

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

(наименование института полностью)

Центр **Центр инженерного оборудования**

(наименование)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки)

Водоснабжение и водоотведение городов и промышленных предприятий

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему **Разработка технологических решений денитрификации на
сооружениях биологической очистки сточных вод**

Обучающийся

А.С Козенков

(инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

канд. техн. наук, доцент, И.А. Лушкин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Анализ проблем осуществления процесса денитрификации	6
1.1 Возможности применения денитрификатора на сооружениях очистки	6
1.2 Анализ условий, определяющих удовлетворительный процесс денитрификации сточных вод	8
1.3 Технологические решения денитрификации на сооружениях очистки сточных вод.....	19
1.4 Проблема глубокого удаления соединений азота из сточных вод (процесс денитрификации)	21
Глава 2 Условия для эффективной реализации процесса денитрификации в аноксидных зонах аэротенков.....	26
2.1 Эффективность пробразования денитрификации в зонах аэротенков. Пример сооружения биологической очистки стоков.....	26
2.2 Проблемы в области методик, нормативного регулирования процесса денитрификации	33
2.3 Факторы, влияющие на эффективность денитрификации	36
2.4 Проблемы проектирования и эксплуатации очистных сооружений.....	38
Глава 3 Выбор технологических решений денитрификации	42
3.1 Физико-химические методы (ионный обмен, мембранные технологии).....	42
3.2 Комбинированные технологии (ANAMMOX, SHARON)	46
3.3 Анализ эффективности технологий	47
3.4 Автоматизация процесса денитрификации на примере работы устройства вертикальной мешалки	50
Заключение	66
Список используемых источников.....	67

Введение

Актуальность и научная новизна настоящего исследования. Денитрификация – процесс восстановления нитритов и нитратов до свободного азота, который выделяется в атмосферу. Присутствие соединений азота в сточных водах – серьезная проблема, и решить ее помогают денитрификаторы. С помощью этого метода можно очистить воду от нитратов и различных нитрат-ионов, которые являются биогенными компонентами, наносящими серьезный вред окружающей среде. Эти вещества опасны для человека, и их концентрация регулируется строгими нормами. Сегодня большая часть загрязнения почвы биогенными жидкостями вызвана старыми очистными сооружениями, построенными несколько десятилетий назад. В то время концентрация азотных соединений в сточных водах была низкой, и выбросы не нуждались в тщательной очистке.

Сегодня необходимо строить модернизированные установки, чтобы соответствовать установленным стандартам и защищать окружающую среду. На таких предприятиях для обеспечения качественной очистки используется денитрификация. «Суть ее заключается в том, что денитрифицирующие бактерии (*Thiobacillus*, *Denitrificans*, *Paracoccus*), являющиеся гетеротрофными бактериями, используют связанный кислород нитрата и нитрита и восстанавливают его до молекулярного азота в ходе своей важной деятельности по окислению органических веществ. Процесс биологической денитрификации происходит в анаэробных условиях, когда присутствует органическое вещество, необходимое для жизнедеятельности бактерий.

Объект исследования – биологическая очистка сточных вод.

Предметом исследования является денитрификация на сооружениях биологической очистки.

Цель исследования: автоматизация процесса денитрификации на сооружениях очистки сточных вод.

Гипотеза исследования состоит в том, что гиперболической мешалки могут быть успешно применены в качестве объекта управления водозаборно-очистных сооружений для очистки воды, если:

- правильно подобран размер и диаметр лопастей мешалки;
- правильно подобрана мощность мешалки;
- при конструировании и изготовлении мешалок выполнялись рекомендации по увеличению их мощности и срока их службы.

Для достижения поставленной цели поставлены следующие задачи:

- Провести анализ существующих типов и конструкций механических мешалок.
- Провести экспериментальное исследование выбранной мешалки для повышения эффективности процесса денитрификации.
- Дать рекомендации по автоматизации и производству гиперболической мешалки.

Теоретико-методологической основой работы является комплексный подход.

Методы исследования: теоретические (анализ научно-методической литературы).

Научная новизна исследования заключается во внедрении мешалок в технологическую схему для повышения эффективности денитрификатора на сооружениях биологической очистки сточных вод.

Практическая значимость исследования работы заключается в разработке автоматизированного управления системой мешалок на объектах очистки сточных вод с целью повышения эффективности работы.

Выпускная квалификационная работа предполагает разработку модернизированных установок, чтобы соответствовать установленным стандартам и совершенствование очистки сточных вод с помощью соответствующих процессов денитрификации.

Апробация работы: результаты докладывались на конференции: «Ресурсосберегающие технологии и технические средства для производства

продукции растениеводства и животноводства» с докладом на тему «Особенности процесса денитрификации сточных вод»

На защиту выносятся:

- Схемы различных типов объекта управления процесса денитрификации.
- Рекомендации по автоматизации процесса денитрификации на объекте.

Структура магистерской диссертации. Работа состоит из введения, 3 глав, заключения, содержит 29 рисунков, 5 таблиц, список используемой литературы (35 источников). Основной текст работы изложен на 71 странице.

Глава 1 Анализ проблем осуществления процесса денитрификации

1.1 Возможности применения денитрификатора на сооружениях очистки

Образующиеся в процессе нитрификации нитриты и нитраты оксидного азота удаляются из воды в денитрификационных резервуарах. Резервуары для денитрификации представляют собой емкости различной формы, в которых перемешивание иловой смеси и сточных вод происходит без подачи кислорода воздуха (рисунок 1). При отсутствии оборудования для перемешивания взвешенных веществ и жидкостей, склонных к оседанию, используются системы перемешивания, сочетающие механические скребки с гидравлическими мешалками, вертикальные мешалки с погружными лопастями [1].



Рисунок 1 – Обобщенная схема процесса денитрификации

Конфигурация систем денитрификации обычно «сводится к нитрификации для удаления нитратного азота и устройству зоны смешения в аэротенке. В зоне смешения могут использоваться погружные механические или пневматические мешалки, а насыщение воды кислородом может быть сведено к минимуму для предотвращения осаждения активного ила. В зоне

смешивания могут возникать аноксические и анаэробные условия [18]. Основное различие между ними заключается в том, что в первом случае концентрация растворенного кислорода близка к нулю, а в анаэробных условиях концентрация нитритов и нитратов, являющихся источниками кислорода для многих гетеротрофных бактерий, также близка к нулю. Состав зоны требует достаточно точного баланса всех компонентов сточных вод и активного ила. Процесс нитритной денитрификации может быть реализован с использованием различных технических схем. В данном случае представлена схема, предусматривающая предварительную денитрификацию. В схеме перед аэробной зоной имеется аноксическая зона. В аноксической зоне нитрат, образующийся в аэробной зоне, восстанавливается до газообразного азота с использованием БПК поступающих сточных вод. Нитрификация происходит в аэробной зоне вместе с удалением почти всего оставшегося растворимого БПК [2]. Степень удаления нитратов низкая, поскольку лишь ограниченное количество нитратов попадает в анаэробную зону вместе с возвращаемым осадком. Для внутренней рециркуляции нитрата при повторной технологии требуются насосы и трубопроводы.

Основной проблемой осуществления процесса денитрификации является создание аноксидных условий. Процесс денитрификации осложняется предшествующим процессом – нитрификацией, поскольку условия для растворенного кислорода и органического загрязнения близки к противоположным. Для реализации процесса денитрификации требуется: 1) наличие денитрифицирующих (мезотрофных) микроорганизмов; 2) наличие органических субстратов (в количествах, необходимых для эффективности процесса); 3) формирование аноксических условий (наличие нитратов и отсутствие (минимизация) растворенного кислорода); 4) оптимальное значение pH среды для процесса денитрификации; 5) достаточное время нахождения стоков в зоне денитрификации с учетом текущей температуры и отсутствие вредных веществ [1].

1.2 Анализ условий, определяющих удовлетворительный процесс денитрификации сточных вод

Сегодняшний стандарт биологического очищения коммунальных и аналогичных по составу бытовых стоков включает технологии нитрификации-денитрификации. Всё чаще внедряют метод биологически управляемого удаления фосфора. Эти подходы предполагают использование участков, свободных от воздуха, где смешанная масса активированного ила должна подвергаться принудительной циркуляции. Современные производители смесительных установок предлагают ограниченный выбор технологий для организации перемешивания массы активного ила на водоочистных станциях. Среди них выделяются вертикально-поворотные, погруженные горизонтально-лопастные и вертикально-гиперболические мешалки. Под термином «гиперболический» подразумевают специальное устройство для перемешивания, оснащённое рабочим колесом специфической гиперпараболоидальной конфигурации [15].

Принцип функционирования подобной конструкции представлен на иллюстрации номер один. Сложность процессов, связанных с обработкой сточной воды, ставит специалистов-проектантов и операторов станций водоочистки перед непростой задачей выбора наилучших конструкторско-технических решений, усугубляемой дефицитом доступной информации. Согласно нормативному документу СП 32.13330 «Наружные сети и объекты канализации»: «Необходимо обеспечить интенсивное перемешивание содержимого в анаэробных областях, предотвращающее оседание активных масс. Рекомендуется применять электромеханические типы мешалок». Однако остаётся неясным, какие именно виды электромеханических мешалок окажутся наиболее эффективными. Сегодня большинство компаний, занимающихся переработкой отходов, используют погружённые горизонтального типа мешалки. Методы расчёта их количества и расположения в специальных резервуарах глубоко проработаны и

стандартизированы. Важным преимуществом горизонтальных агрегатов считается отсутствие потребности возводить дополнительные строительные элементы вроде мостиков для закрепления оборудования. Но вместе с тем существует необходимость устанавливать дорогую систему контроля и диагностики, включая датчики уровня воды, затрудняется визуальное наблюдение за функционированием устройства, повышаются расходы на техническое обслуживание, такие как регулярная смена сальников [20]. Известно, что гиперболические мешалки используются зарубежными компаниями с конца XX века, ими оборудованы крупные заводы по обработке сточных вод в Берлине, Токио, Нью-Йорке, Вашингтоне и других крупных городах мира. Устройство моста, мотора-редуктора, свободное пространство жидкостного слоя, направление линий течения, микровихревые структуры. Лопасті рабочего колеса, сама рабочая турбина, ось вращения на рисунке 2.

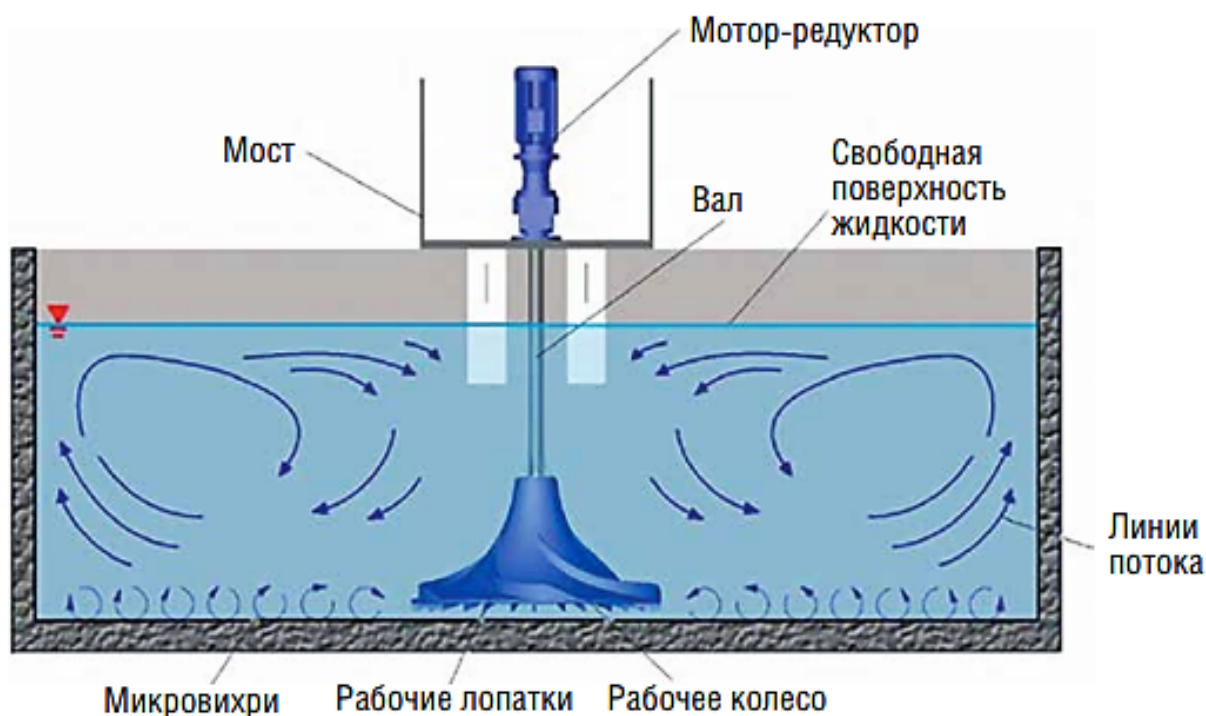


Рисунок 2 – Работа мешалки «Mix GMS» на объекте очистки сточных вод

Схематичное отображение гиперболической мешалки с выделением направлений перемещения жидкостей. Примечательно, что в нашей стране

этот вид техники ещё недостаточно распространён, хотя он обладает рядом значительных преимуществ относительно традиционных лопастных мешалок:

- двигатель располагается вне жидкого объёма, облегчая эксплуатацию агрегата благодаря отсутствию нужды регулярно менять уплотнители и контролировать состояние сложных систем обнаружения влаги внутри корпуса;
- обеспечивается простота визуального наблюдения за процессом работы и минимальное число затрат на обслуживание;
- конструкция мешалки самофокусируется, ей не требуются специальные опоры на дно ёмкости при высоте оси вращения до шести метров;
- равномерное распределение нагрузки на детали конструкции уменьшает воздействие радиальных сил, возникающих при вращении лопастей;
- отсутствуют участки скопления загрязнений активным илом при условии правильного определения местоположения мешалки в резервуаре, соблюдая пропорцию между шириной и длиной бака не больше двух единиц;
- высокая устойчивость к коррозии;
- бережное и качественное перемешивание, обеспечивающее плавный и однородный ток жидкости без заметных пульсаций.

Компания «Астерион» несколько лет назад разработала инновационное решение, предназначенное для высокоэффективного перемешивания взвесей в системах «жидкость – твёрдые частицы», особенно актуально для объёмных резервуаров. Конструкция изготовлена из композитных материалов, производимых непосредственно в России. Этот материал отличается повышенной прочностью, твёрдостью, устойчивостью к износу при незначительном весе [9]. Применение такого оборудования предотвращает возникновение коррозии при воздействии агрессивных сред

сточных вод. Сейчас налажен промышленный выпуск готовых изделий, базовые характеристики базовых модификаций приведены в каталогах (отметим, что конкретные значения оборотов, мощности двигателя и высоты вала устанавливаются отдельно в зависимости от габаритов резервуара) (рисунок 3).



Рисунок 3 – Мешалки серии «Mix GMS» на объекте очистки сточных вод

Полевые испытания новой модели мешалки серии «Mix GMS» проходили на муниципальных предприятиях водоотведения города Кронштадта с целью оценить её эффективность и стабильность функционирования при разных нагрузках (оптимизация числа оборотов вала для достижения качественного перемешивания при минимальных затратах энергии) и поддержки активности состояния осадков в глубинных частях реакторов денитрификации или дефосфатизации (рисунок 4).



Рисунок 4 – Установка мешалок серии «Mix GMS» на объекте очистки сточных вод (подготовка к испытаниям)

Во время тестов сравнивались результаты производительности гиперболической мешалки серии «Mix GMS» и зарубежных аналогов в аналогичных условиях второго отделения аэротенков, проверялась пригодность российского продукта для целей городского водоснабжения СПбГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». Были определены следующие ключевые индикаторы успешного завершения тестового периода:

- сохранение необходимых рабочих характеристик (однородность распределения илового раствора, исключение кислородных соединений в растворе, предотвращение накопления осадков на дне);

- длительность бесперебойной работы мешалки без аварий и неисправностей;
- уровень сервисного обслуживания, требуемый для надёжного функционирования, необходимые ресурсы и усилия персонала в рамках регламентных процедур;
- расход электрической энергии;
- выявление превосходства отечественных аппаратов перед продукцией иностранных производителей.

В течение трёх месяцев (июль-сентябрь 2017 года) еженедельно брались пробы в различных участках аэротенка на глубинах одного, трёх и пяти метров. Анализ концентраций осуществлялся методом измерения сухих остатков. После окончания годовой эксплуатации контрольное освобождение резервуара подтвердило отсутствие скоплений осадка на дне [22].

Применённая методика подсчёта общей стоимости жизни оборудования разработана аналогично применяемой для насосных агрегатов. Общая стоимость владения рассчитывается по формуле:

$$CLC = C_{acq} + C_{inst} + C_{el} + C_{op} + C_{maint} + C_{down} + C_{env} + C_{disp}, \quad (1)$$

где C_{acq} – первоначальная цена покупки;

C_{inst} – монтажные и вводные мероприятия;

C_{el} – электроэнергия за весь срок службы;

C_{op} – операционные издержки (включающие оплату труда сотрудников);

C_{maint} – ремонт и техническое обслуживание (включая покупку запчастей и трудовых ресурсов);

C_{down} – потери от вынужденных остановок;

C_{env} – экологические меры защиты окружающей среды;

C_{disp} – ликвидационная стоимость оборудования.

Итоги вычислений по оценке суммарной стоимости жизненного цикла C_o , C_s , C_{env} и C_d намеренно пропущены, поскольку их влияние одинаково

для обеих рассматриваемых моделей мешалок. Наибольшее значение имеют факторы начальной цены изделия и расходов на электроэнергию. Проведённый анализ показывает, что российская мешалка «Mix GMS» демонстрирует лучшую общую экономичность, несмотря на повышенные обороты и потребление электричества. При сравнении приборов в равных условиях стоимость нашего аппарата оказывается примерно в два с половиной раза ниже иностранной альтернативы. Следует учитывать, что проведённый расчёт носит условный характер и должен применяться конкретно для каждой ситуации. Стоимость немецкой мешалки НС приведена для единичного экземпляра, однако при оптовой закупке ценовые показатели тоже могли бы значительно снизиться. Тем не менее, отечественная продукция обходится дешевле из-за отсутствия необходимости платить таможенные пошлины, транспортные услуги из Европы и оплачивать услуги посредников.

Практическим результатом проведенных заводских экспериментов стало следующее заключение:

- обе испытанные мешалки демонстрируют высокий уровень перемешивания, отклонение коэффициента вариации состава по сухой массе не превышало десяти процентов;
- энергетическая эффективность российских и немецких мешалок оказалась практически идентична;
- при вскрытии резервуара оказалось, что зона обработки российской мешалки была свободна от накопленных донных осадков благодаря наличию особых лопастей на нижней части колеса;
- в ходе тестирования никаких негативных явлений, отрицательно сказывающихся на работоспособности прибора, зафиксировано не было, агрегат работал непрерывно свыше двенадцати месяцев без замеченных дефектов.

Важно заметить, что в коридорных секциях азротенка размещение гиперболической мешалки обеспечивает обработку участка размером

максимум вдвое превышающим ширину канала (такое же соотношение ширины к длине около 2,3:1 рекомендован и для подводных мешалок). В квадратных резервуарах оптимальным решением станет центральное расположение вертикальных мешалок, что позволяет равномерно распределять активный ил. Здесь чётко просматривается явление формирования областей слабого течения, которое способствует образованию накапливающегося осадка.

Переходя к рассмотрению принципа работы гиперболических мешалок с учётом траектории движения жидкости, отметим, что особое положение роторного механизма внизу создаёт преимущественно радиальный поток, эффективно поднимающий тяжёлые фракции с нижних слоёв жидкости. Правильный подбор режима вращения устраняет риск появления скоплений осадка в пределах рабочей зоны.

Традиционно известно, что основной недостаток вертикальных механизмов заключается в наличии длинной оси для фиксации роторной части, вибрация которой в случае дисбаланса распространяется на опорные узлы и вызывает преждевременный износ деталей.

Турбинное колесо круглой формы генерирует стабильно направленный радиальный поток без существенных пульсаций. Осевые нагрузки направлены не вверх, а вниз, что снижает нагрузку на подшипники и узел крепёжного кронштейна. Такое решение ведёт к уменьшению вибрационной нагрузки на установку, увеличению ресурса работы электропривода, возможности отказаться от межшпинниковых элементов, снизить массу и потребность в материалах опорных конструкций. Исходя из представленных фактов, мы можем выделить сильные и слабые стороны разных видов перемешивающих приспособлений.

Расчет денитрификатора.

Расход сточных вод на один аэротенк составляет: $20007 \text{ м}^3/\text{сут}$ ($833 \text{ м}^3/\text{ч}$). «Продолжительность обработки сточной воды в денитрификаторе:

$$t_{\text{ден}} = \frac{(C_{\text{N-NO}_3})_{\text{ден.вход}}^{\text{ден}} - (C_{\text{N-NO}_3})_{\text{ден.выход}}^{\text{ден}}}{a_{\text{ден}}(1-S)\rho_{\text{ден}}} \cdot \frac{20}{T}, \quad (2)$$

где $C_{\text{N-NO}_3 \text{ ден.вход}}$ – концентрация нитратов на входе в денитрификатор, мг/л;
 $C_{\text{N-NO}_3 \text{ ден.выход}}$ – концентрация нитратов на выходе из денитрификатора, мг/л;
 $a_{\text{ден}}$ – доза ила в денитрификаторе, г/л (принимаем 2,5 г/л);
 $\rho_{\text{ден}}$ – скорость восстановления нитратов, принимается в зависимости от начального значения нитратов по таблице [21, с.303], принимаем 7,5 мг/(г·час);
 T – температура сточной воды, °C принимаем 18 градусов.

Значение азота нитратного в сточной воде, поступающей в денитрификатор с учетом рециркуляционного потока:

$$(C_{\text{N-NO}_3})_{\text{ден.вход}}^{\text{ден}} = \frac{C_{\text{N-NO}_3} \cdot Q + (C_{\text{N-NO}_3})_{\text{ц}} \cdot Q_{\text{ц}}}{Q + Q_{\text{ц}}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{N-NO}_3}$ – концентрация азота нитратного в исходной сточной воде, мг/л;
 $(C_{\text{N-NO}_3})_{\text{ц}}$ – концентрация азота нитратного в циркулирующем иле, мг/л;
 $Q_{\text{ц}}$ – расход циркулирующего ила, м³/сут.
 Расход циркулирующего ила:

$$Q_{\text{ц}} = Q \cdot R, \quad (4)$$

здесь требуемая степень рециркуляции активного ила R определяется из уравнения материального баланса по азоту:

$$C_{\text{N-NO}_3}^{\text{пдк}} + \Delta N + C_{\text{N-NH}_4}^{\text{пдк}} = \frac{C_{\text{N-NH}_4} + C_{\text{N-N}_{\text{орг}}}}{1 + R}, \quad (5)$$

где ΔN – количество азота, пошедшее на синтез клеток микроорганизмов в денитрификаторе и аэротенке, мг/л;

C_{N-NH_4} – концентрация азота аммонийного в исходной сточной воде,
35,2 мг/л;

C_{N-Norg} – концентрация азота органического в сточной воде, составляет
2 мг/л» [4].

Количество азота, пошедшее на синтез клеток микроорганизмов в денитрификаторе:

$$\Delta N = P \cdot M \cdot m(1 - S), \quad (6)$$

где P – прирост активного ила, мг/л;

M – доля микроорганизмов в активном иле, принимается равной 0,2-0,3;

m – доля азота в клетках микроорганизмов в пересчете на сухое вещество, принимается равной 0,05-0,15.

Принимаем среднее значение прироста активного 135,2 мг/л.

$$\Delta N = 135,2 \cdot 0,25 \cdot 0,1 \cdot (1 - 0,28) = 2,4 \text{ мг/л.}$$

Принимаем степень рециркуляции 0,5 и по формуле (5) рассчитаем значение нитратов в очищенной воде.

$$C_{N-NO_3}^{очищ} = \frac{35,2 + 2}{1 + 0,5} - 2,4 - 0,4 = 22 \text{ мг/л}$$

Полученное значение ниже ПДК для нитратов, поэтому корректировки расчетов не требуется. Расход циркулирующего ила по формуле (3) при суточном расходе сточных вод по фактическим данным:

$$Q_{ц} = 20007 \cdot 0,5 = 10003 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Значение азота нитратного в сточной воде, поступающей в денитрификатор с учетом рециркуляционного потока по формуле (2):

$$(C_{N-NO_3})_{\text{выход}}^{\text{ден}} = \frac{0 + 22 \cdot 10\,003}{20\,007 + 10\,003} = 7,33 \text{ мг/л}$$

Продолжительность обработки сточной воды в денитрификаторе по формуле (1):

$$t_{\text{ден}} = \frac{7,33 - 0}{2,5(1 - 0,28)7,5} \cdot \frac{20}{18} = 0,6 \text{ час.}$$

Объем денитрификатора:

$$W_{\text{ден}} = q \cdot t_{\text{ден}} (1 + R) = 833 \cdot 0,6 (1 + 0,5) = 750 \text{ м}^3.$$

Второй расчет – это выбор вертикальных мешалок.

Для того чтобы рассчитать количество мешалок, необходимых для системы денитрации, необходимо уточнить характеристики этой системы. Предположим, что мощность мешалки составляет 1,5 кВт, скорость вращения пропеллера – 24 мин⁻¹, производительность мешалки – 3,9 м³/л, а диаметр пропеллера – 250 см.

«Для активизации бактерий и ускорения процесса биологической очистки воды необходимо достаточно интенсивное перемешивание, например, со скоростью 0,2-1 м/с. Если средняя скорость перемешивания составляет 0,5 м/с, а глубина перемешивания – 3 м, то объем перемешиваемой воды равен $750 \times 3 = 2250$ куб. м. При интенсивности перемешивания 0,5 м/с за один час перемешивается 1800 куб. м ($0,5 \times 3600$) воды; производительность одной мешалки составляет 3,9 куб. м на литр, т. е. 3900 куб. м в час ($3,9 \times 1000$). Следовательно, для перемешивания всего объема воды требуется $1,25 \times 2 = 2,5$ мешалки (округлим до 3) (т.е. необходимо не менее трех мешалок мощностью 1,5 кВт). Выберем мешалки «Mix GMS» 1,5 кВт» [24].

1.3 Технологические решения денитрификации на сооружениях очистки сточных вод

Для жизнедеятельности организмов активного ила требуется небольшое количество растворенного кислорода, при этом критической считается концентрация $0,2 \text{ мг/дм}^3$, а удовлетворительной – $0,5 \text{ мг/дм}^3$ [20]. Поэтому для обеспечения достаточного перемешивания иловой смеси и предотвращения выпадения осадка в осадок норма растворенного кислорода должна составлять не менее $1,0\text{-}2,0 \text{ мг/дм}^3$. При превышении требуемой концентрации растворенного кислорода не только не повысится активность микроорганизмов и не улучшится степень очистки, но и возрастут энергозатраты. Улучшение условий аэрации и повышение качества очистки может быть достигнуто путем правильного выбора и установки аэрационной системы. Из вышесказанного можно сделать вывод, что аэрационные системы, предназначенные для реакторов с активным илом, должны выполнять две задачи:

- обеспечивать кислород, необходимый для биологической активности аэробных микроорганизмов активного ила;
- обеспечивать гомогенизацию и перемешивание, необходимые для непрерывного контакта микроорганизмов с аэрационной водой и загрязняющими веществами.

Осветленная вода после первичных отстойников разделена на два потока. Основной поток в количестве 70% общего расхода очищаемой воды поступает в денитрификатор первой ступени, сюда же подается рециркулирующий ил из вторичных отстойников. Из денитрификатора первой ступени иловая смесь через щелевую перегородку поступает в нитрификатор первой ступени, а оттуда – в денитрификатор второй ступени. В начало денитрификатора второй ступени подается оставшаяся часть (30% общего расхода) очищаемой сточной воды, которая использована в качестве органического субстрата на второй ступени денитрификации [10].

«Основные показатели состава исходных сточных вод в период эксперимента: БПК_{полн} 130–190 мг/л, ХПК 290–380 мг/л, взвешенные вещества 130–180 мг/л, аммонийный азот 17–25 мг/л, фосфаты 5,5–10 мг/л, нитраты и нитриты отсутствовали. Из денитрификатора второй ступени иловая смесь поступает в нитрификатор второй ступени, откуда направляется на вторичные отстойники. Здесь происходит разделение иловой смеси: рециркулирующая часть активного ила направляется в денитрификатор первой ступени, а очищенная сточная вода отводится на обеззараживание.

В зонах нитрификации для обеспечения аэрации и перемешивания иловой смеси уложены фильтросные пластины. В этих зонах два варианта перемешивания иловой смеси: пневматическое и механическое» [23].

«Перемешивающие устройства. Известно, что для проведения процесса денитрификации необходимо обеспечить концентрацию растворенного кислорода в зоне денитрификации на уровне 0,5–0,8 мг/л, при этом не допускается осаждение активного ила на дно денитрификатора. Наиболее распространенным способом поддержания активного ила во взвешенном состоянии в денитрификаторах является перемешивание с использованием механических мешалок. Некоторые исследователи считают, что перемешивание в денитрификаторах допустимо осуществлять воздухом.

Опытно-промышленные очистные сооружения были оснащены оборудованием, позволившим сравнить оба способа поддержания иловой смеси во взвешенном состоянии в денитрификаторах: пневматическое перемешивание крупнопузырчатой аэрацией и перемешивание механическими мешалками. Контроль содержания растворенного кислорода производился по длине, ширине и глубине коридоров аэротенка с помощью переносного кислородомера» [10].

Пневматическое перемешивание осуществлялось в режиме крупнопузырчатой аэрации. Для этого в обоих денитрификаторах по дну зон были уложены дырчатые трубы диаметром 75 мм, диаметр отверстий 8 мм,

расстояние между отверстиями 100 мм. Воздух подавался в количестве, обеспечивающем поддержание иловой смеси во взвешенном состоянии.

«В ходе испытания технологической схемы (рисунок 5) выявлено, что при подаче воздуха в зоны денитрификации концентрация растворенного кислорода во всех зонах экспериментальных сооружений (как денитрификаторов, так и нитрификаторов) была примерно на одном уровне независимо от назначения зон. В большинстве случаев она составляла 3–4 мг/л, увеличиваясь в отдельные дни до 5–9 мг/л. Таким образом, рекомендуемый кислородный режим в зонах денитрификации не выдерживался» [4].

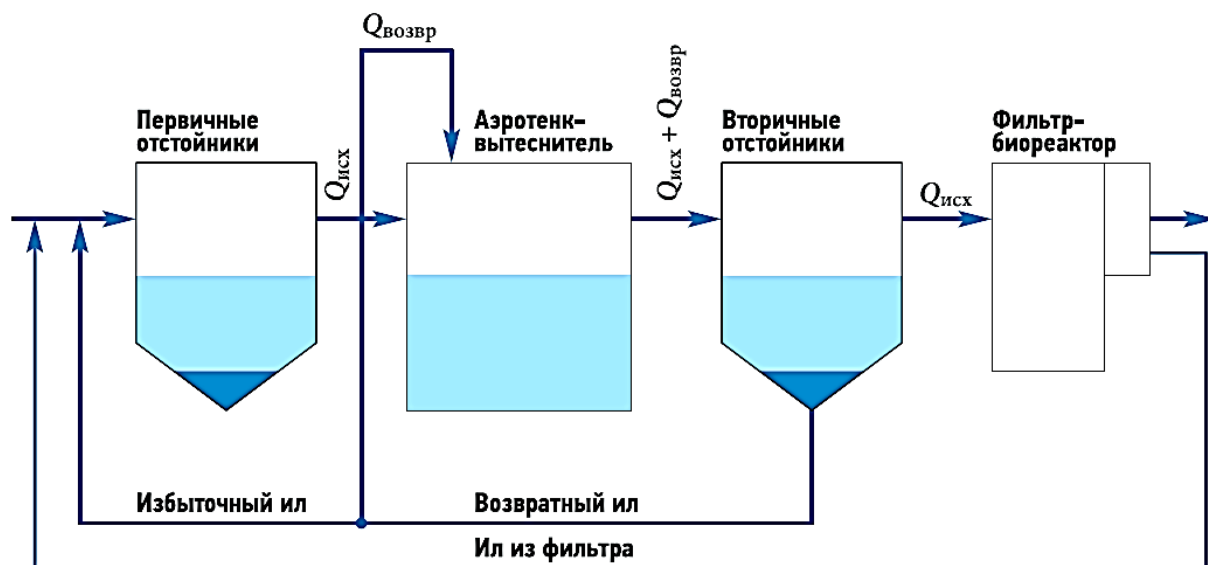


Рисунок 5 – Технологическая схема процесса очистки сточных вод

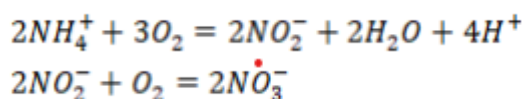
1.4 Проблема глубокого удаления соединений азота из сточных вод (процесс денитрификации)

В процессе реализации производственного плана и его совершенствования с помощью соответствующих процессов денитрификации при строительстве водоочистных сооружений возникают очень важные проблемы, требующие обоснования в случае разрушения покрытия. Чтобы учесть ключевые факторы процесса денитрификации углерода и сыграть образовательную и практическую роль в этом процессе,

руководство школы продолжает строительство очистных сооружений в Мурманске [3].

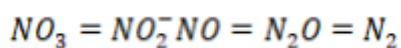
Предполагается, что очистка грунтовки может быть связана с присутствием свободного углекислого газа в газированной воде, предназначенной для проверки наличия органических компонентов и загрязняющих веществ во время денитрификации. цель этого исследования - защитить окружающую среду от загрязнения, визуализации, мусора, загрязнения природы, загрязнения окружающей среды. В дополнение к автотрофным микроорганизмам, азотно-аммиачная вода содержит азотистый осадок, который позволяет использовать неметаллические неорганические питательные вещества. Кроме того, азотно-аммиачная вода содержит азотистый осадок, который позволяет использовать неметаллические неорганические питательные вещества. Азотно-аммиачная вода содержит азотистый осадок, который позволяет использовать неметаллические неорганические питательные вещества, образование основных элементов, нитратов.

Реакции окисления азота аммонийного:



Одной из основных проблем организации спиралей в азротанке является наличие необходимого количества, скорость процесса производства нитратов зависит от температуры окружающей среды. У гетеротрофных бактерий основной целью этого процесса является окисление органических веществ в бескислородном состоянии кислородом, выделяемым нитридом углерода и его соединениями, этот процесс происходит, когда органические вещества окисляются из нитрида углерода и его соединений, что приводит к окислению нитрида кислорода и образованию молекулярного азота в бескислородном состоянии.

Как нейтрализовать газообразный азот:



Что касается основных характеристик, то здесь есть все возможности для использования неочищенных сточных вод, которые определяются на основе необходимых модификаций для определения содержания азота, а не основного компонента в СРС. В этом методе органический слой и сточные воды, содержащие аммиачный азот, попадают в кислородную зону и активируются. Органические субстраты и сточные воды, содержащие аммиачный азот, попадают в зону оксигенации с образованием активных глин, в то время как нитраты попадают в зону оксигенации с обратным потоком активных глин, тем самым создавая условия для денитрификации зоны оксигенации [7].

Рассмотрим схему с предвключённой денитрификацией (рисунок 6).

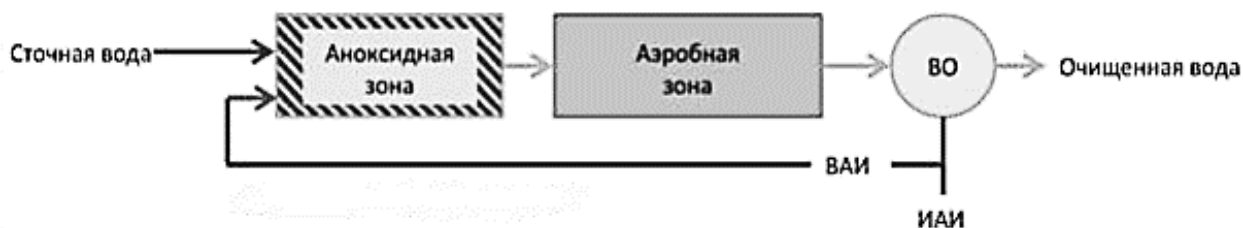


Рисунок 6 – Схема с предвключённой денитрификацией

В этом методе эффективность денитрификации ограничивается количеством нитратов, которые попадают в кислородную зону, через которую глина течет обратно, и для удаления нитратов необходимо добавить почвенную смесь из вентиляционной зоны аэрационного резервуара. В этом случае источником органического слоя в процессе денитрификации является внешний источник углерода и биомасса активного ила (метанол, этиловый спирт, патока, глицерин и др. Метод дополнительной денитрификации для очистки сточных вод с высокой концентрацией аммиачного азота и относительно низкой концентрацией органических соединений позволяет эффективно снижать содержание азота без добавления внешнего источника углерода. Кроме того, этот метод имеет то преимущество, что не отделяет нитраты [20].

«Нижний слой не требуется для очистки сточных вод, это внешнее преобразование углерода, поэтому его необходимо добавить для обеспечения

стабильности и производительности, необходимых в процессе денитрификации. Потенциальная стоимость продуктов, используемых в качестве дополнительного источника углерода при транспортировке для денитрификации, зависит от уровня биоразложения этих веществ» [11].

Было обнаружено, что для денитрификации можно использовать основные добавки, и были изучены значения НРС для каждого материала (рисунок 7).

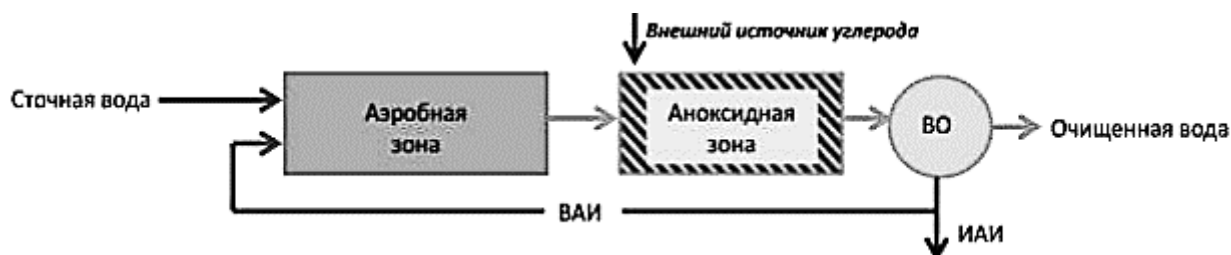


Рисунок 7 – Схема с пост-денитрификацией

Согласно полученным результатам, преимущества метанола, глюкозы и глюкокортикоидов маловероятны, но их использование ограничено финансовыми трудностями и физическими нагрузками. конечно, биоразлагаемых экстрактов в остатках ферментации немного, но доступность этого продукта позволяет получать его внутрь, он не используется в токсичных препаратах и обеспечивает низкую стоимость (стоимость ферментации) (таблица 1).

Таблица 1 – Значения ХПК для различных органических соединений

Органический субстрат	Химическая формула	Значение ХПК, мг/л
Метанол (100%)	CH_3OH	1 188 000
Этанол (100%)	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$	1 649 000
Уксусная кислота (100%-я концентрация)	CH_3COOH	1 121 000
Раствор уксусной кислоты (20%-й раствор)	CH_3COOH	219 000
Сахар (сироп) (50%-я концентрация)	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	685 000
Глицерин (100%)	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	1 538 420
Ферментированный первичный осадок	ЛЖК (в основном уксусная и пропионовая кислоты)	400...800
Ацетат натрия (30%)	NaCH_3COO	235 558
Сахароза (60%)	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	866 006
Сахар (60%)	$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	1 777 440
Глюкоза (100%)	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	1 647 800
Меласса (75%)	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{NNaO}_3\text{S}$	1 006 425

Чтобы гарантировать, что азотная смесь полностью очищается автоматически и физико-химическими методами перед циклом биологической обработки, в этом случае геобиоценоз не останавливает тяжелую почву, и, следовательно, процесс очистки никогда не прекращается. Таким образом, азотная смесь должна быть очищена, и она должна быть очищена [5].

Указание источника углерода, используемого для очистки, считается дорогостоящим и в этом случае, как и в случае с остатками первичной ферментации, цикл можно использовать бесплатно, что напрямую защищает его использование от внешних свойств первичного углерода. Поскольку азот получают из сточных вод, он считается наиболее подходящим для решения проблем циркуляции в этой работе и установке биорадиации. Одним из ограничений его применения является необходимость использования основного субстрата для быстрого окисления, но, согласно результатам исследования, это положение не считается ограничением.

Выводы по первой главе:

Выполнен обзор методов расчета денитрификатора очистки сточных вод от биогенных элементов, исследованы различные технологические схемы глубокой очистки сточных вод от соединений азота и фосфора. На основании исследований показано, что применение совместной очистки сточных вод биологическими и реагентными методами на базе существующих сооружений обеспечит высокую степень очистки от соединений азота более 85% и соединений фосфора более 95%. Выбрано оборудование для перемешивания (гиперболический тип мешалок). Данный тип мешалок фирмы «Mix GMS» имеет гидравлически эффективную конструкцию и небольшое количество легких в обслуживании компонентов для надежной и безотказной эксплуатации.

Глава 2 Условия для эффективной реализации процесса денитрификации в аноксидных зонах аэротенков

2.1 Эффективность пробразования денитрификации в зонах аэротенков. Пример сооружения биологической очистки стоков

Концентрация растворенного кислорода должна быть ниже 0,3 мг/л.

Для «достижения этого могут применяться разные методы:

- отсутствие подачи воздуха для перемешивания,
- минимальное количество подаваемого воздуха для перемешивания,
- использование пульсирующей аэрации для перемешивания иловой смеси,
- применение деоксидации возвратного активного ила» [4].

Необходимое количество органических веществ для успешного протекания денитрификации может быть обеспечено за счет:

- поступающих сточных вод,
- внешних источников углерода,
- ферментированных осадков сточных вод.

Для обеспечения качественного перемешивания могут использоваться различные методы, такие как:

- циклическая или пульсирующая аэрация,
- механические мешалки,
- перемешивающие насосы.

Количество нитратов, подаваемых в зону денитрификации, должно соответствовать необходимой величине для достижения заданного качества очистки (рисунок 8). Суммарный расход возвратного активного ила ($Q_{\text{В.А.И.}}$) и нитратного рецикла ($Q_{\text{Н.Р.}}$) определяется по формуле: $Q_{\text{В.А.И.}} + Q_{\text{Н.Р.}} = Q_{\text{с.в.}} \times (\chi \text{N-NO}_3 / \text{N-NO}_3 (\text{треб}) - 1)$, где $Q_{\text{с.в.}}$ – расход поступающих сточных вод, м³/сут; $\chi \text{N-NO}_3$ – концент азота нитрата, нужное требуется удалять в процесса денитрификации, мг/л = г/м³ ; $\text{N-NO}_3 (\text{треб})$ – нужная концентрации азота

нитратов в воде, $\text{мг/л} = \text{г/м}^3$. Число нитратов, рециркулируемы в аноксидное зону: $\text{N-NO}_3 (\text{рец}) = \text{N-NO}_3 (\text{вых}) \times (Q_{\text{ВАИ}} + Q_{\text{Н.Р.}})$, где $\text{N-NO}_3 (\text{вых})$ – концентрация азота нитратов в очищенной воде, $\text{мг/л} = \text{г/м}^3$ [10].

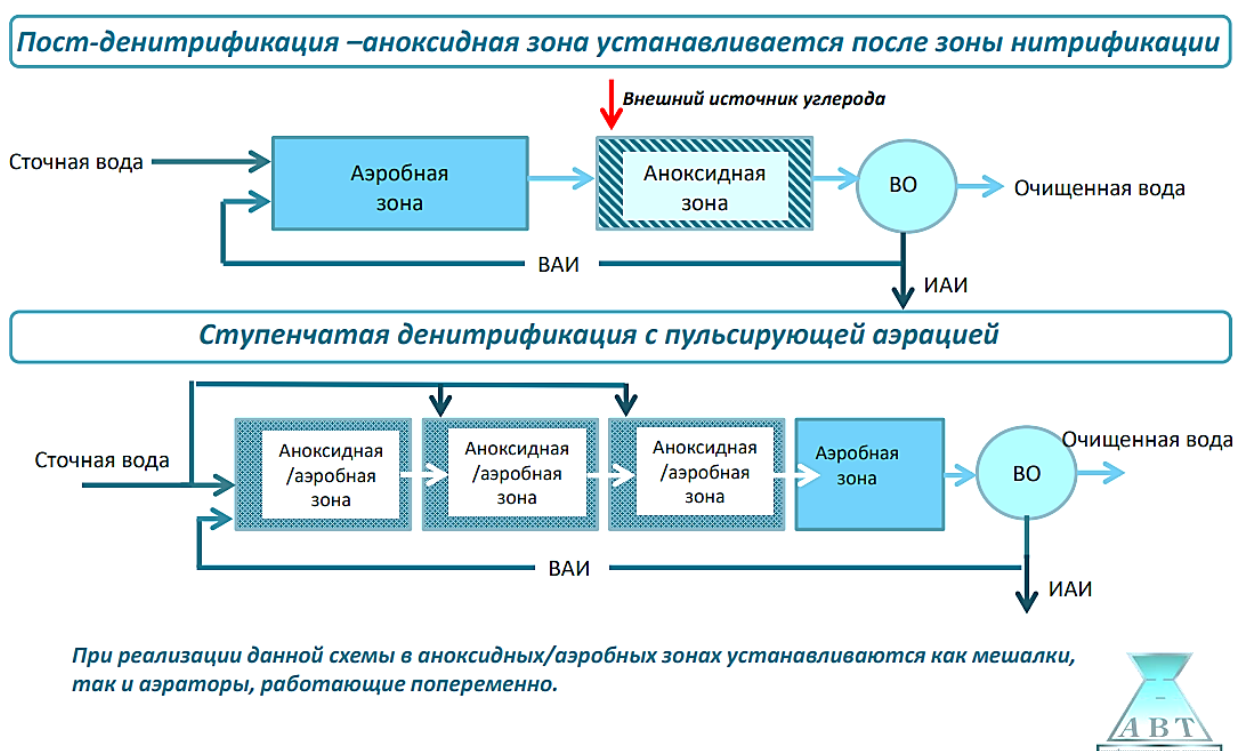


Рисунок 8 – Процесс денитрификации – основные схемы реализации процесса

Физико-химические процессы очистки сточных вод, такие как нитрификация и денитрификация, требуют применения специализированных сооружений для биологической очистки. К традиционным типам таких установок относятся аэротенки и биофильтры. Для обработки сточных вод используется особая система, состоящая из трех стадий, известная как система трех иловых культур.

Если же в процессе очистки планируется применять аэротенки с продленной аэрацией, то весь процесс будет осуществляться в одной стадии, которая будет направлена на полную нитрификацию в рамках одного сооружения (рисунок 9).



Рисунок 9 – Пример локальных очистных сооружений

В данном контексте будет функционировать только секция денитрификации, куда будет подаваться органический субстрат. Перемешивание в этой зоне будет осуществляться с помощью механических мешалок без подачи воздуха. В процессе очистки большое значение имеет ионный обмен сточных вод. При использовании двухступенчатой обработки сточных вод будет задействован аэротенк с продленной аэрацией, а также отдельный денитрификатор. В таком случае могут быть небольшие отклонения от традиционной последовательности обработки, «поскольку при высоком содержании нитратов в сточных водах целесообразно сначала установить зону денитрификации и отдельно зону аэрации, где будет происходить завершающее окисление органических веществ» [11].

«Локальные очистные сооружения (ЛОС) (рисунок 10) – это комплекс технических устройств, предназначенных для очистки сточных вод в местах их образования при отсутствии централизованной канализации. Основное назначение ЛОС – эффективная очистка бытовых или производственных стоков от загрязняющих веществ до уровня, позволяющего безопасно сбрасывать их в окружающую среду или использовать повторно. В отличие от центральных очистных станций, локальные сооружения устанавливаются непосредственно на территории частных домов, дач, коттеджных поселков или предприятий. Они позволяют решить проблему утилизации сточных вод там, где отсутствует возможность подключения к централизованной канализационной системе» [1, 4].

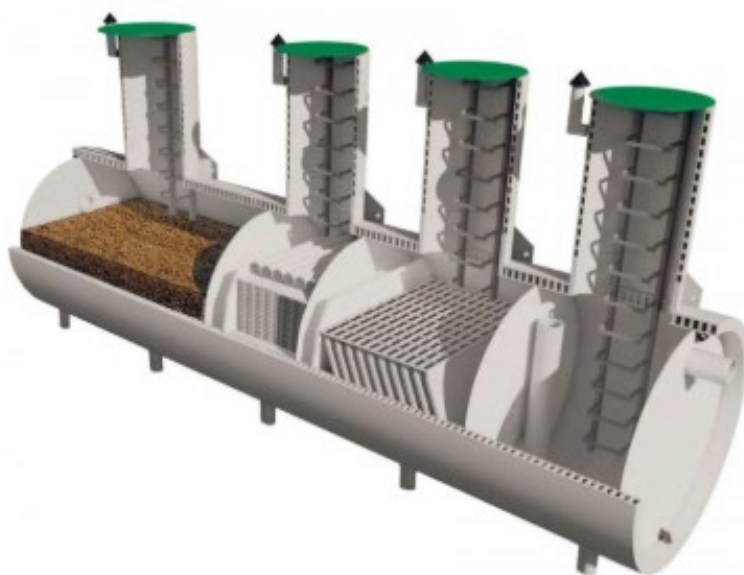


Рисунок 10 – Современная установка локального очистного сооружения

«Локальные очистные сооружения (ЛОС) – это комплекс технических устройств, предназначенных для очистки сточных вод в местах их образования при отсутствии централизованной канализации. Основное назначение ЛОС – эффективная очистка бытовых или производственных стоков от загрязняющих веществ до уровня, позволяющего безопасно сбрасывать их в окружающую среду или использовать повторно» [1, 4].

«В отличие от центральных очистных станций, локальные сооружения устанавливаются непосредственно на территории частных домов, дач, коттеджных поселков или предприятий. Они позволяют решить проблему утилизации сточных вод там, где отсутствует возможность подключения к централизованной канализационной системе.

Современные ЛОС имеют высокую степень очистки сточных вод – от 95% до 98%. Благодаря своей компактности и эффективности с каждым годом они набирают все большей популярности как среди владельцев частных домов, так и на предприятиях малого и среднего бизнеса.

Принцип работы локальных очистных сооружений основан на использовании нескольких камер, которые последовательно проходят сточные воды. Особенности работы конкретного ЛОС зависят от сферы его применения. В станциях могут использоваться разные методы очистки среды:

- механическая – используется для работы с ливневыми стоками. Здесь происходит удаление крупных неорганических примесей (песок, грязь, пластик и т.д.) С помощью решеток, сит или песколовков. Это технология, которая не подходит для органики и химических примесей;
- химическая – используются в промышленности. С помощью различных реактивов опасные и вредные вещества становятся нерастворимыми и выпадают в осадок. Далее их можно удалить механическим способом. Аналогичным образом в промышленности применяются физико-химические методы. В этом случае для очистки стоков используют не только реагенты, но и различные физические процессы.

Некоторые ЛОС могут работать по принципу биологической очистки. Он основан на деятельности аэробных бактерий, которые активно размножаются и питаются органическими веществами в присутствии

кислорода. Для обеспечения эффективной работы этих микроорганизмов в систему подается воздух с помощью компрессора или аэратора» [1].

«Процесс очистки в типичной станции биологической очистки можно разделить на следующие стадии:

- поступление сточных вод в приемную камеру или отстойник;
- первичное отстаивание, где происходит отделение твердых частиц;
- аэрация и биологическая очистка в аэротенке;
- вторичное отстаивание для отделения активного ила;
- доочистка и обеззараживание;
- отвод очищенной воды.

Эффективность работы ЛОС зависит от температуры сточных вод, концентрации загрязняющих веществ, наличия достаточного количества кислорода и общей нагрузки на систему.

В зависимости от принципа работы, конструктивных особенностей и степени очистки, выделяют несколько основных видов локальных очистных сооружений.

Наиболее простой и доступный вид ЛОС – это септики (рисунок 11). Представляет собой герметичный резервуар, разделенный на несколько камер, где происходит естественное отстаивание стоков и частичное их разложение анаэробными бактериями. Основные типы септиков:

- однокамерные – простейшая конструкция, где все процессы очистки происходят в одном резервуаре;
- двухкамерные – более эффективны, так как имеют отдельные камеры для отстаивания и биологической очистки;
- трехкамерные – обеспечивают более качественную очистку за счет дополнительной камеры для доочистки» [4].



Рисунок 11 – Септик

«Более совершенный тип ЛОС – это станции биологической очистки (СБО), обеспечивающий высокую степень очистки (до 98%). Работают на основе активного ила, который в присутствии кислорода перерабатывает органические загрязнения. Основные типы СБО (рисунок 12):

- с прикрепленной биопленкой – бактерии находятся на специальных носителях (биофильтрах);
- с активным илом – бактерии свободно плавают в аэротенке;
- комбинированные – совмещают оба принципа работы.

СБО представляют собой сложную конструкцию и требуют постоянного электроснабжения для работы компрессоров» [5].



Рисунок 12 – Станции биологической очистки

«Локальные очистные сооружения имеют множество преимуществ, среди них:

- обеспечивают высокую степень очистки сточных вод, что минимизирует негативное воздействие на окружающую среду;
- не требуют подключения к централизованной канализации, что особенно важно для удаленных объектов;
- требуют минимальных расходов на обслуживание (особенно для систем с самотечным принципом работы);
- обладают длительным сроком службы — 50 лет и более;
- занимают относительно небольшую площадь на участке;
- могут повторно использоваться для полива, технических нужд и т.д.

Одним из основных недостатков очистных сооружений является высокая стоимость установки. Кроме того, они нуждаются в регулярном обслуживании, включающем откачку ила, проверку работы механизмов и замену расходных материалов. Большинство современных ЛОС также требуют постоянного электроснабжения, а в условиях холодного климата может потребоваться дополнительное утепление из-за чувствительности систем к температурным условиям. Важно учитывать, что не все типы ЛОС можно установить на участках с высоким уровнем грунтовых вод или в глинистых почвах, что ограничивает их применение в определенных регионах. При неправильной эксплуатации, например, при использовании агрессивных химических средств или превышении расчетной нагрузки, возможно нарушение работы всей системы» [5].

2.2 Проблемы в области методик, нормативного регулирования процесса денитрификации

Ключевая трудность процесса денитрификации заключается в создании анаэробических условий. Эта задача усложняется предыдущим процессом — нитрификацией, поскольку их условия противоречат друг другу по

содержанию растворенного кислорода и органических загрязнителей. Для обеспечения жизнеспособности денитрификации необходимы:

- наличие мезотрофных гетеротрофных микроорганизмов, ответственных за процесс,
- адекватные запасы органических субстратов, чтобы достичь необходимой эффективности очистки.

Денитрификация может происходить только после нитрификации, что предотвращает пищевые загрязнения. В данной ситуации растроченные органические соединения в «аноксичном водоеме окисляются за счет растворенного кислорода, поступающего с рекультивированной водой. Сначала подвергаются окислению те органические вещества, которые окисляются наиболее легко. Этот аспект является важным при проектировании аэрационного резервуара для нитрификации и денитрификации.

Для создания анаэробных условий необходимо:

- наличие нитратов и минимизация растворенного кислорода. Попадание растворенного кислорода в анаэробную зону возможно как при рециркуляции нитратов, так и при рециркуляции активного ила. Для решения данной проблемы требуются механические мешалки;
- поддержание оптимального значения pH среды для процесса денитрификации;
- достаточно длительное время пребывания сточных вод в зоне денитрификации с учетом текущей температуры» [1].

«Процесс денитрификации не должен допускать присутствие вредных веществ. Если качественные и количественные характеристики сточных вод, поступающих на биологическую очистку, не соответствуют проектным данным, это может снизить эффективность биохимического процесса и не обеспечить заданное качество очищенной воды [25]. В реальных условиях эксплуатации затраты на возврат активного ила и рециркуляцию нитратов

могут корректироваться с учетом текущего состояния сточных вод. В анаэробную зону сооружения с рециркуляцией активного ила и нитратов должно поступать необходимое количество нитратов для успешной денитрификации, что гарантирует соответствующее качество очищенной воды по содержанию нитратов.

Эффективность денитрификации непосредственно влияет на качество очистки сточных вод и соблюдение экологических норм. Процесс не только способствует удалению нитратов, предотвращая эвтрофикацию и создание анаэробных условий в водоемах, но также представляет собой важный этап в комплексной обработке сточных вод, обеспечивая более высокий уровень очистки от органических и азотных загрязнителей» [1] (рисунок 13).



Растворенный кислород поступает в анаэробную зону как с рециклом возвратного активного ила, так и с "нитратным" рециклом. В этом случае, часть органических соединений, поступающих в анаэробную зону со сточными водами, будет окисляться растворенным кислородом, поступавшим с рециклами. В первую очередь, при этом будет окисляться легко окисляемые органические вещества.

ДАННЫЙ НЮАНС НЕОБХОДИМО УЧИТЫВАТЬ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АЭРОТЕНКОВ С РЕАЛИЗАЦИЕЙ ПРОЦЕССОВ НИТРИ-ДЕНИТРИФИКАЦИИ.

При определении достаточности количества субстрата для реализации процесса денитрификации следует закладывать не расчетное количество органического субстрата, полученного по рассмотренным выше формулам, а принимать коэффициент запаса.

Рисунок 13 – Особенности реализации процесса денитрификации

«Для успешного осуществления процесса денитрификации необходимо создать оптимальные условия для функционирования микроорганизмов, особенно обеспечить наличие достаточного количества органических веществ и исключить свободный растворенный кислород в анаэробной зоне. Понимание процессов, определяющих денитрификацию, а также факторов, влияющих на ее эффективность, является важным аспектом для инженеров и

технологов, занимающихся проектированием, строительством и эксплуатацией очистных сооружений» [1] (рисунок 14).

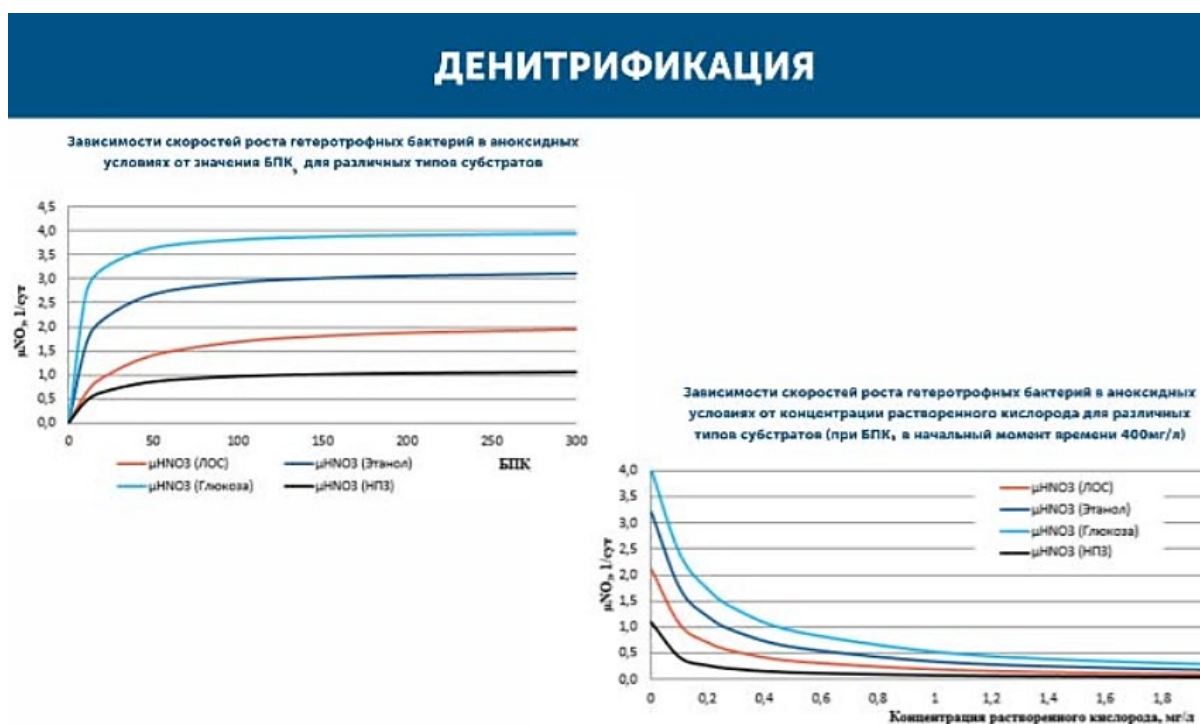


Рисунок 14 – Графическая иллюстрация процесса денитрификации

«В следующей части нашего обсуждения мы более подробно рассмотрим факторы, влияющие на эффективность денитрификации, а также основные трудности, с которыми сталкиваются специалисты в процессе эксплуатации очистных сооружений. Кроме того, мы предложим практические рекомендации для оптимизации этих процессов и повышения качества очистки сточных вод» [1].

2.3 Факторы, влияющие на эффективность денитрификации

«Для успешной реализации процесса денитрификации в очистных сооружениях необходимо учитывать множество аспектов, каждый из которых может существенно влиять на результативность этого процесса. Ниже представлены ключевые факторы, заслуживающие особого внимания» [3]:

- «Влияние концентрации растворенного кислорода. Концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне является одним из наиболее критичных параметров. Для эффективной денитрификации она должна быть максимально низкой, поскольку присутствие кислорода препятствует деятельности денитрифицирующих бактерий, которые предпочитают извлекать кислород из нитратов. Если уровень растворенного кислорода превышает 0,2 мг/л, процесс денитрификации может замедлиться или даже остановиться, что приводит к недостаточной очистке воды от нитратов.
- Нехватка органических соединений. Еще одним важным аспектом является наличие достаточного объема органических соединений, которые служат "пищей" для денитрифицирующих бактерий. Если биологическая потребность в органике превышает ее фактическое содержание в сточных водах, это может привести к неполному окончанию процесса денитрификации и оставлению в воде избыточных нитратов. В подобных случаях может быть необходимо добавление дополнительных источников органики.
- Сброс токсичных примесей. Токсичные вещества, поступающие в систему очистки сточных вод, могут негативно сказаться на денитрификации, угнетая активность микроорганизмов. Хотя для городских очистных сооружений этот аспект не так критичен, как для нитрификации, наличие токсикантов в промышленных сточных водах требует особого внимания и постоянного контроля.
- Температурные условия. Температура оказывает значительное влияние на скорость биохимических реакций и активность микроорганизмов. Низкие температуры могут замедлить или полностью остановить процесс денитрификации, особенно в зимний период на малых очистных сооружениях. При проектировании и эксплуатации систем необходимо учитывать местные климатические

условия и подбирать соответствующие технологические решения для оптимизации работы очистных сооружений» [21].

2.4 Проблемы проектирования и эксплуатации очистных сооружений

«Качество проектирования и эксплуатации очистных сооружений играет ключевую роль в их эффективной работе. Ошибки в расчетах, недочеты в техническом исполнении или недостаточный мониторинг могут негативно сказаться на процессе денитрификации, даже если все условия для этого кажутся идеальными.

В последующем разделе будут предложены меры, направленные на устранение и предотвращение вышеупомянутых проблем, что поможет повысить производительность очистных сооружений и улучшить качество очищенной воды, рекомендации по улучшению процесса денитрификации. Для преодоления проблем с денитрификацией и оптимизации процесса очистки сточных вод необходим комплексный подход. Ниже представлены практические рекомендации для специалистов» [5]:

- «Проверка и корректировка концентрации растворенного кислорода. Важно регулярно контролировать уровень растворенного кислорода в аноксидной зоне с помощью переносных кислородомеров. Это позволит вовремя выявлять проблемы и проводить необходимые корректировки. Адаптация аэрации: Регулируйте интенсивность аэрации в аэробной зоне, стремясь минимизировать поступление кислорода в аноксидные участки. Это может потребовать наладки оборудования или изменения конфигурации процессов.
- Оценка необходимости добавления органических соединений. Регулярно анализируйте состав сточных вод на предмет содержания органических веществ. При недостатке органики стоит рассмотреть возможность добавления внешних источников. Дозирование

органики: Разработайте систему точного дозирования органических компонентов, что обеспечит оптимальные условия для денитрификации и исключит избыточное загрязнение.

- Регулировка кислородного профиля и управление воздушными потоками. Настройте подачу воздуха для поддержания нужной концентрации кислорода в различных зонах очистных сооружений, что соответствует требованиям разных стадий очистки. Контроль возвратных потоков: Управляйте возвратными потоками активного ила для снижения переноса кислорода и нитратов из аэробных зон в аноксидные.
- Учет температурных условий при проектировании. Проектирование с учетом климата. При проектировании очистных сооружений учитывайте местные климатические условия для гарантии эффективности процессов денитрификации на протяжении всего года. Температурная адаптация. Рассмотрите возможность внедрения систем управления температурой или выбора менее чувствительных к понижению температуры технологий» [5].

«Следование этим рекомендациям не только повысит эффективность денитрификации в очистных сооружениях, но также обеспечит высокое качество очищенной воды, способствуя защите водных экосистем и соблюдению экологических норм [28,29]. Для эффективной работы очистных сооружений и успешного процесса денитрификации важно применять современные инструменты мониторинга. Эти инструменты позволяют вовремя выявлять отклонения и проводить соответствующие коррекции (рисунок 15):

- Значение кислородомера – это основной инструмент для специалистов по эксплуатации очистных сооружений. Регулярное измерение уровня растворенного кислорода в различных зонах помогает контролировать аэрацию и другие связанные процессы» [26, 27].

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССОВ.

Величина pH не только влияет на скорость процесса денитрификации, но и определяет состав конечных продуктов восстановления нитратов. Рабочее значение pH для реализации процесса денитрификации находится в пределах 7,0 - 9,0. При pH ниже 6,5 и выше 9,5 происходит ингибирование процесса денитрификации, при pH=6 и ниже, а также при pH выше 10, происходит полная остановка процесса.

Денитрификация, в противоположность нитрификации, увеличивает щелочность среды и вызывает увеличение pH среды в зависимости от буферной емкости среды.

Щелочность - восстановление 1 мг/л N-NO_3 повышает щелочность иловой смеси на 3,57 мг/л (как CaCO_3)

Рисунок 15 – Факторы, влияющие на эффективность процессов

- «Обслуживание кислородомеров, включая их калибровку и проверку, является важным аспектом их использования. Современные очистные сооружения должны быть оснащены комплексными системами, отслеживающими множество параметров в реальном времени – уровень растворенного кислорода, концентрацию нитратов, температуру и другие критические показатели.
- Анализ данных: Реальный анализ данных мониторинга позволяет адаптировать очистные процессы к изменяющимся условиям эксплуатации и составу сточных вод, что способствует повышению общей эффективности очистки.
- Подготовка и обучение персонала: Квалифицированный и подготовленный персонал - залог успешной эксплуатации, регулярные тренинги помогают специалистам быть в курсе новых достижений в сфере водоочистки и эффективно использовать оборудование.

- Разработка процедур: внедрение стандартных операционных процедур для мониторинга и реагирования на отклонения военной работы очистных сооружений обеспечивает единообразие действий и повышает надежность системы» [26,27].

«Использование современных инструментов контроля и мониторинга в сочетании с правильным проектированием, надлежащей эксплуатацией и высококвалифицированным персоналом является основой для успешной работы очистных сооружений и достижения отличного качества очистки сточных вод» [5].

Выводы по второй главе:

Рассмотрен процесс и системы работы сооружения, показана схема сооружения, влияющая на её эффективность, найдена проблема в области теории, методики, нормативного регулирования системы денитрификации и предложен ряд практических рекомендаций для улучшения процессов очистки. Рассмотрены примеры локальных очистных сооружений, а также их преимущества и недостатки. Успешная денитрификация зависит от целого ряда условий, включая концентрацию растворенного кислорода, наличие достаточного количества органических соединений, отсутствие токсичных веществ, температурный режим, а также соответствующую конструкцию и эксплуатацию очистных сооружений.

Глава 3 Выбор технологических решений денитрификации

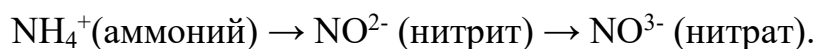
3.1 Физико-химические методы (ионный обмен, мембранные технологии)

Биологическая денитрификация (нитрификация/денитрификация).
Разница между нитрификацией и денитрификацией (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение нитрификации и денитрификации

Критерии	Нитрификация	Денитрификация
Процесс	Преобразует аммиак в нитраты и нитриты.	Преобразует азотистые соли в азот.
Вовлеченные бактерии	В этом участвуют нитрифицирующие бактерии.	В этом участвуют денитрифицирующие бактерии.
Типы бактерий	В этом процессе участвуют аммоний-окисляющие и нитрат-окисляющие микроорганизмы.	Организмы, окисляющие аммоний, и организмы, окисляющие нитраты, в этом не участвуют.
Тип биопроцесса	В этом участвуют аэробные микробы.	В этом замешаны анаэробные организмы.
Влажность	Он играет важную роль в фиксации азота.	Он играет важную роль в круговороте азота.
Режим питания	Автотрофный.	Гетеротрофный.
Примеры вовлеченных микроорганизмов	Нитромонада и нитробактер – основные примеры.	Основными примерами являются <i>Pseudomonas</i> и азотбактер.

Нитрификация — это процесс, при котором аммиак превращается в нитриты (NO^{2-}) и далее в нитраты (NO^{3-}) с помощью нитрифицирующих бактерий. Эти соли могут легко усваиваться растениями.



Механизм нитрификации включает в себя два основных этапа:

- окисление аммиака до нитрата;
- окисление нитрата до нитрита.

Нитрификация начинается с окисления аммиака до нитритов. Этот «процесс катализируют бактерии, окисляющие аммиак (АОВ), далее эти бактерии используют аммиак в качестве источника энергии и производят нитриты в качестве побочного продукта, этот этап катализируется монооксигеназой аммония. Следующий этап — окисление нитритов до нитратов, которое осуществляется бактериями, окисляющими нитриты (NOB)» [12, 13], эта реакция катализируется нитритредуктазой, после эти бактерии завершают процесс преобразования аммиака в нитраты, делая его доступным для поглощения растениями, и таким образом азот фиксируется в живом мире и далее передаётся через круговорот азота [12,13].

Нитрифицирующие бактерии подразделяются на:

- бактерии, окисляющие аммиак (АОВ): АОВ — это бактерии, которые инициируют процесс нитрификации, окисляя аммиак до нитритов. Примерами АОВ являются виды, принадлежащие к родам *Nitrosomonas* и *Nitrosospira*,
- бактерии, окисляющие нитриты (NOB): NOB — это бактерии, которые дополнительно окисляют нитриты, образуемые АОВ, до нитратов. К NOB относятся виды, принадлежащие к родам *Nitrobacter* и *Nitrospira*.

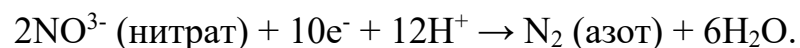
Нитрификация – важный процесс в круговороте азота в экосистеме:

- источник питательных веществ для растений: нитрификация превращает аммиак (NH_3), который часто токсичен для растений, в нитрат (NO^{3-}), который является основным источником азота для

питания растений. Нитраты легко усваиваются растениями и используются для синтеза аминокислот, белков и других важных молекул;

- повышение урожайности сельскохозяйственных культур: нитраты играют важную роль в питании растений, поскольку являются основным питательным веществом;
- повышение плодородия почвы: нитрификация пополняет запасы почвенного азота, поддерживая плодородие почвы с течением времени;
- поддерживайте качество воды: нитрификация регулирует содержание аммиака в водной среде и тем самым снижает эвтрофикацию или цветение водорослей;
- важно при очистке сточных вод: на очистных сооружениях нитрифицирующие бактерии используются для преобразования аммиака, присутствующего в сточных водах, в нитраты, которые затем можно подвергнуть дальнейшей обработке или удалить, снизив загрязнение окружающей среды.

Денитрификация – ещё один ключевой процесс в круговороте азота, при котором нитраты (NO_3^-) превращаются обратно в газообразный азот (N_2) или закись азота (N_2O) с помощью бактерий-денитрификаторов.



Механизм денитрификации. Денитрифицирующие бактерии используют аммиак и превращают его обратно в атмосферный азот, денитрифицирующим бактериям для процесса денитрификации требуется органический углерод или другие органические соединения в качестве источника электронов. Этот процесс включает в себя два этапа:

- восстановление нитрата до нитрита;
- восстановление нитрита до азота.

Нитрифицирующие бактерии используют нитрат (NO_3^-) в качестве акцептора электронов вместо кислорода во время дыхания. Первый этап включает восстановление нитрата до нитрита (NO_2^-) с помощью фермента нитратредуктазы [30, 31].

Несмотря на множество различий, между нитрификацией и денитрификацией есть несколько общих черт:

- требуемый уровень pH – слабощелочной;
- и то, и другое является микробиологическим процессом;
- играет важную роль в азотном цикле Земли.

Методы для удаления специфических загрязнителей:

- адсорбция – это процесс концентрирования веществ на поверхности твердого тела (адсорбента). Активированный уголь, благодаря своей развитой пористой структуре и огромной удельной поверхности, является высокоэффективным адсорбентом для удаления из воды растворенной органики, хлора и его соединений, а также улучшения вкуса и запаха. Это ключевой метод, когда возникает вопрос, как очистить водопроводную воду в домашних условиях для питья, так как угольные фильтры широко применяются в бытовых системах;
- ионный обмен: целевое удаление растворенных солей. Как очистить воду от вредных растворимых примесей, таких как соли жесткости (кальций, магний), тяжелые металлы (свинец, ртуть, кадмий), нитраты, сульфаты. Для этого применяется ионный обмен. Вода пропускается через слой ионообменной смолы – синтетического полимерного материала, способного обменивать ионы из своей структуры на ионы, присутствующие в воде. Для деминерализации используют комбинацию катионитов в H-форме и анионитов в OH-форме. Ионообменные смолы требуют периодической регенерации растворами солей, кислот или щелочей;
- мембранные технологии. Мембранные методы разделения основаны на использовании полупроницаемых мембран, пропускающих воду,

но задерживающих растворенные и нерастворенные примеси. Движущей силой процесса является разность давлений.

В зависимости от размера пор мембраны и рабочего давления различают:

- микрофильтрацию (МФ): Удаляет взвеси, бактерии, крупные коллоиды (размер пор $\sim 0.1-10$ мкм);
- ультрафильтрацию (УФ): Задерживает макромолекулы, вирусы, коллоидные частицы (размер пор $\sim 0.01-0.1$ мкм);
- нанофильтрацию (НФ): Удаляет многозарядные ионы (например, соли жесткости), красители, часть органики (размер пор $\sim 0.001-0.01$ мкм);
- обратный осмос (ОО): Наиболее тонкая очистка. Удаляет практически все растворенные соли (до 99.9%), ионы металлов, нитраты, пестициды, микроорганизмы (размер пор $\sim 0.0001-0.001$ мкм). Требуется высокого давления. Позволяет получить глубоко обессоленную воду, близкую по составу к дистиллированной.

3.2 Комбинированные технологии (ANAMMOX, SHARON)

«Процесс анаммокс активен в интервале температур от 6 до 43°С с оптимумом при 20...30 °С. Диапазон pH = 6,7...8,3, оптимум наблюдается при pH 7...8. Концентрации аммония и нитратов до 100 мМ не препятствуют процессу. Раньше считалось, что ему препятствуют концентрации нитритов, превышающие 20 мМ, и когда концентрация нитритов составляет более 50 мМ, в течение 12 ч деятельность бактерий анаммокс полностью утрачивается. Активность аннаммокс-бактерий может быть восстановлена путем добавления гидразина или гидроксиламина в небольших количествах (50 мкм). Более того, в настоящее время разработаны и действуют технологии очистки стоков с высоким содержанием аммония и нитрита. В результате действия процесса образуется основная часть атмосферного азота. В морских

экосистемах, бактерии анаммох активно способствуют биологическому круговороту азота, будучи ответственными по меньшей мере за 50% от общего объема производства азота в океане, также бактерии анаммох обнаружены в различных пресноводных экосистемах, включая горячие источники. В природных экосистемах процесс анаммокс может функционировать параллельно с процессом денитрификации» [16,17].

«Эти процессы могут взаимодействовать, и тот или другой может доминировать в зависимости от меняющихся условий внешней среды. Такое же сочетание этих процессов может происходить и при очистке воды. Превалирование того или иного процесса зависит от присутствия или отсутствия органических соединений и нитрита.

Для удержания медленно растущих анаммокс-бактерий в системе важную роль играет применение твердых носителей для иммобилизации активного ила. Бактерии анаммох (анаммокс-бактерии, анаммокс-планктомицеты, бактерии анаммокс) были открыты в начале 1990-х годов. Они принадлежат к нескольким новым родам бактерий: *Brocadia*, *Kuenenia*, *Anammoxoglobus*, *Scalindula* и все они относятся к планктомицетам (*Planktomyces*), представляющим отдельную филогенетическую ветвь домена *Bacteria*.

Они представляют группу микроорганизмов с уникальными морфологическими, физиологическими и биохимическими свойствами. Большинство известных планктомицетов – аэробные бактерии, бактерии анаммох – анаэробы, они получают энергию за счет анаэробного окисления аммония в биохимическом процессе окисления иона аммония нитрит-анионом с образованием гидразина в качестве промежуточного продукта» [16,17].

3.3 Анализ эффективности технологий

Сравнительная характеристика методов очистки сточных вод (по критериям: стоимость, КПД, сложность эксплуатации) указана в таблице 3 [34, 35].

Таблица 3 – Сравнительная характеристика методов очистки сточных вод

Метод	Достоинства	Недостатки
«Механический»	– Низкие эксплуатационные затраты – Хорошая степень очистки от механических примесей – Позволяет уменьшить абразивный износ оборудования	– Убирает только нерастворимые механические примеси
Химический	– Простота эксплуатации – Возможность выделения дорогостоящих компонентов – Обезвреживание кислых и щелочных стоков, а также токсичных примесей и тяжелых металлов	– Большой расход реагентов – Дополнительное загрязнение стоков реагентами – Требуется доочистка перед повторным использованием или сбросом в водоем – Требуется корректировки при изменении параметров стоков
Физико-химический	– Большое разнообразие способов очистки – Возможность удалять нерастворенные и некоторые растворенные примеси, переводя последние в нерастворенное либо связанное состояние	– Большой расход реагентов – В случае применения сорбентов или ионообменных смол — их высокая стоимость – Громоздкость оборудования» [5].

Продолжение таблицы 3

Метод	Достоинства	Недостатки
«Электрохимический	– Позволяют удалять растворенные примеси – Возможность извлечения металлов из концентрированных стоков	– Большие затраты электроэнергии – Не эффективен при низких концентрациях – Не достигает требований ПДК – Использование дорогостоящих электродов
Биологический	– Высокая степень очистки от органических примесей – Простота исполнения оборудования – Низкие эксплуатационные затраты	– Только от органических загрязнений – Требуется предварительная очистка от ядохимикатов и кислот
Термический	– Очистка до ПДК – Возможность организации замкнутого цикла без сбросов загрязняющих веществ	– Высокая энергоёмкость – Высокие капитальные затраты» [5].

Как пример внедрения методов очистки сточных вод на действующих очистных сооружениях в России можно рассмотреть реконструкцию Люберецких очистных сооружений в Москве [14]. Обновление начали в 2013 году, а основной объём работ завершили в 2023 году.

Некоторые результаты реконструкции:

- «двухэтапное изъятие мусора из сточной воды. Повысилась надёжность работы комплекса механической очистки, изъятие

мусора увеличилось до 96% и снизились трудозатраты на ремонтные работы;

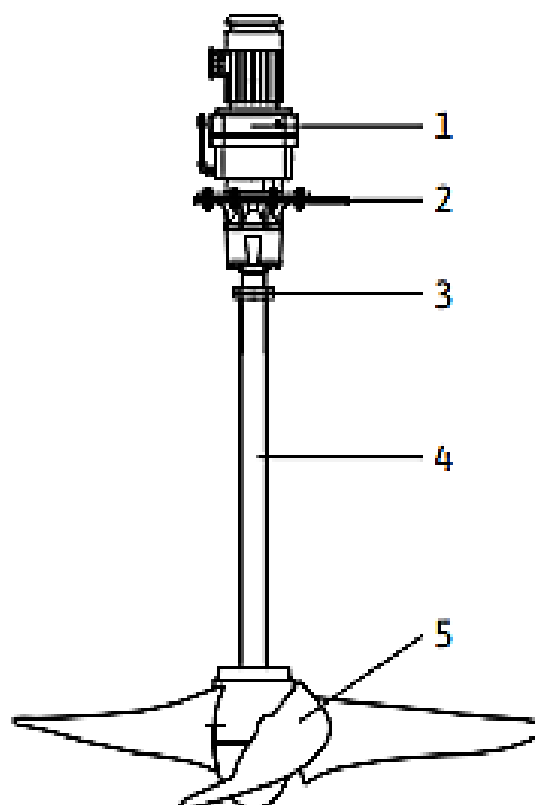
- строительство аэротенков с применением технологий глубокого удаления азота и фосфора. Это позволило достичь наилучшего качества очистки сточных вод;
- строительство второго блока ультрафиолетового обеззараживания. Обеспечилось 100% обеззараживание сточных вод, сбрасываемых в водоприёмники;
- энергоэффективные решения. Экономия составила до 13,5 тысячи мегаватт в год на процессах биологической очистки;
- переработка в биотопливо всего осадка сточных вод и полный отказ от его почвенной утилизации (безотходное производство)» [1, 5].

В Европе широко используется технология сгущения активного ила на центрифугах, которая позволяет исключить фосфор из фугата (жидкости, удаляемой в процессе обезвоживания) [19]. Ещё один пример — очистные сооружения рыбоконсервного комбината «РосКон». Комплекс был спроектирован и построен с учётом опыта передовых рыбоперерабатывающих предприятий Европы, на предприятии организована предварительная очистка сточных вод, которые потом поступают для дальнейшей очистки на муниципальные очистные сооружения АО «ОКОС». На них внедрена механическая и биологическая система очистки, а также есть карты для обезвоживания и утилизации илового осадка.

3.4 Автоматизация процесса денитрификации на примере работы устройства гиперболической мешалки

Рассмотрим процесс денитрификации на примере работы устройства вертикальной мешалки.

В пункте 1.2 мы провели расчёт денитрификатора, исходя из расчёта возьмем вертикальные мешалки (рисунок 16).



1 – привод (электродвигатель с редуктором); 2 – опорная плита электродвигателя;
3 – муфта; 4 – вал мешалки; 5 – пропеллер

Рисунок 16 – Вертикальная мешалка

Характеристика выбранного оборудования.

«Вертикальная мешалка состоит из электродвигателя с редуктором, пропеллера и опорной плиты электродвигателя. Электродвигатель с редуктором жестко соединены с опорной плитой. При помощи опорной плиты производится закрепление на конструкциях резервуара, например, мостиках или консолях.

Привод состоит из электродвигателя с редуктором и опорной плиты и сконструирован для длительного режима работы. Он оснащен усиленными подшипниками. Также при необходимости он оснащается различными принадлежностями и опциями. Электродвигатели мощностью от 0,75 кВт выполнены серийно класса энергоэффективности IE3 (по IEC 60034-30). До

мощности 3,0 кВт опционально возможно исполнение IE4. Опорная плита электродвигателя проектируется с учетом местных условий, чтобы был возможен монтаж на уже существующие мостики или консоли [32,33]. Муфта на валу служит для передачи усилия от привода к пропеллеру и оснащена разборными крепежными элементами. Диаметр и длина вала мешалки рассчитывается индивидуально в зависимости от нагрузок и глубины резервуара. Пропеллер возможен с 2-мя или 3-мя лопастями. Лопасты крепятся на ступице, которая закреплена на валу мешалки. Угол установки лопасти может быть установлен от 30° до 45° с шагом 5° » [4].

Функциональная схема системы автоматического управления денитрификатора (рисунок 17).

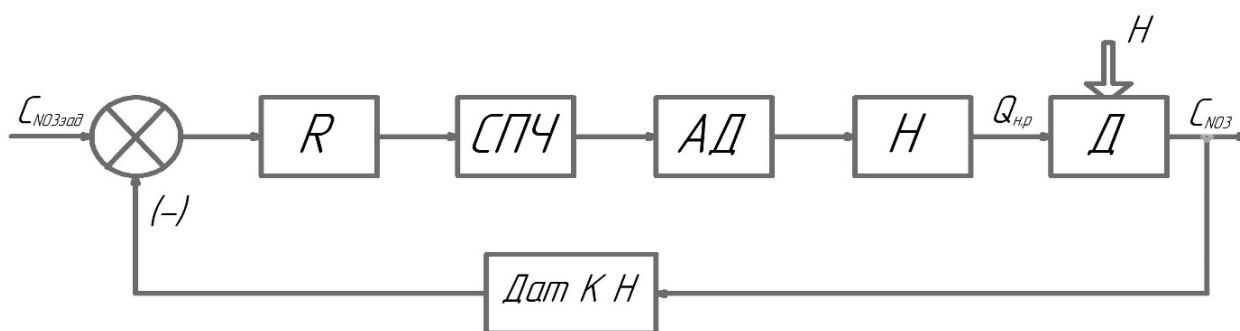


Рисунок 17 – Функциональная схема САУ денитрификации при биологической очистке сточных вод

«Рассмотрим САУ процессом биологической очистки сточных вод промышленного предприятия, замкнутую по концентрации NO_3 на выходе денитрификатора. На прямой вход устройства сравнения подается заданная величина концентрации CNO_3 нитрата в сточных водах на выходе из денитрификатора. На инверсный вход поступает сигнал с датчика ДКН. Полученный сигнал рассогласования приходит на регулятор R, который формирует величину, которая передается на СПЧ. Он в свою очередь регулирует поток рабочей жидкости насоса Н. В зависимости от этой

величины регулируется количество подаваемого нитратного рецикла в денитрификатор Д. Концентрация нитрата на выходе измеряется датчиком ДКН.

За объект управления принимаем процесс денитрификации, обобщенную структуру которого изобразим в виде блока (рисунок 18). За управляющее воздействие примем $Q_{н.р}$ расход нитратного рецикла из нитрификатора, возмущающее воздействие – концентрация $C_{NO_3}^{н.р}$ нитратного рецикла из нитрификатора, выходная координата – концентрация C_{NO_3} нитрата в денитрификаторе (рисунок 18)» [12].

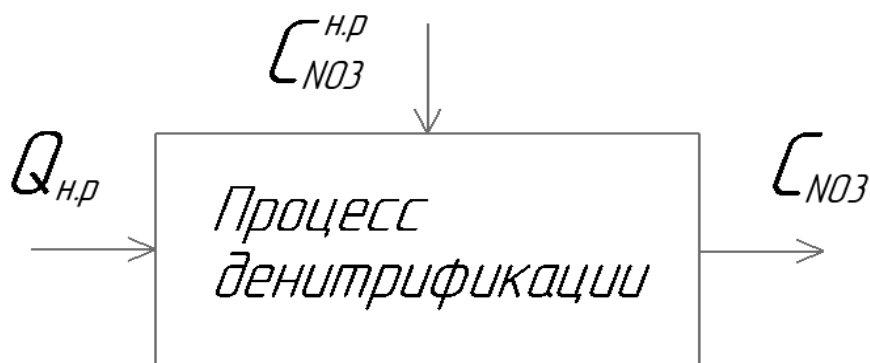


Рисунок 18 – Объект управления

Процесс восстановления окисленных азотистых соединений (нитритов и нитратов) до образования газов (в первую очередь до свободного азота N_2 , при определенных условиях закись и окись азота) называют денитрификацией. Данный процесс применяется на очистных сооружениях.

Он является неотъемлемым этапом в цепочке удаления соединения азота и неразрывно связан с этапом нитрификации, а именно окислением солей аммония сначала до солей азотистой кислоты, а потом до солей азотной кислоты или по-другому нитратов.

В данном процессе для составления уравнения мы пренебрегли следующими параметрами: S_s – концентрацией растворенного в биологически разлагаемом веществе возвратного ила; X_s – концентрацией

взвешенного органически медленно разлагаемого вещества возвратного ила (рисунок 19).

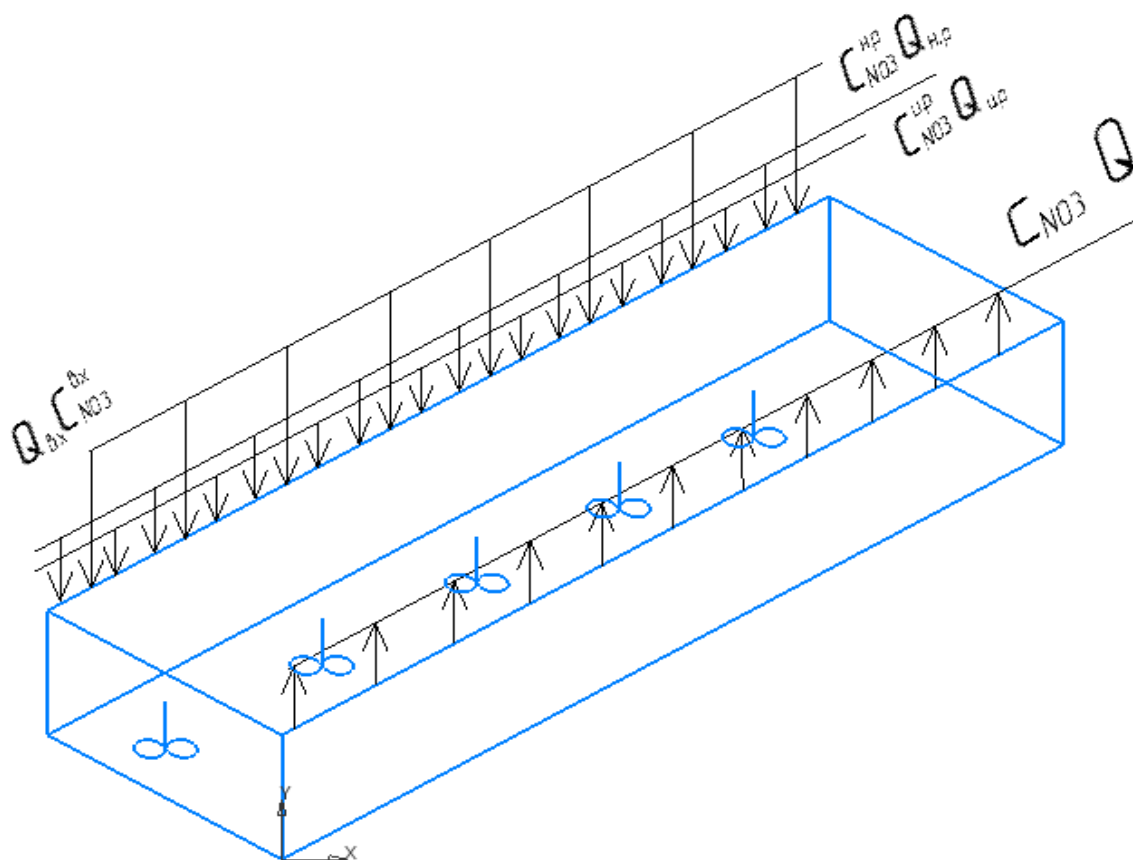


Рисунок 19 – Расчетная модель денитрификатора

«Математическое описание процесса денитрификации как объекта управления. Определим операторы математической модели, которая показывает связь элементов вектора выходных координат с управляющим и возмущающими воздействиями. Система дифференциальных уравнений, описывающая динамику исследуемого объекта управления, включает семь уравнений материальных балансов – для концентрации $C_{гг}$ гетеротрофов, C_{NH4} аммонийного азота, $NO3$ нитратного азота, $C_{орг}$ биологически разлагаемого органического вещества, $C_{взв}$ органически медленно разлагаемого вещества, C_{Nb} органически медленно разлагаемого азота, C_{Nr} растворенного органического азота» [11].

Поэтому имеем:

$$\begin{aligned}
\frac{dC_{zm}(t)}{dt} &= \frac{Q_6(t) \cdot C_{zm}^6(t) + Q_{u.p}(t) \cdot C_{zm}^{u.p}(t) + Q_{h.p}(t) \cdot C_{zm}^{h.p}(t) - Q(t) \cdot C_{zm}(t)}{V} + \rho_{mz}(t); \\
\rho_{zm}(t) &= (\mu_{bh} \cdot n_g \cdot \frac{C_{opz}(t)}{C_{opz}(t) + K_s(t)} \cdot \frac{K_{oh}(t)}{C_\kappa(t) + K_{oh}(t)} \cdot \frac{C_{NO3}(t)}{C_{NO3}(t) + K_{no}(t)} - b_h) \cdot C_{zm}(t); \\
\frac{dC_{NH4}(t)}{dt} &= \frac{Q_6(t) \cdot C_{NH4}^6(t) + Q_{u.p}(t) \cdot C_{NH4}^{u.p}(t) + Q_{h.p}(t) \cdot C_{NH4}^{h.p}(t) - Q(t) \cdot C_{NH4}(t)}{V} + \rho_{NH4}(t) \\
\rho_{NH4}(t) &= (-i_{xb} \cdot \mu_{bh} \cdot n_g \cdot \frac{C_{opz}(t)}{C_{opz}(t) + K_s(t)} \cdot \frac{K_{oh}(t)}{C_\kappa(t) + K_{oh}(t)} \cdot \frac{C_{NO3}(t)}{C_{NO3}(t) + K_{no}(t)} + K_a(t) \cdot C_{Np}(t)) \cdot C_{zm}(t); \\
\frac{dC_{NO3}(t)}{dt} &= \frac{Q_6(t) \cdot C_{NO3}^6(t) + Q_{u.p}(t) \cdot C_{NO3}^{u.p}(t) + Q_{h.p}(t) \cdot C_{NO3}^{h.p}(t) - Q(t) \cdot C_{NO3}(t)}{V} + \rho_{NO3}(t); \\
\rho_{NO3}(t) &= (-\frac{1 - Y_h}{2,86 \cdot Y_h}) \cdot \mu_{bh} \cdot n_g \cdot \frac{C_{opz}(t)}{C_{opz}(t) + K_s(t)} \cdot \frac{K_{oh}(t)}{C_\kappa(t) + K_{oh}(t)} \cdot \frac{C_{NO3}(t)}{C_{NO3}(t) + K_{no}(t)} \cdot C_{zm}(t); \\
\frac{dC_{opz}(t)}{dt} &= \frac{Q_6(t) \cdot C_{opz}^6(t) + Q_{u.p}(t) \cdot C_{opz}^{u.p}(t) + Q_{h.p}(t) \cdot C_{opz}^{h.p}(t) - Q(t) \cdot C_{opz}(t)}{V} - \rho_{opz}(t); \\
\rho_{opz}(t) &= \frac{1}{Y_h} \cdot \mu_{bh} \cdot n_g \cdot \frac{C_{opz}(t)}{C_{opz}(t) + K_s(t)} \cdot \frac{K_{oh}(t)}{C_\kappa(t) + K_{oh}(t)} \cdot \frac{C_{NO3}(t)}{C_{NO3}(t) + K_{no}(t)} \cdot C_{zm}(t) + K_h(t) \cdot C_{636}(t); \\
\frac{dC_{636}(t)}{dt} &= \frac{Q_6(t) \cdot C_{636}^6(t) + Q_{u.p}(t) \cdot C_{636}^{u.p}(t) + Q_{h.p}(t) \cdot C_{636}^{h.p}(t) - Q(t) \cdot C_{636}(t)}{V} + \rho_{636}(t); \\
\rho_{636}(t) &= (1 - i_{xi}) \cdot b_h \cdot C_{zm}(t) - K_h \cdot C_{636}(t); \\
\frac{dC_{N6}(t)}{dt} &= \frac{Q_6(t) \cdot C_{N6}^6(t) + Q_{u.p}(t) \cdot C_{N6}^{u.p}(t) + Q_{h.p}(t) \cdot C_{N6}^{h.p}(t) - Q(t) \cdot C_{N6}(t)}{V} + \rho_{N6}(t); \\
\rho_{N6}(t) &= i_{xb} \cdot b_h \cdot C_{zm}(t) - K_h \cdot C_{N6}(t); \\
\frac{dC_{Np}(t)}{dt} &= \frac{Q_6(t) \cdot C_{Np}^6(t) + Q_{u.p}(t) \cdot C_{Np}^{u.p}(t) + Q_{h.p}(t) \cdot C_{Np}^{h.p}(t) - Q(t) \cdot C_{Np}(t)}{V} + \rho_{Np}(t); \\
\rho_{Np}(t) &= K_h \cdot C_{N6}(t) - K_a \cdot C_{Np}(t) \cdot C_{zm}(t);
\end{aligned}$$

где K_{oh} – «константа насыщения по кислороду для гетеротрофов;

K_s – константа полунасыщения по легко разложимому органическому субстрату при денитрификации;

K_{no} – константа полунасыщения по нитрату при денитрификации;

i_{xb} – фракция азота в биомассе активного ила;

i_{xi} – фракция азота в массе продуктов распада;

n_g – корректирующий фактор скорости роста гетеротрофов в аноксидных условиях;

b_h – константа распада денитрифицирующих бактерий;

Y_h – максимальный коэффициент прироста биомассы для гетеротрофных бактерий;

K_h – константа гидролиза в реакции первого порядка;

K_a – скорость аммонификации;

μ_{bh} – максимальная удельная скорость роста гетеротрофов;

Q_s – расход сточных вод;

$Q_{u.p}$ – расход илового рецикла;

$Q_{n.p}$ – расход нитратного рецикла;

Q – общий расход;

C_k – концентрация кислорода;

ρ – скорость реакции процесса;

V – объем денитрификатора.

Перейдем к изображению по Лапласу» [11]. Тогда:

$$C_{zm}(p) = \frac{1}{p} \left[\frac{Q_s(p) \cdot C_{zm}(p) + Q_{u.p}(p) \cdot C_{zm}^{u.p}(p) + Q_{n.p}(p) \cdot C_{zm}^{n.p}(p) - Q(p) \cdot C_{zm}(p)}{V} + \rho_{zm}(p) \right];$$

$$\rho_{zm}(p) = \left[\mu_{bh} \cdot n_g \cdot \frac{C_{opz}(p)}{C_{opz}(p) + K_s(p)} \cdot \frac{K_{oh}(p)}{C_k(p) + K_{oh}(p)} \cdot \frac{C_{NO3}(p)}{C_{NO3}(p) + K_{no}(p)} - b_h \right] \cdot C_{zm}(p);$$

$$C_{NH_4}(p) = \frac{1}{p} \left[\frac{Q_{\epsilon}(p) \cdot C_{NH_4}(p) + Q_{u,p}(p) \cdot C_{NH_4}^{u,p}(p) + Q_{h,p}(p) \cdot C_{NH_4}^{h,p}(p) - Q(p) \cdot C_{NH_4}(p)}{V} + \rho_{NH_4}(p) \right];$$

$$\rho_{NH_4}(p) = \left[-i_{xb} \cdot \mu_{bh} \cdot n_g \cdot \frac{C_{opz}(p)}{C_{opz}(p) + K_s(p)} \cdot \frac{K_{oh}(p)}{C_{\kappa}(p) + K_{oh}(p)} \cdot \frac{C_{NO_3}(p)}{C_{NO_3}(p) + K_{no}(p)} + K_a(p) \cdot C_{Np}(p) \right] \cdot C_{zm}(p);$$

$$C_{NO_3}(p) = \frac{1}{p} \left[\frac{Q_{\epsilon}(p) \cdot C_{NO_3}^{\epsilon}(p) + Q_{u,p}(p) \cdot C_{NO_3}^{u,p}(p) + Q_{h,p}(p) \cdot C_{NO_3}^{h,p}(p) - Q(p) \cdot C_{NO_3}(p)}{V} + \rho_{NO_3}(p) \right];$$

$$p_{NO_3}(p) = \left[\left(-\frac{1 - Y_h}{2,86 \cdot Y_h} \right) \cdot \mu_{bh} \cdot n_g \cdot \frac{C_{opz}(p)}{C_{opz}(p) + K_s(p)} \cdot \frac{K_{oh}(p)}{C_{\kappa}(p) + K_{oh}(p)} \cdot \frac{C_{NO_3}(p)}{C_{NO_3}(p) + K_{no}(p)} \right] \cdot C_{zm}(p);$$

$$C_{opz}(p) = \frac{1}{p} \left[\frac{Q_{\epsilon}(p) \cdot C_{opz}^{\epsilon}(p) + Q_{u,p}(p) \cdot C_{opz}^{u,p}(p) + Q_{h,p}(p) \cdot C_{opz}^{h,p}(p) - Q(p) \cdot C_{opz}(p)}{V} - \rho_{opz}(p) \right];$$

$$\rho_{opz}(p) = \left[\frac{1}{Y_h} \cdot \mu_{bh} \cdot n_g \cdot \frac{C_{opz}(p)}{C_{opz}(p) + K_s(p)} \cdot \frac{K_{oh}(p)}{C_{\kappa}(p) + K_{oh}(p)} \cdot \frac{C_{NO_3}(p)}{C_{NO_3}(p) + K_{no}(p)} \cdot C_{zm}(p) + K_h(p) \right] \cdot C_{\epsilon 3\epsilon}(p);$$

$$C_{\epsilon 3\epsilon}(p) = \frac{1}{p} \left[\frac{Q_{\epsilon}(p) \cdot C_{\epsilon 3\epsilon}^{\epsilon}(p) + Q_{u,p}(p) \cdot C_{\epsilon 3\epsilon}^{u,p}(p) + Q_{h,p}(p) \cdot C_{\epsilon 3\epsilon}^{h,p}(p) - Q(p) \cdot C_{\epsilon 3\epsilon}(p)}{V} + \rho_{\epsilon 3\epsilon}(p) \right];$$

$$\rho_{\epsilon 3\epsilon}(p) = (1 - i_{xi}) \cdot b_h \cdot C_{zm}(p) - K_h(p) \cdot C_{\epsilon 3\epsilon}(p);$$

$$C_{N\epsilon}(p) = \frac{1}{p} \left[\frac{Q_{\epsilon}(p) \cdot C_{N\epsilon}^{\epsilon}(p) + Q_{u,p}(p) \cdot C_{N\epsilon}^{u,p}(p) + Q_{h,p}(p) \cdot C_{N\epsilon}^{h,p}(p) - Q(p) \cdot C_{N\epsilon}(p)}{V} + \rho_{N\epsilon}(p) \right];$$

$$\rho_{N\epsilon}(p) = i_{xb} \cdot b_h \cdot C_{zm}(p) - K_h(p) \cdot C_{N\epsilon}(p);$$

$$C_{Np}(p) = \frac{1}{p} \left[\frac{Q_{\epsilon}(p) \cdot C_{Np}^{\epsilon}(p) + Q_{u,p}(p) \cdot C_{Np}^{u,p}(p) + Q_{h,p}(p) \cdot C_{Np}^{h,p}(p) - Q(p) \cdot C_{Np}(p)}{V} + \rho_{Np}(p) \right];$$

$$\rho_{Np}(p) = K_h(p) \cdot C_{N\epsilon}(p) - K_a(p) \cdot C_{Np}(p) \cdot C_{zm}(p);$$

Допущения, «принятые при разработке математической модели:

- считаем, что расход сточных вод на входе в денитрификатор и на выходе из него одинаковы (т.е. объём сточных вод постоянен);
- полагаем, что температуры сточных вод и окружающей среды остаются неизменными в течение длительного времени;
- считаем концентрации основных компонентов одинаковой во всём объёме денитрификатора;
- принимаем, что кислотность pH сточных вод и концентрация инертного вещества не влияют на процесс;
- допускаем, что в сточной воде, поступающей в аэротенк, полностью отсутствует растворенный кислород» [11].

Исходя из вышеописанных деталей, для дальнейшего проектирования необходимо составить структурную схему. Объектом управления был выбран сам денитрификатор, который управляется насосами, блоками задвижек и мешалками. Т.е. в свою очередь управляются другими механизмами и датчиками (рисунок 21).

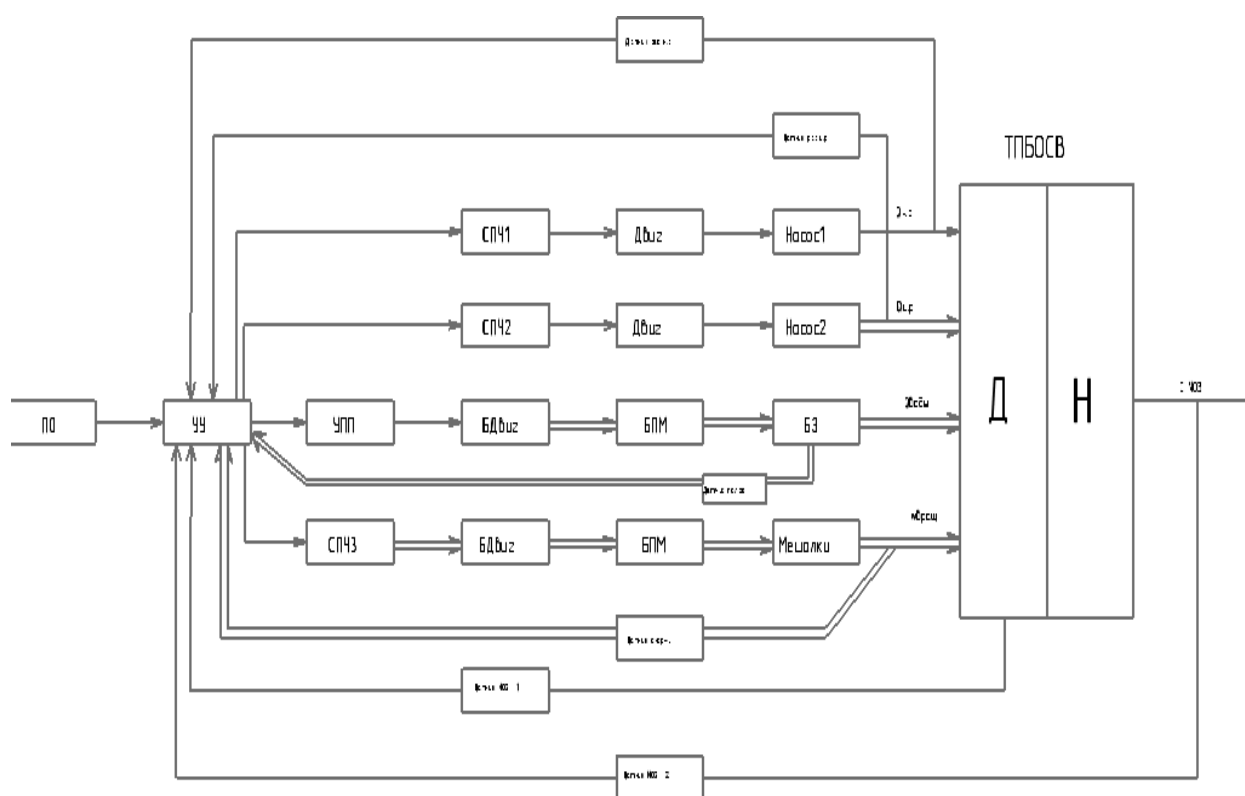


Рисунок 21 – Автоматизированная система управления

«Для получения информации о ходе производственного процесса применяют датчики – элементы автоматики, преобразующие самые разные физические величины (размеры, температуру, давление, расход, скорость, уровень, влажность и т.д.) в некоторый сигнал, удобный для последующей обработки в автоматическом устройстве или ЭВМ. Затем этот сигнал обрабатывается: сравнивается с другими сигналами, анализируются его изменения. Для удобства выпишем выбранные датчики в таблицу 4» [11].

Таблица 4 – Выбор датчиков и исполнительных механизмов

Наименование	Кол-во, шт.	Тип сигнала	Направление сигнала	Кол-во сигналов
Датчик Нитрат-ионов	2	Аналоговый	Входное	2
С-Р азотной кислоты	2	Аналоговый	Входное	2
Датчик контроля частоты вращения D16001	10	Дискретный	Входное	10
Датчик положения индуктивный IE5288	7	Дискретный	Входное	7
УПП ATS22	1	Дискретный	Выходной	1
СПЧ ATV 71 Schneider Electric	3	Аналоговый	Выходной	3

Выбор управляющего устройства. Для выбора управляющего устройства сведем все сигналы в одну таблицу 5, классифицируя их по типу сигнала.

Таблица 5 – Классификация по типу сигнала

Наименование	Тип сигнала	Напр. сигнала	Кол-во сигналов
Датчик положения	Дискретный 24В	Входное	17
Датчик частоты вращения			
Датчик нитрата-ионов	Аналоговый 4-20мА	Входное	2
С-Р	Аналоговый 4-20мА	Входное	2
УПП	Дискретный 24В	Выходное	1
СПЧ	Аналоговый (Цифровой)	Выходной	3

Исходя из этого был выбран программируемый логический контроллер (ПЛК) от фирмы ОВЕН ПЛК210, конфигурации 04-CS.

Аппроксимация по управляющему воздействию (рисунки 22–26).

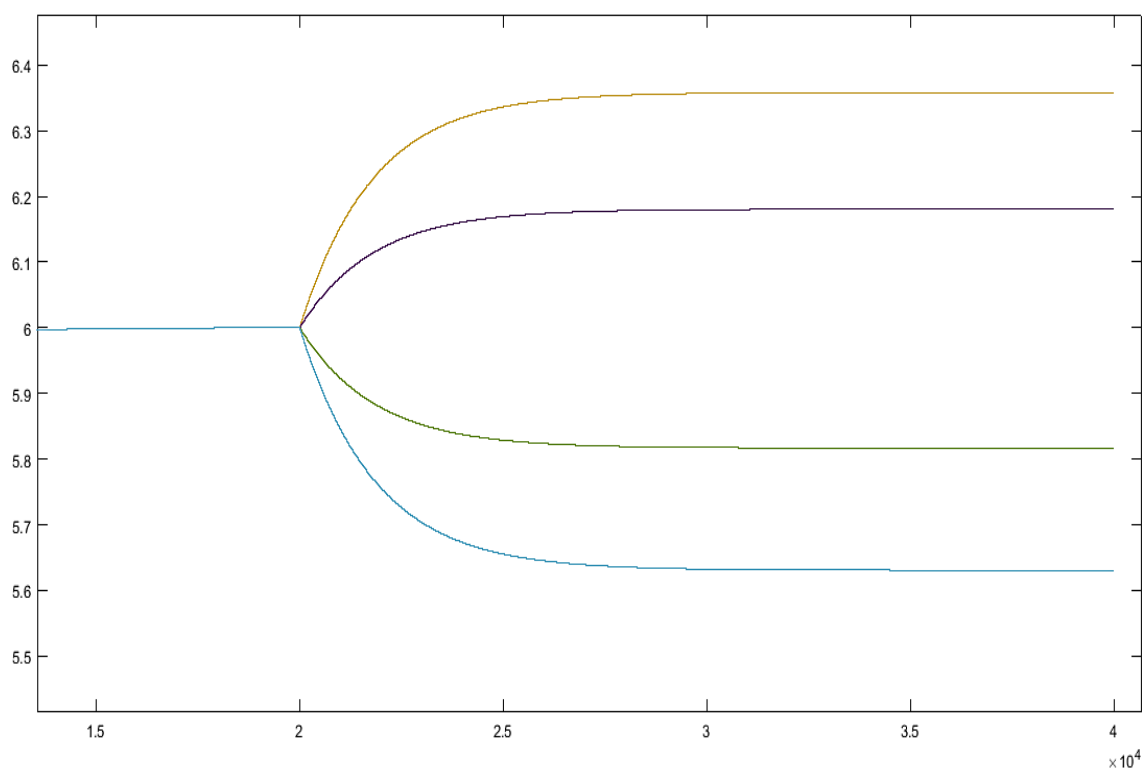


Рисунок 22 – По возмущающему воздействию

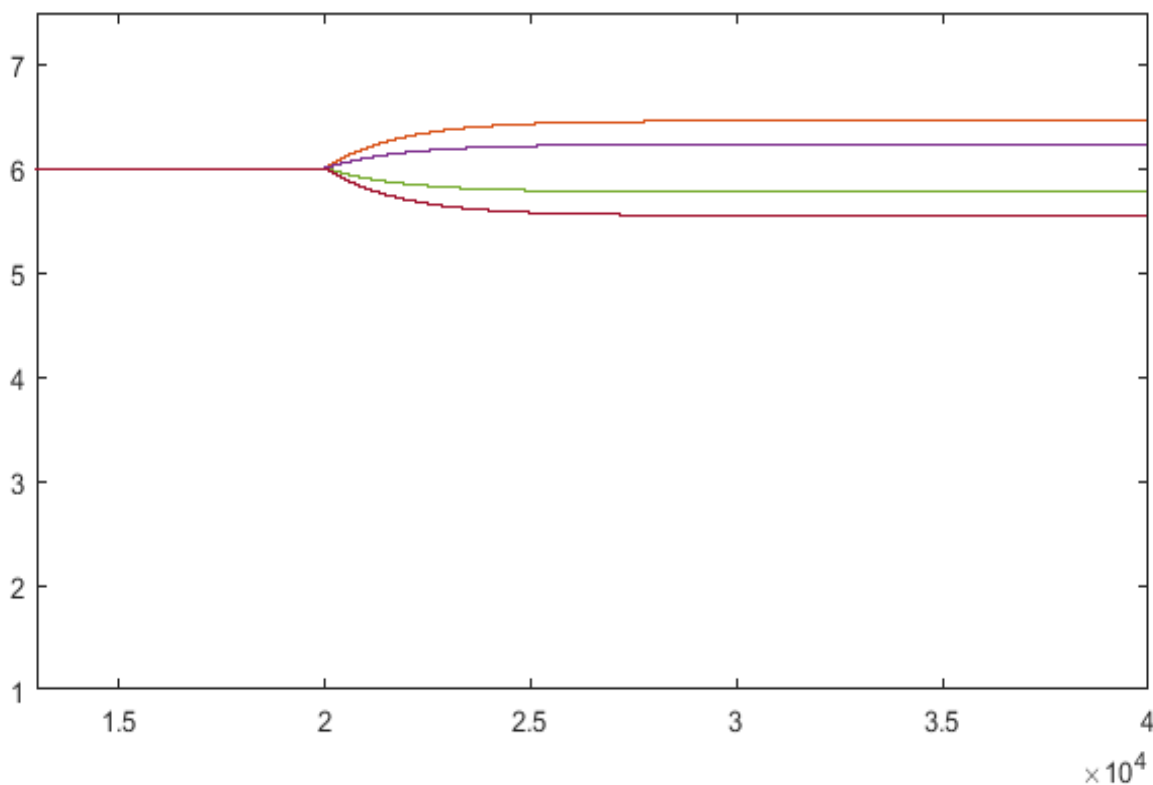


Рисунок 23 – Синтез регулятора САУ денитрификации

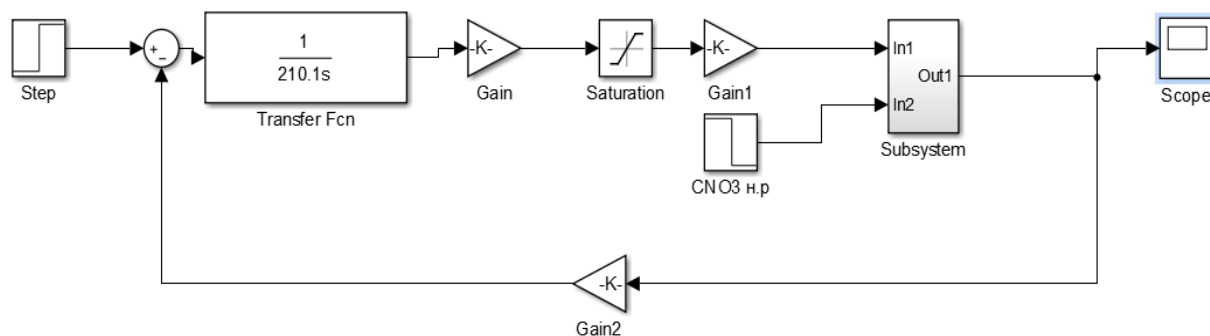


Рисунок 24 – Блок-схема

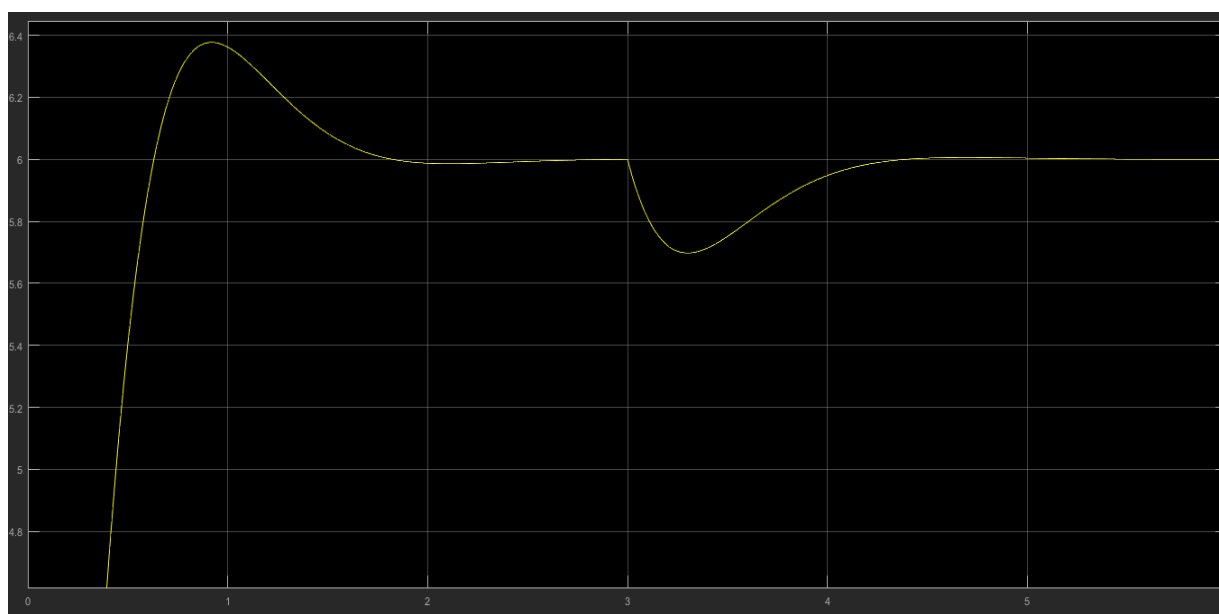


Рисунок 25 – График переходного процесса синтеза регулятора

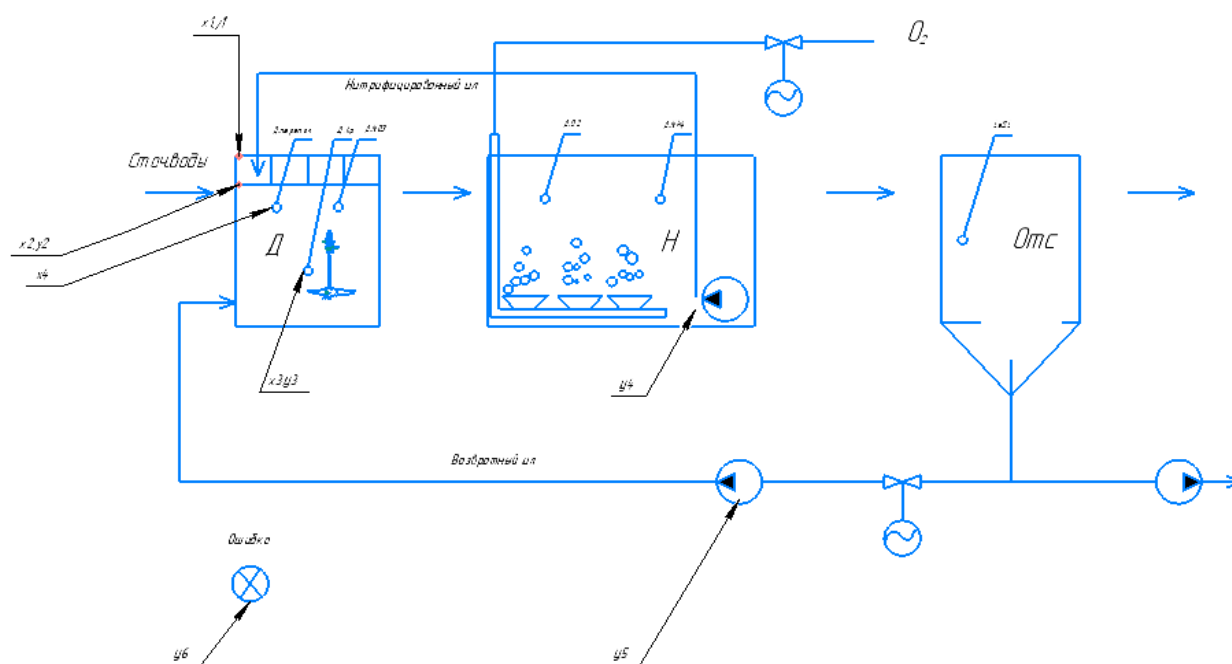


Рисунок 26 – Комплекс процесса денитрификации

В нашем случае сигналы будут «подаваться на датчик переполнения x_4 , датчик заслонки (крайние положения x_1 и x_2), датчик вращения мешалки x_3 . Для того чтобы составить алгоритм, мы должны задаться условиями. Если заслонки находятся в крайних положениях, то происходит отключение их привода. Если отсутствует вращение мешалки – отключаем питание и выключаем насосы y_4 , y_5 и закрываем заслонки. Переполнение воды в денитрификаторе срабатывает датчик переполнения» [11], тем закрываем заслонки. Получаем алгоритм (рисунок 27).

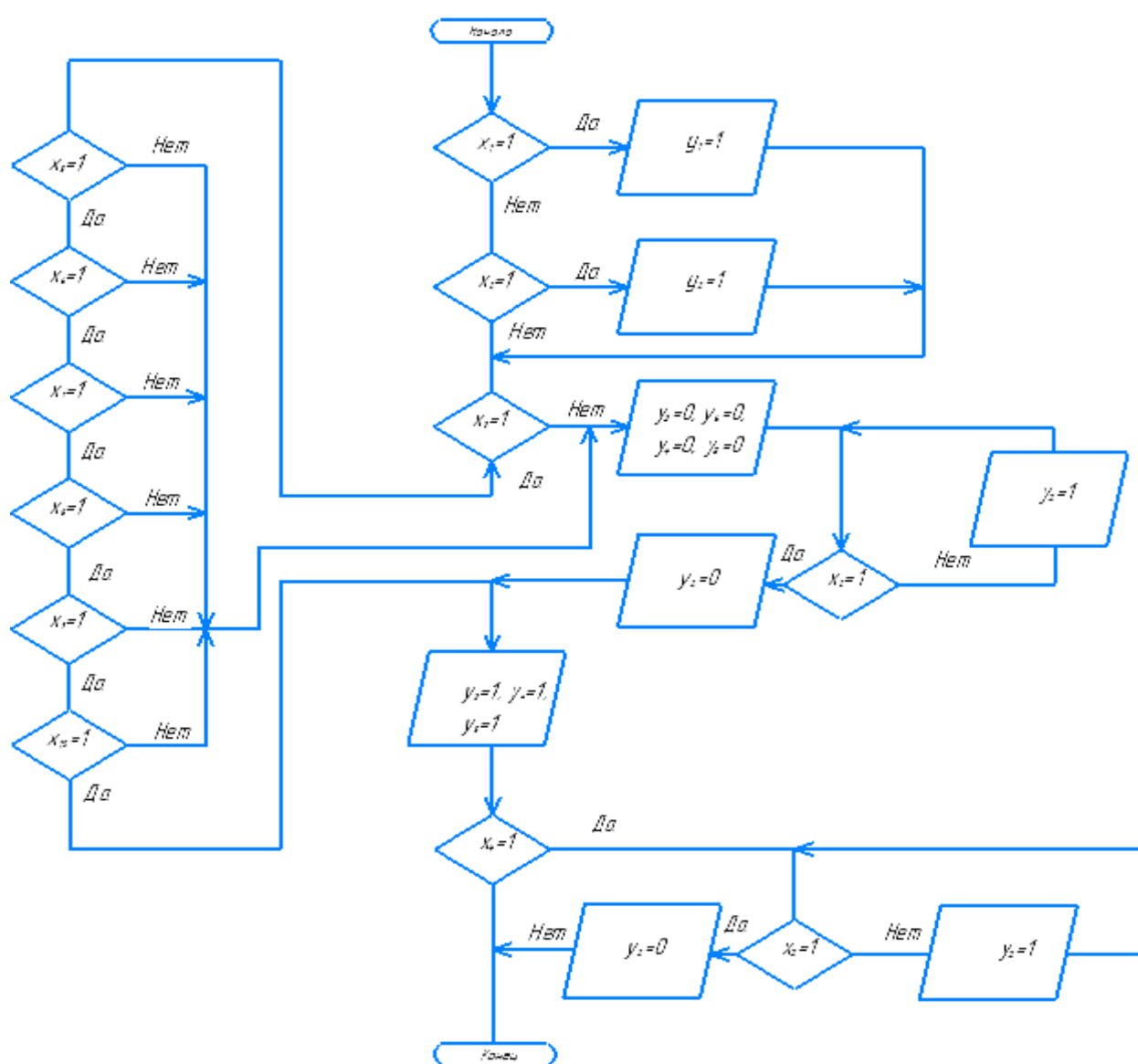


Рисунок 27 – Алгоритм

Составление логических выражений.

После того как мы построили алгоритм, дальше составляем логические выражения.

Получаем вот такие выражения:

$$y_1 = x_1$$

$$y_2 = x_2 \vee (\overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \vee \overline{x_2} \cdot x_4)$$

$$y_3 = x_3(x_5(x_6(x_7(x_8(x_9 \cdot x_{10}))))))$$

$$y_3 = y_4 = y_5 = y_6$$

y_3 – тепловое реле.

Составление логической схемы (рисунок 28).

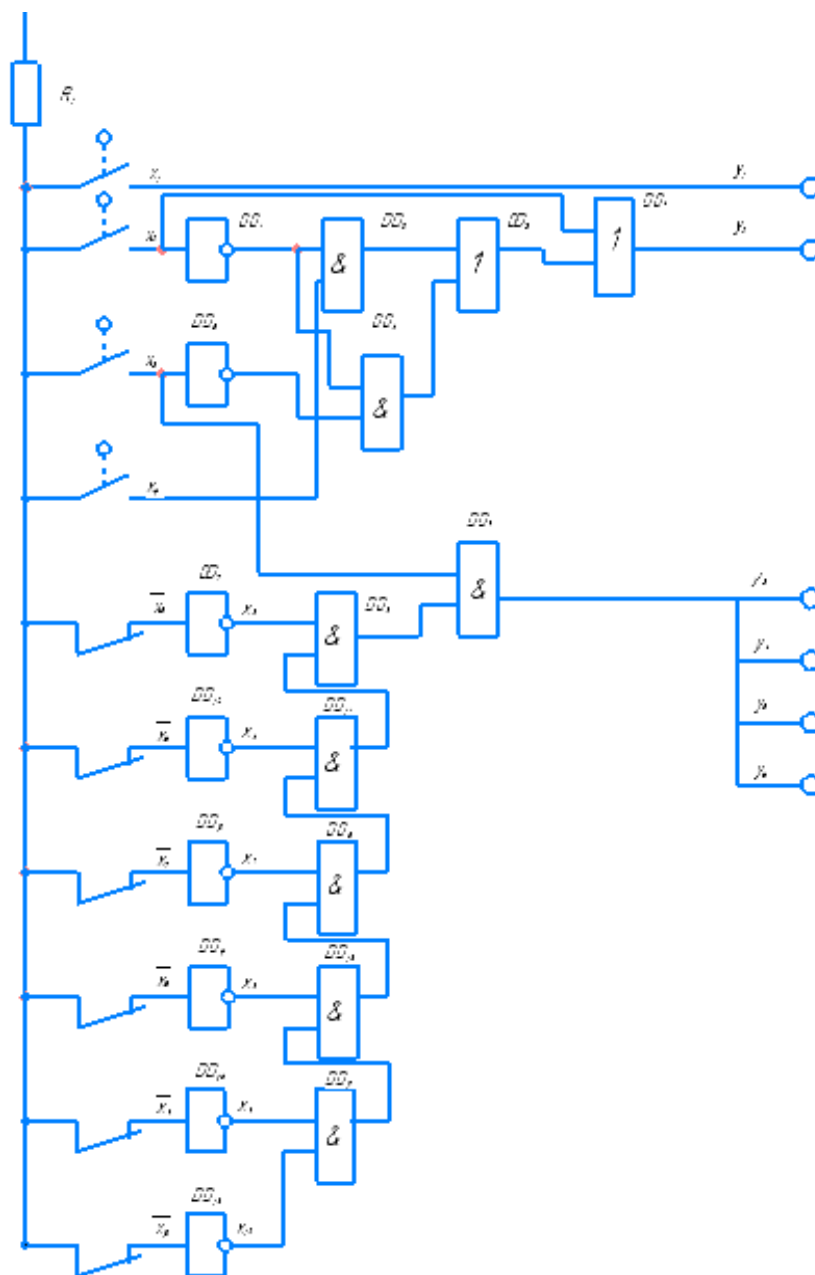


Рисунок 28 – Логическая схема

«Для начала изображаем клемму положительного питания $+U_{п}$ и резистор R1. Эти элементы формируют логическую единицу. Далее от этого потенциала отводим контакты концевых выключателей $x_1 - x_4$, а также контакты $x_5 - x_{10}$. Здесь же ставим инверторы DD1-DD18, чтобы получить инверсные сигналы» [11]. Изображение силовой схемы (рисунок 29).

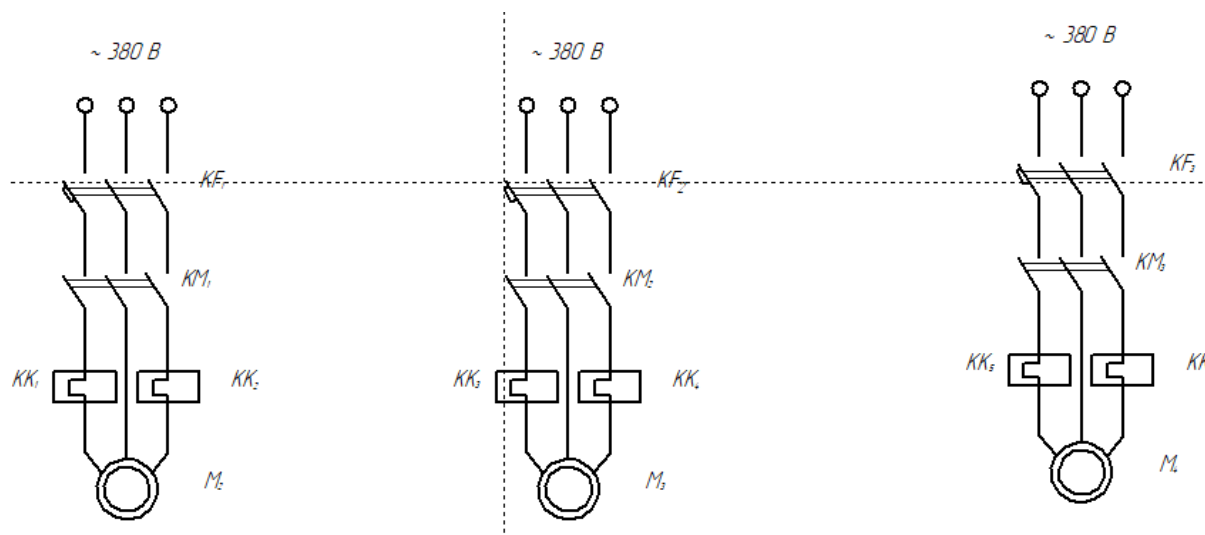


Рисунок 29 – Силовая схема

«Для защиты сети 3 фазного двигателя от короткого замыкания в схеме применим автоматический выключатель KF₁-KF₃, выбираемый из мощности двигателя. Для защиты от перегрузки приложены реле KK₁-KK₆. Для управления в схеме имеются контакторы KM₁-KM₃ при замыкании которого происходит прямое включение в сеть. Для управления ДПТ используем преобразователь U₁. Для выключения и включения применяем контакторы» [11].

Выводы по третьей главе:

Рассмотрены физико-химические методы очистки сточных вод, выполнено сравнение нитрификации и денитрификации, сравнены характеристики методов очистки сточных вод, проведен анализ автоматизации процесса денитрификации на примере работы устройства гиперболической мешалки, сделано математическое описание процесса денитрификации, а также разработаны различные схемы процесса денитрификации, как объекта управления.

Заключение

В ходе данной работы мы подробно рассмотрели вопросы, связанные с проблемой денитрификации на очистных сооружениях, рассмотрели процесс и систему работы сооружения, описали схему сооружения, влияющие на её эффективность, увидели проблемы в области теории, методики, нормативного регулирования системы денитрификации и предложили ряд практических рекомендаций для улучшения процессов очистки. Значение денитрификации в системах обработки сточных вод трудно переоценить, поскольку оно напрямую связано с качеством очищенной воды и её воздействием на окружающую среду.

Выяснилось, что успешная денитрификация зависит от целого ряда условий, включая концентрацию растворенного кислорода, наличие достаточного количества органических соединений, отсутствие токсичных веществ, температурный режим, а также соответствующую конструкцию и эксплуатацию очистных сооружений. Если какое-либо из этих условий не соблюдается, эффективность процесса может снизиться, что подчеркивает важность комплексного подхода к управлению и мониторингу очистных систем.

А также провели такие работы как:

- проанализированы существующие схемы очистки и качество стоков;
- проанализирован процесс денитрификации и определены процессы, влияющие на эффективность работы;
- проведен анализ технической литературы по видовому составу и иловому индексу;
- рассмотрели модернизацию конструкции аэротенка.

Разработаны принципы размещения мешалок и аэраторов, а также организации гидродинамики в аэротенках. Скорость движения иловой смеси не менее 25 см/сек обеспечивается с помощью механических мешалок. Расчетным способом доказано минимальные энергозатраты по сравнению с другими конструктивными решениями. Подобрано перемешивающее оборудование (лопастной тип мешалок) – компактные мешалки фирмы «Mix GMS» 1,5 кВт имеют эффективную гидравлическую конструкцию с небольшим количеством легко обслуживаемых компонентов, что способствует их надежной и безотказной эксплуатации.

Список используемых источников

1. Авдеенков, П. П. Эксплуатация очистных сооружений, реализующих процессы нитри-денитрификации / П. П. Авдеенков, Н. Е. Чистяков // Молодой ученый. – 2019. – № 24(262). – С. 16-17. – EDN OGHSL5.
2. Алексеев Е.В. Физико-химическая очистка сточных вод. – М.: Издво АСВ, 2007. – 248 с. [Электронный ресурс]: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003383813> (дата обращения: 30.02.2020)
3. Большаков Н.Ю. Очистка от биогенных элементов на городских очистных сооружениях. – М.: Изд-во СПб Политехнического университета, 2010. – 112 с. [Электронный ресурс]: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004878082> (дата обращения: 30.02.2020)
4. Брикова О. И., Душин С. Е. Анализ влияния внешних факторов на процессы биологической очистки в моделях нитрификации и денитрификации. 2018 – 10 с.
5. Бурнашова Е.Н., Семенов С.Ю., Мартынов М.С. Микробиологические методы очистки сточных вод от соединений азота. Достижения науки и техники АПК. г. Томск. 2015 – 4 с.
6. Волков С.А., Макиша Е.В. Формирование списков правил для верификации информационных моделей строительных объектов. Ч. 1 // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5347 (дата обращения 01.11.2018).
7. Воропаева Н.Ю., Шлёкова И.Ю. Интенсификация процесса денитрификации при биологической очистке сточных вод // Электронный 63 научно-методический журнал Омского ГАУ. - 2018. -№2 (13) апрель - июнь. – 5 с.
8. Гавриленко А. В., Степачёва А. А., Молчанов В. П., Сульман М. Г. Комплексная очистка сточных вод от нитратов. Бюллетень науки и практики. г. Тверь. 2016 – 5 с.

9. Гогина Е.С., Гульшин И.А. Моделирование энергоэффективного процесса биологической очистки сточных вод в циркуляционном окислительном канале // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 9. – С. 42–48.

10. Гогина Е.С., Гульшин И.А. Удаление азота в модели циркуляционного окислительного канала при пониженном содержании органики в сточных водах // Водоснабжение и санитарная техника. – 2017. – № 12. – С. 26–33.

11. Грудяева, Е. К. Разработка и исследование математических моделей водоочистного комплекса с мембранным биореактором как объекта управления : специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Грудяева Елизавета Камаловна, 2016. – 184 с. – EDN RPGHTW.

12. Гульшин И.А. Характеристика активного ила, осуществляющего процесс очистки хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений азота в аэрационных сооружениях циркуляционного типа при низких концентрациях растворенного кислорода. Инженерный вестник Дона. 2019 – 17 с.

13. Джумагулова Н.Т., Гаврилов И. Е., Нгуен Д. Д. Изучение видового состава микроорганизмов, осуществляющих очистку сточных вод. г. Томск. 2019 – 9 с.

14. Евсеева Т.И., Мелехова О.П., Саранульцева Е.И. Биологический контроль окружающей среды. Биоиндикация и биотестирование. 2е изд., доп. – М.: Академия, 2008. – 288 с. [Электронный ресурс]: <https://myzooplanet.ru/monitoring-ekologicheskij/biologicheskij-kontrolokrujayuschey-sredyi.html> (дата обращения: 30.02.2020)

15. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. – М.: АКВАРОС, 2003. – 507 с. 64 [Электронный ресурс]: <https://bookree.org/reader?file=1358237> (дата обращения: 30.02.2020)

16. Интенсификация процессов удаления соединений азота из сточных вод на биофильтрах / Е.С. Гогина, О.В. Янцен, О.А. Ружицкая, В. Дабровски, Р. Жилка, Д. Борушко // Вода и экология. – 2016. – № 3. – С. 35–46.

17. Козлов М.Н., Дорофеев А.Г., Асеева В.Г. Микробиологический контроль активного ила биореакторов очистки сточных вод от биогенных элементов. – М.: Изд-во «Наука», 2012. – 80 с. [Электронный ресурс]: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006525815> (дата обращения: 30.02.2020)

18. Кольчурина Н.А., Солнцев В.В., Шувалов В.И., Фарберова Е.А. Денитрификация сточной воды. г. Пермь. 2015 – 9 с.

19. Кузнецов Н.Б. Прикладная экобиотехнология. 3е изд., доп. – М.: БИНОМ, 2015. – 629 с. 10. Gogina E.S., Yantsen O.V. Research of biofilter feed properties // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Т.

20. Проектирование систем водоотведения вахтовых поселков при нефтегазовых месторождениях Западной Сибири / Е. И. Вялкова, С. В. Максимова, М. В. Землянова, А. В. Воротникова. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2020. – 172 с. – ISBN 978-5-9961-2372-8. – EDN ZSIBYG.

21. Рыбка К. Ю., Щеголькова Н. М. Механизмы очистки сточных вод от биогенных элементов (азота и фосфора) в фито-очистных системах. Экосистемы: экология и динамика. г. Москва. 2018 – 28 с.

22. Соловьева Е. А. Технология очистки сточных вод и обработки осадков при глубоком удалении азота и фосфора из сточных вод. Известия Петербургского университета путей сообщения. 2016 – 7 с.

23. Штонда Ю.И., Громова А. О., Дроздова А. С. Исследования процессов биологической очистки сточных вод на существующих локальных канализационных очистных сооружениях. Строительство и техногенная безопасность. г. Симферополь. 2019 – 5 с.

24. Макрушин А. В. Биологический анализ качества вод. Л., 1974. 60 с.. Загорская Е.П. Биоценоз активного ила в процессах нитриденитрификации как индикатор качества очистки сточных вод. 2019

25. Calculation of biogas facilities of recycling of organic sewage sludge of breeding factories / V. Sherbakov, E. Gogina, T. Schukina, N. Kuznetsova, N. Makisha, E. Poupyrev // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – V. 10. – № 24. – P. 444347–44349.

26. Factors affecting disinfection and stabilization of sewage sludge / A. Bethany, S. Robert, Jr. Smith, E. James, D. Suresh // Proc. of the Water Environment Federation. – Publisher: Water Environment Federation. – 2006. – Session 61 through session 70. – P. 5345–5361. Available from: https://www.researchgate.net/publication/233485851_Factors_Affecting_Disinfection_and_Stabilization_of_Sewage_Sludge

27. Gogina E., Gulshin I. Simultaneous denitrification and nitrification in the lab-scale oxidation with low C/N ratio // Procedia Engineering. – 2015. – V. 117. – P. 107–113.

28. Gogina E., Gulshin I. The single-sludge denitrification system in reconstruction of wastewater treatment plants in the Russian Federation // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – T. 580–583. – P. 2367–2369.

29. Gogina E., Ruzhitskaya O. One-sludge denitrification system in reconstruction of biological treatment stations in Russian Federation Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 726–727. – P. 1325–1331.

30. Gulshin I., Kuzina A. Adaptation of nitrifying activated sludge to simultaneous nitrification and denitrification in the lab-scale oxidation ditch // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – V. 10. – № 21. – P. 42618–42455.

31. Gulshin I. The settling behavior of an activated sludge with simultaneous nitrification and denitrification // Matec Web of Conferences. – 2017. – № 106. – P. 07002.

32. Ivan Zhu Evoqua Water Technologies (United States), United States of America (July 5th 2017). Nitrification and Denitrification, DOI: 10.5772/65170.

33. Ján Derco, Rastislav Kuffa, Barbora Urminská, Jozef Dudáš and Jana Kušnierová (December 28th 2016). Influence of Phosphorus Precipitation on Wastewater Treatment Processes, Operations Research - the Art of Making Good Decisions, Kuodi Jian, IntechOpen, DOI: 10.5772/65492.

34. Juan C. Alzate Marin, Alejandro H. Caravelli and Noemí E. Zaritzky (March 12th 2019). Performance of Anoxic-Oxic Sequencing Batch Reactor for Nitrification and Aerobic Denitrification, Biotechnology and Bioengineering, Eduardo Jacob -Lopes and Leila Queiroz Zepka, IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.84775.

35. Laboratory research of zeolit use for treatment of wastewater of different origin / N. Makisha, Yu. Voronov, E. Poupyrev, V. Volshanik // International