МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
[Полное название вуза]

Факультет биотехнологии и экологии
Кафедра биотехнологии

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине «Экологическая биотехнология»

на тему: «Биотехнологические методы очистки сточных вод»

Направление подготовки 19.03.01 Биотехнология

Выполнил(а): студент(ка) гр. ____
_____ / И. О. Фамилия

Руководитель: _____
_____ / И. О. Фамилия

[Город] 2026

Пример работы, выполненной в Универ AI · univerai.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....3
1. Теоретические основы биологической очистки сточных вод.....5
1.1 Состав сточных вод и показатели их загрязнения.....5
1.2 Микробиологические и кинетические основы биологической очистки 8
1.3 Основные технологии биологической очистки.....11
2. Расчётно-аналитическая часть: биологическая очистка на условном примере.....16
2.1 Исходные данные и методика расчёта.....16
2.2 Расчёт аэротенка с нитри-денитрификацией.....19
2.3 Сравнительная оценка методов и рекомендации по выбору.....24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....27
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....28
Приложение А. Основные термины биологической очистки сточных вод.....32

ВВЕДЕНИЕ

Город на сто тысяч жителей ежедневно отправляет в канализацию несколько десятков тысяч кубометров воды. В ней растворены и взвешены остатки пищи, моющие средства, мочевина, соединения фосфора, а с промышленных площадок — нефтепродукты, фенолы, красители. Если сбросить такую воду в реку без очистки, бактерии реки начнут окислять органику, израсходуют растворённый кислород, и в водоёме начнутся заморы рыбы. Азот и фосфор вызовут цветение воды. Поэтому очистка сточных вод — не вопрос комфорта, а условие существования городов у рек и озёр.

Большую часть загрязнений городских сточных вод удаляют не химией и не фильтрами, а живыми организмами. Активный ил аэротенка — сообщество бактерий, простейших и коловраток — окисляет органические вещества до углекислого газа и воды, превращает аммоний в нитраты, а нитраты в молекулярный азот. Технология активного ила известна с 1914 года, когда Э. Ардерн и У. Локетт описали опыты по окислению сточной жидкости без фильтров [13]. За прошедший век она превратилась в развитую отрасль биотехнологии с моделями кинетики, генетическими методами анализа сообществ и новыми процессами вроде анаэробного окисления аммония [15; 21].

В России требования к очистке ужесточились после перехода к нормированию на основе наилучших доступных технологий. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» связывает разрешения на сброс с технологическими показателями НДТ [1], а для очистных сооружений поселений эти показатели описаны в информационно-техническом справочнике ИТС 10-2019 [7]. Многие станции, построенные в 1960–1980-е годы для удаления органики, не рассчитаны на глубокое удаление азота и фосфора и требуют реконструкции. Выбор биотехнологического метода становится практической инженерной задачей.

Цель курсовой работы — проанализировать биотехнологические методы очистки сточных вод, их научные основы и область применения, и на условном примере показать порядок технологического расчёта сооружения биологической очистки.

Задачи работы:

1) охарактеризовать состав сточных вод и показатели, по которым оценивают их загрязнённость;

2) рассмотреть микробиологические и кинетические основы биологической очистки;

3) описать основные технологии: аэротенки, биофильтры, процессы удаления азота и фосфора, мембранные биореакторы, анаэробные реакторы, анаммокс, аэробный гранулированный ил;

4) выполнить упрощённый расчёт аэротенка с нитри-денитрификацией для условного населённого пункта;

5) сравнить методы по основным критериям и сформулировать рекомендации по их выбору.

Объект исследования — процессы очистки хозяйственно-бытовых и близких к ним по составу сточных вод. Предмет — биотехнологические методы очистки, основанные на деятельности микроорганизмов.

Методы работы: анализ научной и нормативной литературы, сравнительный анализ технологий, инженерный расчёт по балансовым соотношениям. Исходные данные расчётного примера во второй главе (расход, концентрации, коэффициенты) — условные данные для примера, подобранные в диапазонах, типичных для городских сточных вод по учебной литературе [15; 19]. Они не описывают конкретные очистные сооружения.

Основу работы составили учебники и монографии по очистке сточных вод [8; 9; 10; 12; 15; 19], первоисточники по ключевым процессам [14; 18; 20; 21], нормативные документы Российской Федерации [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7].

Работа состоит из введения, двух глав, заключения, списка использованных источников и приложения.

1. Теоретические основы биологической очистки сточных вод

1.1 Состав сточных вод и показатели их загрязнения

Сточными водами Федеральный закон «О водоснабжении и водоотведении» называет принимаемые от абонентов в централизованную систему водоотведения воды, а также дождевые, талые, инфильтрационные, поливомоечные и дренажные воды, если они принимаются в эту систему [2]. По происхождению различают хозяйственно-бытовые, производственные и поверхностные стоки. Городские сточные воды — смесь всех трёх, и их состав сильно зависит от доли промышленности и от того, общесплавная или раздельная в городе канализация.

Загрязнения находятся в воде в разных формах: взвешенные частицы, коллоиды и растворённые вещества. Механическая очистка (решётки, песколовки, первичные отстойники) удаляет крупные отбросы, песок и часть взвеси. Растворённая и коллоидная органика, а также соединения азота и фосфора остаются в воде, и для них нужна биологическая ступень [9; 10; 19].

Обобщённые показатели органического загрязнения

Измерить по отдельности тысячи органических соединений невозможно, поэтому пользуются обобщёнными показателями. Биохимическое потребление кислорода (БПК) — количество кислорода, которое расходуют микроорганизмы на окисление органики пробы за определённое время, обычно за 5 суток (БПК5) при 20 °C. Химическое потребление кислорода (ХПК) — количество кислорода, эквивалентное расходу сильного окислителя (бихромата калия) на окисление всех окисляемых веществ пробы [12; 15]. В России ХПК воды определяют бихроматным методом по ГОСТ 31859-2012: стандарт рассчитан на диапазон от 10 до 800 мг/дм³, а более загрязнённые пробы перед анализом разбавляют [6]. ХПК всегда больше БПК, а их отношение говорит о биоразлагаемости: для бытовых стоков отношение БПК5/ХПК близко к 0,5, а для стоков с трудноокисляемыми веществами оно заметно ниже [19].

Для расчётов биологической очистки удобно делить ХПК на фракции: легкоразлагаемую растворённую, медленно разлагаемую (в основном взвешенную), инертную растворённую и инертную взвешенную. Такое деление лежит в основе моделей активного ила Международной водной ассоциации и позволяет предсказать, сколько органики будет потреблено, сколько уйдёт с илом и сколько останется в очищенной воде [15; 16].

Биогенные элементы

Азот в бытовых стоках поступает в основном в виде мочевины, которая уже в канализационной сети гидролизуется до аммония. Поэтому в поступающей на очистку воде азот представлен главным образом аммонийным и органическим азотом, суммарно — общим азотом по Кьельдалю, а нитритов и нитратов почти нет. Фосфор присутствует в виде ортофосфатов, полифосфатов (из моющих средств) и органических соединений [15; 19]. Именно азот и фосфор вызывают эвтрофикацию водоёмов, поэтому требования к их содержанию в очищенной воде особенно строги для водоёмов рыбохозяйственного значения. Нормативы качества воды таких водоёмов, включая предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ, с 1 сентября 2025 г. установлены приказом Росрыболовства № 296 [4]. Гигиенические нормативы качества питьевой воды и воды водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования собраны в СанПиН 1.2.3685-21 [3].

Таблица 1 – Типичный состав неочищенных бытовых сточных вод

Показатель	Обозначение	Диапазон, мг/л	Что характеризует
Биохимическое потребление кислорода	БПК5	110–350	Биоразлагаемая органика
Химическое потребление кислорода	ХПК	250–800	Вся окисляемая органика
Взвешенные вещества	ВВ	120–400	Нерастворённые примеси
Общий азот по Кьельдалю	TKN	20–70	Аммонийный и органический азот
Аммонийный азот	N-NH4	12–45	Продукт гидролиза мочевины
Общий фосфор	P общ.	4–12	Орто-, поли- и органические фосфаты

Источник: составлено автором по обобщённым диапазонам из [15; 19]; фактический состав зависит от города и системы канализации.

Нормирование качества очищенной воды

Требования к очищенной воде задаются несколькими механизмами. Для объектов, которые сбрасывают воду в водные объекты, устанавливаются нормативы допустимых сбросов; с переходом к системе НДТ для объектов I категории действуют технологические нормативы, основанные на технологических показателях наилучших доступных технологий [1]. Для очистных сооружений поселений такие показатели приведены в ИТС 10-2019; справочник распространяется на очистные сооружения любой производительности, а применимость отдельных технологий ограничивает в том числе масштабом объекта и условиями сброса в водный объект [7]. Проектирование сооружений ведётся по своду правил СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения» [5].

Для практики из этого следует простая вещь: технология выбирается под конкретные требования. Если нужно удалить только органику и взвесь, достаточно классического аэротенка или биофильтра. Если требуется глубокое удаление азота и фосфора, сооружение должно содержать зоны с разным кислородным режимом, и его проектирование заметно усложняется.

1.2 Микробиологические и кинетические основы биологической очистки

Биологическая очистка — это управляемое использование тех же процессов самоочищения, которые идут в реке, но в концентрированном виде и с подачей кислорода. В аэротенке концентрация микроорганизмов в тысячи раз выше, чем в природном водоёме, поэтому за несколько часов происходит то, на что в реке ушли бы дни и километры течения [10; 12].

Активный ил и биоплёнка

Микроорганизмы в очистных сооружениях существуют в двух формах. Активный ил — хлопья размером от десятков до сотен микрометров, взвешенные в воде. Основу хлопка составляют гетеротрофные бактерии, связанные внеклеточными полимерными веществами; на хлопьях и вокруг них живут простейшие (инфузории, амёбы) и многоклеточные (коловратки, нематоды), которые выедают свободноплавающие бактерии и осветляют воду [12; 15]. По составу микрофауны технологи судят о состоянии ила: обилие прикреплённых инфузорий и коловраток обычно говорит о хорошей работе, а массовое развитие нитчатых бактерий — о риске вспухания ила. Порядок такого гидробиологического контроля аэротенков описан в методическом руководстве ПНД Ф СБ 14.1.77-96 [11].

Вторая форма — биоплёнка, прикреплённая к поверхности загрузки биофильтра или пластиковых носителей. В биоплёнке по толщине складываются градиенты кислорода и субстрата: на поверхности идут аэробные процессы, в глубине могут развиваться аноксидные и анаэробные. Это позволяет в одном сооружении сочетать разные процессы [19].

Кинетика роста микроорганизмов

Скорость роста бактерий зависит от концентрации лимитирующего субстрата. Эту зависимость описал Ж. Моно в 1949 году, и его уравнение до сих пор лежит в основе почти всех расчётов биологической очистки [20]:

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{S}{K_S + S} \quad (1)$$

где μ — удельная скорость роста микроорганизмов, сут$^{-1}$; μmax — максимальная удельная скорость роста, сут$^{-1}$; S — концентрация лимитирующего субстрата, мг/л; KS — константа полунасыщения, равная концентрации субстрата, при которой μ = μmax / 2, мг/л.

Из уравнения видно, что при высокой концентрации субстрата скорость роста близка к максимальной и почти не зависит от S, а при низкой концентрации пропорциональна ей. В очищенной воде концентрации органики малы, поэтому сооружение работает в «пропорциональной» области, и для достижения глубокой очистки нужен большой запас биомассы.

Ключевой технологический параметр — возраст ила, то есть среднее время пребывания микроорганизмов в системе. Он равен отношению массы ила в сооружении к массе ила, выводимой из системы за сутки:

$$\theta_X = \frac{V \cdot X}{Q_w \cdot X_w + (Q - Q_w) \cdot X_e} \quad (2)$$

где θX — возраст ила, сут; V — объём аэротенка, м³; X — концентрация ила в аэротенке, кг/м³; Qw и Xw — расход и концентрация избыточного ила; Q — расход сточных вод, м³/сут; Xe — концентрация взвеси в очищенной воде, кг/м³.

Смысл параметра в том, что в сооружении удерживаются только те микроорганизмы, которые успевают размножиться за время своего пребывания. Нитрифицирующие бактерии растут намного медленнее гетеротрофов, их максимальная скорость роста сильно падает при понижении температуры. Поэтому для нитрификации нужен большой возраст ила, а зимой — ещё больший [15; 19]. Если возраст ила меньше критического, нитрификаторы «вымываются», и аммоний проходит через сооружение почти без изменений.

Процессы удаления азота

Биологическое удаление азота идёт в две стадии. Нитрификация — окисление аммония автотрофными бактериями сначала до нитрита, затем до нитрата в аэробных условиях. На окисление 1 г аммонийного азота до нитрата по стехиометрии расходуется около 4,57 г кислорода, а щёлочность воды при этом снижается. Денитрификация — восстановление нитрата до молекулярного азота гетеротрофными бактериями в аноксидных условиях (без растворённого кислорода, но в присутствии нитрата) с использованием органики стоков как источника углерода; при этом возвращается часть кислородного эквивалента, около 2,86 г на 1 г восстановленного нитратного азота [15; 19].

В 1990-х годах был открыт третий путь — анаэробное окисление аммония нитритом (анаммокс). Его впервые зафиксировали в денитрифицирующем реакторе с псевдоожиженным слоем в Нидерландах [21], а затем выделили и описали ответственных за процесс бактерий из группы планктомицетов [24]. Анаммокс-бактерии превращают аммоний и нитрит прямо в молекулярный азот, без органического углерода. Это позволяет очищать стоки с высоким содержанием азота и низким содержанием органики, например иловую воду после сбраживания осадка, с заметно меньшими затратами кислорода.

Биологическое удаление фосфора

Фосфор удаляется биологически за счёт фосфатаккумулирующих организмов. В анаэробной зоне, где нет ни кислорода, ни нитрата, они поглощают летучие жирные кислоты и запасают их внутри клетки, высвобождая фосфат в воду. В последующей аэробной зоне они окисляют запасы и поглощают фосфата больше, чем выделили. Фосфор уходит из системы с избыточным илом [15]. Процесс чувствителен к поступлению нитрата в анаэробную зону и к недостатку легкоокисляемой органики,

поэтому на практике его часто дополняют химическим осаждением солями железа или алюминия [8].

Таблица 2 – Основные биологические процессы очистки сточных вод

Процесс	Микроорганизмы	Условия	Результат
Окисление органики	Гетеротрофные бактерии	Аэробные	CO_2, H_2O, прирост биомассы
Нитрификация	Автотрофные нитрифицирующие бактерии	Аэробные, большой возраст ила	$NH_4^+ \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO_3^-$
Денитрификация	Гетеротрофные денитрификаторы	Аноксидные, нужна органика	$NO_3^- \rightarrow N_2$
Анаммокс	Планктомицеты	Анаэробные, нужен нитрит	$NH_4^+ + NO_2^- \rightarrow N_2$
Биологическое удаление фосфора	Фосфатаккумулирующие организмы	Чередование анаэробных и аэробных зон	Фосфор накапливается в иле
Метановое брожение	Сообщество бактерий и метаногенных архей	Анаэробные	CH_4, CO_2

Источник: составлено автором по [15; 19; 21; 24].

Итак, биологическая очистка опирается на несколько групп микроорганизмов с разными требованиями к кислороду, субстрату и времени пребывания. Инженерная задача состоит в том, чтобы создать в сооружении зоны с нужными условиями и удерживать в нём достаточно биомассы каждого типа.

1.3 Основные технологии биологической очистки

Технологии биологической очистки различаются формой существования биомассы (взвешенная или прикреплённая), кислородным режимом (аэробный, аноксидный, анаэробный) и способом отделения ила от воды (гравитационное отстаивание или мембраны). Ниже рассмотрены основные из них.

Аэротенки

Аэротенк — резервуар, в котором сточная вода перемешивается с активным илом и аэрируется. После аэротенка смесь поступает во вторичный отстойник, где ил оседает и в большей части возвращается в аэротенк

(возвратный ил), а прирост удаляется как избыточный ил. По гидравлическому режиму различают аэротенки-вытеснители, где вода проходит коридоры от входа к выходу, и аэротенки-смесители, где поступающая вода сразу смешивается со всем объёмом [10; 12]. Классический аэротенк хорошо удаляет органику, но для удаления азота и фосфора его разделяют на зоны.

Наиболее распространённая схема с удалением азота — схема с предвключённой денитрификацией: сточная вода сначала попадает в аноксидную зону, куда из конца аэробной зоны возвращается иловая смесь с нитратами (внутренний рецикл). В аноксидной зоне денитрификаторы используют органику поступающей воды для восстановления нитратов, а в аэробной зоне идёт окисление оставшейся органики и нитрификация [15; 19]. Если перед аноксидной зоной добавить анаэробную, получается схема с биологическим удалением и азота, и фосфора.



Рисунок 1 – Схема биологической очистки с удалением азота и фосфора

Источник: составлено автором по [15; 19].

Биофильтры и сооружения с прикреплённой биомассой

В биофильтрах сточная вода орошает загрузку из щебня, шлака или пластмассы, на которой растёт биоплёнка. Капельные биофильтры просты в эксплуатации и не требуют аэрационных систем, но при низкой нагрузке плохо удаляют азот и боятся замерзания [10]. Современные варианты — затопленные биофильтры и реакторы с подвижной загрузкой, где пластиковые носители свободно перемешиваются в аэрируемом объёме. Такие сооружения компактнее и удерживают медленно растущие нитрификаторы на носителе независимо от возраста взвешенного ила, что удобно при реконструкции старых аэротенков [19]. По обзору Х. Эдегора, такой реактор пригоден и для снятия органики, и для нитри-денитрификации при общем времени пребывания около 3–5 ч [22].

Реакторы периодического действия и мембранные биореакторы

В реакторе периодического действия (SBR) все стадии — наполнение, аэрация, отстаивание, сброс — идут последовательно в одной ёмкости. Это экономит площадь и позволяет гибко менять продолжительность стадий, но требует автоматики и накопительных ёмкостей перед реактором [19]. На основе такого цикла с отбором быстро оседающих частиц формируется аэробный гранулированный ил: плотные гранулы диаметром порядка миллиметра, внутри которых одновременно идут окисление органики, нитрификация, денитрификация и накопление фосфора. Возможность одновременного удаления органики, азота и фосфора гранулированным илом была показана в лабораторных реакторах Делфтского технического университета [14]. Позже процесс перенесли на полномасштабные городские сооружения [23].

В мембранном биореакторе (МБР) вторичный отстойник заменён ультра- или микрофильтрационными мембранами. Мембраны задерживают весь ил, поэтому можно держать его концентрацию в несколько раз выше, чем в обычном аэротенке, и получать очищенную воду практически без

взвеси и с резко сниженным содержанием бактерий. Плата за это — затраты энергии на продувку мембран, засорение и замена мембранных модулей [17].

Анаэробные технологии

Анаэробная очистка не требует аэрации и даёт биогаз, поэтому выгодна для концентрированных стоков пищевой промышленности, пивоварен, спиртовых заводов. Наиболее известная конструкция — реактор с восходящим потоком через слой анаэробного ила (UASB), предложенный группой Г. Леттинги в 1980 году [18]. В нём вода движется снизу вверх через слой плотного гранулированного ила, а сепаратор в верхней части разделяет газ, ил и воду. Для городских стоков умеренного климата анаэробный процесс в чистом виде применяется редко: концентрации органики слишком малы, и он не удаляет азот и фосфор. Зато анаэробное сбраживание широко используется для обработки осадков очистных сооружений.

Естественные методы и биодобавки

Биотехнология нужна и для обработки осадков, которые образуются при очистке воды. Избыточный активный ил и осадок первичных отстойников содержат много органики и воды. На крупных станциях их сбраживают в метантенках: анаэробное сообщество разлагает часть органики до метана и углекислого газа, объём и запах осадка уменьшаются, а биогаз используется для получения тепла и электроэнергии [10; 19]. Иловая вода после сбраживания и обезвоживания богата аммонием, и её возврат в голову сооружений заметно увеличивает нагрузку по азоту на аэротенки. Именно для таких потоков и применяется анаммокс, о котором шла речь в параграфе 1.2.

Для малых населённых пунктов применяют биологические пруды и искусственные водно-болотные системы (биоплато), в которых очистку выполняют микроорганизмы, водоросли и высшие водные растения [10]. Они почти не потребляют энергию, но требуют большой площади и плохо работают зимой. Отдельное направление — биоаугментация, то есть

внесение специально отобранных культур микроорганизмов для разложения трудноокисляемых веществ, например нефтепродуктов или фенолов, в промышленных стоках. Её эффект сильно зависит от того, приживутся ли внесённые культуры в сообществе ила.

Таблица 3 – Основные биотехнологии очистки сточных вод

Технология	**Форма биомассы**	**Что удаляет**	**Область применения**
Аэротенк классический	Взвешенная (активный ил)	Органику, взвесь	Городские и промышленные стоки
Аэротенк с нитри-денитрификацией	Взвешенная	Органику, азот (с анаэробной зоной — и фосфор)	Средние и крупные станции
Биофильтр, реактор с подвижной загрузкой	Прикреплённая	Органику, азот	Малые станции, реконструкция
SBR, гранулированный ил	Взвешенная или гранулы	Органику, азот, фосфор	Ограниченная площадь
Мембранный биореактор	Взвешенная, высокая концентрация	Органику, азот, взвесь, бактерии	Повторное использование воды
UASB-реактор	Анаэробные гранулы	Органику с получением биогаза	Концентрированные промышленные стоки
Анаммокс	Гранулы или биоплёнка	Азот при малом содержании органики	Иловая вода, стоки с высоким азотом
Биопруды, биоплато	Природное сообщество	Органику, частично биогены	Малые населённые пункты

Источник: составлено автором по [10; 14; 17; 18; 19].

Разнообразие технологий не означает, что одна из них «лучшая». Каждая решает свою задачу при своих ограничениях: требованиях к качеству воды, площади, климате, энергетических затратах, квалификации персонала. Сравнительная оценка и расчётный пример во второй главе показывают, как эти факторы учитываются при выборе.

2. Расчётно-аналитическая часть: биологическая очистка на условном примере

2.1 Исходные данные и методика расчёта

Во второй главе показано, как теоретические положения первой главы превращаются в инженерные цифры. Расчёт выполнен для условного населённого пункта, все исходные данные — условные данные для примера. Они подобраны в диапазонах, характерных для бытовых сточных вод по учебной литературе [15; 19], и не описывают реальную станцию. Методика расчёта упрощена: используются балансовые соотношения по органике, азоту и кислороду без динамического моделирования. Для проектирования реального сооружения применяются СП 32.13330.2018 и математические модели активного ила [5; 15].

Задача расчёта: определить объём аэротенка со схемой предвключённой денитрификации, возраст ила, требуемую кратность внутреннего рецикла и суточную потребность в кислороде, а затем оценить эффективность удаления органики и азота.

Таблица 4 – Исходные данные для расчёта (условные данные для примера)

Параметр	Обозначение	Значение	Единица
Среднесуточный расход сточных вод	Q	10 000	м³/сут
БПК5 после первичных отстойников	L0	200	мг/л
БПК5 очищенной воды (цель)	Le	10	мг/л
Азот по Кьельдалю после первичных отстойников	TKN	40	мг/л
Аммонийный азот в очищенной воде (цель)	N-NH4,e	1,5	мг/л
Нитратный азот в очищенной воде (цель)	N-NO3,e	8	мг/л
Расчётная температура зимой	T	12	°C
Концентрация ила в аэротенке	X	3,0	кг/м³
Нагрузка на ил по БПК5	F/M	0,12	кг БПК5/(кг ила·сут)
Наблюдаемый прирост ила	Yнабл	0,8	кг/кг снятого БПК5
Доля азота, включаемого в прирост ила	iN	0,05	г N/г снятого БПК5
Кратность возвратного ила	R	1,0	–

Примечание: условные данные для примера; диапазоны значений приняты по [15; 19].

Расчёт ведётся в следующем порядке: органическая нагрузка и объём аэротенка, гидравлическое время пребывания, прирост ила и возраст ила, проверка возраста ила на условие нитрификации зимой, баланс азота и кратность внутреннего рецикла, потребность в кислороде, эффективность очистки.



Рисунок 2 – Порядок технологического расчёта аэротенка

Источник: составлено автором по [15; 19].

Основные расчётные формулы приведены ниже. Объём аэротенка определяется из нагрузки на ил:

$$V = \frac{Q \cdot L_0}{X \cdot (F/M)} \quad (3)$$

где V — объём аэротенка, м³; Q — расход, м³/сут; L0 — БПК5 поступающей воды, кг/м³; X — концентрация ила, кг/м³; F/M — нагрузка на ил, кг БПК5/(кг ила·сут).

Минимальный возраст ила, при котором нитрификаторы не вымываются из системы, находится из уравнения Моно при насыщающей концентрации аммония с учётом отмирания биомассы:

$$\theta_{min} = \frac{1}{\mu_{max,A} - b_A} \tag{4}$$

где θmin — минимальный аэробный возраст ила, сут; μmax,A — максимальная удельная скорость роста нитрификаторов при расчётной температуре, сут⁻¹; bA — удельная скорость их отмирания, сут⁻¹.

Для схемы с предвключённой денитрификацией при полной денитрификации в аноксидной зоне концентрация нитратов на выходе определяется суммарной кратностью рециклов, поскольку нитраты возвращаются в аноксидную зону только с возвратным илом и внутренним рециклом:

$$N_{NO_3,e} = \frac{N_{нитр}}{1 + R + r} \tag{5}$$

где NNO3,e — нитратный азот на выходе, мг/л; Nнитр — количество нитрифицированного азота, мг/л; R — кратность возвратного ила; r — кратность внутреннего рецикла.

Потребность в кислороде складывается из расхода на окисление органики и на нитрификацию за вычетом кислородного эквивалента денитрификации. Стехиометрические коэффициенты 4,57 г O2/г N и 2,86 г O2/г N приняты по [15; 19]:

$$OR = a_O \cdot \Delta L + 4{,}57 \cdot N_{нитр} - 2{,}86 \cdot N_{ден} \tag{6}$$

где OR — потребность в кислороде, кг/сут; aO — удельный расход кислорода на снятую органику, кг O2/кг БПК5 (в примере условно 1,0); ΔL — снятый БПК5, кг/сут; Nнитр и Nден — нитрифицированный и денитрифицированный азот, кг/сут.

Эффективность очистки по каждому показателю определяется как доля снятого загрязнения:

$$E = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \cdot 100\,\% \tag{7}$$

где C0 и Ce — концентрации загрязнения до и после очистки, мг/л.

2.2 Расчёт аэротенка с нитри-денитрификацией

Органическая нагрузка на аэротенк составляет Q · L0 = 10 000 м³/сут · 0,200 кг/м³ = 2 000 кг БПК5 в сутки. По формуле (3) объём аэротенка V = 2 000 / (3,0 · 0,12) ≈ 5 556 м³. Гидравлическое время пребывания t = V / Q = 5 556 / 10 000 = 0,556 сут, или около 13,3 ч. Для аэротенков с удалением азота такое время пребывания обычно: продлённая аэрация нужна именно для того, чтобы удержать в системе нитрификаторы [19].

Снятый БПК5 составляет 10 000 · (0,200 − 0,010) = 1 900 кг/сут. При наблюдаемом приросте 0,8 кг на 1 кг снятого БПК5 образуется 0,8 · 1 900 = 1 520 кг избыточного ила в сутки. Масса ила в аэротенке V · X = 5 556 · 3,0 ≈ 16 667 кг, отсюда общий возраст ила по формуле (2) в упрощённом виде (без учёта выноса взвеси с очищенной водой) θX = 16 667 / 1 520 ≈ 11,0 сут.

Теперь нужно проверить, хватит ли этого возраста для нитрификации зимой. Примем для примера, что при 20 °C максимальная удельная скорость роста нитрификаторов равна 0,75 сут⁻¹, а скорость отмирания — 0,08 сут⁻¹, и пересчитаем их на 12 °C по температурной зависимости, приведённой ниже в формуле (8). Получим 0,35 и 0,058 сут⁻¹ (условные значения, порядок величин соответствует [15]). Тогда по формуле (4) θmin = 1 / (0,35 − 0,058) ≈ 3,4 сут, а с коэффициентом запаса 2 требуемый аэробный возраст ила составляет около 6,9 сут. Если аноксидная зона занимает 35 % объёма аэротенка, аэробный возраст ила будет 11,0 · 0,65 ≈ 7,1 сут, то есть чуть больше требуемого. Нитрификация зимой обеспечена, но запас минимальный. Летом, при 20 °C, θmin ≈ 1,5 сут, и запас становится многократным.

Таблица 5 – Результаты расчёта объёма и возраста ила (условные данные для примера)

Показатель	Расчёт	Результат
Нагрузка по БПК5, кг/сут	10 000 · 0,200	2 000
Объём аэротенка, м³	2 000 / (3,0 · 0,12)	5 556
Время пребывания, ч	5 556 / 10 000 · 24	13,3
Снятый БПК5, кг/сут	10 000 · (0,200 − 0,010)	1 900
Прирост избыточного ила, кг/сут	0,8 · 1 900	1 520
Общий возраст ила, сут	16 667 / 1 520	11,0
Аэробный возраст ила при доле аноксидной зоны 35 %, сут	11,0 · 0,65	7,1
Требуемый аэробный возраст ила зимой, сут	2 / (0,35 − 0,058)	6,9

Примечание: условные данные для примера; расчёт упрощённый.

Баланс азота

Часть азота уходит из воды с приростом ила. При доле 0,05 г N на 1 г снятого БПК5 в биомассу включается 0,05 · 190 = 9,5 мг/л азота. Нитрифицировать нужно Nнитр = 40 − 1,5 − 9,5 = 29 мг/л, или 290 кг/сут. Чтобы на выходе осталось не более 8 мг/л нитратного азота, по формуле (5) суммарная кратность рециклов должна быть 1 + R + r = 29 / 8 = 3,63. При кратности возвратного ила R = 1,0 кратность внутреннего рецикла r = 3,63 − 1 − 1,0 ≈ 1,6. Денитрифицировать нужно 29 − 8 = 21 мг/л, или 210 кг/сут.

Хватит ли для этого органики? На восстановление 1 г нитратного азота денитрификаторы расходуют несколько граммов биоразлагаемой органики; если принять для примера 5 г ХПК на 1 г N (порядок величины по [15]), на 210 кг азота нужно около 1 050 кг ХПК в сутки. При отношении БПК5/ХПК около 0,5 с водой поступает порядка 4 000 кг ХПК в сутки, из них биоразлагаемой органики заведомо больше требуемого, поэтому в нашем примере дополнительный источник углерода не нужен. Если бы отношение БПК5 к азоту было низким (например, после глубокой первичной очистки), пришлось бы добавлять внешний субстрат или переходить к процессам, не требующим органики, вроде анаммокса.

Потребность в кислороде

По формуле (6) при условном удельном расходе 1,0 кг O2 на 1 кг снятого БПК5 потребность в кислороде на окисление органики составит 1 900 кг/сут, на нитрификацию 4,57 · 290 ≈ 1 325 кг/сут, а кислородный эквивалент денитрификации 2,86 · 210 ≈ 601 кг/сут. Итого OR ≈ 1 900 + 1 325 − 601 = 2 624 кг O2 в сутки, или около 109 кг/ч. Денитрификация в схеме с предвключённой аноксидной зоной снижает потребность в кислороде примерно на 19 % по сравнению с вариантом без неё, где кислорода понадобилось бы 1 900 + 1 325 = 3 225 кг/сут.

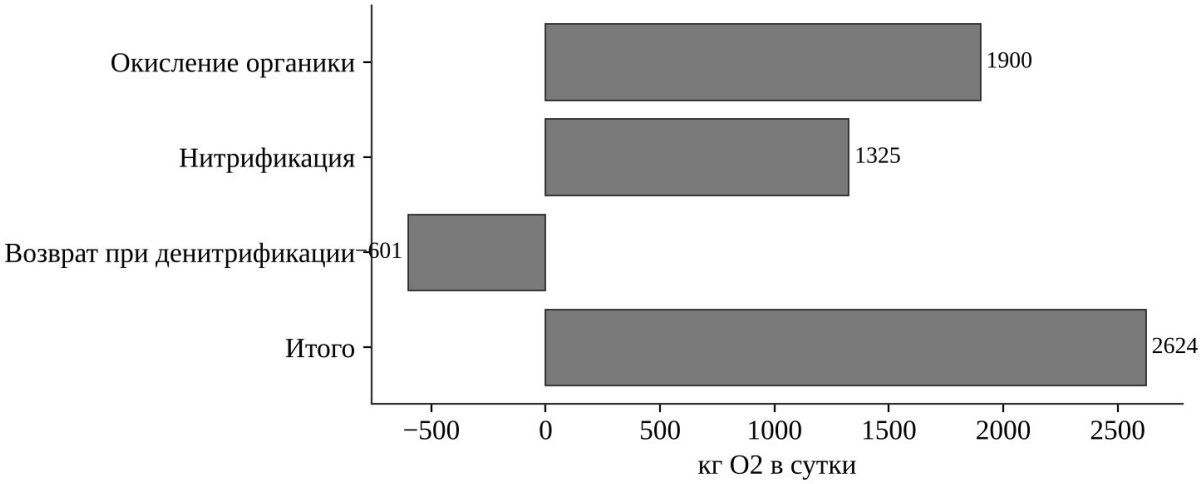


Рисунок 3 – Составляющие суточной потребности в кислороде (условные данные)

Источник: расчёт автора по формуле (6), условные данные для примера.

Эффективность очистки по формуле (7): по БПК5 E = (200 − 10) / 200 · 100 % = 95 %; по общему азоту при остаточных 1,5 мг/л аммонийного и 8 мг/л нитратного азота (без учёта органического азота в очищенной воде) E = (40 − 9,5) / 40 · 100 % ≈ 76 %. Для сравнения, аэротенк без аноксидной зоны с тем же объёмом окислил бы аммоний, но весь нитрифицированный азот ушёл бы с очищенной водой в виде нитратов, и удаление общего азота ограничилось бы азотом прироста ила, около четверти.

Таблица 6 – Баланс азота и кислорода (условные данные для примера)

Показатель	Расчёт	Результат
Азот в прирост ила, мг/л	0,05 · 190	9,5
Нитрифицированный азот, кг/сут	(40 − 1,5 − 9,5) · 10	290
Суммарная кратность рециклов	29 / 8	3,63
Кратность внутреннего рецикла	3,63 − 1 − 1,0	1,6
Денитрифицированный азот, кг/сут	(29 − 8) · 10	210
Потребность в кислороде, кг/сут	1 900 + 1 325 − 601	2 624
Эффективность по БПК5, %	(200 − 10) / 200 · 100	95
Эффективность по общему азоту, %	(40 − 9,5) / 40 · 100	76

Примечание: условные данные для примера; органический азот очищенной воды не учтён.

Расчёт показывает характерную особенность биологического удаления азота: объём сооружения определяется не столько окислением органики, сколько медленным ростом нитрификаторов при низкой температуре. Чтобы показать это количественно, выполним расчёт чувствительности к температуре.

Чувствительность расчёта к температуре

Скорость роста нитрификаторов сильно зависит от температуры. В инженерных расчётах эту зависимость обычно описывают экспоненциальной поправкой к значению при 20 °C [15; 19]:

$$\mu_{max}(T) = \mu_{max,20} \cdot \theta_T^{T-20} \quad (8)$$

где μmax,20 — максимальная удельная скорость роста при 20 °C, сут⁻¹; θT — температурный коэффициент (в примере условно 1,10 для скорости роста и 1,04 для скорости отмирания); T — температура, °C.

Для каждой температуры найдём минимальный аэробный возраст ила по формуле (4), умножим его на коэффициент запаса 2, пересчитаем на общий возраст ила при доле аноксидной зоны 35 % и определим объём аэротенка, необходимый для удержания такой массы ила при приросте 1 520

кг/сут и концентрации 3,0 кг/м³. Прирост ила в этом упрощённом расчёте принят постоянным, хотя в действительности с увеличением возраста ила он несколько снижается.

Таблица 7 – Влияние температуры на требуемый возраст ила и объём аэротенка (условные данные для примера)

T, °C	μmax,A, сут⁻¹	bA, сут⁻¹	θmin, сут	θаэр, сут	θобщ, сут	V, м³	t, ч
8	0,239	0,050	5,3	10,6	16,3	8 248	19,8
10	0,289	0,054	4,3	8,5	13,1	6 631	15,9
12	0,350	0,058	3,4	6,9	10,6	5 349	12,8
15	0,466	0,066	2,5	5,0	7,7	3 898	9,4
20	0,750	0,080	1,5	3,0	4,6	2 327	5,6

Примечание: условные данные для примера; θаэр — требуемый аэробный возраст ила с коэффициентом запаса 2, θобщ — общий возраст ила при доле аноксидной зоны 35 %, V — требуемый объём аэротенка, t — время пребывания. Температурные коэффициенты и кинетические константы приняты условно.

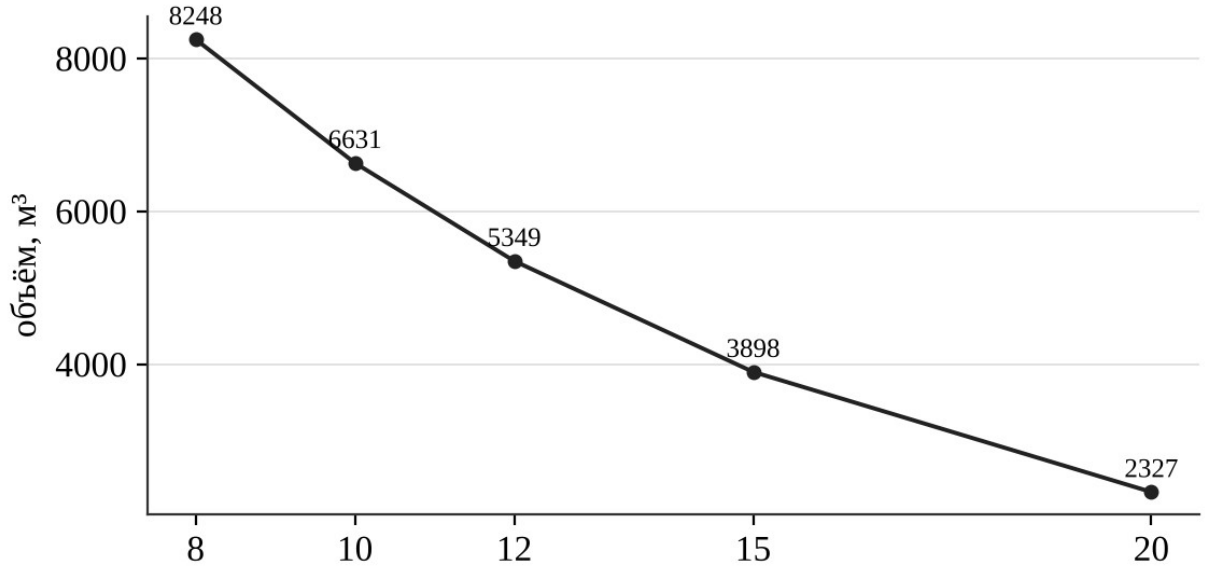


Рисунок 4 – Требуемый объём аэротенка в зависимости от расчётной температуры (условные данные)

Источник: таблица 7, расчёт автора по формулам (4) и (8), условные данные для примера.

Принятый объём 5 556 м³ покрывает потребность при 12 °C (5 349 м³), но если зимняя температура сточной воды опускается до 10 °C, нужен уже 6 631 м³, а при 8 °C — около 8 250 м³, в полтора раза больше. Это главная причина, по которой станции в регионах с холодной зимой проектируют с большим запасом объёма, а реконструкция старых аэротенков под удаление

азота часто требует либо дополнительных ёмкостей, либо технологий с удержанием биомассы: подвижной загрузки или мембран [17; 19]. Понятно и обратное: в южных регионах тот же результат достижим в заметно меньшем объёме.

2.3 Сравнительная оценка методов и рекомендации по выбору

Расчётный пример относится к одному варианту — аэротенку с предвключённой денитрификацией. Для выбора технологии на практике сравнивают несколько вариантов по набору критериев. Ниже приведена качественная оценка основных биотехнологий по данным литературы. Баллы от 1 до 5 — экспертная оценка автора по описаниям технологий в [10; 15; 17; 19], они не являются результатом измерений и служат учебным примером многокритериального сравнения.

Таблица 8 – Сравнительная оценка технологий биологической очистки (баллы 1–5, экспертная оценка автора)

Критерий	Аэротенк с Н-ДН	Био-фильтр	МБР	Гранулы	Био-плато
Удаление органики	5	4	5	5	3
Удаление азота	4	3	5	4	2
Компактность	3	3	5	5	1
Энергозатраты (5 — низкие)	3	4	2	4	5
Простота эксплуатации	3	5	2	3	5
Работа зимой	4	3	4	4	2
Сумма баллов	22	22	23	25	18

Примечание: условная экспертная оценка для учебного примера; Н-ДН — нитри-денитрификация, МБР — мембранный биореактор. При реальном выборе критерии взвешиваются по местным условиям.

Простая сумма баллов почти уравнивает варианты, и это закономерно: у каждой технологии сильные стороны уравновешены слабыми. Поэтому критериям придают веса. Для крупного города с дорогой землёй и строгими требованиями по азоту вес компактности и качества воды высок, и на первый план выходят аэротенки с нитри-денитрификацией, мембранные биореакторы и гранулированный ил. Для посёлка на несколько сотен

жителей решающими становятся простота эксплуатации и энергозатраты, и разумнее выбрать биофильтр или биоплато, если позволяет площадь.

Отдельно стоит сказать об энергии. В аэробных технологиях основная статья энергопотребления — подача воздуха, поэтому любые решения, снижающие потребность в кислороде, сразу отражаются на эксплуатационных затратах [19]. В расчётном примере предвключённая денитрификация сократила потребность в кислороде на 601 кг/сут. Ещё больший эффект дают анаммокс, которому вообще не нужна органика и нужно меньше кислорода, и анаэробные процессы, производящие биогаз вместо того, чтобы расходовать энергию [18; 21]. Поэтому в современной литературе очистные сооружения всё чаще рассматривают не только как потребителей энергии, но и как установки по извлечению ресурсов: энергии, фосфора, воды для повторного использования [15; 19].

Рекомендации

На основе анализа можно сформулировать несколько общих рекомендаций по выбору биотехнологического метода.

– Выбор начинается с требований к качеству очищенной воды: если нормируются азот и фосфор, классический аэротенк без зонирования не подходит, и нужно сразу закладывать аноксидные и анаэробные зоны [7; 19].

– Расчётная температура зимнего периода определяет возраст ила и объём сооружения; экономия объёма за счёт летних параметров приводит к срыву нитрификации зимой [15].

– При реконструкции действующих аэротенков без возможности строить новые ёмкости имеет смысл рассматривать подвижную загрузку, мембраны или переход на гранулированный ил, которые увеличивают количество удерживаемой биомассы [14; 17].

– Для концентрированных стоков пищевых производств выгодно анаэробное предварительное окисление в UASB-реакторах с получением биогаза и последующей аэробной доочисткой [18].

– Для потоков с высоким содержанием аммония и малым содержанием органики, прежде всего иловой воды после сбраживания осадка, рационально отдельное удаление азота процессом анаммокс [21; 24].

– Для малых населённых пунктов предпочтительны технологии с минимальным обслуживанием: биофильтры, компактные установки заводского изготовления, биоплато [10].

Важное ограничение работы — упрощённый характер расчёта. В реальном проекте учитываются суточная неравномерность притока, фракционный состав органики, кинетика денитрификации, щёлочность, эффективность аэрационной системы, работа вторичных отстойников и обработка осадка. Эти задачи решаются по СП 32.13330.2018 и с помощью математических моделей активного ила [5; 15]. Тем не менее даже упрощённый расчёт показывает, какие параметры определяют размеры сооружения, и позволяет сравнивать варианты на ранней стадии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Городские сточные воды содержат органические вещества, взвесь, соединения азота и фосфора; их загрязнённость оценивают по БПК5, ХПК, азоту по Кьельдалю, аммонию и общему фосфору. Требования к очищенной воде задаются нормативами сброса и технологическими показателями НДТ, для очистных сооружений поселений — по ИТС 10-2019.

Биологическая очистка основана на деятельности нескольких групп микроорганизмов: гетеротрофов, окисляющих органику; медленно растущих автотрофных нитрификаторов; денитрификаторов, восстанавливающих нитраты в аноксидных условиях; фосфатаккумулирующих организмов; анаэробных сообществ и анаммокс-бактерий. Кинетика их роста описывается уравнением Моно, а ключевым технологическим параметром служит возраст ила.

Основные технологии — зонированные аэротенки, биофильтры и реакторы с подвижной загрузкой, реакторы периодического действия и гранулированный ил, мембранные биореакторы, UASB-реакторы, анаммокс и естественные методы; у каждой своя область применения.

Упрощённый расчёт аэротенка с предвключённой денитрификацией для условного населённого пункта с расходом 10 000 м³/сут дал объём около 5 560 м³ при времени пребывания 13,3 ч, общий возраст ила 11 суток, кратность внутреннего рецикла около 1,6 и потребность в кислороде около 2 620 кг/сут; эффективность по БПК5 — 95 %, по общему азоту — около 76 %. Расчёт чувствительности показал, что снижение расчётной температуры с 12 до 8 °C требует увеличить объём примерно в полтора раза. Все цифры относятся к условным исходным данным.

Универсального метода нет: выбор определяется требованиями к качеству воды, климатом, площадью, энергозатратами и возможностями эксплуатации. Предложенные рекомендации подходят для предварительного выбора технологии, а для проекта нужен детальный расчёт по своду правил и математическое моделирование.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Об охране окружающей среды : Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ. – Текст : электронный // КонсультантПлюс : справочная правовая система.

2. О водоснабжении и водоотведении : Федеральный закон от 7 декабря 2011 г. № 416-ФЗ. – Текст : электронный // КонсультантПлюс : справочная правовая система.

3. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2 : зарегистрировано в Минюсте России 29 января 2021 г. № 62296. – Текст : электронный // КонсультантПлюс : справочная правовая система.

4. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Федерального агентства по рыболовству от 26 мая 2025 г. № 296 : зарегистрирован в Минюсте России 2 июня 2025 г. № 82497. – URL: https://pravo.ppt.ru/prikaz/rosrybolovstvo/n-296-314391 (дата обращения: 22.10.2026). – Текст : электронный.

5. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85 : свод правил : утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 25 декабря 2018 г. № 860/пр. – URL: https://pravo.ppt.ru/prikaz/minstroy/n-860-pr-216244 (дата обращения: 22.10.2026). – Текст : электронный.

6. ГОСТ 31859-2012. Вода. Метод определения химического потребления кислорода : межгосударственный стандарт : введён в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 ноября 2012 г. № 1618-ст : дата введения 2014-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2013. – Текст : непосредственный.

7. ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям : утверждён приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2019 г. № 2981. – Москва : Бюро НДТ, 2019. – Текст : электронный.

8. Алексеев, Е. В. Физико-химическая очистка сточных вод : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Водоснабжение и водоотведение» / Е. В. Алексеев. – Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007. – 247 с. – ISBN 978-5-93093-511-0.

9. Ветошкин, А. Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / А. Г. Ветошкин. – Москва : Высшая школа, 2008. – 638, [1] с. – (Для высших учебных заведений. Охрана окружающей среды). – ISBN 978-5-06-005762-1.

10. Воронов, Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод : учебник для вузов / Ю. В. Воронов, С. В. Яковлев. – Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 704 с.

11. Жмур, Н. С. Методическое руководство по гидробиологическому и бактериологическому контролю процесса биологической очистки на сооружениях с аэротенками : ПНД Ф СБ 14.1.77-96 / Н. С. Жмур. – Москва : АКВАРОС, 2009. – 73 с., [30] л. ил. – (Методика выполнения гидробиологического анализа). – ISBN 978-5-901652-12-1.

12. Жмур, Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – Москва : АКВАРОС, 2003. – 507 с. – ISBN 5-901652-05-3.

13. Ardern, E. Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters / E. Ardern, W. T. Lockett // Journal of the Society of Chemical Industry. – 1914. – Vol. 33, № 10. – P. 523–539. – DOI 10.1002/jctb.5000331005.

14. de Kreuk, M. K. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge / M. K. de Kreuk, J. J. Heijnen, M. C. M. van Loosdrecht // Biotechnology and Bioengineering. – 2005. – Vol. 90, № 6. – P. 761–769. – DOI 10.1002/bit.20470.

15. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design / M. Henze, M. C. M. van Loosdrecht, G. A. Ekama, D. Brdjanovic. – London : IWA Publishing, 2008. – DOI 10.2166/9781780401867.

16. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 / M. Henze, W. Gujer, T. Mino, M. van Loosdrecht. – London : IWA Publishing, 2015. – (Water Intelligence Online ; vol. 5). – DOI 10.2166/9781780402369.

17. Judd, S. The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment / S. Judd. – 2nd ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2011. – 536 p. – ISBN 978-0-08-096682-3.

18. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment / G. Lettinga, A. F. M. van Velsen, S. W. Hobma [et al.] // Biotechnology and Bioengineering. – 1980. – Vol. 22, № 4. – P. 699–734. – DOI 10.1002/bit.260220402.

19. Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery / G. Tchobanoglous, H. D. Stensel, R. Tsuchihashi, F. Burton. – 5th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2014. – XXIX, 2018 p. – ISBN 978-0-07-340118-8.

20. Monod, J. The growth of bacterial cultures / J. Monod // Annual Review of Microbiology. – 1949. – Vol. 3. – P. 371–394. – DOI 10.1146/annurev.mi.03.100149.002103.

21. Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor / A. Mulder, A. A. van de Graaf, L. A. Robertson, J. G. Kuenen // FEMS Microbiology Ecology. – 1995. – Vol. 16, № 3. – P. 177–184. – DOI 10.1111/j.1574-6941.1995.tb00281.x.

22. Ødegaard, H. Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process / H. Ødegaard // Water Science and Technology. – 2006. – Vol. 53, № 9. – P. 17–33. – DOI 10.2166/wst.2006.284.

23. Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment / M. Pronk, M. K. de Kreuk, B. de Bruin [et al.] // Water Research. – 2015. – Vol. 84. – P. 207–217. – DOI 10.1016/j.watres.2015.07.011.

24. Missing lithotroph identified as new planctomycete / M. Strous, J. A. Fuerst, E. H. M. Kramer [et al.] // Nature. – 1999. – Vol. 400. – P. 446–449. – DOI 10.1038/22749.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Таблица 9 – Глоссарий терминов

Термин	Определение
Активный ил	Хлопьевидное сообщество бактерий, простейших и многоклеточных организмов, взвешенное в иловой смеси аэротенка
Биоплёнка	Слой микроорганизмов, прикреплённых к поверхности загрузки биофильтра или носителя
БПК5	Количество кислорода, израсходованного микроорганизмами на окисление органики пробы за 5 суток при 20 °C
ХПК	Количество кислорода, эквивалентное расходу окислителя на окисление всех окисляемых веществ пробы
Нагрузка на ил (F/M)	Масса органики (по БПК5), поступающая за сутки на единицу массы ила
Возраст ила	Среднее время пребывания микроорганизмов в системе, сут
Аноксидные условия	Отсутствие растворённого кислорода при наличии нитратов или нитритов
Внутренний рецикл	Возврат иловой смеси с нитратами из аэробной зоны в аноксидную
Нитрификация	Окисление аммония до нитрита и нитрата автотрофными бактериями
Денитрификация	Восстановление нитратов до молекулярного азота гетеротрофными бактериями
Анаммокс	Анаэробное окисление аммония нитритом до молекулярного азота
Наилучшая доступная технология (НДТ)	Технология, определяемая на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев охраны окружающей среды при условии её технической возможности применения

Источник: составлено автором по [1; 12; 15; 19].