

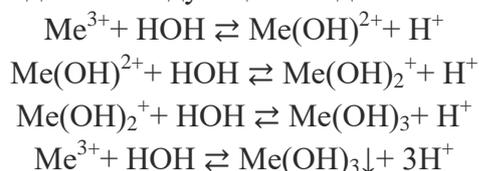
Лекция 8. Химические основы процессов очистки сточных вод от основных загрязняющих веществ. Коагуляция и флокуляция. Адсорбция. Ионный обмен. Биологические методы очистки

- 1. Физико-химические превращения в процессе коагуляционно-флокуляционной очистки вод**
- 2. Химические превращения в процессе реагентной очистки сточных вод**
 - 2.1 Нейтрализация сточных вод*
 - 2.2 Реагентная очистка сточных вод, содержащих цианид-ионы*
 - 2.3 Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов (хрома, цинка, никеля, меди, свинца, железа)*
 - 2.4 Очистка вод от углеводов (RH)*
- 3. Механизмы процесса умягчения воды**
 - 3.1 Термическое умягчение воды*
 - 3.2 Реагентное умягчение воды*
- 4. Механизмы биологической очистки вод**
 - 4.1 Аэробные и анаэробные методы биологической очистки*
 - 4.2 Механизм процесса нитрификации-денитрификации*

1. Физико-химические превращения в процессе коагуляционно-флокуляционной очистки вод

Коагуляция – это процесс укрупнения дисперсных частиц в результате их взаимодействия и объединения в агрегаты. В очистке сточных вод ее применяют для ускорения процесса осаждения тонкодисперсных примесей и эмульгированных веществ. Коагуляция может происходить самопроизвольно, под влиянием химических и физических процессов. Однако в процессах очистки сточных вод коагуляция происходит под влиянием добавляемых к ним специальных веществ – коагулянтов.

Коагулянты в воде образуют хлопья гидратов оксидов металлов, которые быстро оседают под действием силы тяжести. Хлопья обладают способностью улавливать коллоидные и взвешенные частицы и агрегировать их. Так как коллоидные частицы имеют слабый отрицательный заряд, а хлопья коагулянтов слабый положительный заряд, то между ними возникает взаимное притяжение. Процесс гидролиза коагулянтов и образования хлопьев происходит по следующим стадиям:



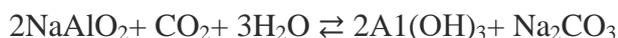
В качестве коагулянтов обычно используют соли алюминия, железа или их смеси.

Выбор коагулянта зависит от его состава, физико-химических свойств и стоимости.

Из солей алюминия наиболее распространен сульфат алюминия, который эффективен в интервале значений $\text{pH} = 5-7,5$. Он хорошо растворим в воде и имеет относительно низкую стоимость. Его применяют в сухом виде или в виде 50 %-го раствора. При коагулировании сульфат алюминия взаимодействует с гидрокарбонатами, имеющимися в воде:



Алюминат натрия применяют в сухом виде или в виде 45 % раствора. Он является щелочным реагентом, при pH 9,3...9,8 образует быстроосаждающиеся хлопья. Для нейтрализации избыточной щелочности можно использовать кислоты или дымовые газы, содержащие CO₂:

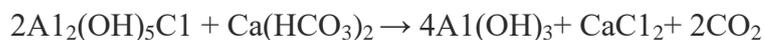


В большинстве случаев используют смесь NaAlO₂ + Al₂(SO₄)₃ в соотношении (10 : 1) – (20 : 1):

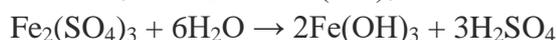
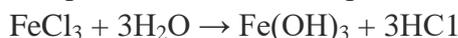


Совместное употребление этих солей дает возможность повысить эффект осветления, увеличить плотность и скорость осаждения хлопьев, расширить оптимальную область pH среды.

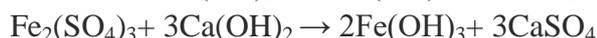
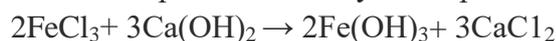
Оксихлорид алюминия обладает меньшей кислотностью и поэтому пригоден для очистки слабощелочных вод; ввиду высокого содержания в нем водорастворимого алюминия ускоряется хлопьеобразование и осаждение коагулированной взвеси, например, по реакции:



Из солей железа в качестве коагулянтов используют сульфаты железа Fe₂(SO₄)₃·2H₂O, Fe₂(SO₄)₃·3H₂O и FeSO₄·7H₂O, а также хлорное железо FeCl₃. Наибольшее осветление происходит при использовании солей трехвалентного железа. Хлорное железо применяют в сухом виде или в виде 10...15 %-х растворов. Сульфаты используют в виде порошков. Доза коагулянта зависит от pH сточных вод и количества взвешенных веществ. Для Fe³⁺ pH = 6–9, а для Fe²⁺ pH = 9,5 и выше. Для подщелачивания сточных вод используют NaOH и Ca(OH)₂. Образование хлопьев протекает по реакциям:



При подщелачивании сточных вод протекают следующие реакции:



Соли железа как коагулянты имеют ряд преимуществ перед солями алюминия:

- лучше действуют при низких температурах воды;
- для них более широкая область оптимальных значений pH среды;
- большая прочность и гидравлическая крупность хлопьев;
- их можно использовать для вод с более широким диапазоном солевого состава;
- они способны устранять вредные запахи и привкусы, обусловленные присутствием сероводорода.

Однако имеются и недостатки: при реакции катионов железа с некоторыми органическими соединениями образуются сильно окрашивающие растворимые комплексы; соли железа обладают сильными кислотными свойствами, усиливающими коррозию аппаратуры; они имеют менее развитую поверхность хлопьев.

При использовании смесей Al₂(SO₄)₃ и FeCl₃ в соотношениях 1 : 1 до 1 : 2 достигается лучший результат коагулирования, чем при отдельном использовании реагентов. Происходит ускорение осаждения хлопьев.

Кроме названных коагулянтов для обработки сточных вод могут быть использованы различные глины, алюминийсодержащие отходы производства, травильные растворы, пасты, смеси, шлаки, содержащие кремнекислоту.

Флокуляция – это процесс агрегации взвешенных частиц при добавлении в сточную воду высокомолекулярных соединений, называемых флокулянтами. В отличие от коагуляции при флокуляции агрегация происходит не только при непосредственном контакте частиц, но и в результате взаимодействия молекул адсорбированного на частицах флокулянта. Флокуляцию проводят для интенсификации процесса образования хлопьев гидроксидов алюминия и железа с целью повышения скорости их осаждения. Использование флокулянтов позволяет снизить дозы коагулянтов, уменьшить продолжительность процесса коагулирования и повысить скорость осаждения образующихся хлопьев.

Для очистки сточных вод используют природные и синтетические флокулянты.

К природным флокулянтам относятся крахмал, декстрин, эфиры, целлюлоза, др. Активная кремневая кислота ($x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$) является наиболее распространенным неорганическим флокулянтом. Из синтетических органических флокулянтов наибольшее применение в нашей стране получил полиакриламид технический (ПАА) и гидролизованный (ГПАА). Технический ПАА получают при взаимодействии акрилонитрила с серной кислотой с последующей полимеризацией акриламида. Гидролизованный полиакриламид получают омылением технического ПАА щелочью. При выборе состава и дозы флокулянта учитывают свойства его макромолекул и природу диспергированных частиц. Оптимальная доза ПАА для очистки промышленных сточных вод колеблется в пределах $0,4 \dots 1 \text{ г/м}^3$. Полиакриламид технический действует в широком диапазоне рН среды. Однако скорость осаждения сфлокулировавших хлопьев при рН = 9 и более уменьшается.

Механизм действия флокулянтов основан на следующих явлениях:

- адсорбции молекул флокулянта на поверхности коллоидных частиц;
- ретикуляции (образовании сетчатой структуры) молекул флокулянта;
- слипанию коллоидных частиц за счет сил Ван-дер-Ваальса.

2. Химические превращения в процессе реагентной очистки сточных вод

2.1 Нейтрализация сточных вод

Производственные сточные воды от технологических процессов многих отраслей промышленности содержат щелочи и кислоты, а также соли тяжелых металлов. Для предупреждения нарушения физико-химических и биохимических процессов в биоокислителях и в водоемах, а также для осаждения из сточных вод солей тяжелых металлов кислые и щелочные стоки подвергают нейтрализации. Практически нейтральными считаются воды, имеющие рН = 6,5–8,5.

Нейтрализация – это реакция между гидратированными ионами водорода сильных кислот и ионами гидроксила в основаниях, приводящая к образованию молекул воды. В общем виде реакция нейтрализации выражается уравнением

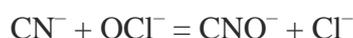


В результате концентрация каждого из этих ионов становится равной той, которая свойственна самой воде, т. е. активная реакция водной среды приближается к $\text{pH} = 7$. Нейтрализацию можно проводить различными способами: смешением кислых и щелочных сточных вод, добавлением реагентов, фильтрованием кислых вод через нейтрализующие материалы, абсорбцией кислых газов щелочными водами или абсорбцией аммиака кислыми водами. В процессе нейтрализации могут образовываться осадки.

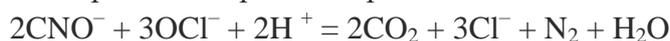
2.2 Реагентная очистка сточных вод, содержащих цианид-ионы

Для обезвреживания цианосодержащих сточных вод используется реагентный метод, основанный на химическом превращении высокотоксичных цианидов в нетоксичные соединения. Цианиды окисляют различными окислителями: соединениями, содержащими активный хлор (хлорная известь, гипохлорит кальция, гипохлорит натрия, жидкий хлор), озоном, перманганатом калия, перекисью водорода. Рассмотрим реакции, по которым осуществляются данные процессы:

а) При обработке цианосодержащих стоков гипохлоритом протекают следующие реакции:

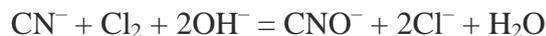


б) При избытке гипохлорит-иона протекает реакция:

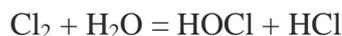


Для устранения побочных реакций образования токсичного хлорциана выделяющуюся соляную кислоту необходимо нейтрализовывать постоянным добавлением щелочи.

При окислении жидким хлором протекает следующая реакция:



При работе с жидким хлором следует иметь в виду, что при растворении его в воде происходит подкисление воды:

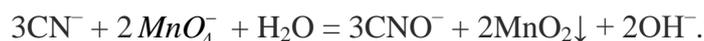


и образование хлорциана по реакции:



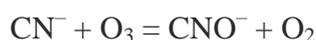
В этом случае требуется постоянное добавление щелочи. Полным окислением цианидов считается наличие в обработанной воде остаточной концентрации активного хлора 2–3 мг/л. Под «активным хлором» понимается недиссоциированная форма HClO . Таким образом, окисления хлором и хлорсодержащими компонентами требует достаточно большого количества щелочи, что делает процесс дорогим и усиливает загрязнение сточных вод дополнительными компонентами.

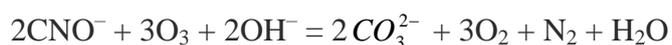
Окисление цианидов раствором перманганата калия протекает по реакции



Процесс проводят при $\text{pH} > 7$, используя оборудование периодического действия. Целесообразнее вести процесс при наличии отходов перманганата калия на производстве, использовании установок малой производительности, в аварийных ситуациях.

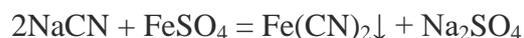
Обезвреживание больших объемов сточных вод с концентрацией $[\text{CN}^-] < 100$ мг/л можно проводить методом окисления озоном. В слабощелочной среде озон быстро реагирует с цианидами, образуя цианаты, которые окисляются до карбонатов и N_2 , по реакции



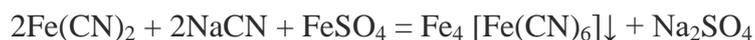


При разрушении цианидных комплексов образуются гидроксиды тяжелых металлов, которые необходимо постоянно удалять. Для улучшения процесса очистки и повышения степени окисления необходимы катализаторы (соли меди, железа, ванадия), это сокращает время и количество требуемого озона. Катализаторы ускоряют процесс, повышая эффективность в 1,5–2 раза. Основными преимуществами метода является высокая степень очистки, отсутствие промежуточных токсических соединений, возможность повторного использования очищенной воды, окисление значительного количества органических соединений, присутствующих в стоках. Недостатки – высокая энергоемкость процесса получения озона и громоздкость оборудования.

Железосульфатный метод обезвреживания цианистых стоков основан на переводе токсичных ионов в малотоксичные ионы $[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ в слабощелочной среде. При $\text{pH} = 7$ и без подогрева образуется значительное количество токсичного осадка простого цианида железа:



При дополнительном введении в обрабатываемый сток FeSO_4 цианид железа взаимодействует с непрореагировавшими цианидами с образованием нетоксичной берлинской лазури:



Расход $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ составляет 5,36 мг на каждый 1 мг цианида. Для того, чтобы реакция шла в нужном направлении, увеличивают количество вводимого FeSO_4 в 4 и более раз, при этом остаточная концентрация CN составляет 2 мг/л. Количество образующегося осадка при обработке стоков железным купоросом составляет 20–25 % от первоначального объема стока.

2.3 Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов (хрома, цинка, никеля, меди, свинца, железа)

Для удаления из сточных вод соединений ионов тяжелых металлов наиболее распространены реагентные методы очистки, сущность которых заключается в переводе растворимых в воде веществ в нерастворимые при добавлении различных реагентов с последующим отделением их от воды в виде осадков.

В качестве реагентов для удаления из сточных вод ионов тяжелых металлов используют гидроксиды кальция и натрия, карбонат натрия, сульфиды натрия, различные отходы. Наиболее широко применяют гидроксид кальция. Осаждение металлов происходит в виде гидроксидов. При обработке кислых вод оксидом кальция и гидроксидом натрия ионы цинка, меди, никеля, свинца, кадмия, кобальта, содержащиеся в стоках, связываются в труднорастворимые соединения.

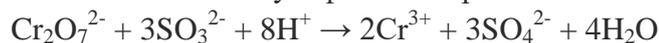
Обработка сточных вод от ионов хрома осуществляется в две стадии:

- восстановление $\text{Cr}(\text{VI})$ до $\text{Cr}(\text{III})$, которые менее токсичны;
- осаждение $\text{Cr}(\text{III})$ в виде гидроксида.

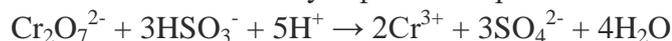
В качестве реагентов-восстановителей наибольшее применение получили натриевые соли сернистой кислоты – сульфит (Na_2SO_3), гидросульфит (NaHSO_3), пиросульфит (пиросернистокислый натрий, метабисульфит натрия) ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), а также тиосульфат натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$).

Восстановление $\text{Cr}(\text{VI})$ до $\text{Cr}(\text{III})$ происходит в кислой среде по реакциям:

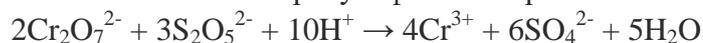
– восстановление сульфитом натрия



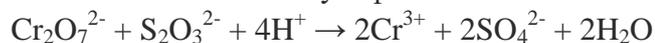
– восстановление бисульфитом натрия



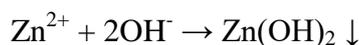
– восстановление пиросульфатом натрия



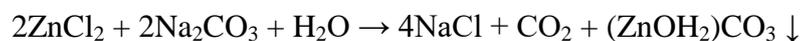
– восстановление тиосульфатом



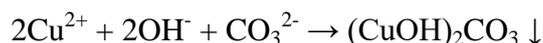
Выделение катионов Zn^{2+} щелочами основано на переводе их в труднорастворимый гидроксид цинка:



При действии соды на сточные воды, содержащие соли цинка, образуются гидрокарбонаты:

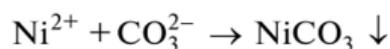
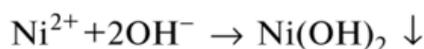


Очистка сточных вод от меди связана с осаждением ее в виде гидроксида или гидроксид-карбоната:

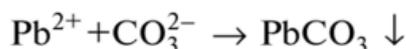
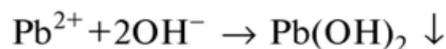


Возможен процесс извлечения меди из сточных вод осаждением ферроцианидом калия. Этот реагент может быть использован и для осаждения других ионов тяжелых металлов.

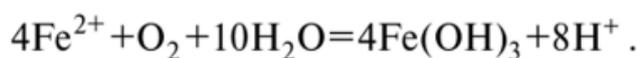
Очистка сточных вод от никеля основана на выделении его из раствора в виде труднорастворимых соединений:



Находящиеся в растворе катионы свинца переводят в осадок в виде одного из труднорастворимых соединений:

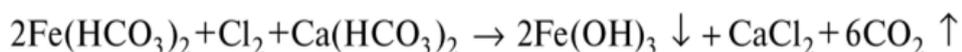


Для очистки от солей железа применяют аэрацию, в процессе которой происходит окисление двухвалентного железа в трехвалентное:



При высоком содержании железа в воде применяют реагентные методы. Для этой цели используют хлор, хлорит кальция (хлорную известь), перманганат калия, озон, оксид кальция (известь), карбонат натрия (соду).

При взаимодействии соединений железа с хлором протекает реакция

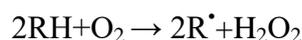
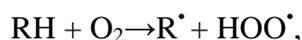


2.4 Очистка вод от углеводородов (RH)

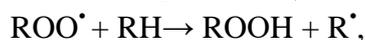
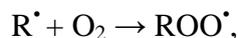
Очистку сточных вод от растворимых углеводородов поводится окислительными методами с применением кислорода воздуха, озоном. Процесс окисления углеводородов (RH) в жидкой фазе протекает по механизму цепных с вырожденным разветвлением цепей с образованием гидроксильных OH^\bullet и гидропероксидных радикалов HOO^\bullet , который может быть записан в следующем виде:

С кислородом воздуха:

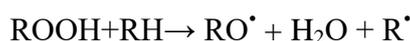
а) инициирование цепи



б) продолжение цепи



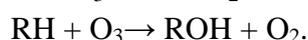
в) вырожденное разветвление



г) обрыв цепи

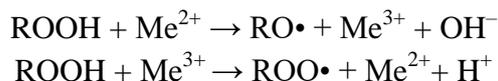


С озоном:



Кроме этого, для интенсификации процесса жидкофазного окисления органических компонентов применяют катализаторы, в качестве которых чаще всего используют металлы переменной валентности. Каталитический эффект ионов металлов переменной

валентности в процессе окисления углеводородов в гомогенной фазе в общем виде можно представить образованием свободных радикалов в процессах, где лимитирующей стадией является одноэлектронный перенос:

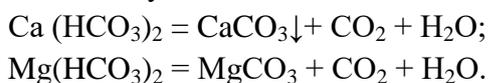


3. Механизмы процесса умягчения воды

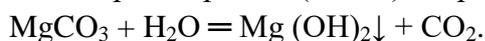
Умягчение воды сводится к уменьшению концентрации в ней кальциевых и магниевых солей. Умягчение воды для хозяйственно-питьевых целей также целесообразно, особенно в случае, если она превышает 7 мг-экв/дм³.

3.1 Термическое умягчение воды

При нагревании воды до кипения происходит превращение гидрокарбонатов кальция и магния в карбонаты по следующим схемам:



Эти обратимые процессы можно почти целиком сместить вправо за счет кипячения воды, так как при высоких температурах растворимость двуокиси углерода понижается. Однако полностью устранить карбонатную жесткость нельзя, так как углекислый кальций хотя и незначительно (около 9,95 мг/л при 15 °С), но растворим в воде. Растворимость MgCO₃ достаточно высока (110 мг/л), поэтому при длительном кипячении он гидролизует с образованием малорастворимой (8 мг/л) гидроокиси магния:



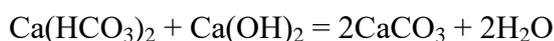
Этот метод может применяться для умягчения воды, содержащей преимущественно карбонатную жесткость и идущей для питания котлов низкого и среднего давления.

Недостатки: снижается только временная (карбонатная) жесткость; требуются большие энергозатраты – в промышленности этот способ водоподготовки используют лишь при наличии дешевых источников тепла (на ТЭЦ, например).

3.2 Реагентное умягчение воды

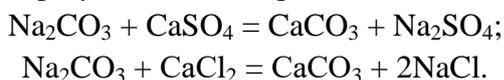
Из реагентных методов наиболее распространен *содово-известковый способ умягчения*. Сущность его сводится к получению вместо растворенных в воде солей Ca и Mg нерастворимых солей CaCO₃ и Mg(OH)₂, выпадающих в осадок. Оба реагента — соду Na₂CO₃ и известь Ca(OH)₂ – вводят в умягчаемую воду одновременно или поочередно. Соли карбонатной, временной жесткости удаляют известью, не карбонатной, постоянной жесткости – содой.

Химические реакции при удалении карбонатной жесткости протекают следующим образом:



Гидрат окиси магния Mg(OH)₂ коагулирует и выпадает в осадок. Для устранения некарбонатной жесткости в умягчаемую воду вводят Na₂CO₃.

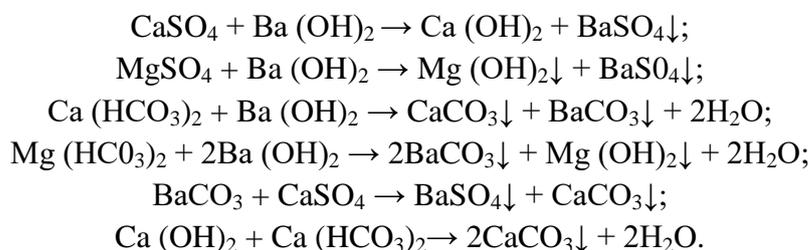
Химические реакции при удалении некарбонатной жесткости следующие:



В результате реакции получается углекислый кальций, который выпадает в осадок.

Умягчение воды бариевыми солями схож с известково-содовым, но имеет то преимущество, что образующиеся при реакции продукты нерастворимы в воде. Содержание солей, обуславливающих жесткость воды, при этом методе понижается, и умягчение идет гораздо полнее. Кроме того, нерастворимость BaCO_3 не требует строгих дозировок, процесс может протекать автоматически.

Реакции, протекающие при умягчении бариевыми соединениями, можно представить схемами:



При умягчении бариевыми солями реакции приводят не к замене одной соли другой, а к полному удалению их из воды – в этом заключается преимущество умягчения бариевыми солями. К недостаткам этого метода относятся высокая стоимость бариевых солей и медленное течение реакции с карбонатом бария BaCO_3 .

Реагентная водоподготовка применяется только на больших станциях водоподготовки, поскольку связан с рядом специфических проблем: утилизация твердого осадка, специально оборудованные хранилища для реагентов, необходимость точной дозировки химикатов и их правильной подачи в исходную воду.

4. Механизмы биологической очистки вод

Процесс **биохимической очистки** основан на способности микроорганизмов использовать растворенные органические вещества сточных вод для питания в процессе жизнедеятельности. Часть органических веществ превращается в воду, диоксид углерода, нитрит- и сульфат-ионы, часть идет на образование биомассы.

4.1 Аэробные и анаэробные методы биологической очистки

Различают аэробные и анаэробные методы биохимической очистки сточных вод.

Аэробные методы биохимической очистки протекают в присутствии кислорода. Они основаны на использовании аэробных групп организмов, для жизнедеятельности которых необходим постоянный приток кислорода и температура 20–40 °С.

При аэробной очистке микроорганизмы культивируются в активном иле и биопленке. Активный ил – это смесь биомассы микроорганизмов и загрязняющих веществ вместе с поступающими в аэротенк сточными водами. Активный ил представляет собой темно-коричневые хлопья размером до нескольких сотен микрометров. На 70 % он состоит из живых организмов и на 30 % – из твердых частиц неорганической природы.

Аэробные микроорганизмы существуют только в кислородсодержащей среде и полностью расщепляют органику до CO_2 и H_2O , одновременно синтезируя собственную биомассу. Формула данного процесса выглядит следующим образом:



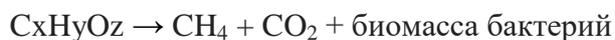
где $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z$ – органическое вещество.

Процесс биохимической очистки сточных вод от органических веществ в аэротенках состоит из следующих этапов:

- адсорбция и коагуляция активным илом взвешенных и коллоидных частиц;
- окисление микроорганизмами растворенных и адсорбированных илом органических соединений;
- нитрификация и регенерация активного ила.
- удаление избыточного активного ила из сооружения.

Анаэробная очистка – процесс сбраживания высококонцентрированных сточных вод, осуществляемый микроорганизмами в отсутствие кислорода (в анаэробных условиях) с получением горючего биогаза. Биогаз – это смесь, состоящая из 65 % метана, 30 % CO₂, 1% H₂S и незначительных примесей N₂, O₂, H₂ и CO (угарного газа). Анаэробные методы очистки используют главным образом для обезвреживания осадков. Процессы анаэробной очистки воды происходят в метантенках и биореакторах.

Анаэробные микроорганизмы нормально обходятся без кислорода, но и прирост биомассы у них небольшой. Бактерии данного типа нужны для бескислородного брожения органических соединений с образованием метана. Формула данного процесса выглядит следующим образом:



Стадии анаэробной очистки:

- гидролиз: сложные углеводороды разлагаются на воду и более простые составляющие;
- предварительное окисление: в результате выделяются спирты и кислоты;
- завершающее окисление продуктов;
- переработка веществ бактериями и выделение метана.

Все стадии анаэробного очищения тесно связаны между собой. При нарушении одного этапа очистка прекращается.

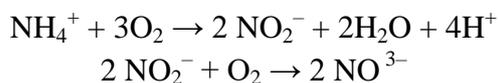
Анаэробные методики незаменимы при высоких концентрациях органики – которые превышают предельно допустимые для аэробных микроорганизмов. При низком содержании органики анаэробные микроорганизмы, наоборот, малоэффективны.

4.2 Механизм процесса нитрификации-денитрификации

Удаление из сточных вод аммонийного азота происходит в результате процесса **нитрификации**, которая осуществляется автотрофными бактериями, использующими для питания неорганический углерод (углекислоту, карбонаты, бикарбонаты). Присутствие в воде органических веществ может тормозить развитие нитрифицирующих бактерий. Это связано с тем, что нитрифицирующие бактерии способны потреблять только тот азот, который не использован гетеротрофными микроорганизмами, развивающимися при наличии органических веществ и потребляющими азот в процессе конструктивного обмена. Кроме того, гетеротрофные бактерии усиленно поглощают кислород, необходимый нитрификаторам.

На первой стадии процесса бактерии рода *Nitrosomonas* окисляют азот аммонийный до нитритов. В качестве субстрата *Nitrosomonas* может использовать аммонийный азот, мочевину, мочевую кислоту, гуанин, но органическая часть молекулы не потребляется. На второй стадии бактерии рода *Nitrobacter* окисляют нитриты до нитратов.

Реакции окисления азота аммонийного:



При нитрификации в качестве источника кислорода бактериями используются также гидрокарбонаты – HCO_3^- , при этом увеличивается концентрация угольной кислоты – H_2CO_3 и, следовательно, снижается рН среды. Степень снижения рН зависит от величины щелочности воды: на 1 мг окисленного азота используется 8,7 мг щелочности. При условии осуществления нитрификации в аэротенке необходимо учитывать дополнительный расход кислорода из расчета 4,6 мг O_2 на 1 мг окисленного азота.

Основным требованием к процессу нитрификации при осуществлении его в аэротенках является наличие достаточной биомассы бактерий-нитрификаторов. Поскольку скорость роста автотрофов значительно ниже чем, гетеротрофов, ведущих процесс разложения органических загрязнений, при осуществлении процесса нитрификации в одном сооружении с окислением органических загрязнений требуется увеличение продолжительности очистки или снижение органической нагрузки. Скорость прироста бактерий-нитрификаторов определяет минимальный возраст активного ила в аэротенке, ниже которого эти бактерии будут просто изыматься из аэротенка с избыточным активным илом.

В аэротенках полного окисления (продленной аэрации) нитрификация проходит довольно полно, так как возраст ила в этих сооружениях достигает 30 суток и более. Здесь отмечается высокое содержание нитратов в очищенной воде (до 8-10 мг/л) и соответственно более низкие концентрации солей аммония (1-2 мг/л). Более глубокую нитрификацию (NH_4 до 0,5 мг/л) можно осуществить в аэротенках с прикрепленной микрофлорой, оснащенных различной нагрузкой. Применение аэротенков полного окисления на станциях большой производительности ранее не применялось по технико-экономическим показателям (увеличение объемов аэротенков и количества подаваемого в них воздуха). Однако считается, что этот метод наиболее перспективен, особенно с учетом современных требований к степени удаления из воды соединений азота (при применении обычных аэротенков все равно необходимо предусматривать дополнительные сооружения для проведения нитрификации).

Достоинством аэротенков полного окисления, особенно при использовании затопленной загрузки, является также то, что в них одновременно протекает процесс денитрификации, эффективность которой может достигать 60-80 %.

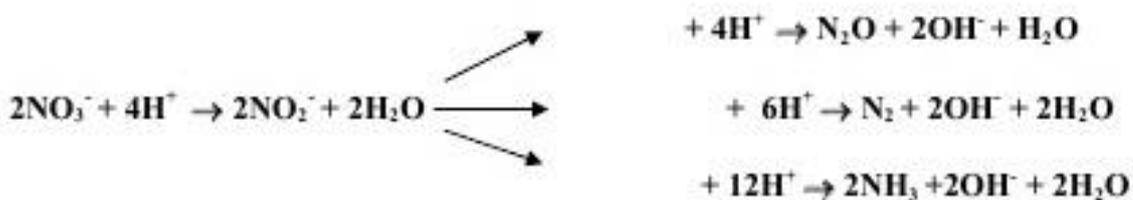
Скорость процесса нитрификации зависит от рН среды и температуры. Так при рН менее 6 и температуре менее 10°C интенсивность нитрификации значительно снижается, присутствие свободного аммиака и солей тяжелых металлов ингибируют процесс. Оптимальными являются температура $20-25^\circ\text{C}$ и рН более 8,4.

Для удаления из воды окисленных форм азота – нитритов и нитратов, образующихся в результате нитрификации, осуществляется процесс *денитрификации*, сущность которого заключается в том, что гетеротрофные бактерии – денитрификаторы (*Thiorescens*, *Denitrificans*, *Русcivaneum*) в процессе своей жизнедеятельности для окисления органического вещества используют связанный кислород нитратов и нитритов, восстанавливая их до молекулярного азота.

Процесс биологической денитрификации проводится в анаэробных условиях в присутствии органических веществ, необходимых для жизнедеятельности бактерий. Органические вещества окисляются кислородом, который был извлечен из нитритов и нитратов. Окисляются в основном легкоокисляемые вещества: углеводы, органические кислоты, спирты. Денитрифицирующие бактерии не могут использовать высокомолекулярные полимерные соединения. Максимальная интенсивность процесса

достигается при рН 7.0 – 8.2. При значениях рН ниже 6,1 и выше 9,6 процесс полностью затормаживается. Повышение температуры интенсифицирует процесс.

Денитрификация происходит согласно такой схеме:



Следует отметить, что аммиака и оксидов азота в процессе образуется немного. Удельная скорость восстановления нитратов колеблется от 5 до 10 мг/(г.ч).

Для эффективной денитрификации необходимо присутствие легкоокисляемых органических веществ (спиртов, низкомолекулярных органических кислот) в качестве источника углеродного питания. Процессы нитрификации и денитрификации проходят в аэротенке одновременно, так как в активном иле всегда есть аэрируемые зоны и зоны с дефицитом кислорода, где образовавшиеся в процессе нитрификации нитриты и нитраты восстанавливаются. Разделение процессов нитрификации и денитрификации позволяет улучшить условия проведения каждого из них и, соответственно, обеспечить глубокое удаление азота.