежесформированных кристаллах магнетита; восстановление поливалентных элементов (хроматов, молибдатов, ванадатов), в том числе восстановление сульфатов до сульфидов; образование нерастворимых фосфатов алюминия и железа; коагуляция частиц дисперсной фазы.

Все указанные процессы осуществляются без введения других химических реагентов с автогенным регулированием любого из механизмов в зависимости от свойств и характера загрязняющих примесей, что позволяет снизить солесодержание в очищаемой воде на 30-50 %.

Метод обладает следующими преимуществами: простое аппаратное оформление; отсутствие прямых энергозатрат на очистку; использование отходов производства - железного, медного и алюминиевого скрапа, кокса, надежность и эффективность в работе аппарата в непрерывном режиме и легкость его механизации; образование ферритных соединений, которые вследствие явно выраженной кристаллической структуры занимают малый объем и быстро отстаиваются; авторегуляция, т. е. с увеличением содержания примесей возрастает скорость реакции растворения анодной массы; широкий диапазон температур и pH.

На современном этапе изучены возможности применения метода для очистки сточных вод, содержащих тяжелые металлы (медь, цинк, никель), ПАВ, мышьяк, различные анионы. Так, медь удаляется на 100 %, цинк и никель - на 85 и 75 % соответственно, сульфаты - на 60-80 %.

Наличие оксидных форм железа, обладающих высокой сорбционной емкостью, обеспечивает высокую эффективность применения гальванокоагуляционного метода для очистки сточных вод от нефте-

продуктов, флотореагентов, органических веществ, для создания замкнутых систем водоснабжения.

В [9] предложена гальванохимическая очистка сточных вод участка производства печатных плат, где указано, что наряду с удалением ионов тяжелых металлов происходит практически полное удаление фосфатов и некоторых других анионов.

В [9] предложена очистка методом гальванокоагуляции шахтных вод, которые содержат ионы тяжелых металлов до 1 г/л, щелочно-земельных металлов - до 100 г/л, фосфатов - до 20 г/л, других анионов кислот - до 250 г/л.

В [57] для очистки промышленных сточных вод предлагается электрофлотомембранный модуль, обеспечивающий извлечение взвешенных веществ, нефтепродуктов, ПАВ, катионов тяжелых металлов в виде гидроксидов и фосфатов.

В [9] для очистки сточных и оборотных вод с большим содержанием фосфатов (до 88 мг/л) предлагается использовать смесь железных и медных опилок в соотношении 4:1 и перемешивании в течение 10 мин. Затем суспензию подвергают фазовому разделению в магнитном сепараторе. Указывается, что степень очистки от фосфатов достигает 98,7-100 %.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что в настоящее время для очистки городских сточных вод от фосфатов имеется достаточно широкий выбор технологических схем реагентной обработки, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Электрохимические методы имеют пока ограниченное применение. Между тем, метод гальванокоагуляции может оказаться наиболее целесообразным для этих целей.

Исследованы адсорбционные возможности извлечения из водных растворов на активных углях неограниченно растворимых в воде фосфорорганических соединений на примере о-изопропилметилфосфата (ИПЭФ). Для этого вещества предпочтительны активные угли с низкой зольностью и недостаточно развитой микропористостью [61]. Установлено, что концентрация ИПЭФ в воде может быть снижена адсорбционными методами от 10 и 100 до 0,001 мг/дм<sup>3</sup> при дозе наиболее предпочтительного угля 3,9-4,1 39-41 кг/м<sup>3</sup>.

#### 4.1. Биогальванический метод удаления фосфорсодержащих веществ из сточных вод.

*Тоснодь из землі ліки виводить, і роздмний музе не  
нехоче ними. Хіба не від дерева вода посилювала, а й сила його  
тим самим виявилась? Це ж він бо людей обдарував знан-  
ням, щоб вони прославляли його ділами дивними.*

*/Святе Письмо. Сирах 38:4-6/*

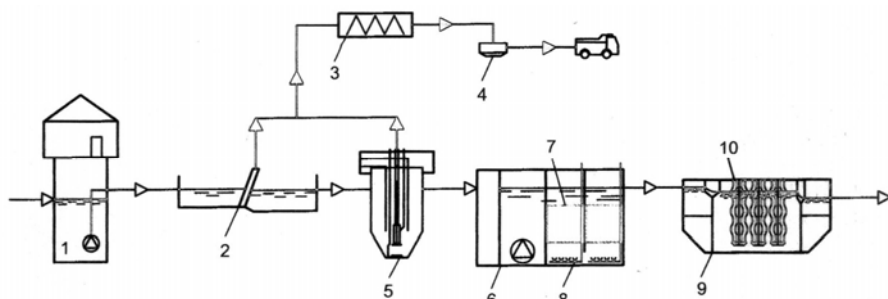
Биогальванический метод очистки городских сточных вод был разработан и запатентован Мосводоканал НИИ проектом (патент РФ №2075202) [62, 68]. Способ основанный на использовании биокоррозии, совмещает биологическое и химическое удаление фосфора. При этом поставщиком реагентов для осаждения фосфора является биологический процесс, вызывающий коррозию металла.

Механизм биогальванического способа удаления фосфатов из сточной воды заключается в следующем. В иловую смесь, находящуюся в аэротенке, помещают инертный грузочный материал, армированный металлом. Грузочный материал обрастает биопленкой активного ила, где в процессе жизнедеятельности бактерии, окисляя загрязнения сточных вод, продуцируют кислые продукты, выделяя их во внешнюю среду. На границе контакта биопленки и сточной воды образуется локальная зона с активной кислой средой. В результате электрохимической реакции в локальной зоне, на границе биопленка—металл, образуется разность потенциалов и выделяются ионы металла, полностью связывая некоторые анионы. Вследствие растворения металла в локальной зоне вода обогащается соответствующими ионами (катионами), вступающими в химические реакции с некоторыми содержащимися в воде анионами ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{S}^{2-}$  и др.). В результате этих реакций образуются нерастворимые в воде соли, выпадающие в осадок. Попадая в нейтральную среду, избыток ионов металлов образует нерастворимый гидрат окиси, который способствует осуществлению процесса коагуляции. При низких значениях pH, т. е. при высокой концентрации водородных ионов, растворы интенсивно разрушают сталь. При значениях pH более 9 процесс коррозии затормаживается. В кислой среде (при pH 5) ион  $\text{PO}_4^{3-}$  взаимодействует с трехвалентным железом с образованием  $\text{FePO}_4$ . Фосфорнокислое железо, нерастворимое в воде, попадая из кислой среды в нейтральную или щелочную, выпадает в осадок.

В отличие от применения солевых коагулянтов при биогальваническом способе очищаемая вода не обогащается сульфатами и хлоридами, а образующийся осадок сорбируется активным илом. При этом отмечается снижение илового индекса и как следствие уменьшение выноса взвешенных веществ из вторичного отстойника. Помимо этого исследованиями установлено, что при использовании биогальванического способа удаления фосфатов окислительная способность биохимических процессов в аэротенке возрастает в 2—3 раза. Это позволяет не только осуществлять глубокую очистку сточных вод от биогенных элементов, но и значительно сократить объемы аэрационных сооружений. Вместе с избыточным илом осажденный фосфор выводится из системы биологической очистки сточных вод на сооружения обработки осадков.

МосводоканалНИИпроект совместно со специалистами фирмы НПФ «ЭТЕК» разработали кассеты, в которых установлены стальные решетки с толщиной прутьев 3—4 мм, покрытые тонким слоем волокнистого полиэтилена размещаемые в аэротенке.

В настоящее время биогальванический способ внедряется на очистных сооружениях г. Медынь (общая производительность 1900 м<sup>3</sup>/сут). Первая очередь этих сооружений предусматривала обработку 950 м<sup>3</sup>/сут сточных вод и была введена в эксплуатацию в начале 1970-х годов. В середине 1980-х годов завершено строительство второй очереди мощностью 1000 м<sup>3</sup>/сут. В составе сооружений были предусмотрены: горизонтальные песколовки с круговым движением воды; двухъярусные отстойники; капельные биологические фильтры, которые располагались в здании; вторичные вертикальные отстойники; биологические пруды (две ступени); иловые площадки. Данные сооружения обеспечивали низкую эффективность очистки сточных вод. Специалисты НПФ «ЭТЕК» разработали проект их реконструкции на производительность 5500 м<sup>3</sup>/сут, приняв за основу интенсификации биологических процессов биогальванический метод удаления фосфатов из сточных вод.



**Рисунок 4.2.** Технологическая схема очистки сточных вод (г. Медынь)

1 - канализационная насосная станция; 2 - решетка; 3 - пресс для отходов; 4 - бункер; 5 - песколовка; 6 - аэротенк; 7 - металлизированная загрузка; 8 - аэратор; 9 - биореактор; 10 - загрузка «рукава»

В составе сооружений предусмотрена механическая очистка на механизированных решетках и песколовках с автоматической выгрузкой отбросов и песка. Песок из песколовок смешивается с отбросами и отжимается на специальном прессе до влажности, достаточной для транспортировки. Биологическая очистка производится в аэротенках с осуществлением процессов нитри-денитрификации. В аэротенках устанавливаются блоки с металлизированной загрузкой для обеспечения биогальванического эффекта удаления соединений фосфатов из сточных вод. Доочистка сточной воды после вторичных отстойников происходит в биореакторах, в которых установлена загрузка «Рукава» для доокисления органических соединений и азота аммонийных солей, а также частичного удаления остаточных взвешенных веществ. Обеззараживание очищенной воды производится на УФ-установках. Обезвоживание осадка осуществляется на ленточных фильтр-прессах. Технологическая схема очистных сооружений г. Медынь представлена на рис. 4.2. В настоящее время реконструкция очистных сооружений г. Медынь заканчивается.

Методика расчета необходимого количества армированного загрузочного материала разработана в ГУЛ «МосводоканалНИИпроект».

## 4.2. Анализ промышленного применения биологических технологий для удаления фосфора из городских сточных вод.

*Ефективні програми національного відродження і охорони навколишнього середовища може створити і втілювати у життя лише справді національна еліта. Тому вона має вибороти владу і провести широку ліквідацію, так як це зробили інші народи.*

*Газета «Українське слово».*

Биологический метод удаления фосфора из городских сточных вод достаточно широко применяется в промышленно развитых странах\*. В основе этого процесса лежит происходящее при создании определенных условий культивирования так называемое «жадное поглощение» фосфора микроорганизмами активного ила.

В конце 60-х - начале 70-х годов многие исследователи занялись проблемой повышенного потребления фосфора микроорганизмами активного ила. Было выявлено, что создание анаэробных и аэробных зон в аэротенках - это лишь одно из многих условий, необходимых для организации устойчивого ведения процесса биологического удаления фосфора.

Сегодня процесс биологического удаления фосфора (био-Р) достаточно хорошо изучен и с микробиологической точки зрения. В его основе лежит способность некоторых типов бактерий запасать большие количества растворимых ортофосфатов в клетках в форме нерастворимого полифосфата, который откладывается в клетках бактерий в виде гранул, выявляемых при микроскопии путем специфического окрашивания (метиленовым синим или по Несслеру). На рис. 4.3. представлена микроколония фосфатаккумулирующих организмов (РАО, био-Р бактерий) в активном иле [аэротенк № 15 Люберецкой станции аэрации (ЛБСА), работающий в режиме биологического удаления фосфора].

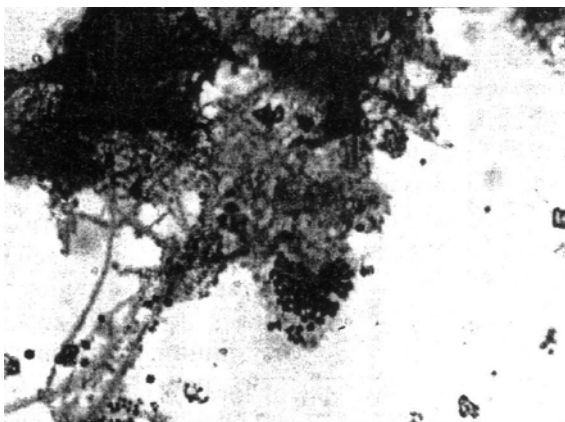


Рисунок 4.3. Гранулы полифосфатов в клетках фосфатаккумулирующих бактерий (увеличение 1х40, окраска метиленовым синим)

Согласно современным представлениям, для организации процесса биологического удаления фосфора из сточных вод одним из основных условий является последовательное прохождение активным илом анаэробных и аэробных зон (рис. 4.4.). В анаэробной зоне происходит ферментативное разложение части органического вещества загрязнений с образованием легкодоступного субстрата - летучих жирных кислот (ЛЖК). Однако в анаэробных условиях отсутствие источника энергии не позволяет гетеротрофным бактериям активного ила (кроме РАО-бактерий) потреблять субстрат. У РАО-бактерий источником энергии служит расщепление запасенных в клетках полифосфатов (с выделением в жидкую фазу ортофосфатов). РАО-бактерии используют субстрат в анаэробных условиях в форме ЛЖК и преобразовывают в запасные вещества (РНВ, гликоген и др.). В аэробных или аноксидных условиях органическое вещество, присутствующее в клетках в форме РНВ, окисляется кислородом или нитратом. Выделенная энергия используется бактериями для поглощения ортофосфата из водной среды, преобразования его в полифосфат (для повторения цикла) и роста. Важным условием данного процесса является отсутствие в анаэробной зоне не только кислорода, но и нитратов, являющихся источником энергии для бактерий-денит-рификаторов.

Поскольку в анаэробной зоне бактерии, не относящиеся к РАО, не получают достаточно субстрата для роста, использование описанного фосфатно-гликогенного цикла дает преимущество РАО-бактериям и позволяет им сформировать значительную часть биомас-

сы ила. Запасенный в клетках полифосфат выводится из сооружений с избыточным илом.

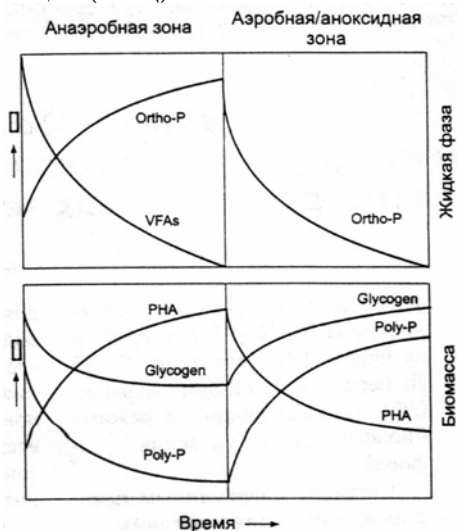
В России, и на Украине несмотря на чрезвычайно жесткие действующие нормативы содержания соединений азота и фосфора в очищенной воде, промышленное внедрение биотехнологий их удаления только начинается. В настоящее время накоплен достаточный опыт расчета, проектирования и (в меньшей степени) эксплуатации сооружений биологического удаления азота, однако освоение процесса биологического удаления фосфора находится в начальной стадии. С водой, очищенной на различных станциях аэрации, в попадает около 80% массового расхода фосфора, поэтому развитие и внедрение технологий удаления фосфора (наряду с удалением азота) является на сегодняшний день одной из наиболее актуальных задач.

Первый опыт удаления фосфора был реализован по проекту датской фирмы «КОВИконсалт» в 1995 г. на опытной линии Курьяновской станции аэрации (КСА) производительностью 35 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Была использована известная технология симультантного осаждения фосфатов хлорным железом. Первое промышленное внедрение технологии удаления фосфора из сточных вод в Москве осуществлено немецкой фирмой «Вассертехник ГмбХ» (в настоящее время WTE) на очистных сооружениях «Южное Бутово» (производительность 80 тыс. м<sup>3</sup>/сут) и на Зеленоградской станции аэрации (производительность 140 тыс. м<sup>3</sup>/сут). На этих станциях удаление фосфора запроектировано как реагентно-биологический процесс: неосветленная сточная вода, прошедшая решетки и песколовки, поступает в контактный анаэробный резервуар, куда подаются возвратный активный ил и реагент FeCl<sub>3</sub> дозой 15 мг/л. Поскольку средняя удельная доза хлорного железа составляет 2 мг/мг фосфора и близка к использованной на опытной линии КСА, роль биологических процессов в данной технологии следует оценивать как неосновную. Причины этого детально показаны ниже.

Использование реагентов на столь крупных станциях аэрации, как Курьяновская и Люберецкая, представляет собой весьма дорогостоящее мероприятие. Помимо затрат на реагенты необходимо учитывать и увеличение количества осадка, образующегося при использовании реагентного метода очистки. В целом эксплуатационные затраты на очистку сточной воды (включая обработку и удаление осадка) в результате внедрения реагентного метода удаления фосфора увеличиваются на 40%.

Принципиальная возможность успешного одновременного проведения процессов биологического удаления азота и фосфора на сточных водах, поступающих на Московские станции аэрации, в середине 90-х годов подвергалась серьезным сомнениям. Объективной причиной для этих сомнений является существенное отличие состава сточной воды, поступающей на Московские станции аэрации, от стоков городов Западной Европы и Северной Америки, где реализованы технологии по удалению азота и фосфора. Низкие концентрации органических соединений в сточных водах российских городов при высоких значениях соотношений N/БПК и P/БПК затрудняют организацию процессов биологического удаления азота и фосфора.

Принимая во внимание сложность проблемы и масштабность решаемой задачи (общая производительность подлежащих реконструкции КСА и ЛбСА превышает 6 млн. м<sup>3</sup>/сут), в МГП «Мосводоканал» было принято решение об одновременной отработке нескольких вариантов технологических процессов биологического удаления азота и фосфора. В 1998-2001 гг. на КСА и ЛбСА были проведены работы по реконструкции очистных сооружений биологического удаления азота и фосфора по трем различным технологиям (табл. 4.4.). Две установки были реализованы по проектам зарубежных фирм: «КОВИконсалт» и «WTE Хельтер Вассертехник ГмбХ», третья - по расчетам и проекту, выполненным специалистами МГП «Мосводо-канал» на основании результатов лабораторных тестов, проведенных в Инженерно-технологическом центре по проблемам канализации (ИТЦ).



**Рисунок 4.4.** Схемы метаболических процессов, протекающих при биологическом удалении фосфора.

Таблица 4.4.

| Сооружение                                                                 | Характеристика схемы                                                                                                                                                                                              | Принципиальная схема | Проект                                   |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------|
| Аэротенк №15 ЛБСА                                                          | Подача в анаэробную зону проденитрифицированной иловой смеси, раздельное проведение нитри-денитрификации*                                                                                                         |                      | МГП «Мос-водока-нал»                     |
| Аэротенк № 13 ЛБСА                                                         | Подача в анаэробную зону неденитрифицированного активного ила, симуль-тантное проведение нитри-денитрификации*                                                                                                    |                      | Фирма «WTE Хель-тер Вас-сер-техник ГмбХм |
| Аэротенк № 3 КСА                                                           | Подача в анаэробную зону неденитрифицированного активного ила, проведение нитри-денитрификации с использованием периодической аэрации в зоне «карусельного» типа и постоянной - в последнем коридоре аэро-тенка** |                      | Фирма «КОВИ-консалт»                     |
| <p>* Работа на осветленной воде.<br/> ** Работа на неосветленной воде.</p> |                                                                                                                                                                                                                   |                      |                                          |

Опытно-промышленная эксплуатация аэротенка № 15 ЛбСА (проект МГП «Мосводоканал»), реконструированного под технологию удаления биогенных элементов, проводилась в течение трех лет. В данном сооружении процессы денитрификации организованы в аноксидной зоне «карусельного» типа, в которую подается возвратный активный ил. Денитрифицированная иловая смесь поступает в анаэробную зону сооружения, где смешивается с осветленной сточной водой, поступающей в аэротенк. Процессы нитрификации организованы в аэробной зоне «карусельного» типа и второй аэробной зоне. Следует отметить, что данный аэротенк и все опытные сооружения работали с собственными илами, не смешивающимися с илом других аэротенков станции. Данные по эффективности работы аэротенка № 15 ЛбСА представлены в табл. 4.5.

**Таблица 4.5.**

| Гидравлическое время пребывания, ч | Рецикл возвратного ила $R_i$ | Рецикл в зоне «карусельного» типа $R_{rec}$ | Рецикл иловой смеси $R_{sl}$ | Средние показатели, мг/л |       |                   |       |                   |       |
|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|--------------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
|                                    |                              |                                             |                              | N-NO <sub>3</sub>        |       | N-NH <sub>4</sub> |       | P-PO <sub>4</sub> |       |
|                                    |                              |                                             |                              | вход                     | выход | вход              | выход | вход              | выход |
| 7                                  | 0,42                         | 15                                          | 1,44                         | 0,2                      | 8,2   | 18,7              | 0,7   | 2,7               | 0,18  |
|                                    |                              |                                             | 0,7                          | 0,2                      | 8     | 18,4              | 0,5   | 2,4               | 0,2   |
| 8,6                                | 0,53                         | 18                                          | 1,8                          | 0,1                      | 8,2   | 17,9              | 0,4   | 2,5               | 0,15  |
|                                    |                              |                                             | 0,9                          | 0,12                     | 8,4   | 18,6              | 0,4   | 2,4               | 0,2   |

Реконструкция аэротенка № 13 ЛбСА под технологию удаления биогенных элементов проводилась «под ключ» фирмой «WTE Хельтер Вассертех-ник ГмбХ». Сооружение реконструировано для биологического удаления фосфора и азота с анаэробной, аноксидной зонами и аноксидно-аэробной зоной «карусельного» типа с организацией в ней симультантной нитри-денитрификации. В отличие от аэротенка № 15 ЛбСА возвратный активный ил подавался в анаэробную зону без предварительной денитрификации. Совместные с немецким партнером промышленные испытания показали, что при высокой эффективности удаления азота добиться выраженного протекания биологического удаления фосфора не удалось. Причиной этого явилось ингибирование процесса нитратами, содержащимися в возвратном активном иле. Показатели качества очистки по общему фосфору в течение 80 % периода эксплуатации превышали 1 мг/л, по P-PO<sub>4</sub> в течение 85 % периода эксплуатации превышали ПДК (0,2 мг/л) для водоемов рыбохозяйственного назначения и составляли в среднем на различных

этапах опытно-промышленной эксплуатации 0,6-1,1 мг/л. Отмеченное в течение 15 % периода эксплуатации более высокое качество очистки по  $P-PO_4$  достигалось либо в периоды повышенного прироста активного ила, либо в периоды срыва процесса нитрификации. Эти выводы были подтверждены проведенными в ИТЦ тестами на активность фосфораккумулирующих микроорганизмов, показавшими весьма низкое ее значение для ила аэротенка № 13.

Аэротенк № 3 КСА был реконструирован по проекту фирмы «КОВИконсалт» под технологию глубокого удаления биогенных элементов. Как и в проекте аэротенка № 13 ЛбСА, возвратный активный ил подавался в анаэробную зону сооружения без предварительной денитрификации, биологическое удаление фосфора не происходило. Проведенный по предложению специалистов МГП «Мосводо-канал» эксперимент по подаче в аэротенк неосветленной воды показал более высокое качество очистки по  $P-PO_4$  (табл. 4.6.).

**Таблица 4.6.**

| Сточная вода  | Гидравлическое время, ч | Рецикл возвратного ила $R_i$ | Нитратный рецикл $R_N$ | Средние показатели, мг/л |       |                   |       |                   |       |
|---------------|-------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
|               |                         |                              |                        | N-NO <sub>3</sub>        |       | N-NH <sub>4</sub> |       | P-PO <sub>4</sub> |       |
|               |                         |                              |                        | вход                     | выход | вход              | выход | вход              | выход |
| Осветленная   | 7                       | 0,6                          | 1,2                    | 0,1                      | 4,5   | 17,5              | 1     | 2,3               | 0,6   |
|               |                         |                              |                        | 0,2                      | 6,3   | 18,4              | 0,8   | 21                | 0,9   |
|               | 8,6                     | 0,75                         | 1,5                    | Отсутствует              | 5,1   | 17,8              | 0,4   | 2,7               | 0,7   |
|               |                         |                              |                        | 0,1                      | 6,6   | 18                | 0,5   | 2,5               | 1     |
|               |                         |                              |                        | 0,1                      | 8,5   | 19,5              | 0,8   | 2,6               | 0,4   |
| Неосветленная | 7,6                     | 0,3                          | 2,5                    | Отсутствует              | 8,3   | 18,8              | 0,5   | 2,5               | 0,5   |

Сравнение активности фосфораккумулирующих микроорганизмов, характеризующейся кинетикой высвобождения и поглощения фосфора, позволило получить следующее соотношение: активный ил аэротенков № 13 ЛбСА, № 3 КСА и № 15 ЛбСА - 1:3, 5:6 соответственно. Таким образом, наиболее высокие скорости высвобождения и потребления фосфора присущи активному илу аэротенка № 15 ЛбСА. Более высокие скорости процессов, полученные для активного ила аэротенка № 3 КСА, по сравнению с активным илом аэротенка № 13 ЛбСА объясняются тем, что активный ил аэротенка № 3 КСА культивировался на неосветленной воде.

Результаты сравнения различных технологических схем удаления биогенных элементов, проведенные МГП «Мосводока-нал»,

показали возможность успешной организации процессов биологического удаления азота и фосфора из низкоконцентрированных сточных вод, характерных для городов России и Украины и определения технологической схемы, позволяющей получать стабильное качество очистки по  $\text{N-NH}_4$ ,  $\text{N-NO}_3$  и  $\text{P-PO}_4$  на уровне ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения. Полученный авторами опыт эксплуатации сооружений, работающих по технологиям глубокого удаления биогенных элементов, показывает, что при отсутствии ошибок в проектировании процесс биологического удаления фосфора в натурных сооружениях идет достаточно устойчиво и не требует существенных затрат на автоматизацию. То же можно сказать и о ранее полученном опыте эксплуатации сооружений, работающих по технологии удаления азота.

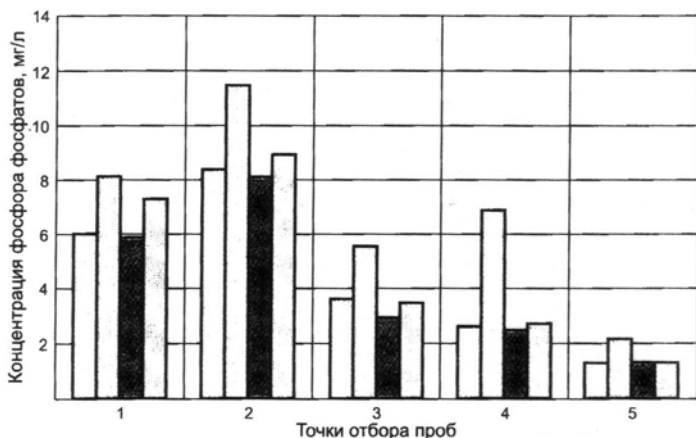
Однако при совместном биологическом удалении азота и фосфора возникают две потенциальные опасности:

- нехватка быстроразлагаемых субстратов для одновременного развития РАО-бактерий и денитрификаторов;

- снижение аэробного возраста ила ниже критических значений, что приводит к вымыванию из ила нитрификаторов. Выбор технологической схемы и расчет конструктивных параметров сооружения должны производиться на основании значений кинетических констант биохимических процессов, присущих конкретным сточным водам, что требует проведения предварительных исследований на объекте.

Специалистами МГП «Мос-водоканал» в настоящее время ведутся исследования, направленные на отработку оптимальных схем реконструкции типовых четырехкоридорных аэротенков, обеспечивающих, наряду с технологической эффективностью, минимальные затраты на реконструкцию, а также оптимальный энергобаланс процесса очистки. Кроме того, проводятся исследования, позволяющие обеспечивать повышение стабильности очистки сточных вод от биогенных элементов в реальных условиях нестационарности поступающей нагрузки.

В этой части главы по биологическим методам удаления фосфора из городских сточных вод будут рассмотрены аргументы в пользу биореагентных методов извлечения фосфорных соединений.



**Рисунок 4.5.** Динамика изменения концентрации фосфора фосфатов по ходу аэротенка  
 1 - начало анаэробной зоны; 2 - конец анаэробной зоны; 3 - аноксидная зона; 4 - конец аноксидной зоны; 5- конец аэробной зоны; серии измерений: □ первая; □ вторая; ■ третья; □ четвертая

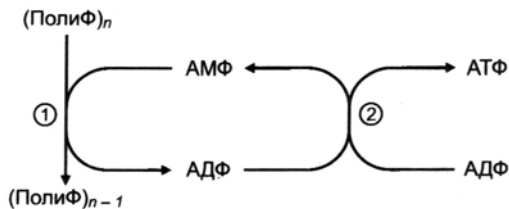
На рис. 4.5. показана динамика изменения концентрации фосфора в воде иловой смеси в анаэробной, аноксидной и аэробной зонах.[62]

Биологический метод очистки сточных вод получил широкое распространение, поскольку предполагает удаление соединений фосфора параллельно с удалением азотных и органических соединений методами нитри-денитрификации. Основными схемами биологической очистки с удалением азота и фосфора являются: AA/O — процесс Phoredox (Phosphorus, redox, oxidation), также известный под названием Phoredox modincation; UCT процесс (University of Cape Town); JNB (Johannesburg) и ряд других. Как свидетельствуют данные экспериментальных исследований, биологический метод дает возможность удалить фосфор с избыточным активным илом в количестве примерно 1,5% его массы по сухому веществу. Количество избыточного ила, выводимого из системы, зависит от его прироста, который в свою очередь определяется возрастом активного ила и количеством окисленной органики. Следует учитывать, что при обработке осадка часть удаленного фосфора выделяется из активного ила и с возвратными потоками возвращается, как правило, в «голову» очистных сооружений. «Молодой» ил более активно прирастает, а вследствие этого и поглощает фосфор. На практике применение биологического метода позволяет снизить концентрацию фосфора в хозяйственно-бытовых

водах до значений 1,2—1 мг/л. Для биологического метода это предельные значения, обусловленные свойствами ила.

Биологически активный ил представляет собой сложную систему, в которой содержание фосфораккумулирующих бактерий типа ацинетобактер и сахарные дрожжи составляют малый процент общего количества биомассы и существенно не влияет на общее поглощение фосфора.

Выделение фосфатов в анаэробной и аноксидной зонах происходит из-за отмирания аэробных бактерий и клеточного автолиза, а не за счет внутриклеточных процессов (другая точка зрения). Отмирание некоторых ослабленных или старых клеток аэробных микроорганизмов в условиях строгого анаэробноза сопровождается естественным разрушением полифосфатов внутри клеток и выделением фосфора в виде ортофосфатов во внешнюю среду. Одновременно с этим идет процесс анаэробного сбраживания органики, в том числе и так называемой мортмассы отмерших клеток с образованием недоокисленных продуктов брожения, в основном летучих жирных кислот — уксусной, пропионовой, масляной. Однако этот процесс не может протекать с большой скоростью из-за малого содержания анаэробных микроорганизмов в активном иле. Аэробные микроорганизмы не могут перестроиться на анаэробный тип обмена веществ ввиду иной физиологии. В последующей аэробной или аноксидной зоне окисление органических веществ (в том числе летучих жирных кислот и мортмассы) проводят обычные аэробные гетеротрофы или денитрификаторы. Окисление сопровождается приростом биомассы активного ила, потреблением ортофосфатов из среды и накоплением их в виде полифосфатов внутри клеток.



**Рисунок 4.6.** Образование АТФ из высокомолекулярных полифосфатов в бактериях типа ацинетобактер

1 - полифосфат; 2 - аденилаткиназа; АМФ - аденозинмонофосфат; АДФ - аденозиндифосфат; АТФ - аденозинтрифосфат

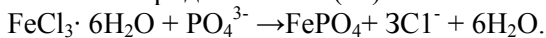
Поглощение фосфора аэробными бактериями происходит в процессе их роста, старый ил выделяет фосфор в сточную воду при отмирании. Известно, что полифосфаты (полимеры ортофосфорной кислоты) участвуют в биоэнергетических процессах бактерий. В первую очередь они регулируют и поддерживают на нужном уровне концентрацию аденозин-трифосфата (АТФ) в клетках. АТФ играет исключительно важную роль в обмене энергии и веществ в организмах. Это соединение является универсальным источником энергии для всех биохимических процессов, протекающих в живых системах. Например, у бактерий ацинетобактер выявлено две реакции, ведущие к образованию АТФ из высокомолекулярных полифосфатов (рис. 4.6.).

Разрыв полифосфатных связей с целью использования энергии никогда не приводит к выбросу фосфатов в окружающую среду. Все происходит внутри клетки независимо от того, аэробы это или анаэробы. Выделение фосфора во внешнюю среду свидетельствует о нарушении биологических процессов и гибели некоторой части клеток. Бактерии типа ацинетобактер относятся к условно патогенным микроорганизмам, вызывающим в определенных условиях раневые инфекции, менингит, желудочно-кишечные заболевания, поэтому присутствие их в активном иле в больших количествах крайне нежелательно. Масса активного ила в очистных сооружениях определяется из общих технологических требований и не может быть произвольно увеличена, соответственно не может быть увеличено поглощение фосфора.

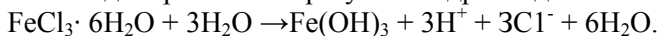
Таким образом, биологическим методом невозможно достичь нормативной концентрации фосфора в очищенной сточной воде 0,2 мг/л.

Уменьшить концентрацию фосфора можно при использовании реагентов —  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{FeSO}_4$  и  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Осаждение фосфатов при этом происходит следующим образом.

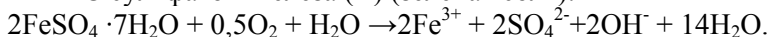
С хлоридом железа (III):



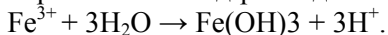
Одновременно образуется гидроксид железа:



С сульфатом железа (II) (зеленая соль):

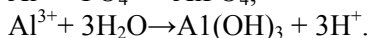
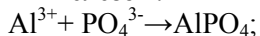


Эта реакция протекает в аэротенке спонтанно с одновременным образованием гид-роксида железа:



По стехиометрическому соотношению для 1 г фосфора требуется около 1,8 г железа при оптимальном показателе рН в пределах около 5.

С сульфатом алюминия реакция протекает так же, как с трехвалентным железом:



Для осаждения 1 г фосфора требуется 0,87 г алюминия. Оптимальная величина рН равна 6.

Для химического осаждения фосфора целесообразно добавление реагента в возвратный поток, наиболее концентрированный по содержанию фосфатов. Это обусловлено скоростью химических реакций, пропорциональной концентрациям реагирующих веществ.

Для оценки возможности удаления фосфора из сточных вод следует рассматривать этапы очистки как единую систему с взаимосвязанными элементами. Взаимосвязь элементов осуществляется не только технически, но и функционально посредством процессов, происходящих в активном иле на каждом этапе: в аэротенках, во вторичных отстойниках, в системе обработки осадка.

Вторичное загрязнение воды фосфатами в результате отмирания клеток может наблюдаться на любом этапе. Например, при нехватке органического питания для микроорганизмов при продленной аэрации сточных вод в аэротенке или при аэробной стабилизации активного ила. Следует отметить, что при аэробной стабилизации избыточного активного ила концентрация фосфора фосфатов достигает 20—30 мг/л.

Выброс фосфатов из клеток микроорганизмов часто наблюдается и во вторичном отстойнике при длительном времени пребывания активного ила в анаэробных условиях в зоне уплотнения. Аналогичный процесс наблюдается после любой стадии обработки осадка. В таблице 4.7. представлены данные по содержанию фосфора в возвратных потоках Люберецких очистных сооружений Москвы.

Таблица 4.7.

| Возвратные потоки                                    | Концентрация<br>Р/PO <sub>4</sub> мг/л |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Иловая вода с уплотнителей сброженного осадка        | 30                                     |
| Иловая вода с уплотнителей избыточного активного ила | 10                                     |
| Фильтрат с ленточных сгустителей сброженного осадка  | 35                                     |
| Фильтрат с фильтр-прессов                            | 50                                     |

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| Суммарный возвратный поток с сооружений обработки осадка | 35 |
|----------------------------------------------------------|----|

Проведенные МосводоканалНИИпроект расчеты баланса фосфорных соединений в системе очистки сточных вод и обработки осадков показывают, что доля фосфора, поступающего с возвратными потоками, после разведения исходной сточной водой составляет 0,5 мг/л. Значительное количество фосфора поступает с возвратным илом из вторичных отстойников. Таким образом, суммарная фоновая концентрация фосфора от сооружений обезвоживания осадков и уплотненного ила вторичных отстойников постоянно циркулирует в системе очистки сточной воды, в результате чего эффект удаления фосфорных соединений минимален, и общее количество их в очищенной воде в несколько раз превышает нормативный показатель на сброс.

#### 4.3. Физико-химический (реагентный) и биологический методы удаления соединений фосфора из сточных вод.

*Вода має нам'якість. Одна і та сама вода може бути і лужною і кислотною, залежно від наших думок і намірів. Кожна ми н'ємо воду, най краще сік, потрібне це робити з позитивними думками і почуттями. Чогани думки можуть завдати шкоди.*

*П. Хорунжий, проф., докт. техн. наук.*

В схемах физико-химико-биологической очистки подача реагента может осуществляться в различных точках [65] до первичных отстойников (предочистка); в аэротенки (одновременная симультанная очистка); после аэротенков во вторичные отстойники (постосаждение), но в этом случае существенное влияние на процесс оказывает остаточное содержание фосфора фосфатов в очищенной воде, так как низкая концентрация фосфатов позволяет гидроксиду  $\text{OH}^-$  вступать во взаимодействие с  $\text{Fe}^{+3}$  и перемещать процесс в область традиционной коагуляции воды. Можно также подавать реагенты в систему обработки осадков.

При реагентной обработке стоков происходят процессы дестабилизации системы нерас-творенных частиц (взвешенных веществ), включая коллоиды, связывание части растворенных органических веществ, образование малорастворимых форм  $\text{FePO}_4$  и комплексов типа  $(\text{Ca})_a(\text{Fe})_b(\text{H}_2\text{PO}_4)_c(\text{OH})_d(\text{HCO}_3)_e$ , а также  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  и  $\text{Fe}_2(\text{CO}_3)_3$ . На возможность прохождения таких процессов указывает наличие в образующихся осадках органических веществ, кальция, магния, железа, карбонатов, фосфатов, гидроксидов металлов [64] В зависимости от места ввода реагента происходят некоторые из перечисленных процессов в сочетании с удалением фосфора.

Добавление реагента перед первичными отстойниками равноценно коагуляции воды. Реагент взаимодействует с коллоидно-дисперсной системой, растворенными органическими веществами, фосфатами, восстановленными формами серы (сульфиды, сероводород). Основная часть его расходуется не на связывание фосфатов, а на побочные реакции. Расход реагента по  $\text{Fe}^{+3}$  достигает 7-12 г/м<sup>3</sup>, образуется достаточно большой объем рыхлого обводненного осадка. В сточных водах существенно снижается количество загрязнений, которые могли бы быть использованы для денитрификации и

дефосфатирования. Непродолжительное время контакта сточных вод с реагентом, резкие колебания щелочности и концентрации загрязнений отрицательно сказываются на эффективности изъятия фосфора.

Подача реагента в анаэробно-аноксидную зону аэротенков для обработки иловой смеси также определяется условиями взаимодействия с окружающей средой. По стехиометрии при образовании  $\text{FePO}_4$  на 1 г фосфора расходуется 1,8 г железа, однако имеются сообщения о соотношении Fe/P 0,4-1 моль/моль [65], что указывает на образование комплексных соединений наряду с простым фосфатом железа. Как показывает практика, соотношение  $\text{Fe/P} < 1$  характерно для повышенного содержания остаточного фосфора (примерно 1—1,5 мг/л). В анаэробной зоне биоблока, благодаря вытеснению фосфора из клеток активного ила, концентрация фосфора фосфатов повышается до 6—9 мг/л, что способствует активному взаимодействию с реагентом, доза которого может быть снижена до 2,5—3 г/м<sup>3</sup> по  $\text{Fe}^{+3}$ . Вынос фосфора при этом составит 0,5-0,8 мг/л. Образующиеся мелкокристаллические частички фосфата железа захватываются хлопьями активного ила, и процессы флокуляции и отстаивания этих примесей происходят автоматически. Содержание железа 0,5—0,6 мг/л в очищенной воде свидетельствует о некотором избытке реагента.

Возможна подача реагента в иловую смесь перед вторичными отстойниками, при этом его доза снижается до 2—3 г/м<sup>3</sup> по  $\text{Fe}^{+3}$  (для остаточного содержания фосфора 0,5 мг/л). Более точную дозу назначают в зависимости от остаточного содержания фосфора в очищенной воде. По мере снижения концентрации фосфора расход железа на побочные реакции увеличивается в 2—4 раза вследствие конкуренции различных анионов, в первую очередь со стороны  $\text{OH}^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ . Например, если необходимо снизить концентрацию фосфора с 1,2 до 0,5 мг/л, то дозу реагента, определенную по стехиометрии  $(1,2-0,5)1,8 = 1,26$  г/г  $\text{Fe}^{+3}$  надо увеличить до значения  $(1,26 \cdot 3,3) = 4,16$  г/г, где 3,3 — коэффициент увеличения дозы. Следовательно, необходимая доза составит  $(1,2-0,5)4,16 = 2,9$  г/м<sup>3</sup> по  $\text{Fe}^{+3}$ .

Дозирование реагента перед вторичными отстойниками требует тщательного измерения расхода иловой смеси, т. е. расхода сточных вод и циркулирующего ила, иначе будет происходить вынос железа с очищенной водой. Обычное содержание железа в таком случае составляет 0,4—0,6 мг/л.

Заслуживает внимания вариант добавки реагента в циркулирующий активный ил. Удобство этого способа заключается в постоянстве расхода ила и соответственно дозы реагента, в возможно-

сти полного использования его реакционной способности, в повышении содержания фосфора в иле (включая связанные формы) до 4-6% массы сухого вещества. Способ был опробован в течение 2008 г на станции аэрации г. Сестрорецка. Результаты испытаний приведены в таблице. 4.8.

Таблица 4.8.

| Показатель, мг/л    | Сточная вода |           |
|---------------------|--------------|-----------|
|                     | исходная     | очищенная |
| Взвешенные вещества | 137,5        | 4         |
| ХПК                 | 320          | 22        |
| БПК <sub>5</sub>    | 113,3        | 3         |
| Азот общий          | 33           | 7         |
| Азот аммонийный     | 21           | 0,65      |
| Азот нитратный      | 0,11         | 4,9       |
| Фосфор общий        | 4,5          | 0,2       |
| Фосфор фосфатов     | 2,3          | 0,1       |
| Железо общее        | 4,35         | <0,1      |

Таким образом, стабильное снижение концентрации фосфора до 0,2 мг/л может быть обеспечено равномерной подачей реагента дозой 1,5—2 г/м<sup>3</sup> по Fe<sup>+3</sup> в циркулирующий активный ил. При этом вынос общего железа с очищенной водой составит 0,1—0,2 мг/л.

Дозирование реагента в потоки сливных вод и фугата, описанное в [66] отражает результаты нечеткой организации работы узла обезвоживания осадков. При взаимодействии осадка первичных отстойников и избыточного активного ила перед обезвоживанием (в особенности при длительном совместном хранении) возникают анаэробные условия, в результате чего из клеток активного ила в значительном количестве вытесняются фосфаты. Например, на Юго-Западных очистных сооружениях Санкт-Петербурга в безреагентном режиме работы в фугате центрифуг содержание фосфора увеличивалось до 250-280 мг/л. Желательно осуществлять раздельное обезвоживание осадка и ила, что автоматически решит проблему возврата фосфатов в начало технологической цепочки. В крайнем случае следует сократить до минимума продолжительность контакта осадка и ила и соединить их в уплотненном, концентрированном виде.

Была изучена эффективность различных коагулянтов, применяемых для очистки городских и бытовых сточных вод от соединений фосфора, с целью выбора отечественных аналогов импортных коагулянтов и определения оптимальной точки их введения [67].

Были использованы отечественные реагенты: хлорид железа (ГОСТ 11157-76), сульфат алюминия (ГОСТ 12966-86), оксихлорид алюминия (ОХА) марки Аква-аурат 10 (ТУ 6-09-05-1456-96) и алюминат натрия (отход производства завода «Мосметаллоконструкции»).

Наиболее эффективным из использованных коагулянтов является ОХА.

**Таблица 4.9.**

| Расход сточной воды, м <sup>3</sup> /с | Первая ступень очистки бытовых сточных вод |            |                           |                             | Вторая ступень очистки бытовых сточных вод |            |                           |                |
|----------------------------------------|--------------------------------------------|------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|------------|---------------------------|----------------|
|                                        | коагулянт                                  | доза, мг/л | содержание фосфатов, мг/л |                             | коагулянт                                  | доза, мг/л | содержание фосфатов, мг/л |                |
|                                        |                                            |            | до вторичных отстойников  | после вторичных отстойников |                                            |            | после биофильтров         | после фильтров |
| 127                                    | Аква-аурат 10                              | 28         | 1,2                       | 0,2                         | - Аква-аурат 10                            | -          | 1,2                       | 0,1            |
| 308                                    |                                            | 4          | 0,78                      | 0,7                         |                                            | 4          | 1,2                       | 0,1            |
| 150                                    |                                            | 8          | 0,25                      | 0,12                        |                                            | 8          | -                         | 0              |
| 164                                    | Lupreal                                    | 10         | 2,3                       | 0,2                         | Aluminium sulfat-Losung                    | 6,6        | -                         | 0,1            |
| 217                                    |                                            | 15         | 1,2                       | 0,8                         |                                            | 5          | -                         | 0,1            |

Для снижения концентрации фосфатов до требуемых норм (0,2 мг/л) на городских очистных сооружениях наиболее эффективно дробное введение сернокислого алюминия после аэротенков и перед фильтрами. Это предположение подтверждается и при очистке бытовых сточных вод ОЦ «Полюс» с использованием коагулянта Аква-аурат 10: при введении дозы коагулянта 4 мг/л после аэротенка и такой же дозы перед биофильтрами содержание фосфатов снизилось с 1,2 до 0,1 мг/л. Как известно, при очистке сточных вод от соединений фосфора с применением минеральных коагулянтов соблюдается определенное соотношение  $[Me^{3+}]:[P]$ . Установлено, что при коагуляции сульфатом алюминия городских сточных вод с уменьшением содер-

жания фосфатов в исходной воде соотношение  $[Al^{3+}]:[P]$  увеличивается и составляет соответственно 9:1, 10:1 и 12,5:1, т. е. большие соотношения имеют место при меньших исходных концентрациях фосфатов. Та же тенденция наблюдается и при использовании ОХА. Для очистки сточных вод с исходным содержанием фосфатов 1,4 и 1,2 мг/л соотношение  $[Me^{3+}]:[P]$  составляет 6,9:1 и 8:1. Это свидетельствует о необходимости увеличения дозы коагулянта при снижении содержания фосфатов в исходной сточной воде.

Экспериментальные исследования показали высокую эффективность очистки сточных вод от соединений фосфора с применением коагулянтов. Наиболее эффективными являются хлорид железа и ОХА. Однако применение хлорида железа для получения высокой эффективности очистки от фосфатов требует присутствия в сточных водах в достаточном количестве веществ, обуславливающих высокую естественную щелочность, что усложняет его использование.

С целью проверки полученных экспериментальных данных и определения возможности замены импортных коагулянтов отечественными были проведены промышленные испытания по очистке бытовых сточных вод ОЦ «Полус» с применением оксидохлорида алюминия марки Ак-ва-аурат 10. Основными сооружениями технологической схемы очистки являются: аэротенк, распределительная камера, вторичные отстойники, биофильтры, многослойные фильтры, УФ-установка и биологические пруды. Коагулянт Аква-аурат 10 подавался в распределительную камеру (вместо реагента Lutrepal) и перед многослойными фильтрами (вместо сульфата алюминия марки Aluminiumsulfat-Losung 8 %).

Результаты промышленных испытаний представлены в таблице 4.9. Как видно из таблицы 4.9. при содержании фосфатов в сточной воде после аэротенка 0,25-1,2 мг/л, расходе сточной воды 127-310 м<sup>3</sup>/с, дозе коагулянта Аква-аурат 10 -3,5-8 мг/л остаточное содержание фосфатов в очищенной сточной воде после вторичных отстойников составляло 0,12-0,7 мг/л. При подаче коагулянта Аква-аурат 10 дозой 8 мг/л перед вторичными отстойниками (в распределительную камеру) и той же дозой перед фильтрами, получен 100-процентный эффект очистки. В очищенной сточной воде после фильтров фосфаты отсутствовали. При подаче коагулянта только в распределительную камеру дозой 28 мг/л эффект очистки после многослойных фильтров по фосфатам составил 0,1 мг/л.

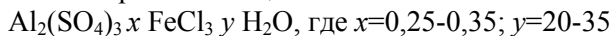
Стабильная очистка бытовых сточных вод до требуемых норм (концентрация фосфатов 0,25 мг/л) при более низких концентрациях

коагулянта Аква-аурат10 достигается только при его постоянной подаче в распределительную камеру и перед многослойными фильтрами. Испытания на промышленной установке при последовательной подаче коагулянта в распределительную камеру и перед многослойными фильтрами по 3,5 мг/л (по  $Al_2O_3$ ) в каждую точку (в сумме 7 мг/л) показали, что после многослойных фильтров остаточная концентрация фосфатов составила 0,1 мг/л (табл. 4.9.). Такой же эффект очистки достигается при использовании импортных реагентов - Lupreal с расходом 10-15 мг/л и Alumini-umsaulfat-Losung 8 % с расходом 5-6,6 мг/л.

Для определения эффективности коагулянта Аква-аурат 10 была проведена непрерывная 24-часовая работа промышленной установки. Коагулянт подавался в распределительную камеру и перед многослойными фильтрами по 3 мг/л в каждую точку (в сумме 6 мг/л). Как показали испытания, в среднем концентрация фосфатов снижается до 0,25 мг/л.

Получаемые из нефелина и минеральной кислоты реагенты, названные РНК (раствор нефелитового коагулянта), были опробованы на промышленных предприятиях различного профиля [69]. Установлено, что эффективность применения РНК не ниже, чем при использовании известных промышленных коагулянтов (хлорное железо, сульфат алюминия и др.) в сочетании с флокулянтами (полиакриламид и др.).

Алюможелезный коагулянт относится к категории смешанных коагулянтов, получаемых при совместной варке плава сульфата алюминия и соли трехвалентного железа с последующей кристаллизацией [70]. Продукт представляет собой неслеживающиеся пластины и гранулы желто-коричневого цвета:



Экспериментальные исследования выполнялись на натуральной хозяйственно-бытовой воде (неочищенный сток), а также на воде, прошедшей биологическую очистку. Разделение дисперсной среды производилось отстаиванием и фильтрованием. В табл. 4.10. представлены качественные показатели неочищенной хозяйственно-бытовой воды и воды, прошедшей физико-химическую очистку (доза коагулянта составляла 21 мг/л).

**Таблица 4.10.**

| Показатель                 | Сточная вода |                                 |              |                         |              |
|----------------------------|--------------|---------------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
|                            | неочищенная  | после физико-химической очистки |              |                         |              |
|                            |              | «АКВА-АУРАТ™30»                 |              | алюможелезный коагулянт |              |
|                            |              | отстаивание                     | фильтрование | отстаивание             | фильтрование |
| рН                         | 8,53         | 7,42                            |              | 7,9                     |              |
| Взвешенные вещества, мг/л  | 72           | 4                               | 2            | 12                      | 3            |
| Фосфаты(Р),мг/л            | 0,19         | <0.016                          |              | <0.016                  |              |
| БПК <sub>полн</sub> , мг/л | 35,91        | -                               | 4            | -                       | 4            |
| Железо, мг/л               | 2,15         | 0.34                            | 0,1          | 0.46                    | 0.15         |
| Остаточный алюминий, мг/л  | -            | 0.22                            | <0,04        | 0,06                    | <0.04        |
| Азот аммонийный, мг/л      | 7.43         | 3.2                             |              | 3.7                     |              |
| Токсичность                | -            | Нетоксична                      |              |                         |              |

В табл. 4.11. представлено качество воды, прошедшей биологическую очистку и физико-химическую доочистку (дозы коагулянта составляли 7 и 10 мг/л).

**Таблица 4.11.**

| Показатель                 | Биологически очищенная вода | Вода после доочистки |              |                         |              |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------|--------------|-------------------------|--------------|
|                            |                             | «АКВА-АУРАТ™30»      |              | алюможелезный коагулянт |              |
|                            |                             | отстаивание          | фильтрование | отстаивание             | фильтрование |
| pH                         | 7.45                        | 7,75                 |              | 7,2                     |              |
| Взвешенные вещества, мг/л  | 32                          | 5                    | 2            | 5                       | 2            |
| Фосфаты(Р),мг/л            | 0.26                        | <0.016               |              | <0,016                  |              |
| БПК <sub>полн</sub> , мг/л | 12,98                       | -                    | 3            | -                       | 3            |
| Железо, мг/л               | 0,75                        | 0,24                 | 0,15         | 0,45                    | 0,15         |
| Остаточный алюминий, мг/л  | -                           | 0,39                 | 0,04         | 0,48                    | < 0,04       |
| Азот аммонийный, мг/л      | 1,27                        | 0,6                  | 0,3          | 0,5                     | 0,2          |
| Токсичность                | Мал токсична                | Нетоксична           |              |                         |              |

В результате исследований установлено, что при физико-химической очистке хозяйственно-бытовых сточных вод расход реагента больше в 3 раза по сравнению с доочисткой воды. Применение коагулянтов на стадии доочистки биологически очищенных сточных

вод позволяет снизить БПК на 80%, фосфаты на 94%, взвешенные вещества на 94%. При этом качество очищенных вод соответствует требуемым нормативам для сброса в рыбохозяйственный водоем.

Предварительное пробное коагулирование в точке ввода (распределительная камера вторичных отстойников) коагулянтов ПОХА «АКВА-АУРАТ™30, 18, 10, 105, 170, 180», а также сульфата алюминия совместно с «АКВА-АУРАТ™30» дозами 20 мг/л показало практическую возможность очистки сточных вод от соединений фосфора (табл. 4.12.). Наиболее высокую активность при очистке от фосфорных соединений проявили коагулянты «АКВА-АУРАТ™30, 18, 105, 180, 170» и сульфат алюминия совместно с «АКВА-АУРАТ™30» с отдельными точками их ввода. Результаты испытаний показывают, что применение полиоксихлоридов алюминия, за исключением «АКВА-АУРАТ™10», позволяет очищать сточные воды от соединений фосфора на 90-93 % с остаточным содержанием фосфора 0,13-0,34 мг/л, что находится в пределах допустимых норм или даже ниже.

Из данных табл. 4.13. следует, что при минимальном времени! осаждения и снижении рабочей дозы коагулянтов эффективность очистки также зависит от выбора точки их ввода. Оптимальные условия очистки от фосфора достигаются при вводе коагулянтов в распределительную камеру вторичных отстойников (табл. 4.12). Ввод коагулянтов в сточную воду в двух точках позволил снизить суммарную дозу коагулянтов до 10-15 мг/л при остаточном содержании алюминия в очищенной воде менее 0,2 мг/л, железа 0,001 мг/л. фосфора 0,13 мг/л.

**Таблица 4.12.**

| Коагулянт        | Доза в расчете на $Al_2O_3$ , мг/л | Содержание фосфора после очистки, мг/л | Эффективность очистки, % |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|
| «АКВА-АУРАТ™30»  | 5                                  | 0,95                                   | 65,05                    |
|                  | 10                                 | 0,6                                    | 78,3                     |
|                  | 20                                 | 0,31                                   | 88,4                     |
| «АКВА-АУРАТ™18»  | 5                                  | 0,95                                   | 65,05                    |
|                  | 10                                 | 0,5                                    | 81,9                     |
|                  | 20                                 | 0,31                                   | 88,4                     |
| «АКВА-АУРАТ™105» | 5                                  | 0,95                                   | 65                       |
|                  | 10                                 | 0,42                                   | 84,4                     |
|                  | 20                                 | 0,18                                   | 93,2                     |
| «АКВА-АУРАТ™170» | 5                                  | 0,55                                   | 79,7                     |
|                  | 10                                 | 0,28                                   | 89,6                     |

|                                                                                                                                                       |    |      |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|------|-------|
|                                                                                                                                                       | 20 | 034  | 93,2  |
| «АКВА-АУРАТ <sup>TM</sup> 30» + сульфат алюминия                                                                                                      | 5  | 0,85 | 68,5  |
|                                                                                                                                                       | 10 | 0,28 | 89,75 |
|                                                                                                                                                       | 20 | 0,07 | 97,4  |
|                                                                                                                                                       | 5  | 1,3  | 52    |
| «АКВА-АУРАТ <sup>TM</sup> 10»                                                                                                                         | 10 | 0,88 | 67,5  |
|                                                                                                                                                       | 20 | 0,89 | 67    |
| Сульфат алюминия                                                                                                                                      | 20 | 0,84 | 69    |
| Примечание. Содержание фосфора до очистки 2,7 мг/л; pH – 7,5-8; температура 19°C; точка отбора проб – распределительная камера вторичных отстойников. |    |      |       |

**Таблица 4.13.**

| Коагулянт                                                                                                                                                                                           | Содержание фосфора после очистки, мг/л | Эффективность очистки, % |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------|
| «АКВА-АУРАТ <sup>TM</sup> 30»                                                                                                                                                                       | 0,29                                   | 95,03                    |
| «АКВА-АУРАТ <sup>TM</sup> 18»                                                                                                                                                                       | 1,29                                   | 72,13                    |
| «АКВА-АУРАТ <sup>TM</sup> 105»                                                                                                                                                                      | 1,3                                    | 79                       |
| «АКВА-АУРАТ <sup>TM</sup> 170»                                                                                                                                                                      | 1,03                                   | 83,3                     |
| Сульфат алюминия                                                                                                                                                                                    | 0,87                                   | 85,92                    |
| Смесь «АКВА-АУРАТ»+ сульфат алюминия                                                                                                                                                                | 0,29                                   | 95,3                     |
| Примечание. Точка отбора проб - камера перед аэротенками после первичных отстойников; доза коагулянта в расчете на Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10 мг/л; содержание фосфора до очистки 6,18 мг/л. |                                        |                          |

Глубокая очистка городских сточных вод от фосфатов может быть достигнута при обработке их щелочными агентами, например известью [71], а также щелочными сульфидсодержащими стоками нефтехимических производств [72]. В этом случае извлечение соединений фосфора из сточной воды идет за счет протекания химических и адсорбционных процессов. Для более глубокого удаления фосфатов из городских сточных вод после биологической очистки и их обработки солями железа обычно предусматривается доочистка воды на песчаных, ^фильтрах. Например, на очистных сооружениях в Южном Бутове (г. Москва^ такая очистка сточных вод осуществляется по технологии немецкой фирмы «СХВ Хельтер Вас-сертехник». Наиболее высокая степень очистки бытовых и городских сточных вод от соединений фосфора была достигнута при обработке полиоксихлоридом алюминия «АКВА-АУРАТ<sup>TM</sup> 10».

В работе рассмотрена возможность очистки до нормативных требований высокомутных фосфорсодержащих сточных вод, поступающих на очистные сооружения канализации МУП «Водоканал» г. Сергиева Посада Московской области[71]. В приемную камеру очистных сооружений поступает сток, включающий .смесь хозяйственно-

бытовых и производственных вод, дренажную воду с иловых полей и Песковых карт, избыточный активный ил. Технологическая схема очистки данных сточных вод, основанная на биологическом методе, не позволяет обеспечить нормативное содержание фосфора в сбрасываемых сточных водах. Поэтому была исследована эффективность очистки сточных вод современными коагулянтами в присутствии активного ила. Для исследований были выбраны известные коагулянты торговых марок «АКВА-АУРАТ» и «СКИФ», обладающие высокой коагулирующей способностью (независимо от температуры очищаемой воды) и низкой коррозионной активностью. Испытанные реагенты " «АКВА-АУРАТ™10», «АКВА-АУРАТ™18», «АКВА-АУРАТ™30» представляют собой полигидроксихлорид алюминия и различаются относительной основностью, т. е. молярным соотношением  $\text{ОН}/3\text{Al}$ , и процентным содержанием хлорид-ионов. Коагулянт «АКВА-АУРАТ™105» и «АКВА-АУРАТ™ 170» имеют сложные составы, в которые наряду с полигидроксихлоридом алюминия входят сульфат алюминия и полигидро-ксихлорсульфат алюминия в строго определенном соотношении. В состав реагентов «СКИФ» дополнительно введен флокулянт.

Таблица 4.14.

| Коагулянт         | Содержание фосфатов (по Р) в точках ввода коагулянта, мг/дм <sup>3</sup> |               |                          |                                         |               |                          |                                              |               |                          |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------|-----------------------------------------|---------------|--------------------------|----------------------------------------------|---------------|--------------------------|
|                   | до первичных отстойников                                                 |               |                          | в иловой смеси до вторичных отстойников |               |                          | в очищенной воде после вторичных отстойников |               |                          |
|                   | до очистки                                                               | после очистки | эффективность очистки, % | до очистки                              | после очистки | эффективность очистки, % | до очистки                                   | после очистки | эффективность очистки, % |
| «АКВА-АУРАТ™ 10»  | 3,58                                                                     | 2,89          | 19,1                     | 1,75                                    | 1,32          | 43                       | 2,085                                        | 0,879         | 58                       |
| «АКВА-АУРАТ™ 18»  | 3,58                                                                     | 2,91          | 18,7                     | 1,75                                    | 0,96          | 45                       | 2,085                                        | 0,838         | 60                       |
| «АКВА-АУРАТ™30»   | 3,58                                                                     | 2,14          | (40)                     | 1,75                                    | 0,92          | 47                       | 2,085                                        | 0,839         | 60                       |
| «АКВА-АУРАТ™ 105» | 3,58                                                                     | 2,8           | 21,6                     | 1,75                                    | 0,86          | 51                       | 2,085                                        | 0,835         | 60                       |
| «АКВА-АУРАТ™ 170» | 3,58                                                                     | 2,68          | 25,1                     | 1,75                                    | 0,66          | (62)                     | 2,085                                        | 0,62          | (70)                     |
| «СКИФ-10»         | 3,58                                                                     | 2,86          | 19,8                     | 1,75                                    | 1             | 43                       | 2,085                                        | 0,81          | 61                       |
| «СКИФ-18»         | 3,58                                                                     | 2,92          | 18,3                     | 1,75                                    | 0,95          | 46                       | 2,085                                        | 0,79          | 62                       |
| «СКИФ-180»        | 3,58                                                                     | 2,5           | (29,7)                   | 1,75                                    | 0,91          | (48)                     | 2,085                                        | 0,73          | (65)                     |
| «АКВА-АУРАТ™30»   | -                                                                        | -             | -                        | 1,75                                    | 0,33          | (81)                     | 2,085                                        | Следы         | (>99)                    |
| «АКВА-АУРАТ™30»   | 6,23                                                                     | 4,48          | 28                       | 4,5                                     | 2,56          | 43                       | -                                            | -             | -                        |
| «АКВА-АУРАТ™170»  | 6,23                                                                     | 3,92          | (37)                     | 4,5                                     | 2,38          | 47                       | -                                            | -             | -                        |

Примечание. Температура воды 17 °С, pH 7, доза коагулянта 10 мг/дм<sup>3</sup>, доза коагулянта «АКВА-АУРАТ™30» 25 мг/дм<sup>3</sup>.

Лабораторные исследования по коагуляции сточных вод были выполнены с использованием известной методики «джар-тест», обес-

печивающей условия моделирования производственных процессов очистки воды: смешение рабочих растворов реагентов и очищаемой воды, условия коагуляции, отстаивание. Контроль за содержанием фосфатов в сточной воде до и после очистки проводили в различных точках: до и после первичных отстойников, в иловой смеси до вторичных отстойников, в очищенной воде после вторичных отстойников. Был изучен эффект очистки сточных вод в зависимости от вида, дозы и места ввода реагента. Оптимизация условий коагуляции, проведенная с учетом влияния различных факторов, позволила получить максимальный эффект очистки сточных вод.

В процессе исследований установлено, что наибольшей эффективностью удаления фосфора из городских сточных вод обладают реагенты «АКВА-АУРАТ™30», «АКВА-АУРАТ™170» и «СКИФ-180» (табл. 4.14.). Значительное влияние на эффективность очистки сточных вод оказывают доза коагулянта (табл. 4.15.) и место ввода реагента. При его введении в сточную воду до первичных отстойников наблюдается моментальное выпадение осадка. В этом случае коагулянт расходуется в основном на очистку воды от взвешенных частиц, а эффективность очистки воды от фосфорсодержащих продуктов низкая. Введение коагулянта в распределительную камеру аэротенков при прочих равных условиях увеличивает эффективность очистки сточных вод от фосфора практически в два раза. Дробное введение коагулянта повышает эффективность очистки дополнительно на 20-25 %

**Таблица 4.15.**

| Коагулянт                                                                         | Доза, мг/дм <sup>3</sup> | Содержание фосфатов (по Р) в иловой смеси до вторичных отстойников мг/дм <sup>3</sup> | Эффективность очистки, % |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| «АКВА-АУРАТ™30»                                                                   | 10                       | 2,52                                                                                  | 48                       |
|                                                                                   | 15                       | 1,79                                                                                  | 63                       |
|                                                                                   | 20                       | 1,21                                                                                  | 75                       |
|                                                                                   | 25                       | 0,63                                                                                  | 87                       |
| «АКВА АУРАТ™170»                                                                  | 10                       | 1,79                                                                                  | 63                       |
|                                                                                   | 15                       | 1,22                                                                                  | 74                       |
|                                                                                   | 20                       | 0,58                                                                                  | 88                       |
|                                                                                   | 25                       | 0,29                                                                                  | 94                       |
| •СКИФ-180»                                                                        | 10                       | 2,37                                                                                  | 51                       |
|                                                                                   | 15                       | 1,8                                                                                   | 64                       |
|                                                                                   | 20                       | 1,11                                                                                  | 77                       |
|                                                                                   | 25                       | 0,48                                                                                  | 90                       |
| Примечание. Содержание фосфатов в очищаемой воде (по Р) 4,84 мг/дм <sup>3</sup> . |                          |                                                                                       |                          |

**Таблица 4.16.**

| Точка ввода коагулянта<br>«АКВА-АУРАТ™30»                                                                                                                                                                                          | Доза<br>коагулянта,<br>мг/дм <sup>3</sup>                          | Остаточное содержание<br>в осветленном слое<br>после отстаивания,<br>мг/дм <sup>3</sup> |                   | Эффектив-<br>ность<br>очистки, % |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                    | алюминий                                                                                | фосфаты<br>(по Р) |                                  |
| I. Осветленная сточная вода. Распределительная камера азротенков. Содержание фосфатов (по Р) 5,8 мг/дм <sup>3</sup> , перемешивание с коагулянтом 2 мин, отстаивание и осветление 1,5 ч                                            | 10                                                                 | < 0,01                                                                                  | 2,66              | 54                               |
|                                                                                                                                                                                                                                    | 5<br>(дополнительно<br>введено в<br>эту же воду<br>через<br>1,5 ч) | 0,06                                                                                    | 1,97              | 66                               |
| II. Сточная вода. Распределительная <b>камера</b> вторичных отстойников. <b>Содержание</b> фосфатов (по Р) 3,93 мг/дм <sup>3</sup> , <b>перемешивание</b> с коагулянтом 2 мин, <b>отстаивание</b> и осветление 3 ч                 | 10                                                                 | 0,15                                                                                    | 3,89              | 0                                |
|                                                                                                                                                                                                                                    | 5<br>(дополнительно<br>введено в<br>эту же воду<br>через<br>3ч)    | <0,01                                                                                   | 2,87              | 27                               |
| III. Смесь очищенной воды (точки I и II), имитирующая поток, направляемый в приемную камеру контактных резервуаров<br>Содержании фосфатов (по Р) 2,43. Перемешивание без введения коагулянта 2 мин, отстаивание и осветление 1,5 ч | -                                                                  | <0,01                                                                                   | 0,83              | 66                               |
|                                                                                                                                                                                                                                    | 10 (дополнительно<br>введено в<br>эту же воду<br>через<br>1,5 ч)   | 0,16                                                                                    | Следы             | >99                              |
| Примечание <b>Температура воды 17 °С, рН 7.</b>                                                                                                                                                                                    |                                                                    |                                                                                         |                   |                                  |

При обработке высокомутных сточных вод коагулянтом процесс их осветления протекает быстро. По этой причине коагулянт в контакте с большим количеством активного ила не успевает за короткий промежуток времени сформировать соответствующие мицеллы с протеканием классического процесса коагуляции. При быстром осаждении часть коагулянта механически захватывается активным илом и выводится из рабочей зоны контакта с очищаемой сточной водой. Последнее приводит к перерасходу коагулянта, отклонению от

его заданной концентрации в воде, вялой коагуляции и неудовлетворительным результатам очистки. Чтобы исключить технологические потери коагулянта и получить требуемый эффект очистки сточных вод, необходимо на первом этапе осуществлять очистку биологическим методом, а затем в осветленную воду вводить коагулянт. Так, высокая степень очистки сточной воды от соединений фосфора была достигнута при введении коагулянта в распределительную камеру перед вторичными отстойниками.

Лучшие результаты были получены при введении коагулянта в приемную камеру контактных резервуаров, в которую поступают стоки с содержанием взвешенных веществ в количестве не более 7-8 мг/дм, прошедшие биологическую очистку активным илом. Но при этом в контактных резервуарах происходит отложение трудноудаляемого осадка, что вызывает определенные сложности в эксплуатации очистных сооружений.

Исследования показали, что значительно эффективнее происходит удаление фосфатов из сточных вод, когда после их обработки коагулянтом осуществляется доочистка воды на фильтрах, установленных перед контактным резервуаром. При производственном применении коагулянта на очистных сооружениях ООО «ФКНТ», имеющих систему доочистки (биореактор с синтетической насадкой «Волан»), эффективность очистки сточных вод от фосфатов (при дозе коагулянта 20 мг/дм<sup>3</sup>) достигала практически 100 %, остаточное содержание фосфора составило 0,1 мг/дм<sup>3</sup>, что соответствует безопасности сброса очищенной воды в водоемы рыбохозяйственного назначения (табл. 4.17.)

**Таблица 4.17.**

| Коагулянт                                                                | Доза,<br>мг/дм <sup>3</sup> | Содержание фосфора, мг/дм |               | Эффективность<br>очистки, % |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------|-----------------------------|
|                                                                          |                             | до очистки                | после очистки |                             |
| «АКВА-АУРАТ™30»                                                          | 10 20                       | 2,03                      | 0,57 <0,1     | 72 100                      |
| Сульфат алюминия                                                         | 10 20                       | 2,03                      | 0,71 <0,1     | 65 100                      |
| Примечание. Точка отбора проб - биореактор, температура воды 16 °С, pH7. |                             |                           |               |                             |

#### 4.4. Очистка от фосфора высококонцентрированных сточных вод животноводческих комплексов.

*Тяжело больная мать не способна родить здорового ребенка. Тяжело больная Млангетла не создаст полноценного человека.*

*Вода есть вода. Дай се корове, то дайт молоко, дай змее, то дайт яд. Наша жизнь — та же вода. Можно ли обвинить воду-жизнь в наших неблагоприятных постижках.*

Высококонцентрированные сточные воды, образующиеся на животноводческих комплексах, характеризуются высоким содержанием аммонийного азота, хлоридов, соединений фосфора и других загрязняющих веществ. Накопление большого количества таких сточных вод значительно ухудшает экологическую обстановку в расположенных рядом населенных пунктах, загрязняя водоисточники и земельные площади. С другой стороны, после дополнительной обработки животноводческие стоки могут применяться в качестве ценных органических удобрений для повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

В настоящее время при утилизации высококонцентрированных сточных вод свиноводческих комплексов в основном используют приведенные ниже методы. [73, 74]

**Разделение стоков.** Из-за высокой концентрации загрязняющих веществ одной из основных операций этого метода является разделение стоков на твердую и жидкую фракции с целью использования продуктов разделения в качестве удобрений [73]. В соответствии с нормативными требованиями, влажность твердой фракции после разделения сточных вод не должна превышать 70—72%, что важно для создания оптимальных условий его дальнейшей биотермической обработки. Жидкая фракция, в которой концентрация взвешенных веществ должна быть минимальной, используется чаще всего для орошения или сбрасывается в водоем после соответствующей биохимической очистки. Продукты разделения с требуемыми характеристиками получают путем многоступенчатой обработки (не менее двух ступеней) в осадительных и фильтровальных устройствах.

**Комбинированная технология физико-химической и биологической очистки** включает предварительный перевод фосфора и аммонийного азота в трудно растворимый орто-фосфат магния-аммония и последующую двухступенчатую биологическую очистку

сточных вод в аэротенках со струйной аэрацией и реагентной доочисткой [73]. Высокая степень очистки позволяет сбрасывать сточные воды в естественные водоемы или использовать их в оборотной системе технического водоснабжения животноводческих комплексов. Образующийся осадок с высоким содержанием биогенных элементов может быть утилизирован как органоминеральное удобрение.

**Аэробная очистка сточных вод** необходима для получения воды, удовлетворяющей экологическим требованиям для сброса ее в водоемы. Метод, изложенный в работе [73], заключается в перемешивании сточных вод с подачей воздуха, что обеспечивает развитие аэробных бактерий, окисляющих органическое вещество до углекислоты и образующих биомассу (активный ил) в количестве приблизительно 70% окисленного органического вещества.

**Аэробно-анаэробный метод** включает анаэробное и аэробное сбраживание и отстаивание. После отделения грубодисперсных примесей сточные воды проходят предварительную очистку в аэротенке. Там же смонтирован метантенк, где происходит сбраживание активного ила после предварительной и двухступенчатой аэробной очистки. При этом температурный режим в метан-тенке поддерживается за счет тепла аэротенка предварительной очистки.

**Использование гидрокультур** высших водных растений [73].

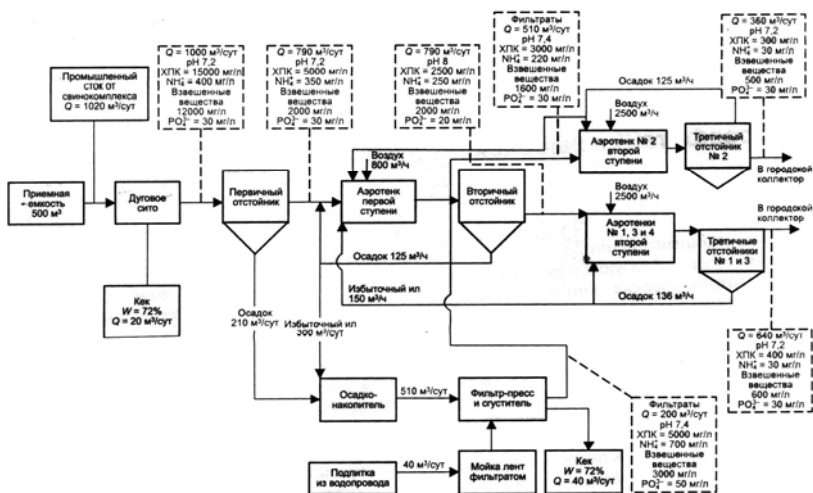


Рисунок 4.7. Балансовая схема очистных сооружений канализации свиноводческого комплекса ЗАО «Надеevo»

Данным способом ускоряется процесс очистки путем контакта сточных вод с гидрокультурой высших водных растений *Fista stratiotes* L. При этом в лотковые установки со сточной водой свиного комплекса из общего коллектора вносят биомассу гидрокультуры. Очистка продолжается в течение 9 дней. Биомасса за этот период увеличивается почти в 2,3 раза, численность сапрофитных форм микроорганизмов снижается в 86 раз, численность кишечных групп бактерий уменьшается в 4687 раз, при этом значительно улучшаются физико-химические показатели качества сточных вод.

**Реагентный метод.** В качестве реагентов помимо сульфатов и хлоридов алюминия, железа и других распространенных коагулянтов применяются фирменные Препараты, в состав которых входят, в частности, органические полимерные соединения с молекулярной массой более 1 000 000. Эти соединения дозируются в реактор, снабженный механической мешалкой (время пребывания 5—10 мин). Степень очистки по показателю ХПК при его исходных значениях до 5000 мг/л составляет около 98% [73].

Рассмотрим эффективность работы очистных сооружений канализации свиноводческого комплекса на 30 тысяч голов (ЗАО «Надеево»), расположенного в Вологодской области. Балансовая схема очистных сооружений представлена на рис. 4.7.

Очищенные сточные воды поступают в городской коллектор и затем — на очистные сооружения канализации г. Вологды. После математической обработки данных технологического контроля были получены средние (за семь месяцев 2008 г.) показатели качества очищенных сточных вод. Результаты расчетов, а также требования к качеству очищенных сточных вод, сбрасываемых в городской коллектор, приводятся в таблице 4.18. Сопоставление данных технологического контроля за 2008 г. и нормативных требований показало недостаточную степень очистки сточных вод от взвешенных веществ, фосфатов и аммонийного азота.

Для снижения остаточных концентраций фосфора и содержания взвешенных веществ на очистных сооружениях свиноводческого комплекса ЗАО «Надеево» рассматривалось несколько инженерных решений. Совместно с институтом «МосводоканалНИИпроект» был разработан вариант с применением мешалок-аэраторов, выпускаемых фирмой «Флюгт» (Италия), в действующих аэро-тенках первой и второй ступеней, а также с устройством анаэробного реактора и реактора по утилизации фосфора. При этом удаление основной части фосфора проводится в реакторе образования струвита (аммония-магния фос-

фата). По предварительным расчетам, очищенные сточные воды имели следующие показатели, мг/л: ХПК — 265,5; взвешенные вещества — 25;  $N-NH_4^+$  — 2,5; фосфаты — 6,3. Несмотря на высокую эффективность очистки, большие финансовые затраты на реконструкцию очистных сооружений (оборудование — 502 629 у. е., строительно-монтажные работы — 77 900 у. е.) делают этот проект экономически нецелесообразным.

Для снижения содержания соединений фосфора и взвешенных веществ в очищенных сточных водах автором предложен реагентный метод очистки с использованием сульфата железа ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ), являющегося отходом производства некоторых предприятий Вологодской области (побочный продукт, образующийся при травлении разбавленной серной кислотой железных листов, проволоки и др.). В частности, этот регент является отходом производства предприятия ОАО «Электротехмаш», расположенного в непосредственной близости от ЗАО «Надеево», что позволит значительно сократить себестоимость коагулянта и транспортные расходы.

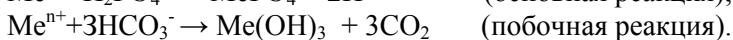
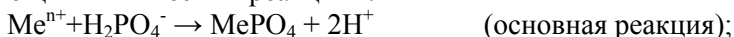
В 2008 г. на базе Вологодского государственного технического университета при участии специалистов очистных сооружений канализации ЗАО «Надеево» были проведены экспериментальные исследования по определению эффективности реагентной очистки сточных вод с использованием сульфата железа. Пробы воды отбирались в следующих точках: перед первичными отстойниками (точка 1), перед аэротенками первой ступени (точка 2) и перед аэротенками второй ступени (точка 3). При этом определялись следующие параметры: рН, ХПК, содержание взвешенных веществ, ортофосфатов, общего азота. Затем в сточную воду вводился реагент различной концентрации и определялось остаточное содержание загрязняющих веществ.

Таблица 4.18.

| Показатель                | До первичных отстойников | После первичных отстойников | До аэротенков второй ступени | После аэротенков второй ступени | На входе в городской коллектор | Нормативные требования |
|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| рН                        | 7,2                      | 7                           | 8                            | 7,4                             | 7,5                            | 6,5-8,5                |
| БПК <sub>5</sub> , мг/л   | 3200                     | 2375                        | 1053                         | 163                             | 105,3                          | 150                    |
| $NH_4^+$ , Мг/л           | 347                      | 337                         | 202                          | 44,9                            | 40,87                          | 35,4                   |
| Нитраты, мг/л             | 8,7                      | 5,3                         | 2,1                          | 0,15                            | 0,154                          | 40                     |
| Нитриты, мг/л             | 1,54                     | 0,82                        | 0,64                         | 0,25                            | 0,166                          | 0,9                    |
| Взвешенные вещества, мг/л | 12631                    | 2494                        | 1521                         | 969                             | 762,93                         | 240                    |
| Хлориды,                  | 89                       | 85,4                        | 72,1                         | 70                              | 68                             | 300                    |

|                   |      |      |      |      |       |        |
|-------------------|------|------|------|------|-------|--------|
| мг/л              |      |      |      |      |       |        |
| Фосфаты,<br>мг/л  | 30,4 | 29,4 | 22,6 | 27,2 | 24,28 | 5,29   |
| Сульфаты,<br>мг/л | 211  | 189  | 51,4 | 28,4 | 21,2  | 114,44 |

Снижение содержания ортофосфатов до ПДК на выходе из очистных сооружений обеспечивается при введении реагента дозой 800 мг/дм<sup>3</sup> перед аэротенками первой ступени. Содержание взвешенных веществ в точке перед аэротенками первой ступени при дозе реагента 800 мг/дм<sup>3</sup> снижается с 2494 до 2041 мг/дм<sup>3</sup> что объясняется адсорбцией загрязнений сточных вод на продуктах гидролиза сульфата железа. Снижение щелочности сточной воды при коагуляции происходит по следующим химическим реакциям:



При удалении фосфатов из разбавленных сточных вод оптимальный диапазон pH исходной сточной воды при использовании сульфата железа составляет 8—8,5, в то время как для высококонцентрированных сточных вод — 6,5—7. В источнике этот факт объясняется тем, что под влиянием возрастающих концентраций фосфатов оптимальные значения pH при коагуляции (как и в присутствии сульфатов) смещаются в сторону более низких значений.

В аэротенке первой ступени за счет подачи кислорода осуществляется перевод железа из двухвалентной в трехвалентную форму, необходимую для активного протекания процесса коагуляции. Если при биологической очистке, включающей стадию осаждения железом, возникает ситуация, при которой концентрация кислорода становится равной нулю (станция перегружена), то Fe<sup>3+</sup> может вновь восстанавливаться до Fe<sup>2+</sup>, в результате чего часть фосфора будет высвобождаться. Однако такая ситуация невозможна до тех пор, пока весь нитрат, присутствующий в среде, не будет израсходован в процессе денитрификации, поскольку нитрат также способен окислять Fe<sup>2+</sup> до Fe<sup>3+</sup>, особенно при участии бактерий.

Остаточное содержание железа при введении реагента дозой 800 мг/дм<sup>3</sup> перед аэротенками первой ступени составляет около 2,08 мг/дм<sup>3</sup>. Если учесть, что 50% железа (как минимум) удаляется после аэротенков, то предполагаемая концентрация железа на выходе из очистных сооружений составит около 1 мг/л. Это соответствует требованиям, предъявляемым к очищенным сточным водам, сбрасываемым в городской канализационный коллектор.

## Глава 5. Проектирование современных комплексов биологической очистки сточных вод от биогенных элементов.

*Нам не буть найвищим втіленням патріотизму,  
бо серед народів першим буде завжди той, хто випередить інших  
у галузі думки та розумної діяльності.*

*Луї Пастер.*

Современный этап развития сооружений очистки сточных вод характеризуется широким внедрением новых технологий и оборудования. При этом технология, применяемое оборудование и современная система проектирования представляют собой взаимосвязанный комплекс [13]. Главной задачей проектирования сооружений биологической очистки для высокон-центрированных сточных вод является создание эффективных сооружений — аэротенков.

Любой современный проект должен обеспечивать достижение установленных жестких норм (Правила охраны поверхностных вод, 1991 г., Сан-ПиН 4630-88) для хозяйственно-питьевых и культурно-бытовых нужд населения рыбного хозяйства (табл. 5.1.)

**Таблица 5.1.** Нормативные показатели, мг/л, сброса в водоемы биогенных элементов.

| Биогенные элементы | Культурно-бытовой водоем | Рыбохозяйственный водоем |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| Азот:              |                          |                          |
| аммиак             | 2                        | 0,05                     |
| аммонийный         | -                        | 0,39                     |
| нитритов           | 0,8                      | 0,02                     |
| нитратов           | 10,2                     | 9,1                      |
| Фосфаты (Р)        | -                        | 0,2                      |

Механизм удаления и возможные предельные значения очистки представлены в табл. 5.2.

**Таблица 5.2.** Показатели биологической очистки сточных вод от общего азота и фосфора.

| Показатель                         | Механизм удаления | Предельное значение, мг/л |
|------------------------------------|-------------------|---------------------------|
| Общий азот:                        |                   |                           |
| N-NH <sub>4</sub>                  | Нитрификация      | <0,5                      |
| NO <sub>2</sub> (NO <sub>3</sub> ) | Денитрификация    | 1-2                       |
| инертный органический              | Илоразделение     | <1,0                      |

|                                                 |                                              |            |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------|
| растворенный органический<br>(небиоразлагаемый) | Нет                                          | 0,5-1,5    |
| Общий фосфор:                                   |                                              |            |
| растворенный                                    | Микробное потребление (химическое осаднение) | 0-1,0(0,1) |
| инертный                                        | Илоразделение                                | <0,05      |
|                                                 |                                              |            |

Основным технологическим документом для проектирования являются исходные данные, содержащих [76].

- нормативы, характеризующие технический уровень и эффективность очистки;
- количественные и качественные характеристики исходной сточной воды;
- описание технологических процессов обработки сточной воды; материальный и энергетический баланс технологического процесса очистки;
- основные технико-экономические показатели лучших отечественных и зарубежных аналогов в сравнимых условиях, атак-же данные по:
  - технологии переработки и утилизации образующихся отходов;
  - созданию систем водопользования с максимальным использованием оборотной воды;
  - защите окружающей среды от вторичного загрязнения;
  - безопасной эксплуатации очистных сооружений;
  - использованию прогрессивного оборудования;
  - автоматизации технологического процесса очистки.

При разработке оптимальной для данного объекта технологии очистки сточных вод от биогенных элементов следует руководствоваться следующими критериями:

- объем стоков, подвергаемых очистке, должен быть минимальным;
- выбор той или иной технологии очистки сточных вод должен строго увязываться со спецификой очищаемой воды и учитывать себестоимость уже существующих сооружений и технологий очистки, включая стоимость энергии, материалов, плату за загрязнение окружающей среды, стоимость сброса воды в городскую систему

водоотведения и пр.;

- аппаратурно-технологическое оформление стадий очистки осуществляется в соответствии с поставленной задачей и оценивается степенью реализации процесса в каждом конкретном случае.

Реализация биологической очистки с целью удаления биогенных элементов связана с решением следующих задач:

- расширение области применения (практически весь спектр азот- и фосфорсодержащих сточных вод в сочетании с органическими загрязнениями);
- устойчивое функционирование процессов при существенных колебаниях концентраций исходных загрязнений и неравномерности поступления воды;
- обеспечение стабильного качества очищенной воды на выходе из системы по мере стабилизации биоценоза активного ила;
- интенсификация процессов (повышение рабочих концентраций активного ила, увеличение окислительной мощности);
- минимизация образования избыточного активного ила, и, как следствие-упрощение технологии дальнейшей обработки и утилизации избыточного ила;
- повышение экологической чистоты технологических процессов и оборудования;
- повышение уровня автоматизации;
- переоснащение действующих очистных сооружений при минимальных затратах.

Цель реконструкции - повысить пропускную способность и эффективность очистки. При этом следует предусматривать расширение станции в пределах существующих площадей в вертикальном направлении с максимальным использованием существующих емкостных сооружений, сохраняя их прежнее технологическое назначение.

Наиболее распространенные стандартные конфигурации процессов биологического удаления азота и фосфора в аэротенках с рециркуляцией потоков иловой смеси и определенной последовательностью чередования зон обработки представлены на рис. 5.1.

Сравнительная оценка этих технологических схем показывает, что все описанные процессы содержат внутренние рециркуляционные контуры. При этом диапазон коэффициентов рециркуляции

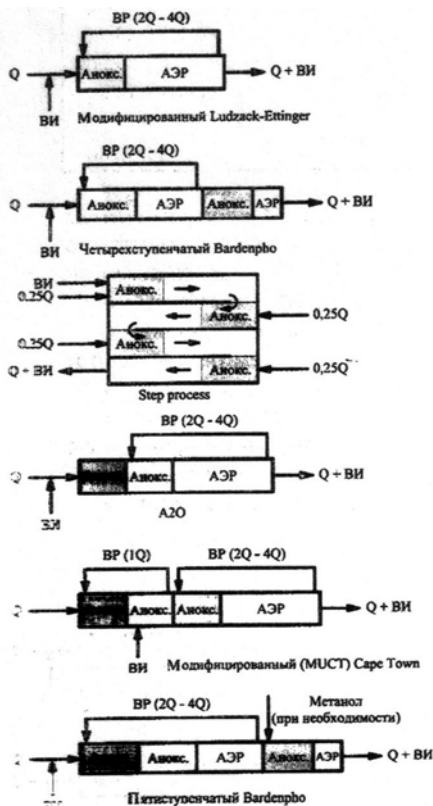
$K_R = (Q \pm Q_R) / Q$  определяет разницу между представленными рециркуляционными схемами ( $K_R = 1,5 \div 5$ ). Аэробные и анноксидные зоны являются родственными, поскольку содержат растворенный кислород, хотя и в различных формах: аэробные — в прямой форме, анноксидные — в связанной форме  $\text{NO}_2$  или  $\text{NO}_3$ .

Таким образом, рециркуляционные контуры стадии удаления азота могут быть реализованы (и реализуются на практике) с использованием рециркуляции по карусельному принципу как в циркуляционных окислительных каналах. В этом процессе осуществляется симультанная денитрификация, протекающая в одном и том же реакторе одновременно с переменной фаз аэрации (в аэробной зоне) и перемешивания (в анноксидной зоне) при  $K_R = 10 \div 400$ . Растворимый кислород в некоторых анноксидных зонах такого аэротенка практически отсутствует. В этих условиях процесс чувствителен к неравномерности притока и нагрузке. Но при использовании грамотного инжиниринга гидродинамики сооружения и системы автоматики чувствительность процесса легко компенсировать оперативным технологическим управлением "on-line".

Достоинство процесса симультанной денитрификации по карусельному принципу в его инженерной простоте, требующей, однако:

- ♦ грамотного инжиниринга базовой гидродинамики;
- ♦ оперативного технологического управления "on-line";
- ♦ наличия современного оборудования (погружных мешалок).

Необходимость использования погружных мешалок отличает все без исключения процессы, представленные на рис. 5.1., поскольку современные схемы и процессы требуют и современного оборудования.



**Рисунок 5.1.** Схемы процессов биологического удаления биогенных элементов ( $Q$  — расход сточных вод; ВИ — возвратный активный ил; ВР — внутренний рецикл иловой смеси; АЭР — аэробная зона, содержащая растворенный кислород; Анокс. — аноксичная зона, содержащая нитриты и нитраты; Анаэр. - анаэробная зона с выделением фосфора)

При проектировании задача не ограничивается областью расчетов кинетики процессов очистки. Учёт гидродинамической составляющей структуры потока является чрезвычайно важным аспектом технологической разработки проекта строительства и реконструкции очистных сооружений.

В 70-х гг. появились первые серийно производимые мешалки с двигателями погружного типа: высокооборотные (безредуктор-ные), низкооборотные (с редукторами) и высокопроизводительные низконапорные рециркуляционные насосы. Появление мешалок погружного типа, отличающихся способностью ориентировать гидравлические потоки в нужном направлении, "вдохнуло" новую жизнь в достаточно старое традиционное решение — аэротенки с продольной рециркуля-

цией иловой смеси по карусельному принципу (рис. 5.2.). Данная компоновка подразумевает разделение функциональных обязанностей между конструктивными элементами аэротенка: ввод кислорода осуществляется высокоэффективными современными аэраторами, а перемешивание — мешалками. Гидравлическая функция мешалки в данном случае основополагающая, поскольку она отвечает за массообмен в структуре биоочистки, а аэраторы являются лишь средством подачи кислорода воздуха в иловую смесь. В данном комбинированном сооружении аэраторы перестают отвечать за процессы поддержания активного ила во взвешенном состоянии.

Данное техническое решение экономит энергозатраты на аэрацию иловой смеси, которые являются самой затратной статьёй расходов.

Экономия энергозатрат обеспечивается благодаря зонной раскладке аэрационной системы во всю ширину коридора аэротенка и увеличению эффекта массопереноса при воздействии энергии горизонтального потока на зонную раскладку плети аэраторов.

К настоящему времени пневматические аэраторы конструктивно усовершенствовались и являются высокоэффективными мелкопузырчатыми диффузорами. Современная инженерная раскладка аэраторов также обусловлена необходимостью повышения эффективности растворения кислорода воздуха и КПД аэрации. Раскладка выполняется позонно в виде плетей и равномерно по ширине коридора.

В аэротенках с расположением аэраторов вдоль одной из стен коридора пузырьки вводятся в струю воды, скорость, которой в 2 — 3 раза выше скорости их движения. Вследствие этого время воздушного контакта уменьшается до  $1/3$  —  $1/4$  ожидаемой величины и в аэротенке глубиной 3 м составляет только 3 — 4 с вместо 10 — 12 с при соответственном снижении эффекта массопередачи.

В соответствии со СНиП (п. 6.151, табл. 42) [75] интенсивность аэрации (коэффициент  $K_1$ ) корректируется в зависимости от площадей аэрируемой зоны и аэротенка  $f_{az}/f_{at}$ , при этом она прямо пропорциональна  $f_{az}/f_{at}$ . Ниже показано влияние плотности раскладки аэраторов по днищу аэротенка на количество подаваемого воздуха (коэффициент  $K_{pa}$ ):

|                   |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $f_{az}/f_{at}$ . | 0,05 | 0,1  | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,75 |
| $K_1$             | 1,34 | 1,47 | 1,68 | 1,89 | 1,94 | 2    | 2,13 |
| $K_{pa}$          | 1    | 1,1  | 1,25 | 1,41 | 1,44 | 1,49 | 1,59 |

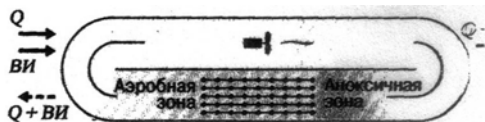
Начальное значение  $f_{az}/f_{at} = 0,05$  приведено к 1 (аэраторы занимают 5 % ширины коридора, вследствие чего происходит поперечное

перемешивание иловой смеси). При поперечном перемешивании иловой смеси в аэротенках общая скорость всплытия пузырьков воздуха  $V_{\text{общ}} = V_{\text{пуз}} + V_{\text{перем}}$  складывается из суммы скоростей всплытия собственно пузырьков воздуха и скорости поперечного перемешивания, что существенно уменьшает время контакта газовой фазы с жидкостью. В случае  $f_{\text{az}}/f_{\text{at}} = 1$  наблюдается равенство  $V_{\text{общ}} = V_{\text{пуз}}$ , скорость поперечного перемешивания  $V_{\text{перем}}$ , практически отсутствует, а время контакта с газовой фазой увеличивается.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: за счет увеличения времени контакта с газовой фазой и уменьшения доли массового продольного перемешивания воздухом удельный расход его в случае 100 %-ной раскладки аэраторов по днищу снижается на 72 %. Этот факт был известен и ранее, однако ни один из типовых проектов прежних лет не включал 100 %-ной раскладки пневматических аэрационных систем по днищу аэротенка.

Энергия горизонтального потока увеличивает эффект массопереноса при зонной раскладке аэраторов.

Таким образом, раскладка современных систем аэрации в условиях продольной рециркуляции иловой смеси является важным энергосберегающим технологическим решением.



**Рисунок 5.2.** Схема аэротенка с продольной рециркуляцией иловой смеси по «карусельному» принципу.

Разработка проводилась на базе приведенных выше данных. В качестве базового технического аналога был выбран типовый проект т.п. 902-2-179 аэротенков-вытеснителей ЦНИИЭП. При этом рабочая глубина блока биоочистки была принята 6 м вместо 5 м (поперечное сечение коридора 6х6 м) для увеличения эффективности аэрации в аэротенке. Это стало возможным благодаря тому, что использование современного воздухоудного оборудования позволяет размещать пневматические аэраторы на глубине до 12 м. Технологический расчет и анализ работы сооружений в условиях неравномерности исходных нагрузок по расходам и концентрациям проводился с привлечением математического моделирования биохимических процессов.

**Таблица 5.3.** Расчетные показатели исходных и очищенных сточных вод.

| Показатели                                                                                             | Исходные воды  | Очищенные воды   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------|
| Расход на одну секцию аэротен-                                                                         | 780; 1140; 480 | -                |
| ХПК, мг/л                                                                                              | 380; 513; 236  | 45; 61; 28       |
| БПК <sub>полн</sub> мг/л                                                                               | 153; 206; 95   | 10; 13,5; 6,2    |
| Взвешенные вещества, мг/л                                                                              | 166; 224; 103  | 11,9; 14; 9,54   |
| Аммонийный азот, мгN/л                                                                                 | 27; 36,4; 16,7 | 0,94; 1,18; 0,8  |
| Растворенные ортофосфаты,                                                                              | 3,7; 5,0; 2,3  | 2,05; 2,75; 1,2  |
| Щелочность, моль/м <sup>3</sup>                                                                        | 7; 9,5; 4,3    | -                |
| Нитраты, мгN/л                                                                                         | -              | 4,87; 5,09; 4,64 |
| <b>Примечание.</b> Приведены значения показателей: среднее, максимальное и минимальное соответственно. |                |                  |

Параметрами ввода данных являлись показатели реального проекта (табл. 5.3.) с учётом стандартного суточного графика неравномерности притока сточных вод по расходам/концентрациям, усреднённых среднестатистических параметров окисляемости (ХПК), а также параметров настройки расчетной модели в соответствии с величинами коэффи циентов. Параметры вывода данных включали соответственно не только усреднённые показатели очистки сточных вод, но и их почасовой диапазон разброса.

#### **Параметры учета окисляемое**

ХПК растворенным веществом, %:

инертным .....9

окисляемым..... 39

ХПК взвешенным веществом, %:

инертным ..... 15

окисляемым..... 37

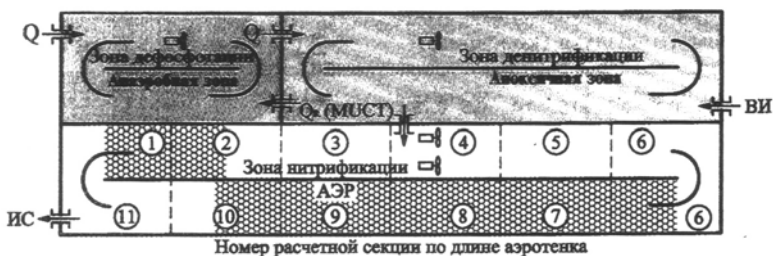
#### **Параметры настройки расчетной модели**

$N-NH_4/N_{общ}$  .....0,65

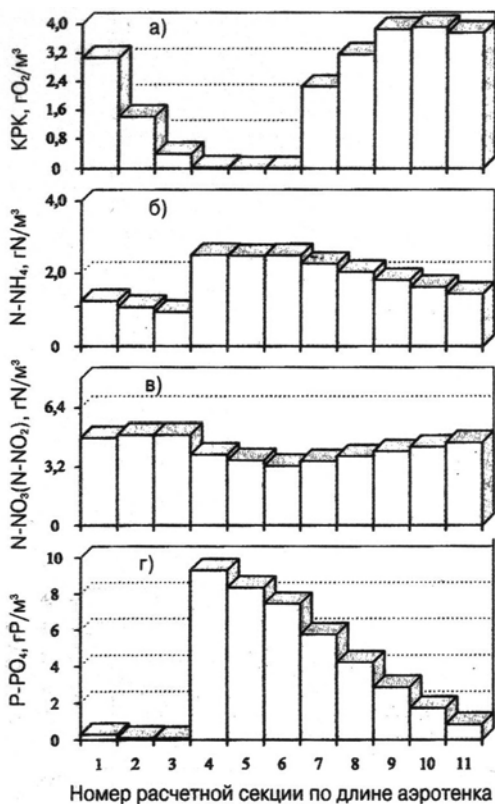
$N_{инерт}/N_{общ}$  ..... 0

$N_{орг}/N_{общ}$  ..... 0,9

Зольность ..... 0,25



**Рисунок 5.3.** Позонная схема комбинированного сооружения с условным делением зоны АЭР на секции-ячейки для математического моделирования процессов очистки по длине сооружения (ИС - иловая смесь)



**Рисунок 5.4.** Распределение показателей очистки по длине карусельной зоны нитрификации в соответствии с номерами расчетных секций (см. рис. 5.3.):

а — растворенный кислород; б — аммонийный азот; в — нитриты и нитраты; г — фосфор

Доза ила в процессе расчетов составила 2,5 г/л, иловый индекс с учетом опыта эксплуатации сооружений такого типа был принят 150 см<sup>3</sup>/г, возраст ила находился в пределах 15 — 17 сут,  $K_R$  составил для анаэробной зоны 3,0, для возвратного ила — 2,2. При этом расчет для вторичных отстойников проводился при низкой гидравлической нагрузке на "зеркало" — 1,25 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> по максимальному расходу. Расчет включал суточное оперативное управление параметром возврата активного ила в аэротенки в диапазоне от 885 до 960 м<sup>3</sup>/ч.

Таким образом, секция аэро-тенка размерами  $L = 114$  м,  $B = 24$  м,  $H = 6$  м содержит все основные признаки и отличия энергосберегающих технологий:

- карусельная анаэробная зона;
- карусельная аноксидная зона;
- карусельная зона нитрификации (аэробная зона);
- плотная раскладка аэраторов по ширине коридора.

В качестве аэраторов проектом предусматривается установка высокоэффективных дисковых мембранных диффузоров. Расчетное количество дисковых аэраторов принято 1460 ед. при плотности их раскладки 2, 3 диска на 1 м<sup>2</sup>. Удельный расход воздуха составил 5,5 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, а расчетный расход воздуха на один аэротенк — 4375 м<sup>3</sup>/ч. Данный расчет не включает оперативного управления подачей воздуха, хотя выбор аэраторов обоснован их способностью к технологическому управлению в диапазоне нагрузок по воздуху от 0 до 6 м<sup>3</sup>/(ч·диск) без кальматации аэрационной системы и роста сопротивлений на выходе. Дальнейшее снижение подачи воздуха и общего энергопотребления возможно на основе внедрения системы автоматического и технологического оперативного регулирования, а также воздуходувок с регулируемым направляющим аппаратом.

Согласно проекту принято на одну секцию аэротенка четыре мешалки горизонтального потока (4,3 кВт) и один рециркуляционный насос (5,5 кВт) в зону дефосфатации (анаэробную зону).

Позонная схема комбинированного аэротенка в соответствии с выбранным при расчете технологическим процессом приведена на рис. 5.3. Последние два коридора, организованные в довольно длинную зону продольного перемешивания, условно разбиты на расчётные секции (ячейки математической модели): 1, 2, ..., 11. Условное деление на зоны позволило наглядно представить показатели очистки по длине карусельной зоны нитрификации (рис. 5.4.) полученные в результате моделирования с использованием расчётной подосновы математической модели.

Расход иловой смеси в зоне продольного перемешивания по карусельному типу составляет  $\sim 38880 \text{ м}^3/\text{ч}$ , т.е. при исходном расходе  $Q = 780 \text{ м}^3/\text{ч}$   $K_R$  достигнет 50,8 ед. (вода за период очистки пройдёт через одну и ту же точку пятьдесят раз).

Однако из анализа рис. 5.4. совсем не следует вывод о том, что аэробная зона (последние два коридора, длина пробега 210 м) является ярко выраженным смесителем. Наоборот, в силу значительной длины наблюдаются существенные неравномерности распределения показателей КРК от 0,1 до  $3,8 \text{ г/м}^3$ ,  $\text{N-NH}_4$  от 0,8 до  $2,2 \text{ г/м}^3$ ,  $\text{N-NO}_3(\text{NO}_2)$  от 3,2 до  $5,2 \text{ г/м}^3$ ,  $\text{P-PO}_4$  от 0,2 до  $9,0 \text{ г/м}^3$  по длине.

Обращает на себя внимание критическая расчётная секция 4. Здесь осуществляется впуск вод, прошедших очистку в анаэробной и аноксидной зонах. Именно в этой секции КРК начинает падать до минимума, резко до максимума возрастают  $\text{N-NH}_4$  и  $\text{P-PO}_4$ , начинает снижаться  $\text{N-NO}_3$ . Вследствие подачи нагрузки в секцию 4 КРК в секциях 4—6 падает до минимальных значений и наблюдаются процессы денитрификации. Некоторое расхождение расчетных показателей очистки и секции 11 (см. рис. 5.4.) является закономерным, поскольку на рисунке представлено распределение концентраций по длине комбинированного сооружения в Статических условиях, а в табл. 5.3. — при динамических суточных колебаниях и совпадении пиков во времени.

Следовательно, по характеру распределения концентраций данное сооружение (вытеснитель с рециркуляцией) одновременно сочетает в себе достоинства, как смесителя, так и вытеснителя.

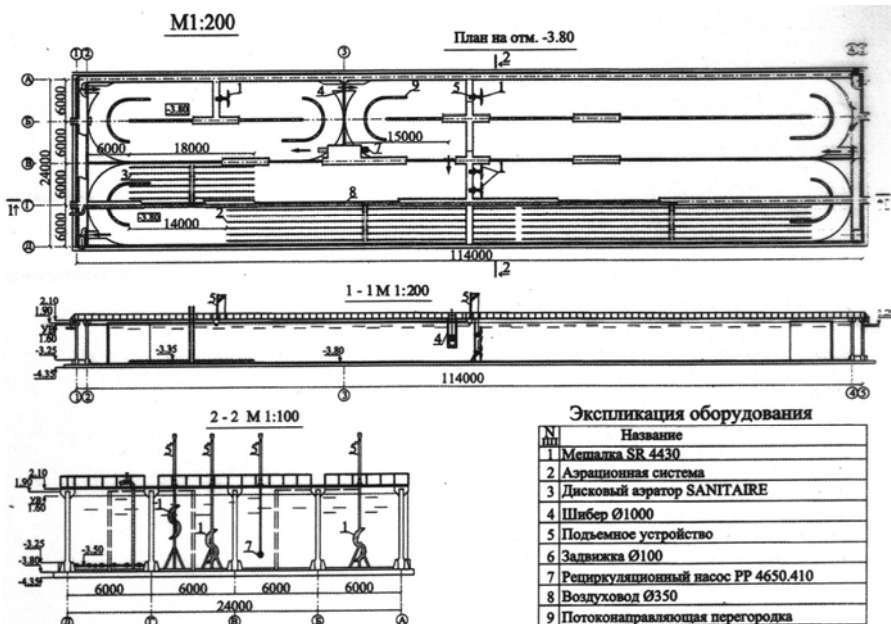


Рисунок 5.5. Типовой проект крупных сооружений биологической очистки сточных вод.

Иловая смесь поступает во вторичные отстойники из секции II. Работа сооружений доочистки детально в настоящей работе не рассматривалась. Однако как вариант предложена ре-агентная обработка, позволяющая поддерживать остаточные концентрации фосфатов P-P0<sub>4</sub> в очищенных водах на стабильном уровне 0,2 мг/л. Для этого рассчитывался ввод коагулянта в управляемом суточном режиме лозой от 3,9 до 8,3 мг Fe<sup>3+</sup>/л, что обеспечивало повышение эффективности удаления фосфора от 80 до 93 %.

Разработанный типовой проект крупных сооружений биологической очистки сточных вод представлен на рис. 5.5. Проект включает энергосберегающий комплекс мероприятий, заключающийся в широком использовании средств рециркуляции иловой смеси.

## Глава 6. Расчет сооружений для удаления биогенных элементов.

*Существует триада: бедная почва, грязная вода, нездоровые люди. Необходимо разрывать связи в этой цепи или удалять два первых элемента этой триады, или мы исчезнем с этой планеты.*

*«Вода и здоровье – 98», научн.-техн. сборник.*

Процесс глубокой нитрификации сточных вод, содержащих  $\text{NH}_4^+$ , независимо от исходной концентрации аммонийного азота эффективно протекает в аэротенках-смесителях при соблюдении строго определенного возраста активного ила, который для различных условий может измениться от 5 до 70 и более сут. При осуществлении процесса нитрификации в отсутствие или недостатке органического субстрата для построения биомассы нитрифицирующих микроорганизмов требуется искусственная добавка источников неорганического углерода в виде  $\text{HCO}_3^-$  или  $\text{CO}_2$  из расчета 2 мг-экв на 1 мг-экв окисленного аммонийного азота.

Оптимальная величина рН для нитрифицирующих микроорганизмов составляет 8,4, оптимальная температура 30°C. При температуре менее 30°C наблюдается снижение скорости нитрификации. Процесс нитрификации может осуществляться как в присутствии органических веществ, так и в их отсутствии. Особое внимание следует обратить на присутствие в сточных водах веществ, тормозящих или полностью ингибирующих нитрификацию, в частности свободного аммиака и тяжелых металлов.

Для удаления из воды окисленных форм азота ( $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$ ) осуществляют денитрификацию, т. е. восстановление нитритов и нитратов до молекулярного азота. Этот процесс может быть реализован при наличии в воде определенного количества органического субстрата, окисляемого сапрофитными микроорганизмами до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  за счет кислорода азотсодержащих соединений. При денитрификации обеспечивается очистка сточных вод одновременно от биологически окисляемых органических соединений и от соединений азота ( $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$ ). Наиболее эффективно процесс денитрификации протекает при рН=7—7,5, при рН выше 9 и ниже 6 процесс затормаживается.

В качестве органического субстрата в процессе денитрификации могут быть использованы любые биологически окисляемые органические соединения (углеводы, спирты, органические кислоты, продукты

распада белков, избыточный активный ил и т.д.). Источником углеродного питания при очистке сточных вод методом денитрификации могут быть исходные или прошедшие очистку в первичных отстойниках сточные воды, а также органосодержащие производственные сточные воды, предпочтительно не содержащие аммонийного, органического и белкового азота.

Необходимое соотношение величины БПК в сточных водах к нитратному азоту ориентировочно равно 4: 1.

Для процессов нитрификации и денитрификации могут быть использованы обычные сооружения биологической очистки: аэротенки и биофильтры.

При удалении соединений азота из сточных вод могут применяться различные схемы ОЧИСТКИ: одностадийные, двух- или трехстадийные. В каждой схеме процесс денитрификации может осуществляться в начале, середине или конце сооружения, с искусственной добавкой субстрата (например, метанола) или с использованием субстрата сточных вод, с проведением процесса денитрификации в аэробных или анаэробных условиях, с дополнительной рециркуляцией иловой смеси в начало резервуара из его конца или из вторичного отстойника, а также из одной ступени в другую. Во всех схемах на завершающей стадии устраивают, как правило, аэрацию иловой смеси продолжительностью не менее 1—2 ч для отдувки газообразного азота и более глубокого окисления аммонийного азота. Для удаления из сточных вод соединений азота возможно применение специально разработанных для этих целей сооружений типа циркуляционных каналов, в которых создаются аэробные и анаэробные участки за счет рассредоточенного расположения поверхностных механических аэраторов. Возможно осуществление процесса в аэротенке—смесителе при попеременном (циклическом) аэрировании и перемешивании иловой смеси в течение короткого времени (1—1,5 ч) при соблюдении необходимого времени пребывания сточной жидкости в сооружении. Для перемешивания иловой смеси могут быть использованы лопастные мешалки с горизонтальной или вертикальной осью вращения, гидравлическое перемешивание, а также перемешивание воздухом с малой интенсивностью, подаваемым дырчатыми трубами или открытыми стояками.

При отсутствии токсичных загрязнений (особенно для нитрификации) могут применяться секционированные вытеснители с последовательно работающими аэробными и анаэробными секциями и

подачей в секции денитрификации соответствующего количества органического субстрата или исходной сточной жидкости.

Аэротенки — нитрификаторы целесообразно применять при отсутствии в сточных водах посторонних органических примесей, например, дренажных вод жидкостей из накопителей производственных отходов, содержащих  $\text{NH}_4^+$ . Для поддержания стабильной очистки не допускается суточное изменение концентрации  $\text{N}—\text{NH}_4^+$  в поступающей жидкости более  $\pm 5\%$ . Процесс нитрификации следует осуществлять в аэротенке-смесителе при невысокой степени очистки воды ( $2—4 \text{ мг N}—\text{NH}_4^+/\text{л}$  очищенной воды).

При расчете процессов нитрификации сточных вод необходимо вначале определить минимальный возраст активного ила, при котором обеспечивается требуемая остаточная концентрация аммонийного азота.

Ориентировочно концентрацию нитрифицирующего ила при требуемом его возрасте следует определять по табл. 6.1. в которой представлены данные по количеству нитрифицирующих микроорганизмов ( $a_{is}$ , г/л) при количестве окисленного аммонийного азота ( $\Delta C_n$ )  $20 \text{ мг N}—\text{NH}_4^+/\text{л}$  за 24-часовой период обработки воды при температуре  $20^\circ\text{C}$ , а также данные по приросту ила и удельной скорости окисления аммонийного азота. При других количествах окисленного аммонийного азота  $\Delta C_n$  и продолжительности очистки  $t$  дозу нитрифицирующего ила следует определять по формуле  $a_{in} = 1.2 \cdot a_{is} \frac{\Delta C_n}{t}$ .

Таблица 6.1.

| Прирост ила,<br>мг/мг $\text{N}—\text{NH}_4$ | Возраст ила,<br>Т, сут | Концентрация<br>микроорга-<br>низмов,<br>$a_{is}$ , г/л | Удельная ско-<br>рость<br>окисления $\rho$ ,<br>мг/(г,ч) |
|----------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 0,17                                         | 5                      | 0,017                                                   | 49,0                                                     |
| 0,17                                         | 10                     | 0,034                                                   | 24,5                                                     |
| 0,16                                         | 15                     | 0,048                                                   | 17,4                                                     |
| 0,138                                        | 20                     | 0,055                                                   | 15,2                                                     |
| 0,09                                         | 25                     | 0,048                                                   | 17,4                                                     |
| 0,055                                        | 30                     | 0,033                                                   | 25,2                                                     |
| 0,03                                         | 35                     | 0,021                                                   | 39,7                                                     |
| 0,02                                         | 40                     | 0,016                                                   | 52,1                                                     |
| 0,048                                        | 50                     | 0,048                                                   | 17,4                                                     |
| 0,044                                        | 60                     | 0,053                                                   | 15,7                                                     |
| 0,018                                        | 70                     | 0,025                                                   | 33,3                                                     |

Минимальное время обработки в аэротенке-смесителе сточных вод, не содержащих органических веществ, 10—12 ч. Вынос нитрифицирующего ила из вторичных отстойников должен быть не более 20 мг/л, т.е. его прирост должен быть не менее этой величины, с целью сохранения нитрифицирующего ила в системе.

Для более эффективного, задержания нитрифицирующего ила целесообразно размещение тонкослойных блоков в конце аэротенков.

Следует отметить, что вследствие весьма малой скорости роста нитрифицирующих микроорганизмов существует критическая минимально возможная суммарная концентрация аммонийного и органического азота  $C_{nen\ min}$  в поступающей воде, ниже которой осуществление процесса нитрификации в аэротенке с заданным эффектом становится практически невозможным из-за ограничений работы вторичных отстойников при возврате в нитрификатор необходимого количества нитрифицирующего ила.

Минимальная допустимая концентрация  $C_{nen\ min}$  при заданном возрасте ила  $T$  в зависимости от допустимого выноса нитрифицирующего ила из вторичных отстойников  $a_b$ , мг/л, определяется выражением

$$C_{nen\ min} = 0,02a_b T/a_{is}. \quad (2)$$

Для обеспечения эффективной нитрификации аммонийного азота при меньших начальных его концентрациях целесообразно вводить дополнительное количество неконсервативных легкоокисляемых органических веществ, например, метанола или неочищенной бытовой сточной жидкости.

Процесс нитрификации следует осуществлять при оптимальном значении рН, равном 8,4. При других значениях рН и той же температуре удельные скорости снижаются. Приведем значения  $K_{pH}$  при различных величинах рН:

|               |      |      |     |     |      |     |      |
|---------------|------|------|-----|-----|------|-----|------|
| рН . . . .    | 6    | 6,5  | 7   | 7,5 | 8    | 8,4 | 9    |
| $K_{pH}$ .... | 0,15 | 0,31 | 0,5 | 0,6 | 0,87 | 1   | 1,23 |

В общем случае при расчете аэротенков с нитрификацией сточных вод необходимо знание удельной скорости роста нитрифицирующих микроорганизмов, которая зависит от рН и температуры жидкости, концентрации растворенного кислорода в иловой смеси и аммонийного азота в очищенной жидкости, а также от наличия токсичных для нитрификации компонентов.

Удельная скорость роста нитрификаторов  $\mu_n$ , сут<sup>-1</sup>, определяется по формуле

$$\mu_n = K_{pH} K_T K_{oc} K_c \mu_{\max} N / (K_n + N), \quad (3)$$

где  $K_T$  — коэффициент, учитывающий влияние pH;

$K_{oc}$  — коэффициент, учитывающий влияние температуры жидкости;

|             |      |      |     |      |     |
|-------------|------|------|-----|------|-----|
| °C. ....    | 10   | 15   | 20  | 25   | 30  |
| $K_T$ ..... | 0,32 | 0,56 | 1,0 | 1,79 | 3,2 |

$K_{oc}$  — коэффициент, учитывающий влияние концентрации растворенного кислорода, который определяется по формуле

$$K_{oc} = C_o / (K_o + C_o), \quad (4)$$

$K_c$  — коэффициент, учитывающий влияние токсичных компонентов; ( $\mu_{\max}$  — максимальная скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов, равная 1,77 сут<sup>-1</sup> при pH=8,4 и температуре 20°C;  $K_n$  — константа полунасыщения, мг N — NH<sub>4</sub>/л;  $N$  — концентрация аммонийного азота в очищенной жидкости.

$C_o$  — концентрация растворенного кислорода в иловой смеси, мг/л;  $K_o$  — константа полунасыщения, равная 2мгO<sub>2</sub>/л. Коэффициент  $K_c$  определяется по формуле

$$K_c = J / (J + C_i), \quad (5)$$

где  $C_i$  — концентрация ингибитора, мг/л;

$J$  — константа полунасыщения, мг ингибитора/л,

Минимальный возраст нитрифицирующего ила  $\theta$  определяется по формуле

$$\theta = 1/\mu. \quad (6)$$

Удельная скорость окисления органических веществ  $\rho$ , мг/(г·ч), определяется по формуле

$$\rho = K_3 + 0,0417 K_p / \theta, \quad (7)$$

где  $K_3$  — энергетический физиологический коэффициент, мгБПК<sub>полн</sub>/(г·ч);  $K_p$  — физиологический коэффициент роста микроорганизмов активного ила, мгБПК<sub>полн</sub>/г;  $\theta$  — возраст ила, сут.

Для городских сточных вод

$$K_3 = 3,7 \text{ мгБПК}_{\text{полн}}/(\text{г}\cdot\text{ч}); \quad K_p = 864 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/\text{г}.$$

Концентрация беззольной части активного ила  $a_i$  определяется из формулы (49) СНиП 2.04.03—85, где для городских сточных вод  $\rho_{\max} = 70 \text{ мгБПК}_{\text{полн}}/(\text{г}\cdot\text{ч})$ ;  $K_i = 65 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/\text{л}$ ,  $\varphi = 0,14 \text{ л/г}$ ;  $K_o = 0,625 \text{ мг/л}$ .

Продолжительность пребывания сточных вод в аэротенке  $t_{\text{атм}}$  с нитрификацией аммонийного азота определяется по формуле

$$t_{\text{атм}} = (L_{\text{en}} - L_{\text{ex}}) / a_i \rho, \quad (8)$$

Удельный прирост активного ила  $K_g$ , мг/(мг·БПК<sub>полн</sub>), определяется по формуле

$$Kg = 41,7 a t_{atm} / (L_{en} - L_{ex}) \Theta, \quad (9)$$

где  $a$  — концентрация ила по сухому веществу, г/л.

Суточное количество избыточного ила  $u$ , кг/сут, составляет

$$G = Kg (L_{en} - L_{ex}) Q / 1000. \quad (10)$$

#### *Пример расчета аэротенка-нитрификатора*

Исходные данные: расход сточных вод  $Q=12\,000\text{ м}^3/\text{сут}$ ; содержание аммонийного азота в исходной воде  $C_{\text{nen}}=150\text{ мг/л}$ , в очищенной воде  $C_{\text{nex}}=3\text{ мг/л}$ ; температура  $20^\circ\text{C}$ ; значение  $\text{pH}=8,4$ ; концентрация растворенного кислорода равна  $4\text{ мг/л}$ .

По формуле (3) определяется удельная скорость роста нитрификаторов  $\mu$ ,  $\text{сут}^{-1}$ ;

$$\mu = 1 \cdot 1 \frac{4}{2 + 4} 1 \cdot 1,77 \frac{3}{25 + 3} = 0,126$$

Минимальный возраст ила находим из уравнения (6)

$$\theta = 1/0,126 = 7,93\text{ сут.}$$

Принимается  $\theta = 8\text{ сут.}$

Затем определяем концентрацию нитрифицирующего ила  $a_{is}$ . При возрасте ила  $\theta = 8\text{ сут.}$ ,  $a_{is} = 0,03\text{ г/л}$ . Удельная скорость нитрификации по табл. 19 составит  $34,5\text{ мг/(г}\cdot\text{ч)}$ .

По формуле (2) определяется минимально допустимая концентрация аммонийного азота в поступающей жидкости  $C_{\text{nen min}}$  при задаваемом выносе ила из вторичных отстойников  $C_t=20\text{ мг/л}$ ;

$$C_{\text{nen min}} = 0,02 \frac{20 \cdot 8}{0,03} = 107\text{ мг/л,}$$

т. е. меньше исходной величины, которая равна  $150\text{ мг/л}$ .

Общую дозу ила следует определять исходя из минимального периода аэрации для аэротенков-смесителей, равного  $10\text{ ч}$ . Из уравнения (1), доза нитрифицирующего ила

$$a_i = \frac{1,2 \cdot 0,03 \cdot (150 - 3)}{10} = 0,53\text{ г/л.}$$

Объем нитрификаторов

$$W_n = Qt/24 = \frac{12000 \cdot 10}{24} = 5000\text{ м}^3.$$

Гидравлическая нагрузка на вторичные отстойники определяется по формуле (67) п. 1.161 СНиП 2.04.03—85.

*Пример расчета аэротенка-нитрификатора в присутствии био-разлагаемых органических веществ*

Исходные данные: расход сточных вод  $48\,000\text{ м}^3/\text{сут}$ ; БПК сточных вод  $L_{\text{en}} = 150\text{ мг/л}$ ; аммонийный азот  $C_{\text{nen}} = 50\text{ мг/л}$ ;

в очищенной воде ( $L_{ex}=8$  мг/л); концентрация  $C_{пex}=2$  мг/л; температура жидкости  $20^{\circ}\text{C}$ ; концентрация кислорода в аэротенке — 2 мг/л;  $\text{pH}=7,8$ .

Характер органических загрязнений аналогичен городским сточным водам. Значения констант при окислении органических веществ и обеспечении глубокой нитрификации:

$$\rho_{\max}=70 \text{ мг БПК}_{\text{полн}}/\text{г}\cdot\text{ч}; \quad K_1 = 65 \text{ мг/л};$$

$$\varphi=0,14 \text{ л/ч}; \quad K_O = 0,625 \text{ мг/л}.$$

По формуле (3) находим  $\mu$

$$\mu = 1 \cdot 0.78 \frac{2}{2+2} 1 \cdot 1.77 \frac{2}{25+2} = 0.051 \text{ сут}^{-1}$$

Минимальный возраст ила по формуле (6)  $1/\mu = 1/0,051 = 19,6$  сут.

Удельная скорость окисления органических веществ определяется по формуле (7)

$$\rho = 3,7 + (864 - 0,0417)/19,6 = 5,54 \text{ мг}\cdot\text{БПК}_{\text{полн}}/(\text{г}\cdot\text{ч}).$$

По формуле (49) п. 6.143 СНиП 2.04.03—85, зная  $\rho$ , находим концентрацию беззольной части активного ила при  $L_{ex}=8$  мг/л

$$5.54 = 70 \frac{8 \cdot 2}{8 \cdot 2 + 65 \cdot 2 + 0.625 \cdot 8} \frac{1}{1 + 0.14 a_i};$$

$$5,54 + 5,54 \cdot 0,14 a_i = 7,41; \quad a_i = \frac{7,41 - 5,54}{5,54 \cdot 0,14} = 2,42 \text{ г/л}.$$

Продолжительность аэрации сточных вод  $t_{atm}$ , ч, а аэротенке-смесителе с нитрификацией аммонийного азота определяется по формуле (8)

$$t_{atm} = \frac{150 - 8}{2.42 \cdot 5.54} = 10.6$$

Концентрация нитрифицирующего ила в иловой смеси при возрасте ила 19,6 сут определяется по данным табл. 6,1 с использованием формулы (1)

$$a_{in} = 1.2 \cdot 0.055 \frac{50 - 2}{10.6} = 0.3 \text{ г/л}$$

Общая концентрация беззольного ила в иловой смеси аэротенков составляет  $a_i + a_m = 2,42 + 0,3 = 2,72 \text{ г/л}$ , с учетом 30% зольности доза ила по сухому веществу составит  $a = 2,72/0,7 = 3,88 \text{ г/л}$ .

Удельный прирост избыточного ила  $K_g$  определится по формуле

$$K_g = \frac{4.17 \cdot 3.88 \cdot 10.6}{(150 - 8)19.6} = 0.62 \text{ мг}/(\text{мг} \cdot \text{БПК}_{\text{полн}})$$

Суточное количество избыточного ила по формуле 10,

$$G = \frac{0.62 \cdot (150 - 8) \cdot 48000}{1000} = 4226 \text{ кг/сут}$$

Объем аэротенков-нитрификаторов

$$W = \frac{48000 \cdot 10.6}{24} = 21200 \text{ м}^3$$

Расход подаваемого воздуха рассчитывается по формуле (61) п. 6157 СНиП 2.04.03—85 с учетом дополнительного слагаемого в числителе

$$1,1 (C_{\text{нен}} - C_{\text{пex}}) 4,6.$$

*Расчет денитрификатора*

В качестве денитрификаторов могут применяться как смесители, так и вытеснители. Для осуществления процесса дени-трификации в качестве источника углерода в сточные воды искусственно добавляют биологически неконсервативные органические вещества (метанол, органические кислоты и т. д.) или исходные сточные воды из расчета 3—6 мг БПК на 1 мг N—NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

Расчет продолжительности процесса в реакторе-смесителе осуществляются по формуле (48) п. 6.143 СНиП 2.04.03—85.

Удельная скорость  $\rho^{\text{dn}}$ , мг/(г·ч), денитрификации рассчитывается по формуле

$$\rho^{\text{dn}} = \rho_{\text{max}}^{\text{dn}} \left( \frac{L_{\text{ex}}^{\text{dn}}}{L_{\text{ex}}^{\text{dn}} + K_{\text{dn}}} \right) \left( \frac{1}{1 + \varphi_{\text{dn}} a_i^{\text{dn}}} \right) \quad (11)$$

Продолжительность пребывания в смесителе, ч:

$$t_{\text{atm}} = \frac{(L_{\text{en}}^{\text{dn}} - L_{\text{ex}}^{\text{dn}})}{a_i^{\text{dn}}(1 - \alpha)\rho^{\text{dn}}} \quad (12)$$

в вытеснителе

$$t_{\text{atm}} = \left[ (L_{\text{en}}^{\text{dn}} - L_{\text{ex}}^{\text{dn}}) + 2.3 K_{\text{dn}} l g \frac{L_{\text{en}}^{\text{dn}}}{L_{\text{ex}}^{\text{dn}}} \right] \frac{1 + \varphi_{\text{dn}} a_i^{\text{dn}}}{\rho_{\text{max}}^{\text{dn}} a_i^{\text{dn}}} \quad (13)$$

Значения кинетических констант принимаются по данным табл.

6.2.

Таблица 6.2.

| Вид суб-<br>страта | $\rho_{\text{max}}^{\text{dn}}$ , мг N-NO <sub>3</sub> /(г·ч) | $k_{\text{dn}}$ , мг N-<br>NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /л | $\varphi_{\text{dn}}$ , л/г |
|--------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Метанол            | 58,8                                                          | 40                                                         | 0,19                        |
| Этанол             | 44,9                                                          | 25                                                         | 0,17                        |

Во всех случаях после денитрификации перед отстойниками необходима аэрация иловой смеси в течение 0,5—1ч для отдувки газообразного азота.

#### *Пример расчета денитрификатора*

Исходные данные; расход сточных вод  $q_w = 48\,000\text{ м}^3/\text{сут}$ ; концентрация нитратного азота 20 мг/л; углеродный субстрат— метанол; концентрация азота в очищенной воде — 9,1 мг/л; иловой индекс—100 см<sup>3</sup>/г, зольность ила —0,3.

Предельная доза денитрифицирующего ила при  $J_i=100\text{ см}^3/\text{г}$  составляет

$$a_{\text{imax}}^{\text{dn}} = 0,3 \cdot 1000/100 = 3\text{ г/л.}$$

Удельная скорость денитрификации  $\rho^{\text{dn}}$ , мг/(г·ч.), в смесителе по формуле (11)

$$\rho^{\text{dn}} = 58,8 \frac{9,1}{40 + 9,1} \cdot \frac{1}{1 + 0,19 \cdot 3} 6,94$$

Продолжительность пребывания в денитрификаторе  $t_{\text{atm}}$ , ч, по формуле (12)

$$t_{\text{atm}} = (30 - 9,1)/3(1 - 0,3)6,94 = 1,43.$$

$$\text{Объем реактора } W_{\text{dn}} = 48\,000 - 1,43/24 = 2860\text{ м}^3.$$

Для создания анаэробных условий перемешивание иловой смеси в денитрификаторе осуществить механическими лопастными мешалками или гидравлическим способом.

#### *Денитрификатор с фиксированной загрузкой*

В качестве загрузки допускается использовать кварцевый песок, гравий, рулонную пластмассу, стекловолокно, а также другие материалы, обладающие высокоразвитой поверхностью и стойкостью к биологическим воздействиям.

При концентрации азота нитратов в поступающей воде менее 50 мг/л рекомендуется устанавливать каркасно-засыпные денитрификаторы; для диапазона концентраций  $50 < \text{N} - \text{NO}_3^- < 100$  — гравийные денитрификаторы. При содержании азота нитратов в исходной воде более 100 мг/л — пленочные и денитрификаторы с загрузкой из стекловолокна типа «ерш».

Расчет денитрификаторов с фиксированной загрузкой, работающих в затопленном режиме, производится по формуле

$$t_{bf}^{\text{dn}} = \left[ (C_{\text{en}}^{\text{dn}} - C_{\text{ex}}^{\text{dn}}) + K_d K_{\text{dn}} \ln \frac{C_{\text{en}}^{\text{dn}}}{C_{\text{ex}}^{\text{dn}}} \right] \frac{1 + \varphi_{\text{dn}} \cdot a_i^{\text{dn}}}{\rho_{\text{max}}^{\text{dn}} a_i^{\text{dn}}} \quad (14)$$

где  $t_{bf}^{dn}$  — время контакта, ч;  $C_{en}^{dn}$  — концентрация азота нитратов в исходной воде, мг/л;  $C_{ex}^{dn}$  — концентрация азота нитратов в очищенной воде, мг/л;  $K_d$  — экспериментальный коэффициент, по табл. 6.3.;  $K_{dn}$  — константа Михаэлиса-Ментен, мг/л;  $\varphi_{dn}$  — коэффициент ингибирования процесса денитрификации продуктами метаболизма активного ила, л/г;  $\rho_{max}^{dn}$  — максимальная удельная скорость восстановления азота, нитратов, мг N—NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/(г·ч) и  $a_i^{dn}$  — концентрация денитрифицирующего ила, г/л.

Для денитрификации с использованием в качестве углеродного субстрата метанола и этанола значения кинетических констант  $K_{dn}$ ,  $\varphi_{dn}$ ,  $\rho_{max}^{dn}$  — установлены экспериментально и определяются по табл. 6.2 и 6.3

Таблица 6.3.

| Конструкция денитрификатора | Экспериментальный коэффициент $K_d$ | Конструкция денитрификатора | Экспериментальный коэффициент $K_d$ |
|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Каркасно-засыпной           | 0,89                                | Гравийный                   | 0,83                                |
|                             |                                     | Пленочный                   | 0,81                                |

Доза денитрифицирующего ила в сооружении зависит от концентрации азота нитратов в исходной воде и необходимой степени очистки. Для расчетов принимаются средние значения  $a_i^{dn}$  в соответствии с данными табл. 6.4.

Таблица 6.4.

| Концентрация азота нитратов в исходной воде, мг/л | Средняя концентрация денитрифицирующего ила, г/л. при концентрации азота нитратов в очищенной воде, мг/л |     |     |      |      |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|
|                                                   | 10                                                                                                       | 20  | 30  | 40   | 50   |
| 50                                                | 1,0                                                                                                      | 2,0 | 2,5 | 3,5  | —    |
| 100                                               | 1,5                                                                                                      | 2,5 | 3,5 | 5,0  | 7,6  |
| 200                                               | 2,0                                                                                                      | 3,5 | 5,5 | 7,5  | 10,0 |
| 300                                               | 2,5                                                                                                      | 4,0 | 6,0 | 9,0  | 14,0 |
| 400                                               | 3,0                                                                                                      | 5,0 | 7,0 | 14,0 | 20,0 |

Объем рабочей части сооружения, заполненного загрузкой, подсчитывается как произведение

$$q_w t_{bf}^{dn} \quad (15)$$

где  $q_w$  — расход нитратсодержащих сточных вод, м<sup>3</sup>/ч.

Расчетные параметры денитрификаторов с фиксированной загрузкой следует принимать по табл.

Регенерацию загрузки каркасно-засыпного и гравийного денитрификаторов следует осуществлять обратным током исходной или очищенной воды.

### **Пример расчета денитрификатора с фиксированной загрузкой**

Исходные данные: расход сточных вод  $q_m=200 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; концентрация азота нитратов в поступающей воде—  $300 \text{ мг/л}$ ; углеродный субстрат — этанол; концентрация азота нитратов в очищенной воде—  $10 \text{ мг/л}$ ; конструкция денитрификатора —с загрузкой из стекловолокна.

Время контакта сточных вод  $t_{bf}^{dn}$ , ч, с загрузкой определяется по формуле (14).

$$t_{bf}^{dn} = \left[ 300 - 10 + 0.6 \cdot 25 \ln \frac{300}{10} \right] \frac{1 + 0.17 \cdot 2.5}{44.9 \cdot 2.5} = 4.4$$

$$\text{Объем загрузки } W_{tf}^{dn} = 200 \cdot 4.4 = 880 \text{ м}^3$$

### **Примеры расчета реконструированного аэротенка.**

Рассчитать объем аэротенка для очистки городских сточных вод с повышенным содержанием азотсодержащих соединений при следующих исходных данных:

Расход сточных вод  $50\,000 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;

БПК<sub>н</sub> поступающих вод  $L_{en} = 200 \text{ мг/л}$ ;

БПК<sub>н</sub> очищенных стоков  $L_{ex} = 15 \text{ мг/л}$ ;

Среднегодовая температура сточных вод  $15^\circ\text{C}$

Количество взвешенных веществ в поступающей воде  $C_{cdp} = 150 \text{ мг/л}$ .

Принимаем к расчету аэротенк-вытеснитель с регенератором с предвключенной денитрификацией.

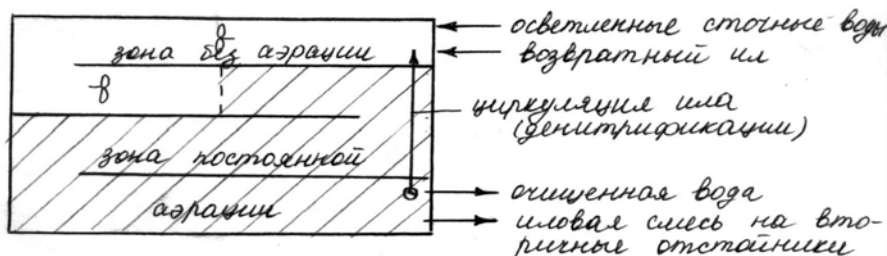


Рисунок 6.1. Схема реконструированного аэротенка с предвключенной денитрификацией.

Период аэрации в аэротенках-вытеснителях:

$$t_{atv} = \frac{1 + \varphi a i}{\rho_{max} c_o a i (1 - s)} \left[ (c_o + k_o)(L_{mix} - L_{ex}) + k_l c_o \ln \frac{L_{en}}{L_{ex}} \right] K_{p,r}$$

$K_{p,r}$  – коэффициент, учитывающий влияние продольного перемешивания:  $K_{p,r} = 1,5$  при биологической очистке до  $L_{ex} = 15$  мг/л;

$L_{mix}$  – БПК<sub>n</sub>, определяемая с учетом разбавления рециркуляционным расходом:

$$L_{mix} = \frac{L_{en} + L_{ex}(Ri + Rd)}{1 + Ri + Rd}, \text{ мг/л}$$

$Ri$  – степень рециркуляции активного ила:

$$Ri = \frac{a i}{\frac{1000}{Ii} - a i}$$

$Rd$  – степень циркуляции денитрификации (по исследованиям лабораторий можно принимать до 0,5)

$a i$  – доза ила в аэротенке:  $a i = 2$  г/л

$Ii$  – иловый индекс, см<sup>3</sup>/г. Принимаем  $Ii = 100$  см<sup>3</sup>/г.

$$Ri = \frac{2}{\frac{1000}{100} - 2} = 0.25$$

$$L_{mix} = \frac{200 + 15(0.25 + 0.3)}{1 + 0.25 + 0.3} = 134 \text{ мг/л}$$

$C_o$  – концентрация растворенного кислорода:  $C_o = 3$  мг/л

$K_l$  – константа, характеризующая свойства органических загрязняющих веществ (таб. 40, СНиП)

$K_l = 33$  мг БПК<sub>n</sub>/л

$K_o$  – константа, характеризующая влияние кислорода (табл. 40, СНиП)

$K_o = 0,625$  мгО<sub>2</sub>/л

$\varphi$  – коэффициент ингибирования продуктами распада активного ила (табл. 40 СНиП)

$$\varphi = 0,07$$

$\rho_{\max}$  – максимальная скорость окисления мг/г·час (табл. 40 СНиП)

$$\rho_{\max} = 85 \text{ мг БПК}_n/\text{г} \cdot \text{час}$$

$$t_{atv} = \frac{1 + 0,07 \cdot 2}{85 \cdot 3 \cdot 2(1 - 0,3)} \left[ (3 + 0,625)(134 - 15) + 33 \cdot 3 \ln \frac{200}{15} \right] 1,5 = 3,3 \text{ часа}$$

Продолжительность окисления органических загрязняющих веществ:

$$t_0 = \frac{L_{en} - L_{ex}}{(Rd + Ri)a_r(1 - S)\rho_r}$$

$a_r$  – доза ила в регенераторе:  $a_r = 5 \text{ г/л}$

$\rho_r$  – удельная скорость окисления при дозе ила  $a_r$ :

$$\begin{aligned} \rho_r &= \rho_{\max} \frac{L_{ex} C_o}{L_{ex} C_o + K_l C_o + K_o L_{ex}} \frac{1}{1 + \varphi a_r} \\ &= 85 \frac{15 \cdot 3}{15 \cdot 3 + 33 \cdot 3 + 0,625 \cdot 3} \frac{1}{1 + 0,07 \cdot 5} \\ &= 19,4 \text{ мгБПК}_n/\text{г} \cdot \text{ч} \end{aligned}$$

$$t_o = \frac{200 - 15}{(0,25 + 0,3)5(1 - 0,3) \cdot 19,4} = 5 \text{ час.}$$

Продолжительность обработки воды в аэротенке:

$$t_{at} = \frac{2,5}{\sqrt{ai}} \lg \frac{L_{en}}{L_{ex}} = \frac{2,5}{\sqrt{2}} \lg \frac{200}{15} = 2,5 \text{ часа}$$

Продолжительность регенерации:

$$t_r = t_o - t_{at} = 5 - 2,5 \text{ часа} = 2,5 \text{ часа}$$

Вместимость аэротенка:

$$Wat = tat(1 + IRi + Rd)q_w$$

$q_w$  – расчетный расход сточных вод,  $\text{м}^3/\text{час}$ .

$$Wat = 2,5(1 + 0,25 + 0,3) \cdot 2083 = 8100 \text{ м}^3$$

Принимаем типовый аэротенк-вытеснитель со следующими параметрами:

1. ширина коридора 4,5м
2. рабочая глубина аэротенка 3,2м
3. число коридоров 4 шт.
4. длина секции 48м

5. рабочий объем секции 2465 м<sup>3</sup>

6. количество секций 3 шт.

Схема аэротенка приведена на рис 6.2.

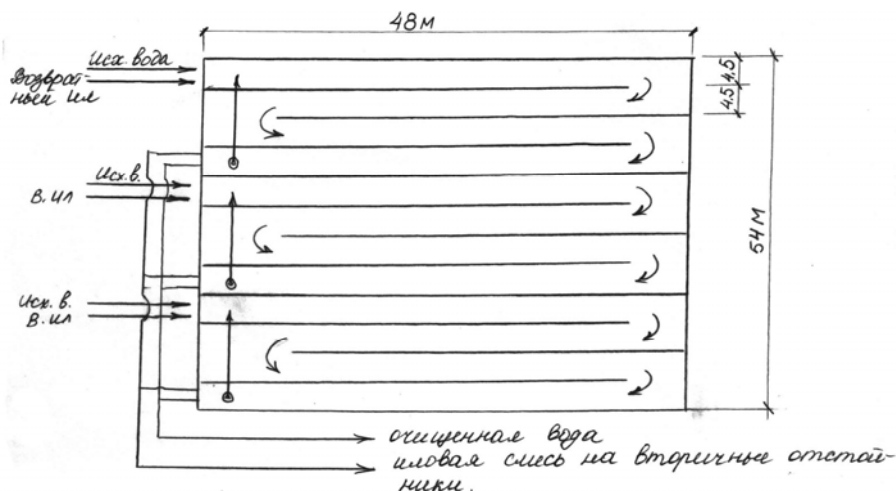


Рисунок 6.2. Схема аэротенка.

Вместимость регенератора:

$$W_r = tr \cdot R_i \cdot q_w = 2.5 \cdot 0.25 \cdot 2083 = 1300 \text{ м}^3$$

Сравним прирост ила в традиционной схеме и в нашей принятой схеме:

Прирост активного ила: в традиционной схеме:

$$P_i = 0.8 C_{cdp} + K_g L_{en}, \text{ мг/л}$$

$K_g$  – коэффициент прироста:  $K_g = 0,3$  для городских сточных вод.

Прирост ила в сутки при расходе 50 000 м<sup>3</sup> составит:

$$180 \text{ мг/л} \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot 50\,000\,000 \text{ л/сут.} = 9\,000 \text{ кг/сут.}$$

По исследованиям, проведенным лабораториями, было установлено, что при примененной нами реконструкции аэротенка прирост ила составляет 0,6 кг/кг БПК<sub>п</sub> поступающей воды, т.е. для 50 000 м<sup>3</sup>/сут. и БПК<sub>исх.</sub> = 200 мг/л прирост ила составляет:

$200 \text{ мг/л} \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot 50\,000\,000 \text{ л/сут.} \cdot 0,6 \text{ кг} = 6000 \text{ кг/сут.}$ , что на 33% меньше, чем в традиционной схеме.

Как видно из рис. 6.1. в аэротенке две зоны – зона без аэрации и зона постоянной аэрации. В зоне без аэрации перемешивание воды и ила осуществляется механическими мешалками. Принимаем для зоны

денитрификации погружные мешалки фирмы Flygt типа SR 4660 (3 штуки). В качестве насосов для перекачки ила из зоны нитрификации в зону денитрификации принимаем рециркуляционные насосы Flygt PP 4660 Удельный расход воздуха при пневматической аэрации:

$$q_{air} = \frac{q_0(L_{en}-L_{ex})}{K_1 K_2 K_T K_3 (C_a - C_0)}, \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$q_0$  – удельный расход кислорода воздуха, принимаемый при очистке до БПК<sub>н</sub> · 15 мг/л 1,1 мг/мг БПК<sub>н</sub>

$K_1$  – коэффициент, учитывающий тип аэратора: для мелкопузырчатой аэрации  $K_1 = 2,13$  (табл. 42, СНиП)

$K_2$  – коэффициент, зависящий от глубины погружения аэраторов  $h_a$  (табл. 43, СНиП):  $K_2 = 2,08$  (при  $h_a = 3\text{м}$ )

$K_T$  – коэффициент, учитывающий температуру сточных вод:

$$K_T = 1 + 0,02(T_w - 20)$$

$T_w$  – среднемесячная температура воды за летний период, °C

$$K_T = 1 + 0,02(24 - 20) = 1,08$$

$K_3$  – коэффициент качества воды (табл. 44, СНиП):  $K_3 = 0,88$ .

$C_a$  – растворимость кислорода воздуха в воде:

$$C_a = \left(1 + \frac{h_a}{20,6}\right) C_T, \text{ мг/л}$$

$C_T$  – растворимость кислорода в воде:  $C_T = 9,95$  мг/л

$$C_a = \left(1 + \frac{3}{20,6}\right) \cdot 9,95 = 11,4 \text{ мг/л}$$

$$q_{air} = \frac{1,1(200-15)}{2,13 \cdot 2,08 \cdot 1,08 \cdot 0,88(11,4-3)} = 5,8 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Интенсивность аэрации:

$$I_a = \frac{q_{air} H_{at}}{t_{at}}, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$$

$H_{at}$  – рабочая глубина аэротенка:  $H_{at} = 3,2\text{м}$ .

$$I_a = \frac{5,8 \cdot 3,2}{2,5} = 7,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{час}$$

Число аэраторов:

$$N_{ma} = \frac{q_0(L_{en} - L_{ex})w_{at}}{1000 K_T K_3 \left(\frac{C_a - C_0}{C_a}\right) t_{at} q_{ma}}$$

$W_{at}$  – объем аэрируемой зоны

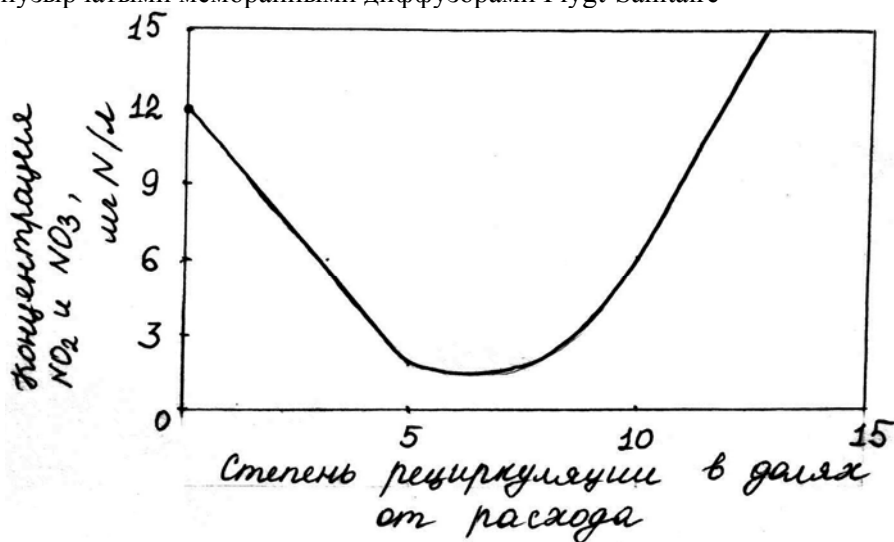
$$W_{at} = 0,75W = 0,75 \cdot 81000 = 6075 \text{ м}^3$$

$q_{ma}$  – производительность аэратора по кислороду

$$q_{ma} = 1,2 \text{ кг/час}$$

$$N_{ma} = \frac{1,1(200-15) \cdot 6075}{1000 \cdot 1,08 \cdot 0,88 \left(\frac{11,4-3}{11,4}\right) \cdot 2,5 \cdot 1,2} = 585 \text{ шт.}$$

В зоне постоянной аэрации используем аэрационную систему с мелкопузырчатыми мембранными диффузорами Flygt-Sanitaire



**Рисунок 6.3.** Зависимость эффективности удаления соединений азота от степени рециркуляции.

По приведенному на рис. 6.3. графику определяю эффективность удаления соединения азота в зависимости от степени рециркуляции денитрификации. При  $R_d = 0,3$  она составляет 6 мг N/л.

### Удаление из сточных вод соединений фосфора.

Одним из приемов предупреждения эвтрофирования водных объектов является удаление из очищенных сточных вод фосфора. В процессе обычной биологической очистки соединения фосфора удаляются не полностью. Благодаря бактериальному воздействию полифосфаты превращаются в ортофосфаты. Если в неочищенных исходных городских сточных водах примерно две трети общего содержания фосфора обусловлено присутствием полифосфатов, а одна треть — ортофосфатов, в биологически очищенных сточных водах имеет место обратное соотношение.

Для удаления из сточных вод соединений фосфора применяют реагентную обработку, в процессе которой снижение содержания ортофосфатов происходит в результате химического взаимодействия

вводимого реагента с ионами  $\text{PO}_4^{3-}$  с образованием нерастворимых соединений, выпадающих в осадок, и в результате сорбции соединений фосфора хлопьями гидроксидов металлов.

В качестве реагентов могут быть использованы традиционные минеральные коагулянты, применяемые в практике водоподготовки: сернокислое железо  $\text{Fe}^{3+}$ , сернокислый алюминий, железный купорос. Можно также использовать отходы производств, содержащие соли  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Al}^{3+}$ , не токсичные для биологического процесса.

Иногда в качестве реагента применяется известь. Однако из-за необходимости повышения величины pH воды до 11 и последующей нейтрализации очищенных сточных вод, а также возможного образования отложений углекислого кальция на поверхности трубопроводов, загрузке фильтров предпочтение следует отдавать алюминий- или железосодержащим реагентам.

При введении реагентов на ступени механической очистки сточных вод, т. е. при предварительном осаждении соединений фосфора, одновременно имеет место значительное снижение концентрации органических и других загрязняющих веществ. Поэтому предварительное осаждение фосфатов целесообразно применять для очистки производственных и смеси городских и производственных сточных вод с величиной БПК<sub>полн.</sub> более 400 мг/л, а также при перегрузке очистных сооружений.

Практически для удаления из сточных вод соединений фосфора применяется биолого-химическая очистка. При биолого-химической очистке традиционные схемы сооружений биологической очистки (с заключительным фильтрованием сточных вод или без него) дополняются реагентным хозяйством, включающим растворные и расходные баки для коагулянтов и помещение для их хранения. Указанное реагентное хозяйство рассчитывается в соответствии с требованиями СНиП 2.04.02—84.

Доза реагента при его введении в сточные воды на ступени биологической очистки определяется по формуле

$$C_{\text{реаг}} = K C_{\text{Робщ}}, \quad (16)$$

где  $K$  — коэффициент увеличения стехиометрического соотношения, вычисленный с учетом определения по стандартным методикам содержания общего фосфора (по  $\text{PO}_4^{3-}$ ) и металлов реагента (по оксиду металла  $\text{Me}_2\text{O}_3$ ), принимается по табл. 66;  $C_{\text{Робщ}}$  — концентрация общего фосфора в поступающей воде, мг/л. При отсутствии данных о концентрации в поступающей воде общего фосфора, ориентировочно может быть принято  $C_{\text{Робщ}} = (2 - 3) C_{\text{PO}_4^{3-}}$ ;

$C_{PO_4^{3-}}$  - концентрация фосфатов в поступающей воде мг,  $PO_4^{3-}$ /л.

Таблица 6.6.

| Эффективность<br>удаления обще-<br>го фосфора, % | Величина $K$ при применении |                            |                          |
|--------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|
|                                                  | Сернокислого<br>железа II   | Сернокислого<br>железа III | Сернокислого<br>алюминия |
| 60                                               | 0,33                        | 0,15                       | 0,35                     |
| 65                                               | 0,5                         | 0,25                       | 0,4                      |
| 70                                               | 0,66                        | 0,33                       | 0,5                      |
| 75                                               | 1                           | 0,5                        | 0,65                     |
| 80                                               | 1,34                        | 0,66                       | 0,74                     |
| 85                                               | 1,67                        | 1                          | 0,9                      |

Учитывая возможное угнетение микроорганизмов активного ила при введении реагентов в иловую смесь, не рекомендуется принимать дозы сернокислого железа (II) более 25 мг/л по  $Fe_2O_3$ ; сернокислого железа (III) более 15 мг/л по  $Fe_2O_3$ ; сернокислого алюминия более 18 мг/л по  $Al_2O_3$ .

С целью эффективного использования реагента и с учетом его влияния на активный ил рекомендуется введение сернокислого железа (II) — в начало аэротенка либо во флотационную емкость, сернокислого железа (III)—перед вторичным отстойником, сернокислого алюминия — в конец аэротенка.

При использовании в качестве реагента сернокислого алюминия для уменьшения концентрации взвешенных веществ в очищенной воде следует добавлять полиакриламид (ПАА). Ориентировочная доза ПАА 0,2—1 мг/л. Введение раствора ПАА осуществляется в иловую смесь перед вторичным отстойником.

При наличии в схеме очистки сточных вод на завершающем этапе фильтров с повышенной грязеемкостью (например, гравийно-песчаных фильтров с восходящим потоком воды) применение ПАА не обязательно.

Введение реагента на ступени биологической очистки позволяет снизить содержание в воде общего фосфора до 85% растворимых фосфатов до 95%. Более глубокое удаление общего фосфора (до 90—95%) достигается в процессе доочистки сточных вод фильтрованием.

Введение реагента должно учитываться при определении объема аэротенка изменением зольности ила (коэффициент  $\beta$ ) и удельной скорости окисления (коэффициент  $m$ ). Тогда формула (48) п. 6.143 СНиП 2.04.03—85 определения продолжительности аэрации примет вид

$$t_{a\text{тм}} = (L_{en} - L_{ex})/a_i(1 - \beta s)pm, \quad (17)$$

где  $a_i$  — доза ила, принимается по табл. 6.7.  $S$  — зольность ила;  $\beta$  — поправка за счет введения реагента, принимаемая по табл. 6.8.

Удельная скорость окисления, мг БПК<sub>полн</sub> на 1г беззольного вещества ила в 1 ч, определяется по формуле (49) СНиП 2.04.03—85.

**Таблица 6.7.**

| Доза реагента по $\text{Me}_2\text{O}_3$ , мг/л | Рекомендуемая доза ила $a_i$ , г/л, в зависимости от БПК <sub>полн</sub> , поступающей в аэротенк сточной воды $L_{en}$ |     |     |     |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|
|                                                 | 100                                                                                                                     | 150 | 200 | 300 |
| 10                                              | 3                                                                                                                       | 4   | 5   | 5   |
| 15                                              | 4                                                                                                                       | 5   | 6   | 6   |
| 20                                              | 5                                                                                                                       | 6   | 6   | 7   |
| 25                                              | 6                                                                                                                       | 6   | 7   | 7   |

Примечание. При применении сернокислого алюминия или сернокислого железа (Ш) дозу ила принимать не более 5 г/л.

**Таблица 6.8.**

| Реагент                                 | $\beta$ при дозах реагента в $\text{Me}_2\text{O}_3/\text{л}$ |      |     |      |      |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------|-----|------|------|
| При применении сернокислого железа (II) | 5                                                             | 10   | 15  | 20   | 25   |
|                                         | 1,1                                                           | 1,2  | 1,3 | 1,4  | 1,5  |
| При применении других реагентов         | 1,07                                                          | 1,15 | 1,2 | 1,22 | 1,22 |

Коэффициент, учитывающий изменение скорости окисления органического вещества за счет введения реагента по отношению к скорости окисления при биологической очистке,  $m$ , принимается по табл.6.9. в зависимости от нагрузки по коагулянту  $N_{\text{коаг}}$ ,

**Таблица 6.9.**

| $N_{\text{коаг}}$ | 9    | 8    | 7    | 6    | 5 | 4    | 3    | 2    |
|-------------------|------|------|------|------|---|------|------|------|
| $m$               | 0,63 | 0,78 | 0,84 | 0,95 | 1 | 1,08 | 1,16 | 1,24 |

мг $\text{Me}_2\text{O}_3/\text{г}$  беззольного вещества ила, рассчитанной по формуле

$$N_{\text{коаг}} = C_{\text{реаг}}/a_i(1 - \beta s) \quad (18)$$

Удельный расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ , сточной воды определяется по формуле (61) СНиП 2.04.03—85. При этом в схеме с введением железного купороса средняя концентрация кислорода в аэротенке принимается равной 5 мг/л.

Рециркуляционный расход активного ила ориентировочно принимается в зависимости от рабочей дозы ила в аэротенке и дозы возвратного ила по данным табл. 6.10.

Перекачку возвратного ила рекомендуется осуществлять эрлифтами, что предупреждает излишнее дробление хлопка ила, создает большую аэробность системы и является более экономичным способом перекачки ила по сравнению с центробежными насосами. Выполнение этой рекомендации особенно важно при применении в качестве реагента сернокислого алюминия. Реагент вводится в аэротенк в виде раствора.

При применении гравийно-песчаных фильтров с восходящим потоком воды в схеме биолого-химической очистки расчет фильтров производится:

**Таблица 6.10.**

| Рабочая доза<br>ила в аэро-<br>тенке, г/л | Схема с введением  |                     |                                           |                     |
|-------------------------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------------------------|---------------------|
|                                           | железного купороса |                     | сернокислого железа<br>(III) или алюминия |                     |
|                                           | доза, г/л          | рециркуля<br>ция, % | доза, г/л                                 | рециркуля<br>ция, % |
| 3                                         | 10                 | 45                  | 6,5                                       | 85                  |
| 4                                         | 11,5               | 50                  | 8,5                                       | 90                  |
| 5                                         | 11,5               | 60                  | 10,0                                      | 100                 |
| 6                                         | 14,0               | 75                  | —                                         | —                   |
| 7                                         | 14,0               | 100                 | —                                         | —                   |

в схеме с введением сернокислого закисного железа перед аэротенком — по параметрам безреагентного фильтрования;

в схеме с введением сернокислого окисного железа перед вторичным отстойником или сернокислого алюминия в конце аэротенка следует принимать скорость фильтрования в рабочем режиме 9—10 м/ч, при форсированном 11—12 м/ч.

Промывку следует предусмотреть 2—3 раза в сут.

При расчете сооружений по обработке осадка необходимо учитывать увеличение массы сухого вещества активного ила в связи с

образованием дополнительного химического осадка, количество которого на 1 мг/л  $\text{Me}_2\text{O}_3$  составляет 1% прироста активного ила, рассчитанного по п. 6.148 СНиП 2.04.03—85.

Однако, несмотря на увеличение массы ила, объем избыточного ила сокращается в 1,5 раза в связи с лучшей способностью осаждаться. Активный ил обладает хорошими водоотдающими свойствами, аналогичными свойствами осадка после аэробной стабилизации.

Введение реагента на ступени биологической очистки не влияет на протекание процессов сбраживания осадков в метантенках. При механическом обезвоживании биолого-химических илов с применением реагентов расход последних можно сократить до 30%.

### **Пример расчета азротенка при биолого-химической очистке сточных вод с введением в азротенк сернокислого железа**

Исходные данные: расчетный расход сточных вод  $q_w = 4160 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; БПК<sub>полн</sub> начальное и конечное  $L_{en} = 200 \text{ мг/л}$  и  $L_{ex} = 15 \text{ мг/л}$ ; содержание взвешенных веществ  $C_{cdp}$  начальное и конечное 150 и 15 мг/л; содержание общего фосфора поступающей воды 16 по  $\text{PO}_4^{3-}$ ; требуемая доза реагента  $C_{\text{реаг}} = 1 \cdot 16 = 16 \text{ мг/л}$ ;  $K = 1$  — по табл. 6.6.

Необходимо удалить 75 % общего фосфора.

При исходной БПК<sub>полн</sub> = 200 мг/л и необходимой дозе реагента 16 мг/л согласно табл. 6.7. биолого-химический процесс целесообразно вести при дозе активного ила  $a_i = 6 \text{ г/л}$ . При этих параметрах увеличение зольного ила принимаем по табл. 6.8.,  $\beta = 1,3$ , т. е. зольность ила будет  $0,3 \cdot 1,3 = 0,39$ .

Нагрузку по коагулянту определяем по формуле (18)

$$N_{\text{коаг}} = 16/6(1 - 1,3 \cdot 0,3) = 4,4 \text{ мг/г}.$$

По табл. 6.9. коэффициент изменения удельной скорости окисления органических загрязнений при  $N_{\text{коаг}} = 4,4 \text{ мг/г}$  составит  $m = 1,04$ .

Скорость окисления органического вещества при биологической очистке определяем по формуле (49) СНиП 2.04.03—85

$$\rho = 85 \cdot 15 \cdot 5 / [(15 \cdot 5 + 33 + 0,625 \cdot 15)(1 + 0,07 \cdot 6)] = \\ = 18 \text{ мг} \cdot \text{БПК}_{\text{полн}} / (\text{г} \cdot \text{ч}),$$

где  $\rho_{\text{max}} = 85 \text{ мг} \cdot \text{БПК}_{\text{полн}} / (\text{г} \cdot \text{ч})$ ;  $C_o = 5 \text{ мг/л}$  (использование железного купороса);  $K_f = 33 \text{ мг} \cdot \text{БПК}_{\text{полн}} / \text{л}$ ;  $K_o = 0,625 \text{ мг/л}$ ;  $\phi = 0,07 \text{ л/г}$ ,

Удельная скорость окисления органических веществ при биолого-химической очистке  $\rho m = 18 \cdot 1,04 = 18,7 \text{ мг} \cdot \text{БПК}_{\text{полн}} / (\text{г} \cdot \text{ч})$ .

Расчет периода аэрации в азротенках производим по формуле (17)

$$t_{alm} = (200 - 15) / 6(1 - 0,39) = 18,7 = 2,73 \text{ ч.}$$

Рециркуляцию ила принимаем по табл. 6.9.—75%. Тогда прирост ила составит  $1,16 (0,8 \cdot 150 + 0,4 \cdot 15) = 145 \text{ мг/л.}$

В заключение определяем количество реагента для расчета реагентного хозяйства при содержании 52 %  $\text{FeSO}_4$  в техническом железном купоросе ( $P_{\text{pear}}$ ) по формуле

$$Q_{\text{pear}} = q_w C_{\text{pear}} / P_{\text{pear}} = 4160 \cdot 16 \cdot 1,9 \cdot 100 \cdot 24 / 52 \cdot 1000 \cdot 1000 = 5,76 \text{ т/сут.}$$

## Литература\*

1. Баженов В.И., Денисов А.А. Проектирование современных комплексов биологической очистки сточных вод // ЭКиПР, февраль, 2009, с. 26-31.
2. Ковальчук В.А. Очистка стічних вод. – Рівне:ВАТ «Рывненська друкарня», - 2002. – 622с.:іл..
3. Котенко Л.Н., Юрченко В.А. Нормирование азотсодержащих соединений в сточных водах. // Екологічний інтелект – 2010: Збірка наукових праць за матеріалами V Міжнародної наукової конференції-молодих вчених. – Д.: Дніпроп. нац. ун-т Залізн.трансп. ім.. акад. В. Лазаряна, 2010. с.52-53.
4. Тиньгаев А.В. Утилизация биологических отходов, образующихся при водоотведении в городах и предприятиях на примере Алтайского края. // ЭКиПР, февраль, 2009г. с. 52-54.
5. Смолин А.Н. Удаление соединений азота из сточных вод производства минеральных удобрений АО «Акрон» // ВСТ, №7, 2000, с. 18-19.
6. Присяжнюк В.А. // «С.О.К» - 2005. - №8(20). – с. 10-14.
7. Стельмашук В., Салек М. Возможности адсорбционной очистки воды от о-изопропилметилфторфосфата. // ЭиР. – 2003, - №4 – с. 44-47.
8. Подорван Н.И., Глоба Л.И., Куликов Н.И., Гвоздяк П.И. Удаление фосфора из сточных вод. // ХитВ. – 2004. – т.26. - №6. – с. 591-605.
9. Дедков Ю.М.,Конищев М.А., Кельина С.Ю. Методы доочистки сточных вод от фосфатов. // ВСТ. – 2003. - №11. – с.25-31.
10. Алексеев М.И., Мишуков Б.Г., Гумен С.Г., Васильев Б.В. Удаление азота и фосфора из сточных вод С.-Петербурга. // ВСТ. – 1998, - №10, - с. 11-12.
11. Гумен С.Г., Пробирский М.Д., Васильев Б.В., Алексеев М.И. Совершенствование технологи очистки сточных вод в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» // ВСТ. – 1999. - №10. – с. 4-6.
12. Пономарьов П. Х., Сирохман І.В. Безпека харчових продуктів та продовольчої сировини. Навчальний посібник. – К.: Лібра, 1999. – 272с.
13. Справочник проектировщика. Канализация населенных мест и промышленных предприятий./Лихачев Н.И.,Ларин И.И. и др.; Под общ. ред. Самохина В.Н. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1981. – 639с.

14. Очистка производственных сточных вод: Учеб. пособие для вузов. / Яковлев С.В. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1985. – 335с.

15. Коваленко А.Н., Благодарная Г.Н., Шевченко Т.А. Анализ методов очистки сточных вод от биогенных элементов. // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. – 2008. - №74. – с.185-189.

16. Яковлева С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. – 702с.

17. Шевченко Т.А. Ресурсосберегающие технологии при очистке сточных вод.// Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. №84. – 2009. – с. 119-122.

18. Разумовский Э.С., Залетова Н.А. Удаление биогенных элементов из городских сточных вод. // ВСТ. – 1991. - №6. – с. 28-30.

19. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512с.

20. Грязев В.Ю., Комарова Л.Ф. Экологические технологии: методы оптимизации очистки сточной воды от биогенных элементов на канализационных очистных сооружениях. // Инженерная экология. - - №1 – с. 37-43.

21. Данилович Д.А., Дайнеко Ф.А., Мухин В.А., Николаева Е.Б., Эпов А.Н. Удаление биогенных элементов. // ВСТ., - 1998. - №9. – с. 10-12.

22. Смирнов В.Б., Гецина Г.И. Интенсификация работы аэротенков на станции биологической очистки сточных вод. // ВСТ. – 1995. - №12.

23. Залетова Н.А., Башкатова Л.В., Пятачкова Е.В., Бришнет Л.К. Удаление биогенных веществ из городских сточных вод.// ВСТ. – 1992, - №7.,с. 16-17.

24. Швецов В.Н., Морозова К.М., Нечаев И.А., Петрова Л.А. Нитрификация и денитрификация сточных вод. // ВСТ, - 1995, - №11, - с. 16-18.

25. Мешенгиссер Ю.М., Вербицкий Г.П., Курнилович О.Б. Удаление аммонийного азота при использовании мелкопузырчатых полиэтиленовых аэраторов. // ВСТ, - 2000, - №7, - с. 30-31.

26. Эль Ю.Ф., Исаев О.Н., Дайнеко Ф.А. Обеспечение глубокой биологической очистки сточных вод// ВСТ, - 1999, - №8, - с. 14-16.

27. Загорский В.А. и др. Реконструкция аэротенков Люберецкой станции аэрации с внедрением технологии нитри-денитрификации // ВСТ, - 1999, - №11, - с.28-31.
28. Разумовский Э.С. Глубокая очистка сточных вод // ВСТ, - 1992, - №6, - с. 5-6.
29. Мухин В.А., Очистка городских сточных вод от азота и фосфора // ВСТ, - 1997, - №2, - с. 23-25.
30. Холдинг «Комплект экология». Реконструкция существующих очистных сооружений. 2000. (рекламный проспект), 2000.
31. Мишуков Б.Г. Перспективные схемы биологической очистки сточных вод от азота и фосфора // ВЭ.ПР. – 1999. - №1.
32. Мишуков Б.Г., Иваненко Н.Н., Соловьева Е.А. Производственная проверка технологии биологического удаления азота и фосфора на Северной станции аэрации Санкт-Петербурга // ВЭ.ПР. – 2000. - №2.
33. Васильев Б.В. и др. Технологии биологического удаления азота и фосфора на станциях аэрации. // ВСТ. – 2001. - №3. – с. 22-25.
34. Крючихин Е.М., Николаев А.Н., Большаков Н.Ю. Биоочистка сточных вод от азота и фосфора. // ЭКиПР, - 2002, - июль, - с. 9-12.
35. Загорский В.А., Данилович Д.А. и др. Опыт промышленного внедрения технологий биологического удаления азота и фосфора.// ВСТ, - 2001, - №12, - с. 21-27.
36. Хуторнюк Г.Н., Гундырева Т.М., Амбросова Г.Т., Функ А.А. Опыт удаления биогенных элементов из сточных вод // ВСТ, - 2009, - №3, - с. 37-40.
37. Спиркин Д.Я., Каштанов А.Г. др. Улучшение технологических показателей очистных сооружений канализации г. Ставрополя. // ВСТ, - 2002, - №11, - с. 21-24.
38. Николаев А.Н., Крючихин Е.М. Очистка сточных вод до требований экологических нормативов на сбросе в водоемы // ЭКиПР, - 2003, - июль, - с. 17-20.
39. Эль Ю.Ф., Решетилов Ю.Н., Концептуальные изменения в технологиях очистки сточных вод. // ВСТ, - 2009, - №5, - с. 57-63.
40. Одегард Н. Усиленная комплексная очистка сточных вод, основанная на применении коагуляции и псевдоожиженного слоя биопленки // Wat. Sci. Tech. – IWA Publishing. v.42. №12
41. Васильев Б.В., Гребенская Т.М., Мишуков Б.Г., Иваненко И.И. Реализация технологии удаления азота и фосфора на очистных сооружениях Санкт-Петербурга // ВСТ, - 2004, - №5, - с. 9-10.

42. Кармазинов Ф.В. и др. Реконструкция канализационных очистных сооружений г. Пушкина // ВСТ, - 2006, - №9, ч. 1 – с. 2-5.
43. Хроменков С.В. и др. Повышение качества очищенных сточных вод на Курьяновских и Люберецких очистных сооружениях. // ВСТ, - 2006, - №11, ч. 1, - с. 24-30.
44. Мешенгиссер Ю.М. и др. Удаление биогенных элементов на на Щелковских межрайонных очистных сооружениях канализации // ВСТ, - 2009, - №11, - с. 64-67.
45. Щетинин А.И., Реготун А.А. Определение возможного качества биологической очистки сточных вод активным илом при помощи программы «ЭкоСим» // ВСТ, - 2000, - №12, ч. 2.
46. Tchobanoglous G., Buston F.L., Stensel H.D. Wastewates Engineering: Treatment and Reuse. – New York: Metcalf&Eddy, Inc., 2003
47. Крючихин Е.М. и др. Эффективная очистка городских сточных вод от биогенных элементов на ЦСА Санкт-Петербурга. // ВСТ, - 2009, - «12, - с. 59-62.
48. Мешенгиссер Ю.М. , Вербицкий Г.П., Курнилович О.Б. Удаление аммонийного азота при использовании мелкопузырчатых полиэтиленовых аэраторов // ВСТ, - 2000, - №7, с. 30-31.
49. Поліщук О.В. Денітріфікація міських стічних вод в коридорних аеротенках. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук. Київський нац. унів. будів. і архітек. – К: 2007, с. 18.
50. Первов А.Г., Смирнов Д.Г., Мотовилова Н.Б. Мембранные технологии для очистки сточных вод и их повторного использования // ВСТ, - 2009, - №7, - с. 48-52
51. Мирсаидов у. Норматов И.Ш., Хакимова Н.У. Перспективы применения бурых водорослей в формировании катализаторов для очистки сточных вод // ХиТВ, - 2002, - №5, т. 24, - с. 433-438.
52. Алыков Н.М. и др. Очистка воды от ионов аммония // ЭКиПР, - 2003, - октябрь, - с. 20-22.
53. Ингибитор нитрификации «СВОД®-ИН». Проспект НИиПИ «Водоочистные технологии» г. Северодонецк, Луганской обл., - 2010.
54. Кравец В.В. и др. Высшая водная растительность как элемент очистки промышленных сточных вод. // ЭКиПР, - 1999, - август, - с. 20-24.
55. Разумовский Э.С., Непаридзе Р.Ш. Очистка сточных вод предприятий пищевой промышленности. // ЭКиПР, - 2002, - март, - с. 25-28.

56. Гляденов С.Н. Очистка сточных вод: тенденции и новации. // ЭКиПР, - 2001, - февраль, - с. 15-17.
57. Павлов Д.В., Вараксин С.О., Колесников В.А. Очистка сточных вод металлообрабатывающих предприятий. Проблемы и решения. // ЭКиПР, - 2009, - март, - с. 8-9.
58. Алексеев М.И., Медведев И.Г. Содержание азота и фосфора в осветленных сточных и возвратных иловых водах. // ВСТ, - 1998, - №6, - с.18-19.
59. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5 000 Einwohnerwesten. – ATV, Regelwerk Abwasser – Abfall. Arbeitblatt. A-131, Februar 1991.
60. Подорван Н.И., Глоба Л.И., Куликов Н.И., Гвоздяк П.И. Удаление фосфора из сточных вод. // ХиТВ. – 2004. – №6, т. 26 – с. 591-603
61. Стельмашук В., Салек М. Возможности адсорбционной очистки воды от о-изопропилметилфторфосфата. // ЭиР. – 2003, - №4 – с. 44-49
62. Пупырев Е.И. и др.. Биогальванический метод удаления фосфатов из сточных вод. // ВСТ, - 2009, - №8, - с. 55-59.
63. Загорский В.А., Данилович Д.А. и др.. Анализ промышленного применения технологий удаления фосфора из городских сточных вод. // ВСТ, - 2004, - №5, - с. 5-8.
64. Васильев Б.В., Мишуков Б.Г., Соловьева Е.А. Реагентное удаление фосфора из городских сточных вод. // ВСТ, - 2009, - №2, - с. 58-60.
65. Добрых Я.М. Изъятие фосфора из городских сточных вод и осадков в целях предотвращения эвтрофикации водоемов: Автореферат диссертации канд. техн. наук. – Л., 1987.
66. Беляев А.Н., Васильев Б.В., Маскалева С.Е. и др.. Удаление азота и фосфора на канализационных очистных сооружениях. // ВСТ, - 2008, - №9.
67. Гандурина Л.В. и др. Реагентный способ удаления соединений фосфора из сточных вод. // ВСТ, - 2001, - №6, с. 18-20.
68. Чернышев В.Н., Куликов Н.И., Ракульцев А.А. Очистка сточных вод от фосфора. // ВСТ, - 2001, - №1, с. 18-20.
69. Делицын Л.М., Власов А.С. Флокулянт РНК для обработки сточных вод. // ЭКиПР, - 2002, - ноябрь, - с. 12-15.
70. Потанина В.А., Хачатуров А.А., Тонков Л.И. Эффективность применения алюможелезного коагулянта для очистки сточных вод. // ВСТ, - 2005, - №3, - с. 36-38.

71. Гетманцев С.А. и др. Очистка сточных вод от соединений фосфора коагулянтами «Аква-Аурат». // ВСТ, - 2006, - №8, с.39-43.
72. Шайхиев И.Г. и др. Очистка гальваностокосов сульфидсодержащими сточными водами нефтехимических производств. // ЭКиПР, - 2008, - июль.
73. Фокичева Е.А. Дефосфотация высококонцентрированных сточных вод. // ВСТ, - 2009, - №11, - с. 56-59.
74. Йуль К, Залетов С.В. и др. Использование соединений фосфора, содержащихся в сточных водах свиноведческих комплексов. // ВСТ, - 2003, - №12, - с. 28-31.
75. СНиП 2.04.03\_85. Канализация. Наружные сети и сооружения. – М.: ГУП ЦПП, 1999.
76. Яковлев С.В. и др. Опыт проектирования и внедрения сооружений глубокой очистки сточных вод от биогенных элементов. Часть 1 // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002, - №4, - с. 27.
- Часть 2 // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002, - №5, - с. 38-39.
77. Проектирование сооружений для очистки сточных вод. / Всесоюз. комплек. н.-и. и конструктор.-технолог. ин-т водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инж. гидрогеологии. – М.: Стройиздат, 1990. – 192с: (Справ. пособие к СНиП).

\*Примечание. В списке литературы приняты следующие сокращения:

ЭКиПР – Экология и промышленность России.  
ВСТ – Водоснабжение и санитарная техника.  
С.О.К. – Сантехника. Отопление. Кондиционирование.  
ЭиР – Экология и ресурсосбережение.  
ХиТВ – Химия и технология воды.  
ВЭ.ПР. – Вода и экология. Проблемы и решения.

Научное издание

Долина Леонид Федорович

Очистки сточных вод от биогенных элементов.

Научное издание

Монография

Книга печатается в авторской редакции -

Подписано к печати 14.10.10 Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1.4.1 Тираж 500 экз.

Издательство «Континент»

г. Днепропетровск