

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ
СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ
СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК

Пенза 2013

УДК 628.11:556.5 (075.8)

ББК 38.761.2:26.22я73

С56

Монография разработана в рамках проекта «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства – региональный центр повышения качества подготовки высококвалифицированных кадров для строительной отрасли», выполненного по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации (конкурс «Кадры для регионов»)

Рецензенты: технический директор ООО «СТЭН»
А.П. Поликашин;
доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы» ФГБОУ ВПО «Пензенский ГУАС» В.Г. Камбург

Авторы: Б.М. Гришин,
С.Ю. Андреев,
М.В. Бикунова,
Е.А. Титов,
А.С. Кочергин

Совершенствование работы сооружений биологической
С56 очистки сточных вод с использованием электрогидродинамических установок: моногр./ Б.М. Гришин [и др.]. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 128 с.
ISBN 978-5-9282-0950-6

Приведён обзор основных направлений интенсификации работы аэротенков физико-химическими методами. Дано обоснование выбора предлагаемых технологических решений по предварительной обработке возвратного ила аэротенков. Рассмотрены результаты лабораторных и экспериментальных исследований электрогидродинамического устройства (ЭГДУ) при обработке возвратного ила аэротенков.

Производственные испытания ЭГДУ различных конструкций были проведены на канализационных очистных сооружениях (КОС) в г. Заречном, Пензенской области, производительностью 30 тыс. м³ в сутки.

Книга подготовлена на кафедре «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» и предназначена для ученых, инженерно-технических работников, аспирантов, магистрантов и студентов, специализирующихся в области совершенствования работы сооружений биологической очистки сточных вод с использованием электрогидродинамических установок, а также интересующихся вопросами использования возвратного ила в процессе биологической очистки сточных вод.

ISBN 978-5-9282-0950-6

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2013

ПРЕДИСЛОВИЕ

Решение проблемы охраны и рационального использования водных ресурсов неразрывно связано с проведением комплекса мероприятий по предотвращению загрязнений поверхностных и подземных вод источников бытовыми и производственными сточными водами. При этом весьма важное значение имеет совершенствование очистных сооружений канализационных систем, в составе которых основная роль по стоимости и значению отведена сооружениям биологической очистки. Снижение эксплуатационных и капитальных затрат при одновременном улучшении качества очистки именно по этим сооружениям даёт высокий эколого-экономический эффект.

Важным направлением научно-технического прогресса является интенсификация биологической очистки бытовых и промышленных сточных вод в аэротенках с использованием различных физико-химических методов, а также за счет усовершенствования конструкций самих аэрационных сооружений и вспомогательного оборудования. Большое значение при этом имеет снижение общих энергозатрат на очистку сточных вод в аэротенках. Целью работы является разработка и исследование энергосберегающей технологии активации возвратного ила аэротенков с использованием новых эффективных конструкций вихревых электрогидродинамических установок для интенсификации процессов биологической очистки сточных вод в аэротенках.

Монография состоит из пяти разделов.

В первом разделе приведен аналитический обзор методов интенсификации работы аэротенков. Обоснована целесообразность нахождения новых конструктивных решений и технологических режимов работы электрогидродинамических установок (ЭГДУ), обеспечивающих увеличение степени электроактивации возвратного ила и насыщения его кислородом воздуха по сравнению с ранее разработанными промышленными аппаратами.

Второй раздел посвящен теоретическому обоснованию предложенной конструкции ЭГДУ для активации возвратного ила аэротенков.

В третьем разделе представлены данные лабораторных исследований процессов биологической очистки сточных вод в контрольном и опытных аэротенках. Экспериментально найдены оптимальные режимы обработки возвратного ила в ЭГДУ по числам Кэмпбелла и удельному расходу электричества на активацию иловой смеси.

В четвертом разделе на основе экспериментального материала показано, что предварительная обработка активного ила в ЭГДУ позволяет осуществлять биологическую очистку сточных вод в аэротенке с повышенными (до 3,5 г/л) дозами ила, сохраняя стабильные значения илового индекса (менее 150 мл/г) при вторичном отстаивании иловой смеси.

В пятом разделе даны результаты промышленных испытаний технологии обработки возвратного ила в аэротенках с использованием однопоточных ЭГДУ новой конструкции, которые подтвердили высокую эффективность предложенных авторами научно-технических решений.

Авторы выражают признательность рецензентам – техническому директору ООО «СТЭН» А.П. Поликашину и д.т.н., профессору кафедры «Информационно-вычислительные системы» Пензенского ГУАС В.Г. Камбуогу за высказанные замечания и пожелания по рукописи монографии.

Отзывы и пожелания направлять на кафедру ВВГ ПГУАС: 440028, г. Пенза, ул. Г.Титова, 28.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений научных исследований по проблемам энергосбережения является использование избыточной энергии потока возвратного активного ила, который перекачивается из вторичного отстойника в аэротенк с помощью рециркуляционных насосов. На существующих станциях биологической очистки стоков поток возвратного активного ила, как правило, подается центробежными насосами в иловую камеру для гашения избыточного напора, а затем с помощью самотечных трубопроводов и лотков распределяется по секциям блока аэротенков. Энергия потока возвратного ила в большинстве случаев достаточна для обеспечения его интенсивного смешения с воздухом в гидродинамических установках различных конструкций, что приводит к весьма значительному увеличению его биохимической активности. Дополнительная обработка возвратного ила физическими методами (в частности электрическим током) позволяет ещё более интенсифицировать обменные процессы в его клетках и в конечном счете улучшить качество очистки сточных вод в аэротенке. Наибольший эффект использования избыточной энергии потока возвратного активного ила может быть достигнут при применении вихревых электрогидродинамических установок (ЭГДУ), способных создать оптимальные условия для смешения потоков иловой суспензии и воздуха в компактном объеме за счет использования центробежной силы. Существующие в настоящее время конструкции ЭГДУ, снабженные струйными эжекторами для подачи воздуха, имеют ряд недостатков. В частности, для нормальной работы таких установок требуется значительный напор рециркуляционных насосов возвратного ила. Таким образом, разработка энергосберегающих технологий и установок для активации возвратного ила аэротенков является актуальной задачей, связанной с интенсификацией биохимической очистки сточных вод в аэротенках.

Монография посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям, направленным на интенсификацию процессов биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод за счёт усовершенствования конструкций аэрационных сооружений.

Предложен новый способ активации возвратного ила аэротенка в однопоточном электрогидродинамическом устройстве (ЭГДУ), конструкция которого позволяет наиболее полно использовать энергию рециркуляционного илового насоса для создания в корпусе ЭГДУ режима высокотурбулентного перемешивания иловой жидкости с воздухом, поступающим из штатной системы аэрации, в сочетании с эффективной электрообработкой возвратного ила за счет использования центрального стержневого катода.

Технология обработки возвратного активного ила с применением однопоточных ЭГДУ внедрена на КОС (г. Заречный, Пензенской области) производительностью 30 тыс. м³/сут.

Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил более 340 тыс. руб. (в ценах 2012 г.).

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАБОТЫ АЭРОТЕНКОВ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

1.1. Состав и свойства активного ила

С биологической точки зрения активный ил представляет собой скопление бактерий, в нем присутствуют актиномицеты, водные грибы и дрожжи. Наиболее многочисленной группой являются бактерии. В определенных условиях возможно интенсивное развитие грибов. Кроме микробов в воде аэротенков присутствуют простейшие и другие более высокоорганизованные представители фауны (коловратки, черви, личинки насекомых, водные клещи).

По внешнему виду активный ил выглядит в виде мелких хлопьев с цветом от белесо-коричневого до темно-коричневого и даже черного. Хлопья состоят из большого числа многослойно расположенных бактериальных клеток, заключенных в слизь. Подобные бактериальные скопления получили название зооглей.

Механизм образования хлопьев активного ила до настоящего времени еще окончательно не ясен. Предполагается, что хлопьевидные агрегаты бактериальных клеток образуются в основном в результате взаимодействия полимеров, выделяемых бактериальными клетками или адсорбированных ими. Вещество, которое заполняет межклеточное пространство, выделяется из хорошо флокулирующего активного ила, подобно синтетическим полиэлектролитам (полиакриламиду, полиглутаминовой кислоте и т.п.) [32].

С физико-химической точки зрения активный ил представляет собой амфотерный коллоид, имеющий в интервале значений $pH=4\div 9$ отрицательный заряд.

Исследования показывают, что активный ил обладает значительной поверхностью, величина которой достигает 100 м^2 на 1 г сухого вещества. Благодаря такой поверхности активный ил имеет большую адсорбционную способность. Ему присуща также способность связывать значительные количества воды. Способность активного ила связывать воду зависит от его концентрации в смеси: с повышением концентрации она увеличивается, с понижением – уменьшается. Склонность активного ила к образованию хлопья увеличивается с повышением величины pH . Этим, по-видимому, и объясняется лучшая осаждаемость активного ила при щелочной реакции по сравнению с кислой.

Микроорганизмы ила аэротенков для своего роста и развития в процессе биологической очистки сточных вод получают все необходи-

мые элементы: основные органогены – С, Н, О, N, зольные элементы и микроэлементы. По отношению к источнику углерода все микроорганизмы делятся на гетеротрофы, автотрофы и промежуточные гетеротрофы. Гетеротрофы усваивают углерод из готовых органических соединений, автотрофы ассимилируют CO_2 из воздуха и карбонатов, а промежуточные гетеротрофы обладают способностью использовать оба механизма усвоения углерода.

Доступность органического углерода для бактерий связана со структурой органического вещества. В этом направлении выполнено много специальных исследований, которые показали, что доступность использования вещества определяется его молекулярной массой, длиной углеродной цепи, наличием и месторасположением функциональных групп, двойных связей, наличием ароматического кольца и т.п. [69].

Бактерии илов очистных сооружений в основном относятся к гетеротрофам.

Автотрофное усвоение углерода может происходить за счет солнечной энергии – фотосинтеза и энергии химических реакций – хемосинтеза. Фото-трофные микроорганизмы широко представлены в микрофлоре окислительных прудов. Примером хемоавтотрофов являются бактерии-нитрификаторы, присутствующие в больших количествах в аэротенках длительного аэрирования, аэротенках-нитрификаторах, окислительных каналах и прудах.

Количество бактерий в активных илах довольно велико и составляет от $1 \cdot 10^9$ до $4 \cdot 10^{10}$ на 1 г (в пересчете на сухое вещество).

В условиях обильного углеродного питания происходит увеличение объема слизистых клеточных оболочек, за счет этого уменьшается количество клеток в 1 г активного ила; в условиях ограниченного углеродного питания размеры капсул меньше и число клеток в 1 г активного ила увеличивается [32].

Сухое вещество активного ила представляет собой комплекс минеральных (10–30 %) и органических (70–90 %) веществ. Основную массу органических веществ составляют белки, содержание которых может достигать 70 %. Количество белковых веществ не постоянно. Оно зависит от возраста и вида культур микроорганизмов, образующих активный ил, а также от состава питательной среды. Кроме белков органическая часть активного ила содержит липиды (жиры и близкие к ним жироподобные вещества), углеводы и другие вещества. Процентное соотношение отдельных компонентов органической части ила, так же, как и его химический состав, не одинаково для различных сточных вод.

Самыми важными факторами формирования биоценозов илов очистных сооружений являются состав обрабатываемой воды и вели-

чина нагрузки на ил. Действие других факторов – температуры, перемешивания, концентрации растворенного кислорода – практически не изменяет качественного состава илов, но влияет на количественное соотношение различных групп микроорганизмов [15].

Бактериальное микронаселение илов обычно представлено *Pseudomonas*, *Bacterium*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Arthrobacter*, *Mycobacterium*, *Micrococcus*, *Actinomyces*, *Nocardia*, *Sarcina*, *Zooglearamigera* и др.

В активных илах при очистке сточных вод смешанного состава практически всегда развиваются простейшие и некоторые более сложные организмы – коловратки и др. Простейшие могут не развиваться в иле в том случае, если вода очищается селекционными илами или в условиях очень высоких нагрузок на ил. Простейшие представлены четырьмя классами: саркодовые (*Sarcodina*), жгутиковые (*Mastigophora*), ресничные (*Ciliata*) и сосущие (*Suctorina*) инфузории. Их отношение к бактериям описывается системой «жертва – хищник» в общей трофической цепочке «растворенные органические вещества – бактерии-сапрофиты – простейшие» [69].

Роль простейших весьма многопланова. Они питаются бактериями, поддерживая тем самым бактериальное равновесие в активном иле. Поедая наряду с молодыми старые клетки, простейшие обуславливают омоложение ила и развитие новых жизнеспособных клеток. Кроме того, высвобождается в воду дополнительное количество экзоферментов. Наряду с иловыми частицами простейшие усваивают и загрязнения, находящиеся во взвешенном состоянии в исходной воде, благодаря чему обеспечивается дополнительное осветление воды.

Установлено, что в илах хорошего качества на $1 \cdot 10^{16}$ бактериальных клеток приходится 10-16 видов простейших организмов, в илах среднего качества – 5-9 и в илах плохого качества – 1-4. Этот показатель состава ила называют коэффициентом протозойности.

Многочисленные наблюдения позволили установить взаимосвязь между состоянием окислительной системы, качеством очищенной воды и развитием в илах определенных групп простейших и коловраток (табл. 1.1).

Важнейшим свойством активного ила является его способность к оседанию, которая характеризуется иловым индексом. Хорошо оседающий ил имеет иловый индекс от 60-80 до 120-150 мг/л, в зависимости от технологического режима работы аэротенков и состава сточных вод. Увеличение илового индекса происходит по многим причинам: это и уменьшение концентрации растворенного кислорода, и избыточное

количество углеводов в исходной воде, недостаток азота и фосфора, резкие изменения нагрузок на ил, чрезмерная аэрация и др.

Т а б л и ц а 1 . 1

Степень развития индикаторных организмов при различной работе очистных сооружений

Характеристика работы биологического окислителя	Амебы	Бесцветные жгутиковые	Инфузории	Коловратки
Неудовлетворительная	Преобладают		Отсутствуют или присутствует очень малое число	
Удовлетворительная (нитрификация слабая)	Единичные экземпляры	Преобладают	Преобладают разноресничные	Преобладают
Хорошая (нитрификация хорошая)	Отсутствуют		Преобладают кругло- и брюхоресничные	Преобладают

При нормальных условиях аэрации значения илового индекса прежде всего зависят от нагрузки на активный ил по органическим веществам (рис. 1.1).

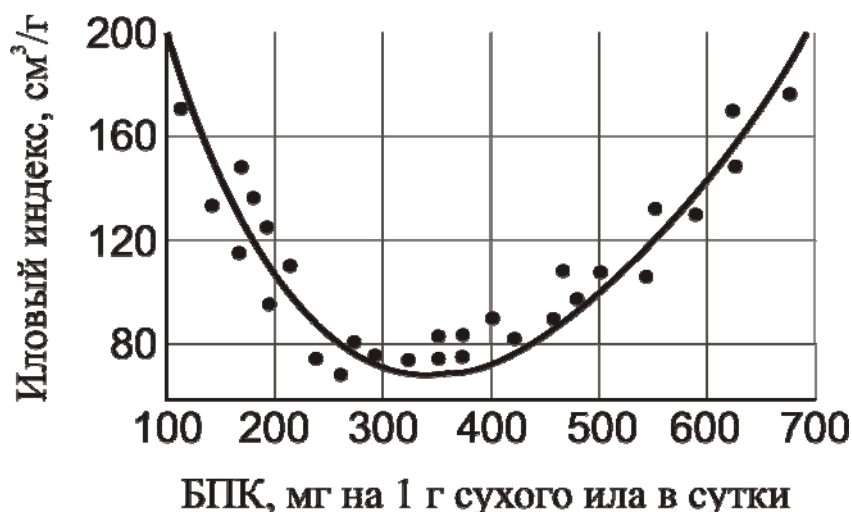


Рис. 1.1. Зависимость илового индекса от нагрузки на активный ил

Связь эффективности флокуляции со степенью обеспеченности углеродным питанием (величиной нагрузки на активный ил) отмечалась многими исследователями. Показано, например, что добавление свежего субстрата к флокулированным бактериям вызывает диспергирование хлопьев; к тому же результату приводит длительное отсутствие питания.

Таким образом, можно выделить три состояния биологических систем с точки зрения их склонности к флокуляции. В первом случае при избыточном количестве углеродного питания, что соответствует большому количеству свободной энергии и высокой подвижности клеток, интенсивность образования биополимерного полиэлектролита недостаточна для обеспечения флокуляции. Во втором, противоположно предельном, случае при остром лимитировании по субстрату равновесие в биоценозе сдвигается в сторону культур, способных метаболизировать биополимер, что приводит к редиспергации хлопьев. Таким образом, стационарное существование хлопьев активного ила реализуется в определенном диапазоне обеспеченности питанием. Третий случай характеризует состояние хорошо флокирующего активного ила.

Любое нарушение адаптационных условий в системе, приводящее к торможению процессов метаболизма, вызывает перестройку биоценоза в сторону развития форм с более низкой энергетической потребностью и более высокими скоростями роста, например, нитчатых бактерий, следствием чего может явиться ухудшение седиментационных свойств активного ила, которое носит название «вспухание ила». Вспухший ил, обладающий чрезвычайно развитой поверхностью, имеет очень высокую очистительную способность по сравнению с обычным илом. Отмечено также, что вспухший ил приобретает способность интенсивно использовать углерод из трудноокисляемых синтетических веществ, например, СПАВ.

Однако нормальная эксплуатация очистных сооружений со вспухшим илом невозможна из-за отсутствия удовлетворительных технических решений отделения вспухшего ила от воды; поэтому большие потенциальные возможности использования повышенной окислительной способности вспухшего ила теряются.

Борьба со вспуханием ила ведется по многим направлениям. Например, в ряде зарубежных стран применяются химические реагенты типа утяжелителей, которые изготавливаются на основе низкомолекулярных полимеров. Используются также сепараторы, в которых ил размельчается до отдельных фрагментов, что не устраняет причины вспухания, но позволяет вести удовлетворительную эксплуатацию сооружений. Необходимо также отметить, что при сепарации в условиях довольно интенсивного турбулентного перемешивания происходит обновление поверхностей бактериальных клеток активного ила и повышается его окислительная способность.

При исследованиях процесса биологической очистки промышленных сточных вод в аэротенках А.А. Бондаревым и Л.О. Никифоровой

была выявлена взаимосвязь между электрокинетическим потенциалом активного ила и иловым индексом [12]. Оптимальные значения илового индекса при очистке сточной воды соответствовали максимальным абсолютным значениям электрокинетического потенциала активного ила (рис. 1.2). Этим же значениям потенциала соответствовали максимальный эффект осветления воды при флотационном уплотнении избыточного ила (рис. 1.3), а также наибольшие величины удельной скорости окисления субстрата в аэротенке.

Таким образом, путем изменения величины электрокинетического потенциала, очевидно, можно добиться улучшения седиментационных свойств активного ила и существенного ускорения процессов биохимической очистки сточных вод в аэротенках.

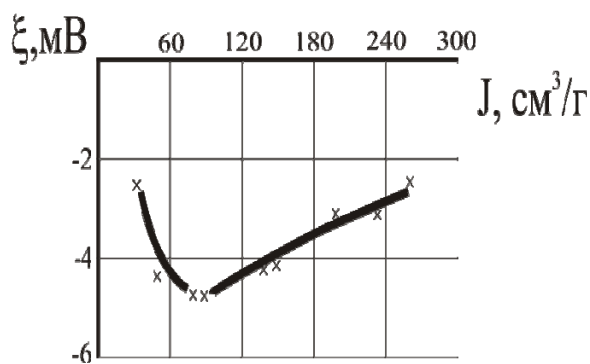


Рис. 1.2 Зависимость электрокинетического потенциала активного ила от величины илового индекса [12].

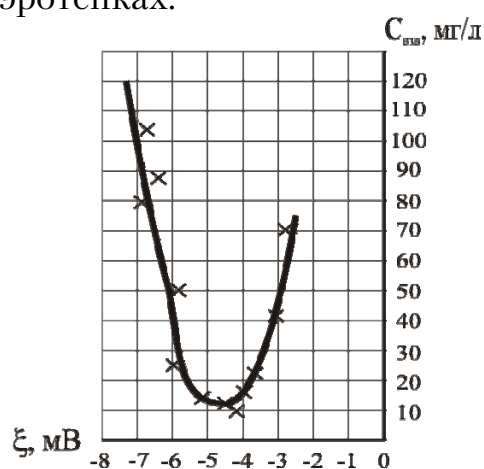


Рис. 1.3 Влияние величины потенциала иловой смеси на концентрацию взвешенных веществ в осветленной воде [12]

1.2. Анализ влияния физико-химических и гидродинамических факторов на показатели работы аэротенков

Исследованию вопроса интенсификации процессов биологической очистки сточных вод в аэротенках с применением физико-химических методов, а также изменения гидродинамических условий воздействия на активный ил посвящены работы многих российских и зарубежных авторов [10, 16, 32, 33, 36, 39, 51-53, 67-82]. Использование данных методов в ряде случаев может привести к существенному улучшению очистки промышленных или городских сточных вод от органических примесей и биогенных элементов.

1.2.1. Физико-химические методы интенсификации биологической очистки сточных вод

К физико-химическим методам интенсификации работы аэротенков могут быть отнесены следующие:

- использование окислителей (кислорода, азота, перекиси водорода);
- применение сорбентов;
- использование биологически активных веществ (химических мутагенов);
- повышение дозы активного ила;
- обработка иловой смеси ультразвуком и электрическим током.

Применение кислорода в аэротенках специальных конструкций позволяет значительно интенсифицировать их работу. Наибольший опыт в разработке и эксплуатации аэротенков, работающих на чистом кислороде или кислородобогащенном воздухе, накоплен в США. Исследованием таких аэротенков, получивших в практике очистки сточных вод название «окситенки», в США занимается фирма «Юнион Карбайд», производящая оборудование для получения технического кислорода. Самая распространенная конструкция окситенка известна под названием «Юнокс». Это герметичное сооружение, разделенное перегородками на три-четыре секции. Движение кислорода и иловой смеси происходит в этом сооружении в попутном направлении от секции к секции. Каждая секция оборудована механическим или пневматическим аэратором. Система «Юнокс» обеспечивает 90-95 %-е использование кислорода. Как правило, в окситенке применяется технический кислород 95-98 %-й чистоты, производимый криогенным или адсорбционным способом.

Для окситенков системы «Юнокс», работающих на городских сточных водах, характерны следующие показатели (при БПК₅ исходной воды 110-350 мг/л и очищенной 10-23 мг/л): период аэрации 1,3-2,6 часа; доза ила 3-6 г/л; нагрузка на ил 0,23-1,05 г БПК₅/(г·сут); окислительная мощность (ОМ) 0,9-2,7 кг БПК₅/(м³·сут). В аналогичных условиях окислительная мощность аэротенков не превышает 0,51-0,78 кг БПК₅/(м³·сут), что в 2-3 раза меньше, чем окислительная мощность окситенков [70].

Использование окситенков особенно целесообразно для очистки производственных сточных вод на промышленных предприятиях, где имеется «бросовый» кислород, не находящий применения в технологическом цикле или образующийся в виде побочного не утилизируемого продукта. Окислительная мощность окситенков «Юнокс» при полной очистке городских сточных вод в 2-3 раза больше, чем окислительная мощность обычных аэротенков. При полной биологиче-

ской очистке производственных сточных вод значение ОМ составляет 1,8-3,4 кг БПК/(м³·сут); доза ила – 3-6 г/л; период аэрации – 1,3-2,6 ч. Компактные установки «Юнокс» целиком изготавливаются в заводских условиях.

На поверхности герметичных окситенков могут скапливаться масла, нефтепродукты и т.д., что может вызвать взрыв или пожар. В связи с этим в США, Японии и других странах стали разрабатываться открытые конструкции окситенков. Так, в США фирмой «FMC и K⁰» разработан окситенк «Марокс». Диспергирование кислорода в нем производится вращающимся диффузором. Диффузор представляет собой полый диск, верхняя и нижняя часть которого изготовлены из пористых пластин. Кислород подается в диск по полуму валу, одновременно обеспечивающему вращательное движение. При вращении фильтросного диска пузырьки кислорода срезаются с него вращающейся жидкостью, не успев укрупниться, как это происходит в неподвижном аэраторе. Пузырьки размером 100 мкм увлекаются потоками жидкости, создаваемыми крыльчатками, установленными на верхней и нижней поверхностях диффузора, и винтовыми мешалками на верхней части вала и не всплывают на поверхность до практически полного растворения кислорода в жидкости. Эффективность использования кислорода в системе «Марокс» составляет 80-90 %. Применение системы «Марокс» для интенсификации работы действующих очистных сооружений не вызывает больших затруднений.

Существенным преимуществом биологической очистки стоков с использованием кислорода является снижение количества избыточного активного ила (до 48 %), что соответственно позволяет сократить расходы на его обработку.

Сопоставление энергозатрат на очистку сточных вод в окситенках и аэротенках показывает, что, применение кислорода дает возможность снизить расход электроэнергии в 1,3-1,7 раза, причем наибольшая экономия энергии наблюдается в процессе растворения кислорода в иловой смеси.

Улучшение седиментационных свойств ила при повышенных концентрациях кислорода позволяет более эффективно уплотнять ил перед обезвоживанием (до 92-96 % после окситенков, против 96,5-98,8 % после аэротенков).

Для улучшения работы аэротенков в США предложен способ добавления в иловую смесь перекиси водорода, что позволяет снизить иловый индекс и улучшить седиментационные качества активного ила [16]. По данным американских ученых, внесение в иловую смесь с индексом около 800 см³/г перекиси водорода с дозой 40-200 мг/л позволило по-

лучить хорошо оседающий ил, индекс которого не превышал 160 см³/г. Оптимальной точкой введения перекиси водорода, по мнению канадских исследователей, является канал, отводящий ил из аэротенков во вторичные отстойники, а ее доза составляет 10-200 мг/л. При очистке некоторых трудноокисляемых сточных вод перекись водорода добавляется непосредственно в зону аэрации, где ее расщепление интенсифицируется микроорганизмами активного ила.

Другим окислителем, интенсифицирующим процесс очистки, является озоновоздушная смесь. Она вводится в поток рециркулирующего ила в количестве 1-3 г/л в течение 10-15 мин с последующим перерывом на 40-60 мин. При этом общая продолжительность аэрации сточных вод в аэротенке при очистке, например, фенолсодержащих сточных вод снижается в 1,5-2 раза, а количество фенолов в очищенной сточной воде в несколько раз меньше, чем в воде, очищенной по обычной технологии.

Использование окислителей может быть рекомендовано для очистки некоторых видов концентрированных производственных сточных вод, однако для городских стоков эти работы не нашли применения из-за достаточно высоких затрат на их приготовление и дозирование.

Применение различных сорбентов также позволяет интенсифицировать процесс биологической очистки. Украинскими исследователями было изучено действие природных сорбентов на жизнедеятельность микроорганизмов. Установлено, что такие глинистые материалы, как монтмориллонит и палыгорскит, при добавке их в сточные воды в количестве 1 % способны увеличить окислительную активность культуры микроорганизмов почти в 2 раза [47, 51].

В качестве искусственного сорбента может быть успешно применен активированный уголь. При дозе угля 70-100 мг/л окислительная мощность аэротенка возрастает в 2-2,5 раза, уменьшаются цветность и запах обрабатываемых сточных вод.

Некоторое распространение для интенсификации очистки сточных вод от химических загрязнителей получил метод химического мутагенеза, сущность которого заключается в воздействии химическими мутагенами на сложный биоценоз активного ила, содержащий различные популяции бактерий, актиномицетов, различных грибов, зеленых водорослей и т.д. В качестве химических мутагенов используются нитрозометилмочевина (НММ), деметилсульфат (ДМС), нитрозоэтилмочевина (НЭМ), нитрозометилбиурет (НБМ) и др. Обработка части активного ила мутагенами позволяет очищать концентрированные по загрязнению сточные воды с ХПК 800-9000 мг/л, получая

эффект очистки 85-99 % при одновременном возрастании окислительной мощности аэротенка в 4-8 раз.

Анализ использования различных физико-химических методов для интенсификации биологической очистки сточных вод в аэротенках показывает, что наиболее эффективным и рентабельным является метод, основанный на аэрации иловой смеси техническим кислородом. Однако из-за проблем, связанных с использованием оборудования для производства технического кислорода на канализационных очистных сооружениях, данный метод не нашел широкого применения в нашей стране.

Повышение концентрации активного ила является одним из возможных и наиболее реальных путей интенсификации работы аэротенков. Средняя доза ила в аэрационных сооружениях колеблется от 2 до 4 г/л. Более высокую дозу ила обычно не позволяют удерживать вторичные отстойники, работающие при стандартном периоде отстаивания в 1,5-2 часа.

На величину поддерживаемой в аэротенке дозы активного ила большое влияние оказывает иловый индекс, характеризующий способность активного ила к осаждению во вторичных отстойниках. Чем меньше иловый индекс, тем большую дозу ила можно поддерживать в аэротенке, и наоборот. Рекомендуются следующие оптимальные дозы ила в зависимости от илового индекса [32].

Иловый индекс, мл/г	50	80	120	150	200	250	300
Доза ила, г/л	6	4,3	3	2,5	2	1,5	1

Повышая дозу активного ила в аэротенках, необходимо иметь в виду, что при высоких концентрациях биомассы не сохраняется прямая пропорция между дозой и скоростью потребления загрязнений. Этот факт объясняется ухудшением условий питания отдельных клеток. Потребление веществ микроорганизмами и выработка продуктов метаболизма происходят очень быстро, в то время как приток новых порций вещества осуществляется медленно. В результате этого вокруг отдельных бактериальных клеток создаются микрозоны с неблагоприятными условиями жизнедеятельности.

Кроме того, решение проблемы повышения дозы активного ила в аэротенке связано с совершенствованием технологии илоразделения и использованием прикрепленных биоценозов. При повышении дозы активного ила с 1-2 до 7-8 г/л пропорционально возрастает окислительная мощность аэротенка с 0,5-1 до 3,5-4 кг БПК/(м³сут). Однако, вследствие того что оптимальной концентрацией активного ила во

вторичном отстойнике является величина порядка 1,5-2 г/л, увеличение дозы ила выше этого значения может привести к ухудшению качества очистки.

Одним из путей увеличения дозы активного ила является создание аэротенков с фильтрационным разделением иловой смеси [16]. В рабочей зоне такого сооружения поддерживается доза активного ила до 25 г/л. Перед подачей очищенной сточной жидкости во вторичный отстойник она пропускается через специальные фильтровальные перегородки в виде сеток или пористых элементов. При этом во вторичные отстойники поступает не более 3-4 г/л взвешенных веществ. Некоторые фильтрующие материалы могут обеспечить вынос активного ила не более 20-25 мг/л, что в принципе позволяет отказаться от вторичных отстойников.

Недостатком фильтротенков являются очень маленький рабочий цикл фильтрования между регенерациями (1-2 ч), высокая вероятность засорения фильтрующих элементов волокнистыми органическими примесями (особенно при использовании сеток) и большое сопротивление фильтрованию при использовании объемных пористых элементов.

Другим сооружением биологической очистки сточных вод с высокими дозами активного ила является флототенк, состоящий из флотационного илоотделителя, совмещенного с аэротенком [8, 37, 38].

Принцип работы флототенка состоит в том, что осветление смеси биологически очищенных сточных вод и активного ила проводят методом напорной флотации. Туда же из аэротенка с помощью насоса поступает иловая смесь. Сатурации подвергается либо весь расход иловой смеси, либо его часть, после чего он смешивается с иловым потоком. Сфлотированный ил концентрацией 30-50 г/л из верхней части флотатора удаляется скребками различной конструкции или самотечным переливом на рециркуляцию в рабочую зону аэротенка и частично в качестве избыточного активного ила отводится на сооружения обработки осадка. Как показал опыт работы флототенков, количество избыточного активного ила невелико. Это объясняется тем, что снижение удельной окислительной мощности активного ила при увеличении его дозы фактически переводит активный ил в фазу продленной аэрации, которая характеризуется очень малыми величинами прироста биомассы.

Увеличения концентрации активного ила свыше 3 г/л можно достичь и на вторичных отстойниках после их реконструкции во флотационные илоотделители. Физико-химические свойства активного ила позволяют проводить процесс флотационного разделения иловых смесей. С точки зрения обеспечения жизнеспособности активного ила

в период его отделения, режим напорной флотации поддерживает оптимальные аэробные условия как в иловой смеси, так и в уже выделенном концентрированном иле.

Исследования флотационного илоразделения проводились НИИ ВОДГЕО, МИСИ им. В.В.Куйбышева и АКХ им. К.Д.Памфилова (Москва). Были определены продолжительность процесса флотации (не менее 30 мин) и оптимальная концентрация иловой смеси (10-12 г/л).

Эксперименты, проведенные в МИСИ им. В.В.Куйбышева, с прямой флотацией показали, что количество выносимого активного ила из флотатора было весьма велико (до 1 г/л). Это происходило вследствие того, что активный ил, пройдя центробежный насос в процессе насыщения иловой смеси воздухом, чрезмерно диспергировался и в значительной мере терял флокулирующие свойства [37]. Поэтому схема прямого флотационного илоразделения была рекомендована для интенсификации работы станций с двумя ступенями аэротенков, причем флотацию предлагалось применять только на первой ступени.

В экспериментах, проводимых в АКХ им. К.Д.Памфилова [38], была исследована технологическая схема флотации с рециркуляцией рабочей жидкости. Эта схема исключала попадание осветляемой иловой смеси в насос, что позволило предотвратить диспергирование ила и сохранить его флокулирующую способность. Было установлено, что предложенная схема илоотделения может быть эффективно использована для осветления иловых смесей любой концентрации, а также доказана возможность регулирования качества осветленной воды путем изменения режима флотации.

Более поздние исследования, проведенные в НИИ ВОДГЕО [8, 70], показали, что схемы с рециркуляцией осветленной жидкости весьма энергоемки, поскольку необходима 150-300 %-я рециркуляция осветленной во флотаторе жидкости под давлением 0,2-0,3 МПа. Кроме того, применение рабочей жидкости не может гарантировать вынос взвешенных частиц из флотационного илоразделителя менее 15-20 мг/л.

К недостаткам флототенков следует отнести высокие капитальные и эксплуатационные затраты, связанные со строительством отдельного флотационного резервуара, а также перерасходом энергии для подачи сжатого воздуха и рециркуляции иловой смеси.

Очистка сточных вод при относительно высоких значениях концентрации активного ила и обеспечении пребывания его в аэробных условиях на протяжении всего процесса осуществляется в аэротенках-отстойниках и аэротенках-осветлителях.

Аэротенк-отстойник (рис.1.4) представляет собой резервуар, разделенный на две самостоятельные зоны (аэрации и отстаивания) не доходящей до дна продольной наклонной перегородкой. Зона аэрации оборудована впускными устройствами, расположенными рассредоточенно, и пневматическим аэратором. Зона отстаивания снабжена иловыми бункерами с эрлифтами и устройствами для сбора и удаления осветленных сточных вод и всплывающих веществ. Сточная жидкость после первичных отстойников направляется в зону аэрации, где она смешивается с активным илом при барботаже воздухом. Иловая смесь из зоны аэрации через придонную щель под наклонной перегородкой поступает в зону отстаивания. В процессе отстаивания иловой смеси образуется слой взвешенного активного ила, способствующий более эффективному осветлению жидкости. Активный ил из верхней части слоя взвешенного осадка поступает в иловый бункер, откуда откачивается эрлифтом в зону аэрации.

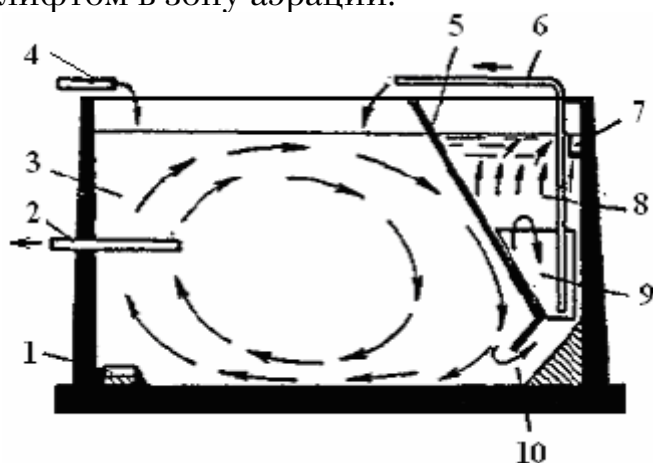


Рис.1.4. Аэротенк-отстойник с принудительной циркуляцией ила:
 1 – пневматический аэратор; 2 – трубопровод для удаления избыточного ила; 3 – зона аэрации; 4 – труба для подачи сточной воды; 5 – перегородка; 6 – эрлифт для циркуляции ила; 7 – лоток для сбора и отвода очищенной воды; 8 – зона отстаивания; 9 – иловый бункер; 10 – впускная щель

Применение аэротенков-отстойников позволяет увеличить дозу активного ила до 4-5 г/л и, следовательно, уменьшить период аэрации сточной жидкости [4].

В отличие от аэротенков-отстойников в аэротенках-осветлителях создается значительно более высокая степень рециркуляции ила, что позволяет рассматривать взвешенный слой ила в отстойной зоне как фильтр и реактор окисления. В аэротенках-отстойниках и аэротенках-осветлителях обеспечивается устранение в отстойной части участков, в которых может накапливаться и загнивать активный ил, что, в свою очередь, гарантирует высокую степень нитрификации сточных вод. К недостаткам аэротенков-отстойников следует отнести тот факт, что

избыточный активный ил удаляется не из зоны отстаивания, а из аэрационной зоны, где он находится в незначительной концентрации и появляется необходимость дополнительного сооружения большого объема для его уплотнения. Недостатками аэротенка-осветлителя являются его весьма сложное конструктивное оформление и необходимость поддержания строгого постоянства расходов сточных вод и активного ила.

Дозу ила в аэротенке можно увеличить, используя инертные носители биомассы. В качестве инертного носителя применяются плоские рамы и кассеты с размещенными в них пористыми материалами (поролон и пр.) или винипластовой пленкой. Блоки и кассеты с насадкой располагаются в аэротенке таким образом, чтобы обеспечить эффективную циркуляцию иловой смеси в загрузке. Кроме кассет с винипластовой пленкой и поролоном могут использоваться другие типы модулей или блоков в виде объемных конструкций. Это трубчатые или сетчатые элементы, пучки из синтетических нитей или стекловолокна [49]. Известны конструкции аэротенков с засыпными наполнителями из полимерных материалов в виде отрезков труб, колец Рашига и пр.

Аэротенки с плоской или объемной насадкой рекомендуется применять для очистки концентрированных сточных вод при резком колебании их состава. Для интенсификации процессов очистки сточных вод обычного состава, а также процессов их глубокой очистки применяются мелкофракционные носители биомассы. Это гранулированные синтетические или минеральные материалы, полимеры, кварцевый песок, антрацит, активированный уголь, кокс, керамзит с высокой удельной поверхностью и крупностью зерен 0,1-10 мм. Доза активного ила в зоне аэрации с использованием носителей биомассы может превышать 15 г/л.

Общим недостатком систем, использующих инертные носители биомассы, являются высокие капитальные затраты, связанные с размещением большого количества плоских или объемных модулей либо с необходимостью строительства глубоких вертикальных сооружений в случае применения мелкофракционных носителей.

Для увеличения дозы активного ила, а также интенсификации процессов нитрификации, денитрификации и удаления фосфора в ряде стран Западной Европы и США стали довольно широко использоваться так называемые циклотенки. Например, в соответствии с разработанной американской фирмой US Filter технологией, процессы биологической очистки сточных вод, отстаивания, отбора осветленного стока, уплотнения и удаления активного ила осуществляются в одном резервуаре-циклотенке. После завершения цикла в реактор подается

сточная вода, которая смешивается с определенным количеством оставшегося активного ила, и процесс повторяется. Доза ила в подобных реакторах-циклотенках может достигать до 7-8 г/л, что обеспечивает достаточно высокую интенсивность процессов биологической очистки стоков.

Недостатком данной технологии является необходимость устройства как минимум четырех циклотенков для обеспечения процесса непрерывной очистки стоков даже при небольшой производительности очистной станции. Кроме того, в климатических условиях России циклотенки должны устанавливаться в отапливаемых крытых модулях, что резко увеличивает капитальные затраты при их строительстве.

Одним из возможных путей интенсификации процесса биологической очистки сточных вод является использование физических методов воздействия (в частности ультразвука) на микроорганизмы активного ила. В отечественной и зарубежной литературе отсутствует практический опыт применения подобной технологии.

Внимание исследователей привлечено в последнее время к использованию ультразвуковых колебаний не только для изучения свойств веществ, но и с целью оценки их воздействия на различные физические, химические и биологические процессы [11, 36, 58, 59, 65].

Воздействие ультразвука на объект может сопровождаться акустической кавитацией, т.е. процессом роста в ультразвуковом поле пузырьков воздуха из имеющихся субмикроскопических зародышей газа или пара в жидкостях до размеров в несколько десятых долей миллиметра, которые начинают пульсировать с частотой ультразвука и захлопываются в положительной фазе давления. При этом возникают большие локальные давления порядка тысяч атмосфер, образуются сферические ударные волны. Возле пульсирующих пузырьков образуются акустические микропотоки. Интенсивность, соответствующая порогу кавитации, зависит от рода жидкости, частоты звука, температуры и других факторов. В воде на частоте 20 кГц она составляет около 0,3 Вт/см² [65].

Воздействие ультразвука на биологические объекты определяется, главным образом, интенсивностью ультразвука и длительностью облучения и может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на жизнедеятельность организмов. При поглощении ультразвука в биологических объектах происходит преобразование акустической энергии в тепловую. Локальный нагрев тканей на доли и единицы градусов, как правило, способствует жизнедеятельности объектов, повышая интенсивность процесса обмена веществ. Однако более интенсивные и длительные воздействия могут привести к перегреву биологических структур и их разрушению (денатурация белков и др.).

В основе биологического действия ультразвука могут лежать также вторичные физико-химические эффекты. Так, при образовании акустических потоков может происходить перемешивание внутриклеточных структур. Кавитация приводит к разрыву молекулярных связей в биополимерах и других жизненно важных соединениях и к развитию окислительно-восстановительных реакций. Ультразвук повышает проницаемость биологических мембран, вследствие чего происходит ускорение процессов обмена веществ из-за диффузии.

Все перечисленные факторы в реальных условиях действуют на биологические объекты в том или ином сочетании совместно, а поэтому подчас невозможно разделить исследовать процессы, имеющие различную физическую природу.

Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал по влиянию ультразвука на клетку свидетельствует о том, что большинство эффектов воздействия ультразвука связано с функционированием мембран и активностью мембранных ферментов [36, 59, 80].

Исследуя в работе [11] различные физические методы воздействия на активный ил, А.А. Бондарев делает вывод о том, что можно выделить несколько гипотез относительно положительного влияния ультразвука на микроорганизм – мы активного ила, а именно:

- разрушение бактериальных клеток с высвобождением ряда биологически активных соединений, а именно витаминов, стероидов, ферментов, биополимеров и др.;
- активизация неразрушенных микроорганизмов в связи с повышением клеточной проницаемости;
- усиление активности ферментов и ряда поверхностно расположенных рецепторов клетки;
- дробление хлопков активного ила по межклоновым прослойкам, способствующее улучшению процесса переноса питательных веществ и кислорода к бактериальным клеткам;
- появление потомства с иными морфологическими признаками, т.е. изменение генетического аппарата клетки.

В результате проведения большого количества экспериментальных исследований А.А. Бондаревым было установлено, что ультразвук небольшой интенсивности (3 Вт/см^2) и частоты ультразвуковых волн (22-44 кГц) вызывал увеличение метаболической активности микрофлоры активного ила. По данным исследований, в контактных условиях степень увеличения дегидрогеназной активности ила составляла 70-100 %, удельной скорости потребления кислорода – 25-50 %, ускорения процесса биологического окисления субстрата – 50-80 %. Оптимальная доза озвучиваемого активного ила составляла 0,3-0,5 % от

общего количества ила, находящегося в системе аэротенк – илоотделитель. Увеличение доли озвученной иловой смеси свыше 0,3-0,5 % не приводило к возрастанию удельной скорости потребления кислорода, а обработка 50 % ила в 1,4 раза снижала эту скорость.

В качестве источника ультразвука для интенсификации процессов биологической очистки сточных вод А.А. Бондаревым была предложена оригинальная конструкция гидродинамического излучателя (ГДИ), состоящего из корпуса 1, тела обтекания 2 и соединяющих опор 3 (рис. 1.5).

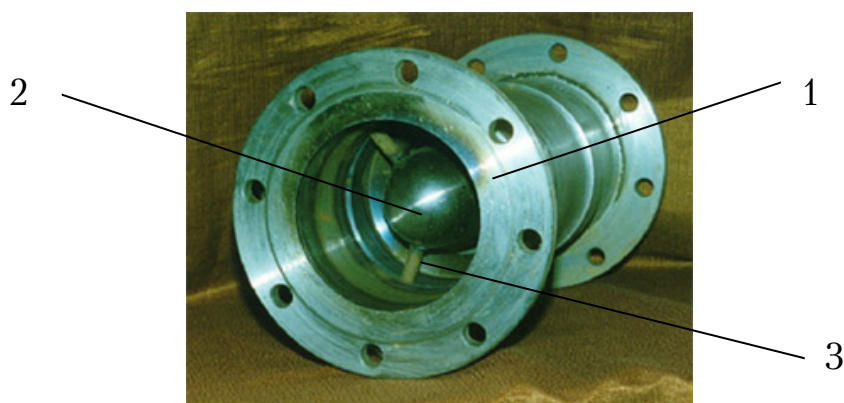


Рис. 1.5. Общий вид гидродинамического излучателя (ГДИ):
1 – корпус; 2 – тело обтекания; 3 – опоры

Активный ил, проходя под высоким избыточным давлением через ГДИ, подвергается кавитационному ультразвуковому воздействию в зоне разрежения за телом обтекания.

Оптимальное время обработки активного ила в испытанных ГДИ составило 10-15 мин, доза обрабатываемого ила – 0,5 % по сухому веществу от общего количества ила в системе, периодичность обработки – 4-6 раз в сутки, давление в рециркулирующей системе – 4-6 ати [11].

Применение ГДИ в процессе биологической очистки сточных вод приводит к повышению окислительной мощности сооружений по органическим веществам и аммонийному азоту в 1,5-2 раза с одновременным улучшением качества очищенной жидкости. Кроме того, иловый индекс и прирост активного ила при такой обработке снижаются на 30-50 %. К недостаткам кавитационной обработки активного ила можно отнести необходимость дополнительной установки высоконапорных насосов, что не всегда бывает технически осуществимым на действующих очистных станциях.

Менее энергоемким процессом является воздействие на активный ил электрическим током. Изучение возможности интенсификации биологической очистки током проводили на двух аэротенках-осветли-

телях (опытный и контрольный) объемом по 0,2 м³ [59]. Взвешенный слой активного ила опытного аэротенка подвергался электрообработке переменным током с помощью двух плоскопараллельных электродов из нержавеющей стали, расположенных в камере взвешенного слоя на боковых стенках сооружения (рис.1.6).

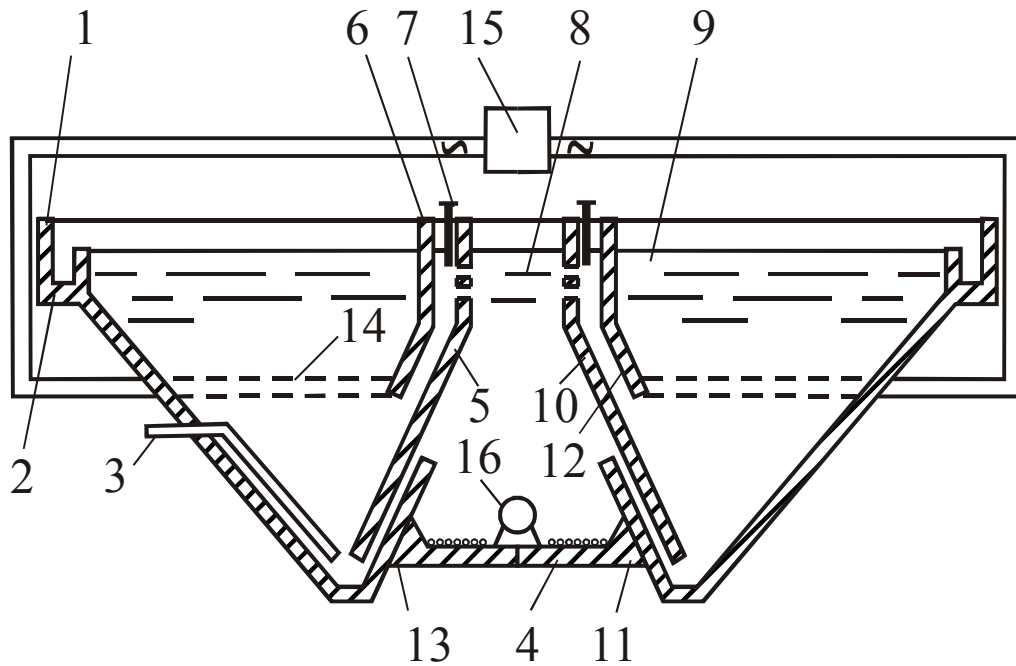


Рис. 1.6. Опытный аэротенк-осветлитель с электродами:
 1 – корпус; 2 – водоотводящие лотки; 3 – илоотводящая трубка;
 4 – аэраторы; 5, 6 – наклонные перегородки; 7 – отверстия; 8 – зона аэрации;
 9 – зона осветления; 10 – зона гашения пульсации; 11 – придонная щель;
 12 – направляющие козырьки; 13 – отражающие зубья; 14 – электроды;
 15 – источник переменного тока; 16 – труба для подачи воздуха

При проведении экспериментов по интенсификации биохимической очистки сточных вод в опытном аэротенке-осветлителе были приняты следующие параметры: сила тока 1,8 мА, напряжение 140 мВ, мощность тока 252 мВт, расход электроэнергии – не более 0,3 Вт·ч/м³, время воздействия – 3 минуты, интервал повторной электрообработки – один час. На десятые-одиннадцатые сутки после начала экспериментов степень очистки сточной воды по БПК₅ в опытной установке была в 3 раза выше, чем степень очистки в контрольной, а дегидрогеназная активность ила была в 2,8 раза выше активности ила в контрольной установке (рис.1.7 и 1.8).

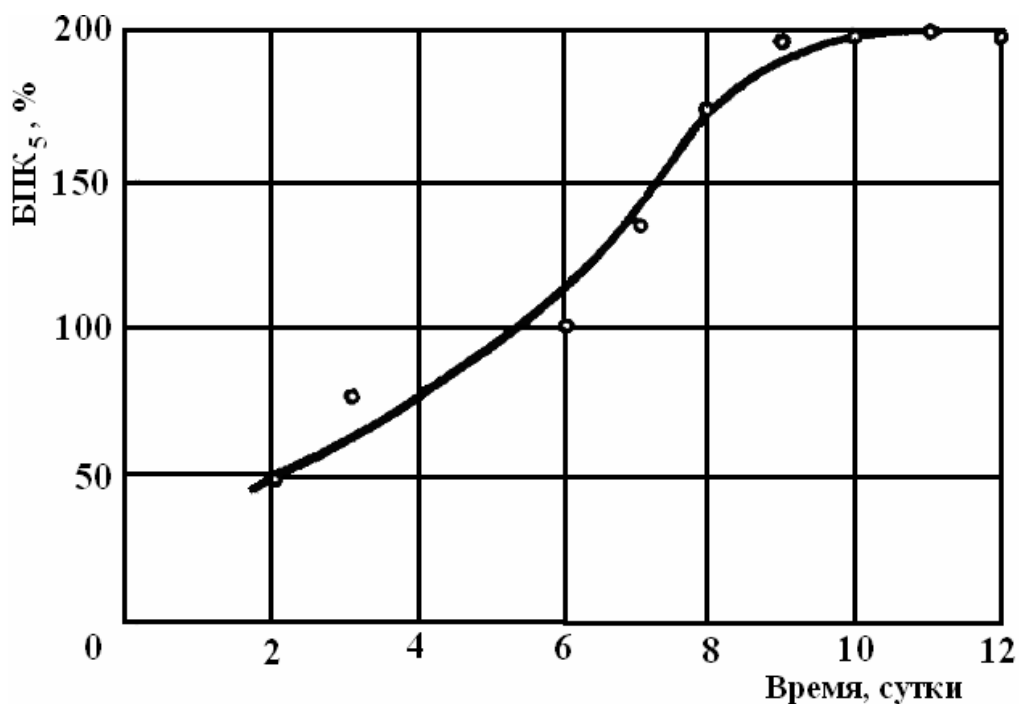


Рис. 1.7. Изменение степени очистки сточной воды по БПК₅ в опытном аэротенке-осветлителе по сравнению с контрольным [59]

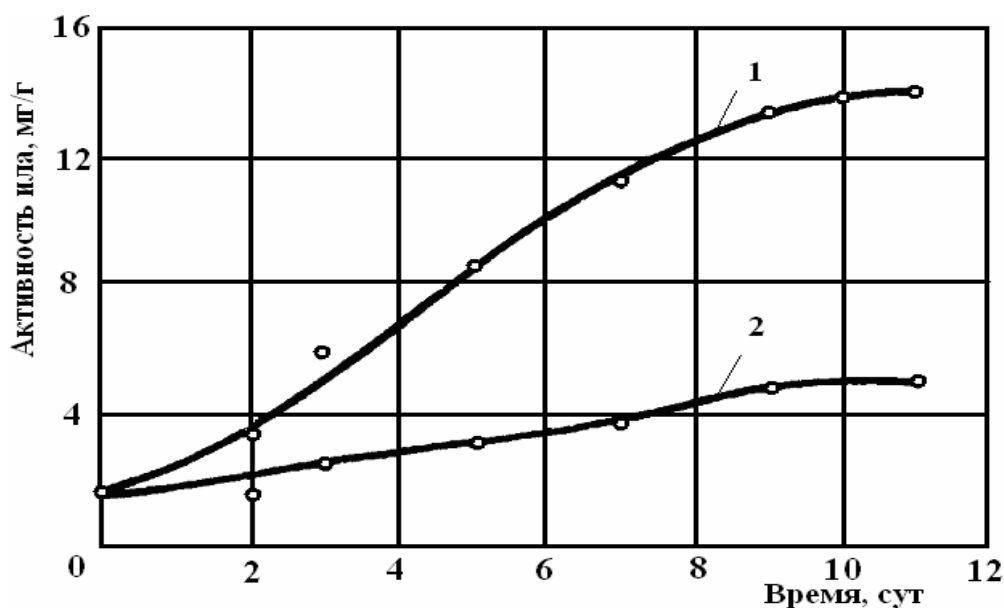


Рис. 1.8. Изменение дегидрогеназной активности ила в аэротенках: 1 – опытный; 2 – контрольный [59]

Таким образом, проведенные эксперименты [59] показали возможность эффективного применения электрического тока для интенсификации биохимической очистки аэрируемых сточных вод при незначительных затратах энергии. Метод обработки активного ила электрическим током совместно с аэрацией имеет по сравнению с другими методами такие несомненные преимущества, как малые эксплуатационные затраты, простота и удобство эксплуатации устанавливаемого

оборудования, отсутствие движущихся частей и механизмов, высокая эффективность. К недостаткам метода электроактивации иловой смеси в системе с плоскопараллельными электродами следует отнести необходимость точного выдерживания параметров электрообработки. Анализ графика изменения дегидрогеназной активации иловой смеси при ее электрообработке постоянным током в электролизере с плоскопараллельными электродами (рис.1.9) [59] показывает, что при недостаточной интенсивности электростимуляции эффект активации незначителен, при чрезмерной электростимуляции наблюдается подавление активности микроорганизмов иловой смеси.

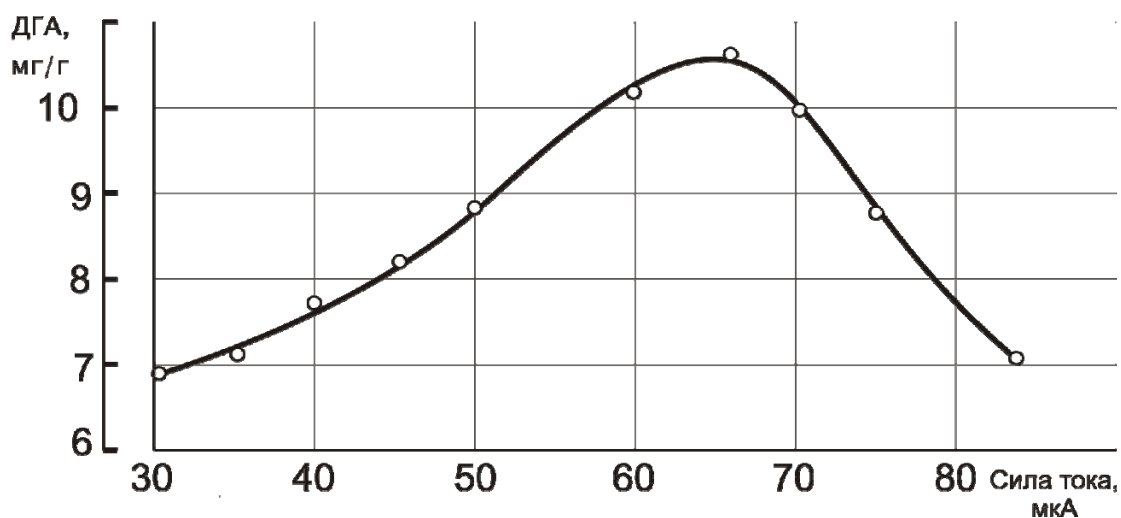


Рис. 1.9. График изменения дегидрогеназной активности иловой смеси в зависимости от силы тока при постоянном значении напряжения (7 мВ)

Таким образом, наименее затратными из вышеперечисленных физико-химических методов являются методы активации иловой смеси с обработкой электротоком и пересыщением смеси кислородом воздуха (добавлением окислителя).

С целью снижения влияния внешних факторов и повышения эффективности процесса электроактивации сотрудниками кафедры «Водоснабжение и водоотведение» Пензенского ГУАС было предложено обрабатывать иловую смесь в электролизере с последовательно соединенными трубчатыми электродами, имеющими различную площадь поверхности [2, 61]. Такая схема расположения электродов (рис. 1.10) предотвращает возможность одновременного нахождения обрабатываемого потока в катодной и анодной зонах (поток поочередно проходит эти зоны), что позволяет избежать подавления активности микроорганизмов обрабатываемого ила при повышенной интенсивности электростимуляции.

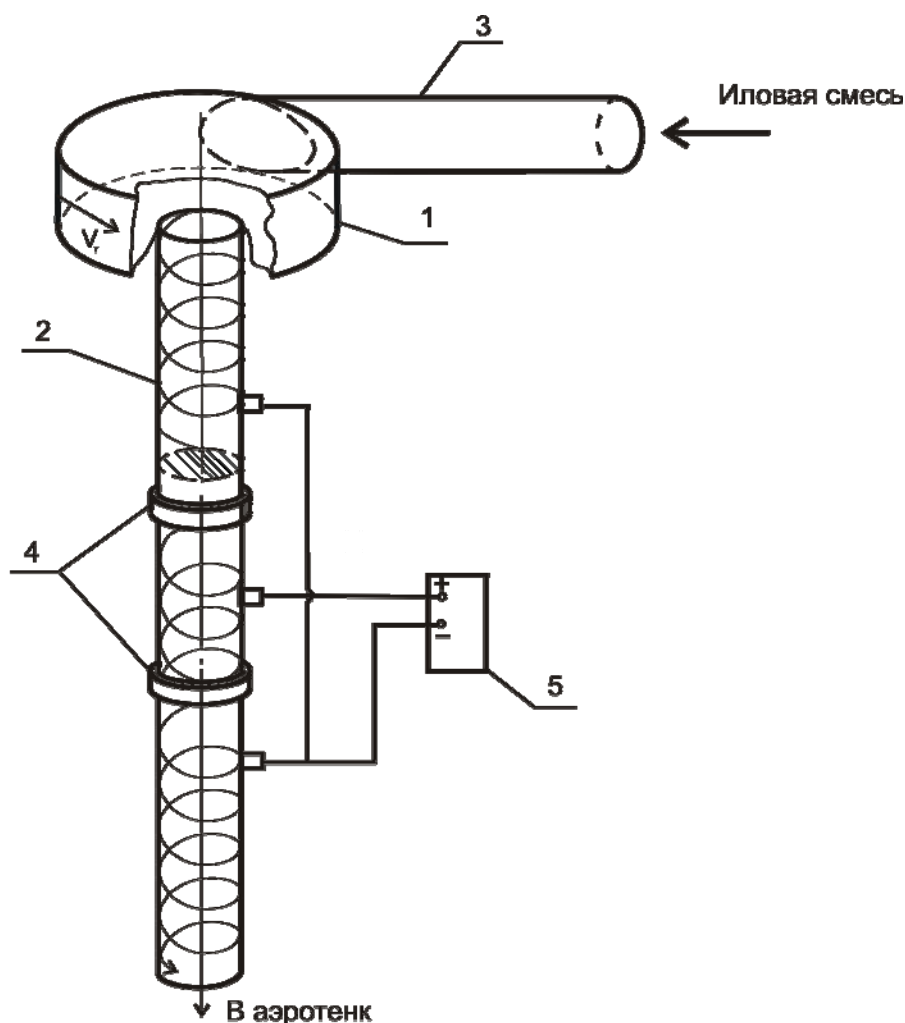


Рис. 1.10. Схема электролизера с последовательно соединенными трубчатыми электродами:
 1 – камера входа; 2 – вихревая камера; 3 – входной патрубок;
 4 – диэлектрические муфты; 5 – источник тока

После проведения экспериментов по электрообработке активного ила в цилиндрических электролизерах со стержневыми и игольчатыми центральными электродами были сделаны выводы о зависимости ферментативной активности ила от величин плотности тока на центральных электродах [3, 19, 30]. Кроме того, центральные электроды, в отличие от последовательно соединенных трубчатых электродов, в меньшей степени подвержены опасности возникновения короткого замыкания, а также, при необходимости, позволяют легко и быстро изменять площадь контакта с жидкой фазой при электрообработке. Таким образом, создание новых эффективных конструкций электролизеров для обработки активного ила является актуальной и экономически оправданной научно-технической задачей.

1.2.2. Повышение эффективности биологической очистки сточных вод за счет использования устройств, обеспечивающих высокую турбулизацию иловой смеси

Российскими и зарубежными исследователями отмечается, что при высоких концентрациях биомассы активного ила сохраняется прямая пропорция между дозой и скоростью потребления загрязнений, т.е. интенсивность потребления уменьшается с повышением начальной дозы [32, 69]. Это объясняется ухудшением условий питания отдельных клеток. Дело в том, что потребление веществ микроорганизмами происходит очень быстро, в то время как приток новых порций вещества осуществляется медленно. В результате этого вокруг отдельных бактериальных клеток создаются микрзоны с неблагоприятными условиями обитания.

Для того чтобы таких микрзон не возникало, необходимо обеспечить интенсивную турбулентность потока в аэротенке. Турбулентность потока вызывает распад хлопьев активного ила на мельчайшие колонии микробов и приводит к быстрому обновлению поверхности раздела между микроорганизмами и окружающей средой. Оба эти фактора обеспечивают увеличение скорости поступления питания и кислорода к микроорганизмам, отток продуктов метаболизма и в конечном счете приводят к повышению скорости очистки. По данным У. Бойла и Дж. Ролиха, за счет тщательного перемешивания сточных вод с активным илом можно увеличить снижение БПК с 88 до 96 % или, не ухудшая качества очистки, сократить период аэрирования с 8,2–10,6 до 4,6 ч.

Об интенсивно идущих процессах окисления при повышенной турбулентности потока свидетельствуют снижение содержания в активном иле углеводов и увеличение содержания протеинов.

Повышение активности микроорганизмов в условиях высокой турбулентности, вероятно, связано не только с улучшением условий обитания отдельных бактериальных клеток, но и с избирательным действием перемешивания на различные микроорганизмы, приводящим к преобладающему развитию форм, которые обладают максимальной способностью разлагать загрязнения.

В работе [26] отмечалось, что в условиях лабораторных экспериментов по биологической очистке сточных вод с перемешиванием активного ила увеличение турбулентности потока (за счет работы мешалки) вызывало исчезновение в активном иле свободно плавающих простейших. Скорость их исчезновения возрастала с повышением интенсивности перемешивания. При относительно слабом перемешивании в активном иле появлялись нитевидные бактерии, наиболее интен-

сивное перемешивание создавало благоприятные условия для массового развития свободных цилиндрических бактерий и мелких зооглейных форм активного ила, в котором первоначально преобладала *Sarcina*. Активный ил с преобладанием нитевидных бактерий и *Sarcina* слабо разлагал органические вещества, и наоборот, активный ил с преобладанием зооглейных и цилиндрических форм бактерий имел самую высокую биохимическую активность.

Влияние турбулентности на распределение хлопьев активного ила по размерам показано на рис. 1.11 [25].

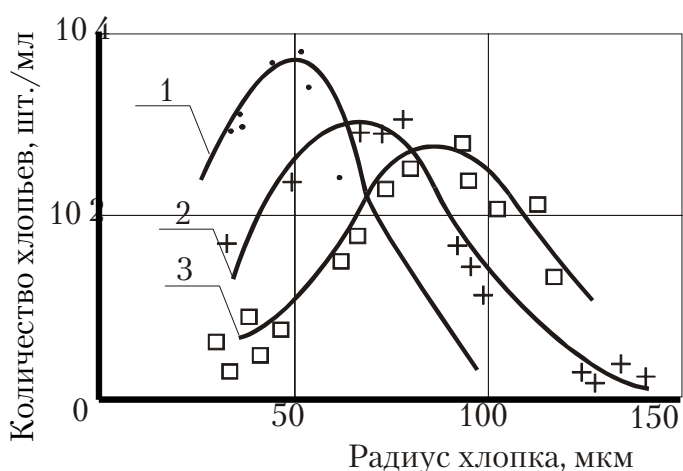


Рис.1.11. Влияние интенсивности перемешивания на дисперсный состав активного ила:
1 — при числе оборотов мешалки (аэратора) 600 об/мин; 2 — 200 об/мин;
3 — 100 об/мин

Статистическое распределение хлопьев активного ила по размерам устанавливается как результат двух одновременно протекающих и взаимно уравновешивающихся процессов диспергирования хлопьев под действием турбулентности и их слияния под действием сил, обуславливающих флокуляцию.

Улучшение гидродинамических условий при биологической очистке обычно достигается либо изменением конструкции самого аэротенка, либо созданием условий для хорошего перемешивания сточной жидкости в процессе ее аэрации.

Эффективность работы действующих коридорных аэротенков можно повысить путем разделения объема коридора на секции (камеры, ячейки). В аэротенке такой конструкции происходит полное перемешивание жидкости в каждой камере, однако отсутствует ее перемешивание между камерами. При последовательном движении жидкости от камеры к камере через отверстия в придонной части перегородок

создается гидравлический режим, аналогичный гидравлическому режиму в идеальном вытеснителе. Размер камер, общее число которых колеблется от четырех до десяти, может быть одинаковым. В некоторых конструкциях аэротенков-вытеснителей сточная жидкость движется от секции к секции путем перелива не через разделительные перегородки, а только через специальные камеры, установленные в узловых точках ячейки. Этот прием позволяет использовать одновременно два технологических режима очистки: смешение и вытеснение. Такая схема обуславливает высокие стабильность и качество очистки сточных вод. Кроме того, в каждой зоне благодаря процессам автоселекции развивается адаптированный биоценоз активного ила, что также способствует стабилизации процесса очистки.

Для создания высокой турбулентности и повышения растворимости кислорода при аэрации в Великобритании, Канаде, Японии и других странах используются шахтные аэротенки небольшого диаметра, но значительной глубины (до 300 метров и более). Общий рабочий объем шахтного аэротенка разделен на две секции – восходящего и нисходящего потоков. Обычно это реакторы типа «труба в трубе» или перегородчатые. В секциях шахтного аэротенка воздух, подаваемый компрессором, создает эрлифтную циркуляцию сточных вод. Однако известны конструкции шахтных аэротенков, где циркуляция иловой смеси создается насосом. Для устройства шахтных аэротенков могут использоваться горные выработки, кроме того, они могут строиться способом опускного колодца.

В НИИ ВОДГЕО разработана конструкция противоточного аэротенка, который состоит из трех основных зон: аэрации, эрлифтной циркуляции и отстаивания. Зона аэрации оборудована мелкопористыми пневматическими аэраторами, расположенными в нижней ее части. Равномерное распределение воды осуществляется струенаправляющими лопатками с винтовым креплением, позволяющим регулировать глубину их погружения [70]. Зона эрлифтной циркуляции отделена от зоны аэрации полупогружной перегородкой и снабжена решеткой из дырчатых труб. Отстойная зона расположена в центральной части сооружения и отделена от зоны аэрации перегородками с циркуляционными щелями и впускными окнами с регулируемым сечением. Сточная жидкость подается в верхнюю часть зоны аэрации и движется нисходящим потоком в противоток движению воздуха, что обеспечивает длительный контакт иловой смеси с воздухом и высокую эффективность использования кислорода.

Турбулизация водовоздушного потока в аэротенке может быть также достигнута применением аэраторов определенных конструкций.

Например, в американской практике широкое распространение получил пневматический аэратор «спарджер», представляющий собой литую крестовину из четырех коротких трубок (диаметром 7,6 см) с открытыми концами (рис. 1.12).

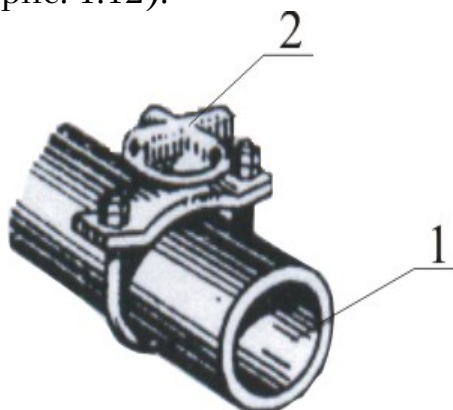


Рис. 1.12. Аэратор «спарджер»:
1 – воздухораспределитель; 2 – трубки

Трубки с внутренним диаметром 0,3 – 1,8 см рассчитаны на пропуск 0,2-0,3 м³ воздуха в 1 мин (максимально до 0,6 м³/мин). Спарджеры насаживаются на общий воздухораспределитель, располагаемый у дна аэротенка, через каждые 0,3-0,6 м. Воздухораспределитель может быть как неподвижным, так и подъемным на случай проведения ремонтных работ. Благодаря получению компактной, определенно направленной и выходящей с большой скоростью струи воздуха над спарджером развивается высокая турбулентность потока, в результате которой происходит вторичное дробление воздуха и образуется облако мелких пузырьков, сравнимых по размеру с пузырьками тонкодиспергированного воздуха.

Разновидностью спарджеров являются дефлектофузоры, имеющие также четыре отверстия диаметром 0,3-0,8 см, но расположенные под диском диаметром 7,6 см, который служит дефлектором для струй воздуха, выходящих из отверстий.

Достаточно высокая турбулизация сточной жидкости достигается при оборудовании средне- и крупнопузырчатых аэраторов струенаправляющими устройствами (рис. 1.13).

Высокие массообменные характеристики имеют механические аэраторы, которые насыщают жидкость кислородом за счет интенсивной ее рециркуляции или разбрызгивания, а также при всасывании и диспергировании атмосферного воздуха. Недостатком использования механических аэраторов является необходимость их тщательного обслуживания и повышенные требования к электробезопасности при эксплуатации.

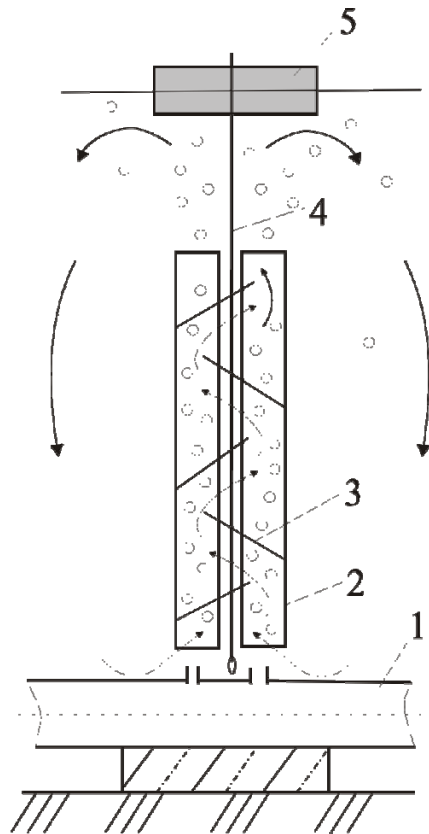


Рис. 1.13. Аэратор со струнаправляющим устройством:
 1 – воздухопровод; 2 – направляющая труба; 3 – спиральная насадка;
 4 – трос; 5 – поплавок

На очистных станциях небольшой производительности используются струйные аэраторы, обеспечивающие диспергирование атмосферного воздуха за счет эжектирования его падающей или напорной струей аэрируемой жидкости, которая подается к аэраторам специально предусмотренными циркуляционными насосами. Применяются два типа струйных аэраторов – шахтный и эжекторный.

Шахтный аэратор (рис. 1.14) представляет собой коническую или цилиндрическую трубу высотой 3–8 м, расположенную над уровнем воды или заглубленную под уровень. Циркулирующая рабочая жидкость подается в верхнюю часть трубы, переливается через водосливное устройство и стекает по стенкам трубы вниз, захватывая воздух, диспергируя его и увлекая в аэрируемый резервуар.

Эжекторный аэратор (рис. 1.15) имеет сравнительно короткое сопло (до 0,3–0,4 м) цилиндрической формы, внутри которого коаксиально введена труба, сообщающаяся с атмосферой. При подаче в сопло рабочей жидкости в суженном кольцевом пространстве между соплом и воздушной трубой образуется разрежение, вследствие чего всасывается воздух, который интенсивно диспергируется и вместе с рабочей струей поступает на поверхность жидкости аэрируемого резервуара. При падении струи в жидкость происходит дополнительная аэрация.

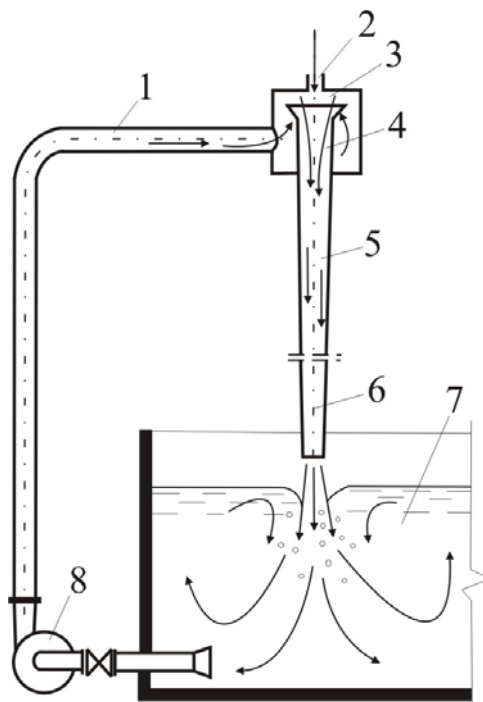


Рис. 1.14. Шахтный аэратор:
 1 – трубопровод иловой смеси; 2 – штуцер подсоса воздуха; 3 – водосливная камера; 4 – переливная воронка; 5 – колонна; 6 – коническая насадка;
 7 – аэротенк; 8 – циркуляционный насос

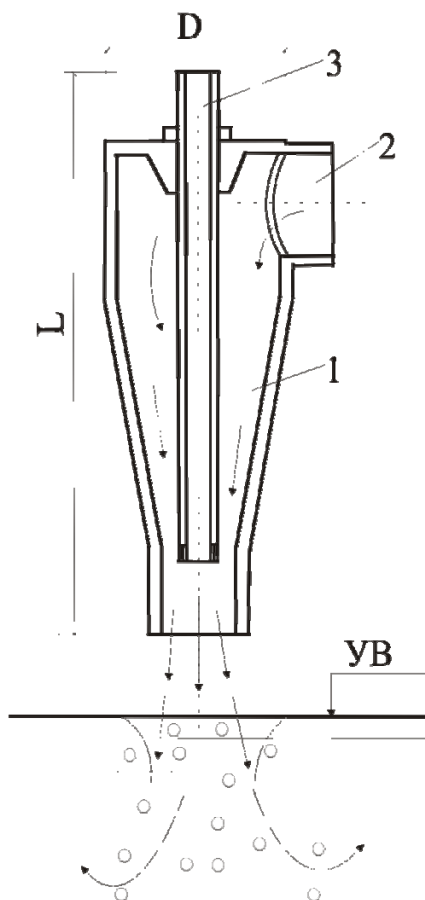


Рис. 1.15. Эжекторный аэратор:
 1 – сопло; 2 – подающий патрубок; 3 – воздушная труба

По производительности и энергетическим показателям шахтные аэраторы превосходят эжекторные, но последние более компактны.

Струйные аэраторы более просты и надежны, чем механические, поскольку в них нет вращающихся частей. Окислительная способность данных устройств регулируется в зависимости от состава сточных вод путем изменения степени открытия вентиля на патрубке эжектируемого воздуха.

Значительный интерес представляет решение задачи насыщения кислородом возвратного активного ила. Здесь следует отметить, что 1,5-2-часовое пребывание иловой жидкости во вторичных отстойниках в условиях глубокого дефицита кислорода (до 100 %) приводит к заметному снижению активности микроорганизмов. Данная проблема особенно актуальна для аэротенков-вытеснителей, где на начальных стадиях процесса биологической очистки стоков наблюдаются перегрузка активной биомассы питательными веществами и дефицит кислорода. Для уменьшения влияния данных негативных условий необходимо интенсивное насыщение возвратного активного ила кислородом воздуха в условиях высокой турбулентности. Для этой цели С.Н. Хазовым [2, 61] была предложена конструкция электрогидродинамического устройства (ЭГДУ), которое устанавливается на трубопроводе возвратного активного ила непосредственно перед аэротенком (рис. 1.16). Данное устройство использует при своей работе избыточную энергию насосов для перекачки возвратного активного ила, которая достаточна для эжектирования воздуха и его перемешивания с иловой жидкостью.

Для использования остаточной энергии вращательного движения иловоздушной смеси в стволе ЭГДУ в крупномасштабной установке были приняты две входные камеры, в которых происходило вращение потоков в противоположных направлениях. Поток иловоздушной смеси из верхней входной камеры поступал во внутреннюю камеру смешения, а поток из нижней входной камеры – в кольцевое пространство между внешней и внутренней камерами смешения. Оба потока смешивались в нижней части ствола (внешней камеры) ЭГДУ, обеспечивая дополнительную турбулизацию смеси.

С целью дополнительной активации ила предусматривалась обработка электрическим полем, создаваемым катодными и анодными участками ствола ЭГДУ.

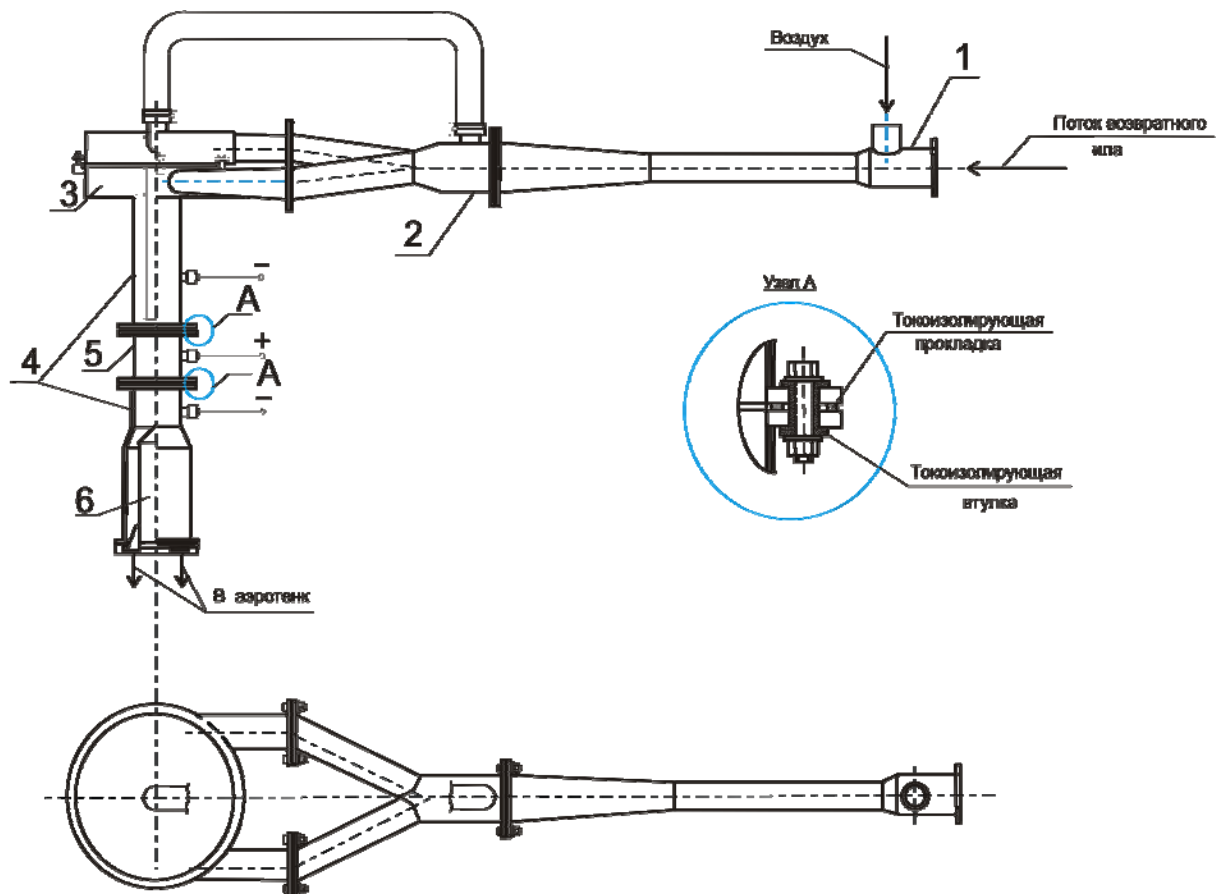


Рис.1.16. Схема установки по утилизации избыточной энергии потока возвратного ила:

1 – эжектор; 2 – тройник; 3 – входная камера ЭГДУ; 4 – катодные участки ствола ЭГДУ; 5 – анодный участок ствола ЭГДУ; 6 – тело обтекания

Недостатком двухпоточного ЭГДУ, которое рассматривается в работе С.Н. Хазова [61], является весьма низкая интенсивность перемешивания пузырьков воздуха с активным илом вследствие наличия невысоких скоростей движения потоков, выходящих из верхней и нижней входных камер устройства (не более 1,5 м/с) и отсутствия дополнительных приспособлений, обеспечивающих высокий уровень массообмена кислорода при малом времени пребывания иловоздушной смеси в стволе ЭГДУ. Струйный эжектор, установленный перед ЭГДУ, требует для своей нормальной работы весьма высоких значений входного давления ($p_{вх} > 2,5 \cdot 10^5$ Па), что на целом ряде очистных сооружений бывает трудноосуществимо, так как насосы подачи рециркуляционного ила обычно имеют небольшой напор. Опыт эксплуатации ЭГДУ показал, что последовательное расположение катодных и анодных участков на стволе ЭГДУ приводит к частому «пробиванию» диэлектрических прокладок электродной системы. Замена диэлектрических прокладок связана с демонтажом всей нижней части ствола ЭГДУ и является весьма трудоемкой операцией. Кроме того, весьма

значительные площади катодных и анодных участков ствола ЭГДУ определяют невысокие плотности тока при электрообработке возвратного ила (менее 8 А/м^2), что уменьшает эффект электроактивации гетеротрофных и автотрофных микроорганизмов.

В частности, внедрение ЭГДУ на КОС (г. Заречный, Пензенской области) позволило снизить содержание аммонийного азота в процессе биологической очистки стоков с 22-24 до 3,5-4 мг/л, а БПК₂₀ – с 180-220 до 14-18 мг/л, в то время как до внедрения ЭГДУ содержание аммонийного азота в очищенном стоке находилось в пределах 12-14 мг/л, а величина БПК₂₀ составляла 20-25 мг/л. Указанные цифры подтверждают тот факт, что процессы окисления в аэротенке при работе ЭГДУ все же идут недостаточно эффективно и необходимы конструктивные доработки данного аппарата, которые обеспечили бы более глубокую степень изъятия органики и соединений азота.

Выводы

1. Определяющее воздействие на кинетику биологического окисления сточных вод в аэротенках оказывают состав, свойства активного ила, условие обеспечения его углеродным питанием и кислородом, а также интенсивность массообмена в системе «пузырек воздуха – иловая смесь».

2. Обработка активного ила электрическим током с малыми удельными энергозатратами позволяет существенно увеличить дегидрогеназную активность микроорганизмов и улучшить условия протекания процесса биологической очистки стоков в аэротенке.

3. Одним из наиболее актуальных решений проблемы интенсификации биологической очистки сточных вод в аэротенках является обработка возвратного активного ила в электрогидродинамических установках (ЭГДУ), где можно обеспечить условие для быстрого насыщения иловой жидкости кислородом воздуха с одновременной активацией микроорганизмов электрическим током при минимальных эксплуатационных затратах.

4. Является целесообразным нахождение новых конструктивных решений и технологических режимов работы электрогидродинамических установок, обеспечивающих увеличение степени электроактивации возвратного ила и насыщения его кислородом воздуха, по сравнению с ранее разработанными промышленными аппаратами.

2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ВОЗВРАТНОГО ИЛА АЭРОТЕНКОВ

2.1. Регенерация активного ила и условия, определяющие необходимость ее осуществления

При оптимизации процесса биологической очистки одним из основных вопросов является установление необходимости регенерации активного ила.

Несмотря на широкое распространение технологических схем с отдельной регенерацией активного ила, вопрос о необходимой степени регенерации решается, как правило, на основе общих соображений о преимуществах и недостатках систем с регенерацией и эмпирических данных. Такое положение связано прежде всего с отсутствием в настоящее время ясных представлений о биохимической функции регенерации ила.

В большинстве случаев регенераторы активного ила рассматриваются как сооружения, обеспечивающие восстановление сорбционно-окислительных свойств активного ила в результате доокисления ранее сорбированных органических загрязнений. Однако исследования ряда авторов не подтверждают такой трактовки.

Установлено, что количество сорбируемого клеткой вещества относительно невелико и процесс потребления микроорганизмами питательного вещества происходит значительно интенсивней, чем скорость притекания его к микробной клетке [7, 32, 47]. Поэтому питательное вещество не может находиться на поверхности клетки столь длительное время, в течение которого активный ил пребывает во вторичном отстойнике и регенераторе.

Согласно экспериментальным данным, полученным М.А. Евилевичем [25], основным механизмом изъятия органических веществ на всех этапах процесса биологической очистки является окислительная деструкция, а не сорбция их на поверхности активного ила.

Как известно, в хлопке активного ила процессы образования новой биомассы, автолиза (разложения) старой биомассы и окисления продуктов автолиза протекают параллельно.

На начальной стадии процесса очистки в аэротенке имеется избыток субстрата, и в связи с этим происходит быстрое образование новой биомассы. При этом благодаря большому количеству легкоокисляемых веществ в субстрате окисление продуктов автолиза, представленных главным образом трудноокисляемыми высокомолекулярными соеди-

нениями, отстает от процесса автолиза, что приводит к накоплению автолиза.

На последующих этапах по мере истощения субстрата на окисление продуктов автолиза расходуется все большее количество кислорода, и скорость их окисления уравнивается скоростью автолиза, а затем превосходит ее. Таким образом, на заключительных стадиях процесса происходит снижение содержания продуктов автолиза. Очевидно, что для обеспечения стационарного состояния активного ила необходимо, чтобы количество продуктов автолиза в конце процесса снизилось до первоначального уровня. При установившемся режиме работы сооружений более высоким нагрузкам, или более низкому возрасту активного ила, будет соответствовать повышенное содержание автолизата в системе. Это может служить одним из объяснений изменения седиментационных свойств активного ила в зависимости от его возраста.

В регенераторе, где имеет место низкая концентрация легкоокисляемого субстрата при повышенной концентрации активного ила, происходят интенсивное окисление продуктов автолиза и одновременно с этим дальнейшее окисление трудноокисляемой части загрязнений сточной воды. Таким образом, одна из наиболее важных функций регенерации состоит в более полном окислении высокомолекулярных соединений (прежде всего образующихся в процессе автолиза), благодаря чему обеспечивается восстановление первоначального состава ила, соответствующего условиям наибольшей активности для данных адаптационных условий. Таким образом, можно сделать вывод об увеличении числа жизнеспособных бактерий в регенерированном иле.

Подобное явление, в частности, наблюдала О.Т. Болотина при исследовании влияния регенерации на активный ил [7]. Было отмечено увеличение в активном иле числа жизнеспособных бактерий *Zoogloea ramigera* с 14 570 до регенерации до 22 320 после регенерации. Такое значимое увеличение может быть объяснено следующими причинами. В процессе очистки сточных вод в аэротенках-вытеснителях микроорганизмы активного ила проходят определенный цикл развития от «молодости» к «старости». Известно, что микробы, которые проходят такой цикл развития, в конце его образуют особые покоящиеся или репродуктивные формы, которые при попадании в среду, богатую питательными веществами, дают начало новому поколению микробов [26]. Однако, как указывал акад. Н.Д. Иерусалимский, необходимо учитывать, что состав бактериальной культуры никогда не бывает однородным и отдельные клетки могут оказываться на разной стадии развития [28, 29]. Поэтому в конце очистки некоторая часть микроорганизмов

может еще не закончить своего цикла развития, и, так как физиологическое развитие клеток необратимо, при возвращении их в начало аэротенка на среду, богатую питательными веществами, т.е. не соответствующую их фазе развития, они отмирают. Введение регенератора, в котором отсутствуют питательные вещества, позволяет закончить таким клеткам цикл развития; в результате при той же массе активного ила число жизнеспособных микробиальных клеток оказывается большим, чем в нерегенерированном иле, что и ведет к повышению общей скорости окисления.

Следует также отметить, что некоторые специалисты не разделяют положительной оценки роли регенерации активного ила, считая, что после пребывания ила в регенераторе, где нет его контакта с очищаемой водой, потребуется определенная реадаптация ила в аэротенке к поступающим загрязнениям, экономия в объемах за счет высокой дозы ила в регенераторе будет сведена на нет при полной биологической очистке сточной воды.

Механизм активации и частичной регенерации возвратного ила при его обработке в смеси с воздухом в электрогидродинамическом устройстве может быть объяснен на основе анализа внутреннего строения хлопков активного ила. Результаты электронной микроскопии хлопков ила показывают, что хлопок активного ила неоднороден и состоит из отдельных скоплений бактерий (клонов), разделенных прослойками биополимера. Размер отдельных клонов составляет около 10 мкм, размер самого хлопка активного ила достигает 100 мкм. Трудноокисляемые органические вещества и продукты автолиза, оставшиеся в хлопке активного ила после аэротенка и вторичного отстойника, образуют внеклеточные накопления. Можно предположить, что вокруг каждой сорбированной частицы образуется локальная зона с дефицитом кислорода и избытком продуктов анаэробного разложения частицы, угнетающих процессы биохимического окисления. При традиционной регенерации активного ила происходят разложение трудноокисляемых органических частиц и окисление продуктов их распада, что приводит к повышению его активности.

Можно считать, что при интенсивном перемешивании хлопков активного ила в среде с повышенным содержанием кислорода токсичные соединения – продукты анаэробного распада трудноокисляемых органических частиц – выделяются из внеклеточного полимера и выводятся из хлопка наружу, активный ил как бы подвергается “проветриванию”. Таким образом, хлопок активного ила восстанавливает свою окислительную способность, не разлагая токсичные соединения,

как в процессе традиционной регенерации, а выделяя их из себя, что требует значительно меньших затрат.

В каждом конкретном случае однозначный ответ о целесообразности осуществления регенерации активного ила может быть получен только по результатам экспериментов или, при их отсутствии, по нормативным документам. Например, в соответствии с рекомендациями СНиП [55] регенерация не предусматривается в том случае, если БПК_{полн} очищенных сточных вод не превышает 150 мг/л. Никифорова Л.О., исследуя свойства активного ила при биологической очистке сточных вод Новогорьковского НПЗ, пришла к выводу, что целесообразность проведения регенерации зависит от конструкции аэротенка и может быть определена непосредственным измерением электрокинетического потенциала ила при его отстаивании [41]. Так, при использовании типового аэротенка, имеющего три коридора, первый из которых – регенератор, второй – смеситель, третий – вытеснитель, изменение электрокинетического потенциала иловой смеси при гравитационном отстаивании в радиальных отстойниках протекает по кривой 1 (рис. 2.1). При отстаивании такой активный ил имеет тенденцию к увеличению абсолютного значения электрокинетического потенциала поверхности и через 2 – 2,5 часа изменяет знак (-) на (+). Это означает, что при возврате в аэротенк необходимо предусматривать регенерацию.

ξ , мВ

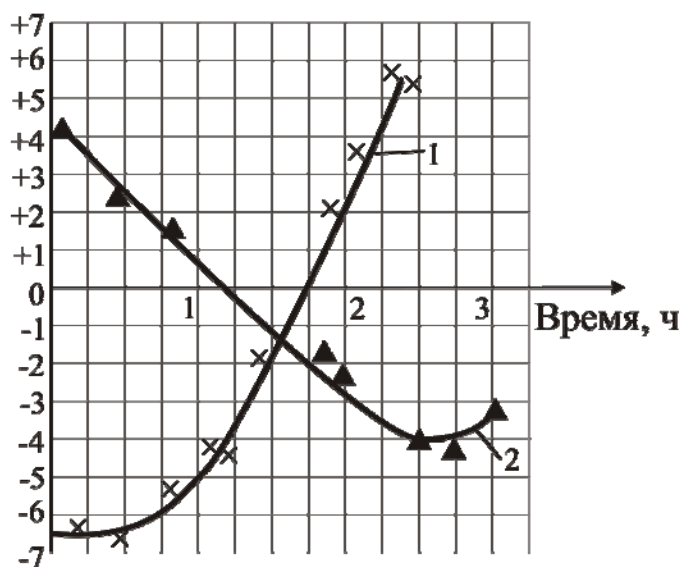


Рис. 2.1. Кинетика изменения поверхностных свойств активного ила при отстаивании в зависимости от типа аэротенка

Иначе происходят изменения поверхностных свойств ила в аэротенках, работающих также по типовой схеме (регенератор и два коридора-вытеснителя), где поступление очищаемых стоков осуществляется в начале второго коридора. В этом случае для иловой смеси при отстаивании характерно снижение электрокинетического потенциала и смена знака (+) на (-). Единственным ограничением является соблюдение времени отстаивания, которое не должно составлять менее 2 часов (см. рис. 2.1, кривая 2). Такой активный ил обладает хорошей адсорбционной активностью и может быть использован в аэротенках без предварительной регенерации. Та же часть избыточного ила, которая направляется на флотационное уплотнение, как правило, хорошо образует флотокомплексы и легко удаляется с флотопеной.

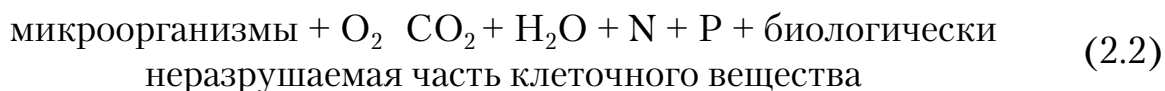
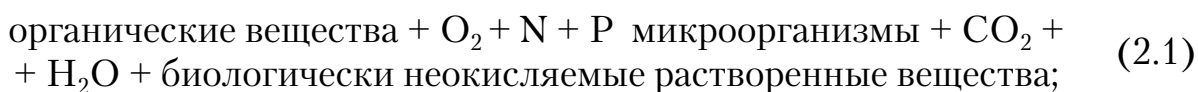
С другой стороны, как уже отмечалось в подразд. 1.1, в ходе исследований, проведенных А.А. Бондаревым и Л.О. Никифоровой [12], была установлена прямая связь между величиной электрокинетического потенциала активного ила и значением илового индекса, определяющего седиментационные свойства иловой смеси (см. рис. 1.2 и 1.3). Таким образом, эффективность регенерации, а также целесообразность ее осуществления можно оценить по седиментационным характеристикам активного ила, полученным в лабораторных условиях в процессе отстаивания биологически очищенных сточных вод.

2.2. Кинетика ферментативных реакций

биологического окисления загрязнений активным илом.

Влияние начальных условий на процесс биологической очистки

Механизм биологического окисления в аэробных условиях гетеротрофными бактериями может быть представлен следующей схемой [68].



Реакция (2.1) показывает окисление исходных органических загрязнений сточных вод и образование новой биомассы. Реакция (2.2) описывает процесс эндогенного окисления клеточного вещества, который происходит после использования внешнего источника питания, т.е. самоокисления активного ила.

Механизм изъятия активным илом органических веществ из сточных вод схематично может быть представлен следующими этапами [32, 72]:

1) массопередача органического вещества и кислорода из жидкости к поверхности хлопка активного ила;

2) массопередача органического вещества и кислорода с поверхности хлопка активного ила к поверхности клетки;

3) диффузия через полупроницаемые мембраны клетки либо самого вещества, либо продуктов гидролиза этого вещества, способных проникать через мембраны внутрь клетки;

4) метаболизм диффундировавших в клетку продуктов с выделением энергии и синтезом нового клеточного вещества.

На первом и втором этапах скорость протекания процесса определяется законами диффузии того или иного вещества в жидкости и в значительной степени зависит от гидродинамических условий в аэротенке. Эффективное и постоянное перемешивание смеси активного ила и сточной воды в аэротенке, обеспечивающее равномерное распределение биомассы и растворенного кислорода по всему объему сооружения, создает оптимальные условия для подведения органического субстрата и кислорода к поверхности клеток микроорганизмов [64].

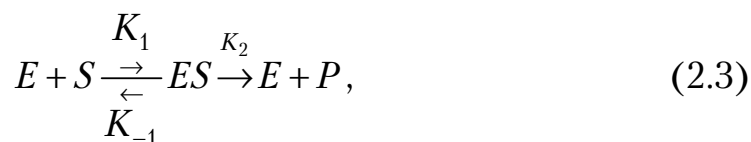
На третьем этапе перенос вещества от поверхности клетки внутрь ее осуществляется либо путем последовательного растворения вещества в веществе стенки и цитоплазматической мембраны, благодаря чему оно диффундирует внутрь клетки, либо путем присоединения проникающего вещества к специфическому белку-переносчику, находящемуся в мембране и вводящему это вещество внутрь клетки, после чего белок высвобождается для совершения нового цикла переноса.

На четвертом этапе происходит метаболическое превращение иловой клеткой органических веществ частично в такие конечные продукты, как нитраты, сульфаты, двуокись углерода, вода (процесс окисления органических веществ), частично в новое вещество бактериальной клетки (процесс синтеза бактериальной массы).

В клетках микроорганизмов активного ила одновременно протекает множество реакций, которые катализируются различными ферментами, тесно связанными между собой и образующими сложные полиферментные системы. Особенностью биологических ферментативных систем в клетках является их способность к саморегулированию [13, 70, 72].

При ферментативном катализе на участке клетки, называемом активным центром, происходит контакт фермента с субстратом, в результате чего образуется фермент-субстратный комплекс (ФСК), который после внутримолекулярной перегруппировки образует ком-

плекс фермента с продуктами реакции. Далее происходит диссоциация этого комплекса с образованием свободного фермента и продуктов реакции. В общем виде последовательность этих превращений для наиболее простого случая записывается в следующем виде [25, 70]:



где E – фермент;
 S – субстрат;
 ES – ФСК;
 P – продукт реакции;
 K_1, K_{-1}, K_2 – константы скорости.

В целом макромолекулы ферментов имеют широкий спектр активности, благодаря чему одновременно протекает большое количество разнообразных реакций, идущих в строго определенной последовательности. В отличие от химических катализаторов белковая природа ферментов обуславливает изменение их активности в зависимости от создаваемых условий. При этом скорость катализируемой ферментом реакции увеличивается не пропорционально концентрации субстрата, а с постепенным замедлением.

Согласно гипотезе Михаэлиса и Ментена зависимость скорости ферментативной реакции от концентрации субстрата выглядит следующим образом [25, 68, 70]

$$V = V_m \frac{S}{S + K_s}, \quad (2.4)$$

где K_s – константа насыщения,

$$K_s = \frac{K_{-1} + K_2}{K_1}; \quad (2.5)$$

V_m – максимальная скорость реакции, достигаемая при насыщении фермента субстратом,

$$V_m = K_2 E_0; \quad (2.6)$$

здесь E_0 – начальная концентрация фермента,

$$E_0 = E + ES \quad (2.7)$$

(E, ES – соответственно концентрации свободного фермента и ФСК).

В работах Моно и Н.Д.Иерусалимского было показано, что скорость роста биомассы μ описывается уравнением, аналогичным выражению (2.4) [68, 70]:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{S + K_s} = \frac{dx}{dt}, \quad (2.8)$$

где K_s – константа;

μ_{\max} – максимальная скорость роста;

x – концентрация микроорганизмов.

Взаимосвязь между скоростью потребления субстрата и скоростью роста биомассы часто выражается зависимостью

$$\frac{dx}{dt} = y \frac{dS}{dt}. \quad (2.9)$$

С учетом уравнения (2.8) зависимость для скорости потребления субстрата записывается в виде:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{y} \frac{\mu_{\max} \cdot S}{K_s + S}, \quad (2.10)$$

где y – коэффициент пропорциональности, характеризующий выход биомассы на единицу потребленного субстрата.

Одним из основных факторов, влияющих на жизнедеятельность микроорганизмов активного ила, является снабжение кислородом. В процессе очистки сточных вод скорость растворения кислорода должна быть по крайней мере равна скорости потребления его активным илом, иначе может произойти временное или местное исчерпание содержания кислорода, что приводит к нарушению обмена веществ клеток и снижению скорости окисления загрязнений. Скорость потребления кислорода активным илом мало зависит от концентрации растворенного кислорода, если последняя остается выше некоторой критической величины, принимаемой обычно равной 2 мг/л [32, 68, 70]. Скорость окисления почти не снижается даже при концентрации кислорода 1 мг/л, однако в связи с тем, что при отделении ила от воды на вторичных отстойниках теряется растворенного кислорода от 1 до 2 мг/л, минимальный уровень растворенного кислорода установлен в 2 мг/л, чтобы исключить длительное пребывание ила в анаэробных условиях.

Освобождение химической энергии при окислительных процессах происходит в три фазы: гидролиз, гликолиз и окисление в цикле трикарбоновых кислот [69]. Причем основная часть энергии освобождается в двух последних фазах, в которых до 40 % химической энергии

превращается в тепло, а остальная часть используется для аккумуляции энергии в процессе АТФ.

В аэробных условиях для образования и постоянного накопления АТФ в клетках очень важны процессы окислительного обмена или снабжения клеток кислородом – процессы клеточного дыхания, осуществляемого с помощью комплекса специализированных ферментов, образующих так называемую дыхательную цепь.

В окислительно-восстановительных реакциях, протекающих в клетках в процессе дыхания, источником электронов служат молекулы питательных веществ; их конечным акцептором, как было показано в подразд.1.1, является молекулярный кислород, который может вовлекаться в метаболизм клетки по трем направлениям:

- 1) в качестве конечного акцептора электронов в дыхательной цепи;
- 2) прямым внедрением в окислительный субстрат;
- 3) непосредственным акцептированием водорода дегидрогеназ (помимо дыхательной цепи) с образованием перекиси водорода.

Кислород является одним из важнейших компонентов, снабжающих микроорганизмы энергией для биосинтеза. Молекулярный кислород не только участвует в конечном окислении субстратов, но и оксигенирует большое число органических соединений на самых начальных стадиях их метаболизма, что обеспечивает возможность их использования микроорганизмами [24, 47]. При повышении концентрации кислорода в аэротенке наблюдается ускорение процессов окисления и одновременное снижение прироста биомассы активного ила. Установлено, что повышение концентрации кислорода может вызвать перестройку процесса окислительного обмена, при котором активизируются протеазные и оксигеназные системы, образующие в качестве промежуточного продукта перекиси. В свою очередь, перекиси индуцируют пероксидазные и каталазные системы, где перекиси используются для окисления разнообразных субстратов, при этом повышается общая скорость окисления.

Положительное влияние повышенных концентраций растворенного кислорода на скорость окисления наблюдается не только при активации перекисного пути свободного окисления. Предполагается, что в этих условиях возможно частичное разобщение сопряженности окисления с фосфорилированием и существенное повышение активности обоих путей окисления.

Вследствие сопряжения окисления и фосфорилирования кислород оказывает влияние на энергетическом уровне практически на все протекающие в клетках процессы, которые катализируются ферментами. Отсюда вытекает, что математически влияние кислорода должно

описываться одним из уравнений двухсубстратных ферментативных реакций. Конкретный вид этого уравнения установлен после анализа экспериментальных данных исследований, выполненных НИИ ВОДГЕО [54, 70]:

$$V = \frac{V_{\max} \cdot S \cdot C_k}{K_s \cdot C_k + K_k S + S \cdot C_k}, \quad (2.11)$$

где V – удельная скорость окисления загрязнений, мг/(г·ч);

V_{\max} – максимальная скорость окисления загрязнений, мг/(г·ч);

S – концентрация загрязнений, мг/л;

C_k – концентрация растворенного кислорода, мг/л;

K_s и K_k – константы насыщения для субстрата и кислорода, мг/л.

Из уравнения (2.11) и рис.2.2 следует, что наибольшее влияние концентрации растворенного кислорода наблюдается при отсутствии лимитирования процесса субстратом S .

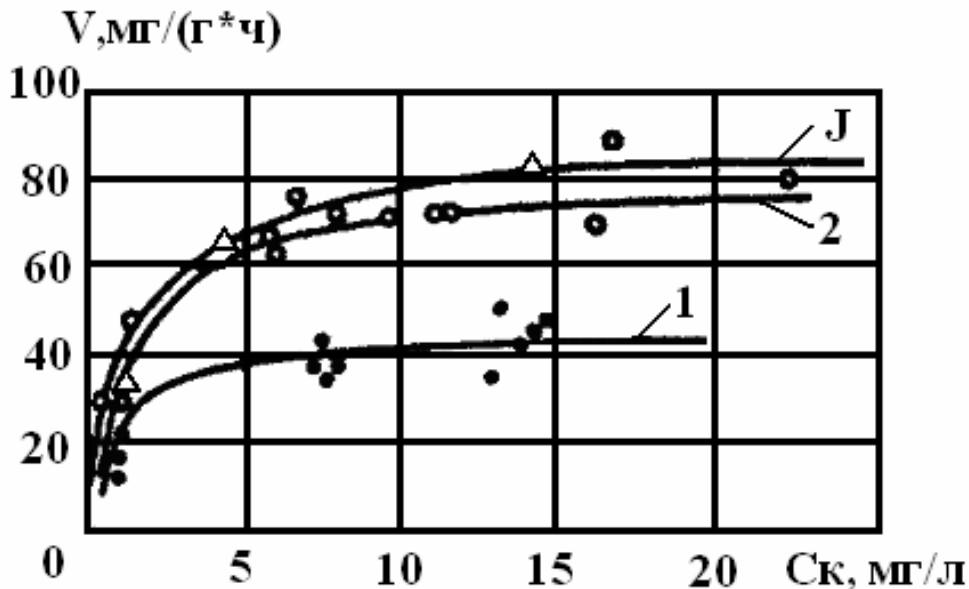


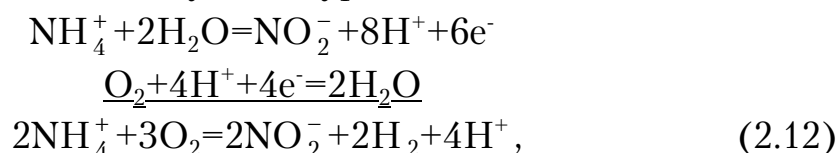
Рис.2.2. Зависимость удельной скорости потребления кислорода от концентрации растворенного кислорода при различной концентрации загрязнений [70]:

1 – $S=94$ мг ХПК/л; 2 – $S=360$ мг ХПК/л; 3 – $S=450$ мг ХПК/л

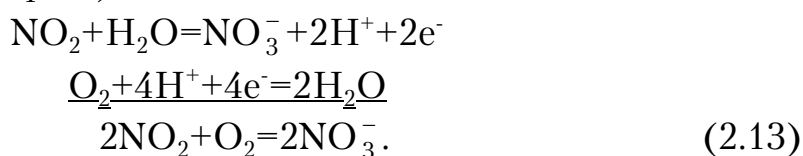
С уменьшением S влияние C_k заметно снижается; поэтому максимальное повышение скорости биохимического окисления за счет увеличения C_k возможно при неполной очистке концентрированных сточных вод или на начальных этапах биологической очистки в аэротенке-вытеснителе, когда концентрации органических загрязнений еще велики.

Представляет интерес решение задачи насыщения активного ила кислородом воздуха. Кроме окисления органических примесей в аэро-

тенке проходит процесс нитрификации (окисление аммонийного азота до нитритов и нитратов), который осуществляется автотрофными микроорганизмами. Необходимую для своего существования энергию эти микроорганизмы получают в результате окислительно-восстановительной реакции, катализируя ее посредством своего ферментативного аппарата. Реакция окисления аммонийного азота в нитриты (1 фаза нитрификации) выражается следующим уравнением:



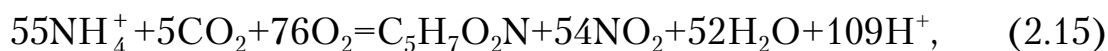
а нитритов в нитраты (II фаза) –



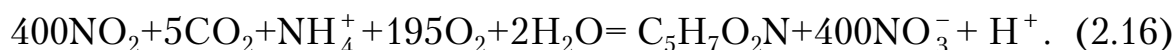
Если предположить, что $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ является эмпирическим клеточным веществом для нитрифицирующих бактерий, то реакция ассимиляции углекислоты будет следующей:



или для I фазы



для II фазы



Из приведенных уравнений следует, что при окислении 20 мг/л аммонийного азота синтезируется около 3,3 мг/л клеточной массы. Кислород, потребленный на этот синтез, будет составлять 84 мг/л. Около 2 % начального количества азота идет на образование клеточной массы, а остальное количество окисляется в нитратный азот.

В технологии биологической очистки сточных вод нитрификация наиболее ярко выражена в аэротенках, работающих на полную очистку, и представляет собой показатель санитарной оценки процесса очистки.

В активном иле нитрификаторы находятся в ассоциации с гетеротрофной микрофлорой. Усиленное поглощение кислорода гетеротрофной микрофлорой в процессе окисления органических веществ создает условия, при которых нитрификаторы находятся в невыгодном положении. Окисление аммонийного азота нитрификаторами начинается после того, как органические вещества использованы, деятель-

ность гетеротрофной микрофлоры вышла на стационарный режим и в аэрируемой смеси имеется растворенный кислород.

Таким образом, создавая условия, обеспечивающие интенсивное окисление органических примесей гетеротрофными микроорганизмами, можно ускорить начало процесса нитрификации автотрофными бактериями, что, в свою очередь, приведет к более глубокому удалению аммонийного азота при неизменном времени биологической очистки сточных вод в аэротенке. При использовании в качестве аэрационного сооружения аэротенка-вытеснителя особый интерес представляет создание благоприятных условий жизнедеятельности гетеротрофов на начальных участках первого коридора, где наблюдается максимальный дефицит кислорода при избытке углеродного питания. Решение данной проблемы достигается за счет интенсификации массообмена в системе «пузырек воздуха – жидкость – бактериальная клетка ила» при обеспечении насыщения жидкой фазы достаточным количеством кислорода. Большое значение при этом также имеет предварительная обработка возвратного ила аэротенков в аппаратах с высоким массообменными характеристиками.

Процесс транспорта молекул кислорода к месту протекания ферментативных реакций, преимущественно реализуемых внутри бактериальных клеток, осуществляется в несколько этапов. Первым этапом является перенос кислорода из подаваемого системой аэрации газа в жидкую фазу, описываемый уравнением массопередачи [34]:

$$\frac{dm}{dt} = K_L A (C_s - C), \text{ г/ч}, \quad (2.17)$$

где $\frac{dm}{dt}$ – поток кислорода в единицу времени; г/ч;

K_L – пленочный коэффициент массопередачи, м/ч;

A – площадь межфазового контакта, м²;

C_s – равновесная концентрация кислорода в иловой смеси (концентрация насыщения), г/м³;

C – фактическое значение концентрации кислорода в иловой смеси, г/м³.

Коэффициент массопередачи является функцией гидродинамической обстановки вблизи поверхности контакта фаз жидкость – воздух, площади контакта и физических свойств контактирующих фаз. При этом лимитирующее влияние на величину K_L оказывает перенос в фазе с большей вязкостью и меньшим коэффициентом диффузии. В системе вода – воздух лимитирующим оказывается стадия переноса в

жидкой фазе. На практике вместо пленочного коэффициента массопередачи используют объемный коэффициент массопередачи K_{La} , с^{-1} :

$$K_{La} = K_L \frac{A}{W}, \quad (2.18)$$

где W – аэрируемый объем, м^3 .

Вторым этапом транспорта кислорода является его распределение в аэрационном объеме. Этот процесс осуществляется в результате усреднения концентрации кислорода в аэрируемом объеме под действием турбулентного перемешивания.

Третий этап заключается в транспорте кислорода с поверхности хлопка активного ила непосредственно к клетке.

Скорость каждого из этапов переноса кислорода может быть различной и лимитирующей в данной системе оказывается стадия переноса, характеризующаяся минимальной скоростью.

Стадией, лимитирующей скорость переноса кислорода для биологических систем с хлопками активного ила, является этап, предусматривающий процессы массопередачи внутри хлопка активного ила.

Тогда скорость массопередачи кислорода с поверхности хлопка активного ила можно выразить формулой

$$\frac{dm}{dt} = K_{La} W_u (C - C_u), \text{ г/ч}, \quad (2.19)$$

где K_{La} – объемный коэффициент массопередачи, ч^{-1} ;

C_u – средняя концентрация кислорода на границе раздела фаз «поверхность хлопка – жидкость», мг/л ;

W_u – суммарный объем, занимаемый хлопками активного ила в 1 м^3 жидкости.

Скорость массопередачи кислорода и скорость протекания процесса биохимического окисления напрямую зависят от размера хлопка активного ила. Чем меньше хлопок активного ила, тем больше поверхность раздела фаз «поверхность хлопка – жидкая фаза», тем более короткий путь от поверхности хлопка до отдельной клетки. Размеры хлопка активного ила зависят от гидродинамической обстановки в жидкости.

Эксперименты, проведенные М.А. Евилевичем, показали, что скорости биоокисления органических веществ свободноплавающими микроорганизмами в несколько десятков раз превосходят аналогичные показатели для активного ила. Формирование хлопка активного ила обуславливается динамическим равновесием между явлениями сегрегации (разрушение хлопков под действием турбулентных пульсаций) и

агрегации (при столкновениях хлопков), а также интенсивностью процессов автолиза.

Существует мнение, что повышение турбулентности в системе приводит к разрушению хлопков и ухудшению седиментационных свойств активного ила. Такая картина, однако, может иметь место лишь в условиях отсутствия адаптации к данной интенсивности перемешивания. Эксперименты, выполненные в условиях адаптации, показывают, что при значениях удельной мощности от 10 до 500 Вт/м³ отрицательного влияния турбулентности на иловый индекс не наблюдается (рис. 2.3). Это подтверждается также опытом эксплуатации промышленных аэротенков с механическими и пневмомеханическими аэраторами.

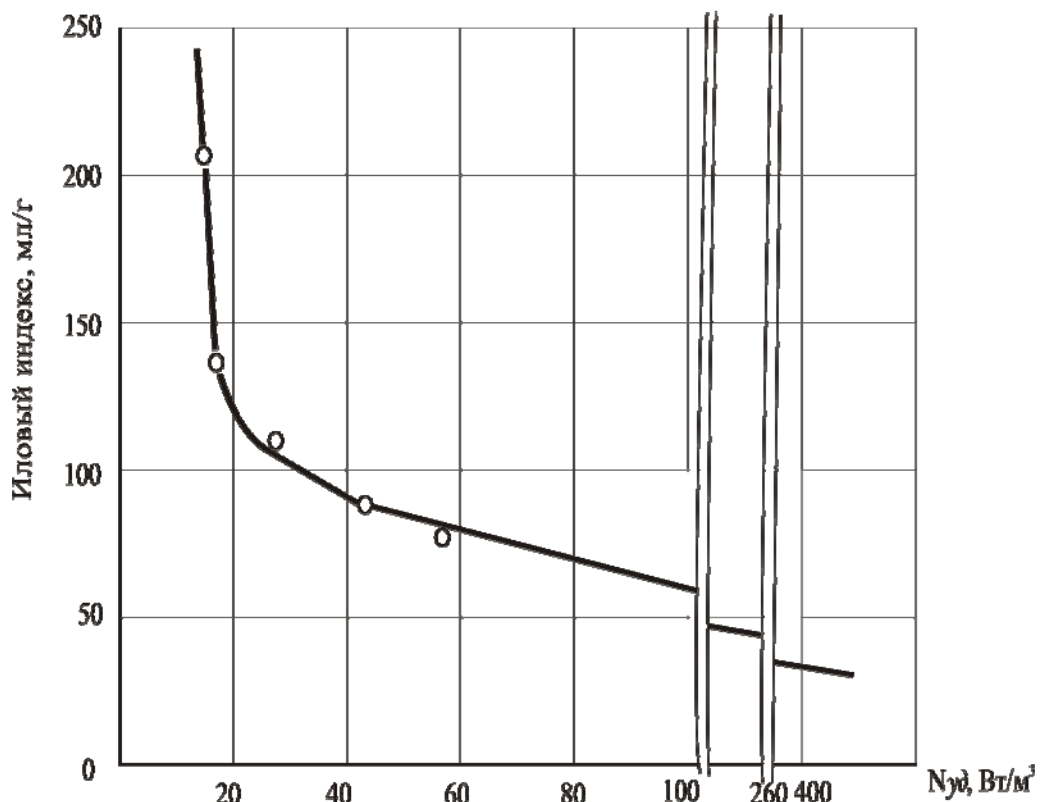


Рис. 2.3. Влияние удельной мощности перемешивания на величину илового индекса [25]

Как видно из приведенных данных, турбулентность потока не только существенно влияет на скорость окисления, но и улучшает седиментационные свойства активного ила.

2.3. Теоретическое обоснование конструкции электрогидродинамической установки для обработки возвратного ила аэротенка-вытеснителя

Перекачивание возвратного ила в голову аэротенков на станциях биологической очистки сточных вод, как правило, производится центробежными насосами или эрлифтными установками. При перекачивании активного ила центробежными насосами избыточная энергия потока не используется и безвозвратно теряется.

В соответствии с предложенной в диссертации С.Н. Хазова [61] технологией поток возвратного ила, подаваемый рециркуляционным насосом, перед попаданием в аэротенк проходит эжектор и электрогидродинамическое устройство (ЭГДУ). При перекачивании через эжектор поток подсасывает атмосферный воздух, в результате чего на выходе из аппарата образуется водовоздушная смесь. Обработка водовоздушной смеси в электрогидродинамическом устройстве позволяет интенсифицировать процесс массообмена между потоком и кислородом воздуха, а электрообработка повышает активность возвратного ила.

Как уже отмечалось в подразд. 1.2.2, недостатком ЭГДУ с точки зрения гидродинамики пузырьков является весьма низкая интенсивность перемешивания пузырьков воздуха с активным илом из-за отсутствия местных сопротивлений, обеспечивающих достаточный уровень массообмена в стволе ЭГДУ. Кроме того, наличие струйного эжектора 1 перед ЭГДУ 3 (см. рис. 1.16) приводит к значительному увеличению потерь напора и соответствующему снижению (до 20-25 %) подачи рециркуляционного ила центробежным насосом, что, в свою очередь, уменьшает дозу активного ила и ухудшает кинетику окисления загрязнений в аэротенке.

С учетом указанных недостатков, новая конструкция ЭГДУ должна отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать подачу в поток возвратного активного ила максимально возможного количества кислорода воздуха без ухудшения условий работы центробежного рециркуляционного насоса;
- создавать режим интенсивного перемешивания потока иловой смеси с воздухом для обеспечения высоких массообменных характеристик системы «пузырек воздуха – жидкость – бактериальная клетка ила»;
- осуществлять активацию клеток ила электрическим током с помощью эффективно действующей и удобной в эксплуатации электродной системы.

Первое требование может быть выполнено за счет подачи сжатого воздуха из штатной системы аэрации непосредственно в корпус ЭГДУ

при условии отсутствия во входной камере аппарата значительного противодавления воды. Устройство в верхней части ЭГДУ центрального стержневого электрода позволит увеличить плотность тока при электрообработке иловоздушной смеси, а также существенно упростить конструкцию и облегчить эксплуатацию установки.

Исходя из вышеуказанных конструктивных требований, корпус ЭГДУ должен быть функционально разделен на две части или зоны (рис. 2.4) – зоны организации вращательного движения иловой жидкости и подачи сжатого воздуха (верхняя зона между сечениями 1-1 и 2-2) и зоны смешения иловой жидкости с воздухом, где устанавливается центральный опорный стержень с дисками для турбулизации потока (нижняя часть ЭГДУ между сечениями 2-2 и 3-3). Электрообработку иловой смеси целесообразно производить на границе верхней и нижней зон, где начинается процесс интенсивного перемешивания двух фаз. Для обеспечения подачи более компактной струи на центральные диски нижней части аппарата на границе раздела двух зон устраивается разделительная диафрагма.

Конструктивные параметры гидродинамической установки определяются прежде всего гидравлическим расчетом.

2.3.1. Гидравлический расчет установки

Целью гидравлического расчета ЭГДУ является определение допустимой величины давления $p_{ц}$ жидкости в центральной части входной камеры 2 (см. рис. 2.4), а также нахождение суммарных потерь давления, создаваемых при движении иловой смеси в корпусе ЭГДУ (входной камере 2 и стволе 3).

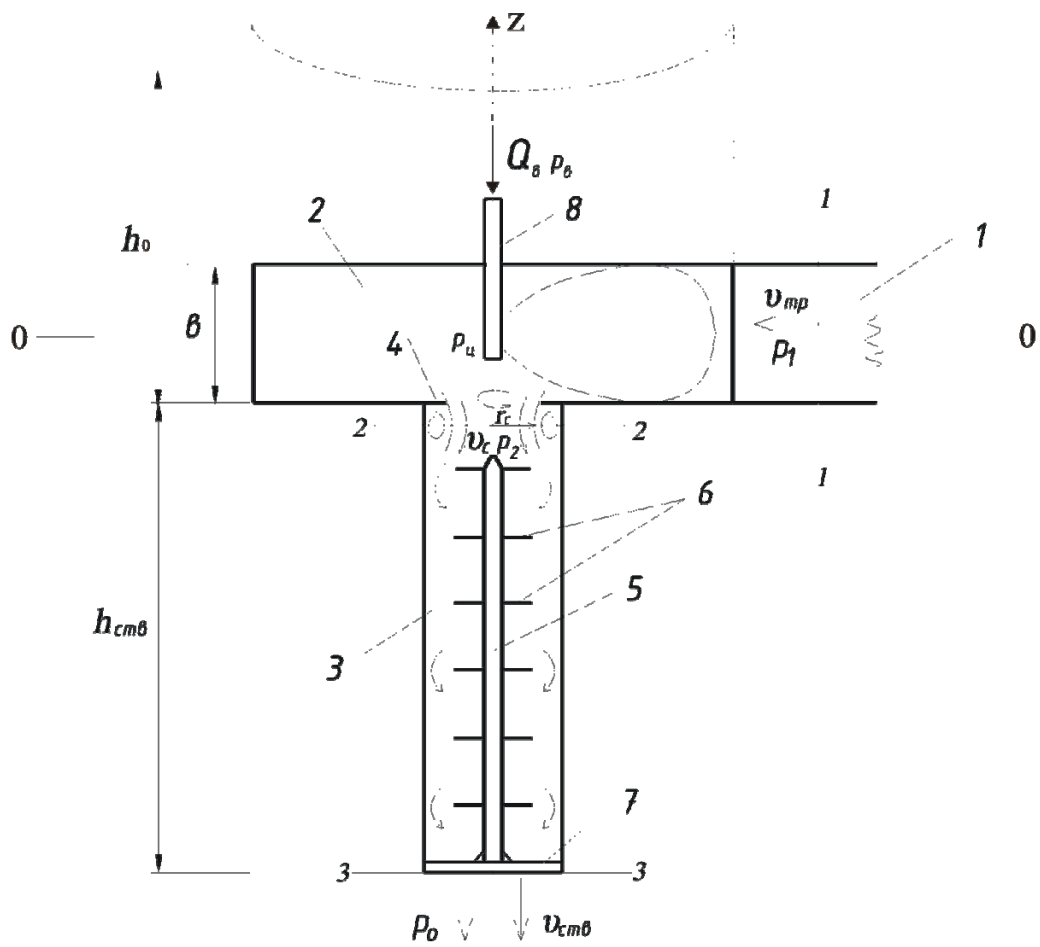
При напорном вихревом движении иловой жидкости во входной камере свободная поверхность 8 потока будет иметь форму параболы, уравнение которой в вертикальной плоскости имеет вид [35]

$$Z = h_0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g}, \quad (2.20)$$

где h_0 – условная глубина жидкости от днища входной камеры до свободной поверхности при $r = 0$;

r – радиус, изменяющийся от 0 в центре до $r_{вх}$ на цилиндрической стенке входной камеры;

ω – осредненная угловая скорость вращения потока жидкости во входной камере.



План в сечении 0-0

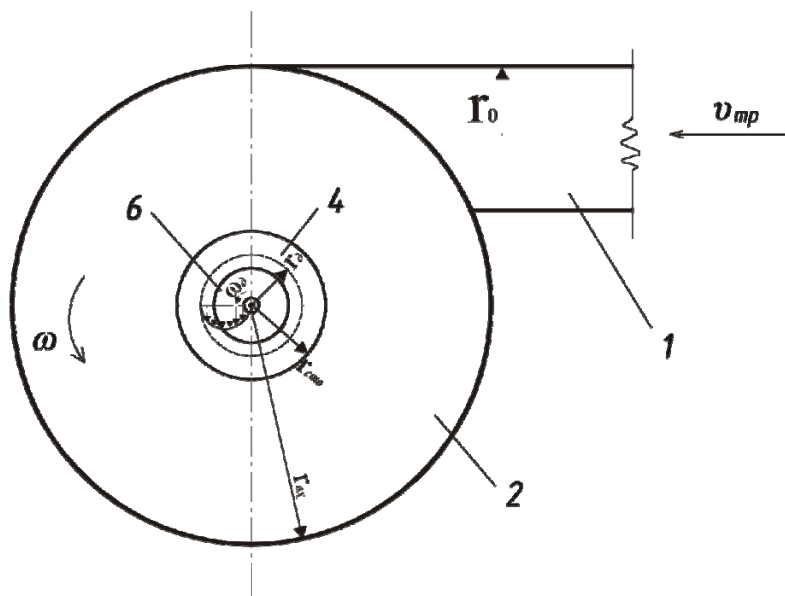


Рис. 2.4. Расчетная схема для определения гидродинамических характеристик аппарата обработки возвратного ила:
 1 – подающий трубопровод; 2 – входная камера; 3 – ствол;
 4 – разделительная диафрагма; 5 – опорный стержень;
 6 – внутренние диски; 7 – швеллеры; 8 – патрубок подачи воздуха

Одним из условий нормальной работы ЭГДУ является обеспечение подачи в центральную часть ЭГДУ требуемого расхода $Q_{\text{в}}$ сжатого воздуха из штатной системы аэрации аэротенка, находящейся под давлением $p_{\text{в}}$. Данное условие может быть выражено неравенством

$$p_{\text{в}} - p_{\text{ц}} \geq p_{\text{расч}}, \quad (2.21)$$

где $p_{\text{расч}}$ – расчетный перепад давления, при котором обеспечивается подача в ЭГДУ сжатого воздуха с расходом, не меньшим заданного ($Q_{\text{в}}$).

Для определения величины $p_{\text{ц}}$ составим уравнение баланса удельной энергии потока жидкости применительно к сечениям 1-1 (подающий трубопровод) и 2-2 (сжатое сечение потока за разделительной диафрагмой), пренебрегая потенциальной энергией положения:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_{\text{вх}}^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_{\text{с}}^2}{2} + \frac{\omega_{\text{с}}^2 \cdot r_{\text{с}}^2}{2} + \frac{\Delta p}{\rho}, \quad (2.22)$$

где p_1 и p_2 – давления жидкости в сечениях 1-1 и 2-2, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

$v_{\text{вх}}$ и $v_{\text{с}}$ – скорость потока соответственно во входном трубопроводе и в сжатом сечении за диафрагмой, м/с,

$$v_{\text{с}} = v_{\text{вх}} \frac{r_0^2}{r_d^2} \cdot \frac{1}{\varepsilon}, \quad (2.23)$$

здесь r_0 и r_d – радиусы входной трубы и диафрагмы, м;

ε – коэффициент сжатия струи, $\varepsilon \approx 0,64$;

$\omega_{\text{с}}$ – угловая скорость вращения потока в сжатом сечении, 1/с;

Δp – потери давления вследствие сопротивлений, Па.

Средняя окружная скорость вращения потока в сжатом сечении может быть определена по формуле

$$v_{\text{ок}} = \frac{1}{r_{\text{с}}} \int_{r_{\text{с}}} u_{\text{ок}} dr = \omega_{\text{с}} \cdot r_{\text{с}}, \quad (2.24)$$

где $u_{\text{ок}}$ – действительная окружная скорость на радиусе r ($0 \leq r \leq r_{\text{с}}$);

$r_{\text{с}}$ – радиус сжатого сечения за диафрагмой.

С учетом формул (2.22) и (2.24) давление в сжатом сечении будет определяться следующим соотношением:

$$p_2 = (p_1 - \Delta p) - 0,5\rho(v_{\text{с}}^2 + v_{\text{ок}}^2 - v_{\text{вх}}^2). \quad (2.25)$$

Величина Δp является функцией скорости потока $v_{\text{вх}}$, геометрических размеров входной камеры, сопротивления в диафрагме ξ_d и реологических характеристик иловой жидкости.

Величина потерь удельной энергии $\frac{\Delta p}{\rho}$ складывается из потерь энергии

за счет сопротивления по длине потока, движущегося по спирали от сечения 1-1 до входа в диафрагму, а также за счет местных сопротивлений (поворот потока во входной камере и сопротивление диафрагмы). Таким образом, можно записать

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \lambda \frac{l_0}{d_0} \frac{v_{\text{вх}}^2}{2} + \xi_{\text{вх}} \frac{v_{\text{вх}}^2}{2} + \xi_d \frac{v_c^2}{2}, \quad (2.26)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения;

l_0 – длина траектории средней линии потока от сечения 1-1 до входа в диафрагму, $l_0 = f(K_r)$;

$d_0 = 2r_0$ – диаметр подающего трубопровода;

$v_{\text{ств}}$ – скорость потока в стволе ЭГДУ (за диафрагмой); при $r_0 = r_{\text{ств}}$ $v_{\text{ств}} = v_{\text{вх}}$;

$\xi_{\text{вх}}$ и ξ_d – коэффициенты сопротивления при повороте потока в камере и входе в диафрагму, а также в самой диафрагме.

Значения коэффициента λ в общем случае зависят от числа Рейнольдса Re и относительной шероховатости поверхности входной камеры. Для зоны гидравлически гладких труб, а также для переходной зоны ($10^4 < Re < 3 \cdot 10^5$) коэффициент λ можно принять равным 0,015–0,02 [27]. Величину $\xi_{\text{вх}}$ при повороте потока на угол 360° (один полный оборот) вследствие вращения определяем с использованием данных [40, 56]

$$\xi_{\text{вх}} = 0,76 + 6,5 \left(\frac{r_0}{r_{\text{вх}} - r_d} \right)^{3,5}, \quad (2.27)$$

где $r_{\text{вх}}$ – радиус входной камеры.

Коэффициент сопротивления диафрагмы ξ_d является функцией соотношения квадратов радиусов диафрагмы r_d и ствола ЭГДУ $r_{\text{ств}}$. Так как в ЭГДУ обычно принимается $r_{\text{ств}} = r_0$, то $\xi_d = f\left(\frac{r_d^2}{r_0^2}\right) = f(n)$ и изменяется от $\xi_d = 0,18$ при $n = 0,9$ до $\xi_d = 2,34$ при $n = 0,6$ [56].

Оценивая порядок величин сопротивлений, входящих в правую часть формулы (2.26), отметим, что потерями энергии по длине входной камеры можно пренебречь вследствие их малости. Тогда формулу (2.26) с учетом соотношения (2.23) можно переписать в виде

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{v_{\text{вх}}^2}{2} (\xi_{\text{вх}} + \xi_d). \quad (2.28)$$

Подставив полученное выражение для потерь энергии в формулу (2.25), получим окончательную формулу для давления в сжатом сечении:

$$p_2 = p_1 - 0,5\rho \left[v_{\text{вх}}^2 \left(\xi_{\text{вх}} + \xi_d + \frac{r_0^4}{r_d^4 \cdot \varepsilon^2} - 1 \right) + v_{\text{ок}}^2 \right]. \quad (2.29)$$

При установившемся режиме движения потока во входной камере аппарата давление в сжатом сечении p_2 и давление в центральной части камеры на ее оси $p_{\text{ц}}$ будут отличаться друг от друга на величину гидростатического давления, создаваемого жидкостью высотой h ($0 \leq h \leq b$, см. рис. 2.4). Пренебрегая незначительной величиной этого давления, можно допустить примерное равенство $p_{\text{ц}} \approx p_2$. С учетом формулы (2.29) условие (2.21) для обеспечения подачи требуемого расхода воздуха в ЭГДУ запишется в виде

$$p_{\text{в}} - p_1 + 0,5\rho(mv_{\text{вх}}^2 + v_{\text{ок}}^2) \geq p_{\text{расч}}, \quad (2.30)$$

где

$$m = \xi_{\text{вх}} + \xi_d + \left(\frac{r_0}{r_d} \right)^4 \frac{1}{\varepsilon^2} - 1. \quad (2.31)$$

Окружная скорость в створе сжатого сечения за диафрагмой определяется по формуле

$$v_{\text{ок}} = K_v \cdot K_r \cdot v_{\text{вх}} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}, \quad (2.32)$$

где K_v – коэффициент скорости, характеризующий сопротивление жидкости при вращательном движении, $K_v = f(K_r)$;

K_r – геометрический коэффициент, $K_r = \frac{r_{\text{вх}}}{r_d}$. По данным [61],

$$K_r = 3-5.$$

По результатам экспериментальных исследований $K_v = 0,95$.

Формулы (2.30)–(2.32) позволяют произвести вычисление основных конструктивных параметров вихревых аппаратов, а также определить допустимое значение p_1 при заданных размерах установки. Например, для критического случая подачи воздуха в корпус аппарата ($p_{\text{расч}} = 0$, $p_{\text{в}} = p_2$) максимально допустимое давление жидкости на входе p_1 из формулы (2.30) будет определено как

$$p_1^{\text{доп}} = p_{\text{в}} + 0,5\rho(mv_{\text{вх}}^2 + v_{\text{ок}}^2). \quad (2.33)$$

При заданных значениях $p_2 = p_{\text{в}} = 0,5 \cdot 10^5$ Па (для типовых воздуходувок, используемых в системах штатной аэрации аэротенков) $\rho = 1000$ кг/м³,

$d_0=0,15$ м, $r_0=0,075$ м, $v_{\text{вх}}=1,5$ м/с (при расходе возвратного ила $Q_{\text{в.и}}=100$ м³/ч), $r_{\text{вх}}=0,25$ м, $r_d=0,055$ м находим по [56] $\xi_d=1,14$, по формуле (2.27) $\xi_{\text{вх}}=1,02$, $K_r=\frac{r_{\text{вх}}}{r_d}=4$, $K_x=0,95$. Определяем коэффициент m по формуле (2.31):

$$m=1,02+1,14+\left(\frac{0,075}{0,062}\right)^4 \cdot \left(\frac{1}{0,64}\right)^2 - 1 = 6,4.$$

Из формулы (2.32)

$$v_{\text{ок}}=0,95 \cdot 4 \cdot 1,5 \left(\frac{1}{0,64}\right)^{0,5} \approx 7 \text{ м/с.}$$

Подставив найденное значение в формулу (2.33), получим:

$$p_1^{\text{доп}}=0,5 \cdot 10^5 + 0,5 \cdot 1000(6,4 \cdot 2,25 + 49) = 0,82 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

При известных значениях $p_1^{\text{доп}}$ и $Q_{\text{в.и}}$ подбирается марка проектируемого центробежного насоса рециркуляционного ила. При наличии действующих на очистных сооружениях рециркуляционных насосов гидравлическим расчетом определяется фактическое давление на входе в ЭГДУ ($p_1^{\text{факт}}$), обеспечивающее подачу расхода $Q_{\text{в.и}}$. В том случае, если неравенство $p_1^{\text{факт}} \leq p_1^{\text{доп}}$ не будет удовлетворяться, необходимо задать новые размеры и конструктивные параметры ЭГДУ, обеспечивающие выполнение требуемых условий.

В корпусе ЭГДУ, и прежде всего в его стволе, создается режим интенсивного перемешивания воздушных пузырьков с иловой жидкостью. В стволе ЭГДУ должны обеспечиваться условия для дробления не только пузырьков воздуха, но и хлопьев активного ила с целью увеличения его удельной поверхности и, следовательно, скорости окисления загрязнений. Данные условия могут быть обеспечены в том случае, если масштаб наименьших турбулентных вихрей λ_0 будет сопоставим с радиусом $r_{\text{хл}}$ хлопья ила [25]. Масштаб наименьших вихрей, по Колмогорову – Обухову, может быть выражен через затраты энергии на турбулизацию

$$\lambda_0 = \left(\frac{v_c^3}{\varepsilon_0} \right)^{1/4}, \quad (2.34)$$

где ε_0 – среднее значение мощности, рассматривают в единице массы перемешиваемой среды, Вт/кг;

v_c – кинематическая вязкость водовоздушной смеси, м²/с.

Величина ε_0 связана с удельными затратами мощности $N_{уд}$ на перемешивание соотношением

$$N_{уд} = \varepsilon_0 \cdot \rho_c, \text{ Вт/м}^3, \quad (2.35)$$

где ρ_c – плотность водовоздушной смеси.

Кинематическая вязкость и плотность водовоздушной смеси в стволе ЭГДУ зависят от степени насыщения иловой жидкости воздухом.

Плотность водовоздушной смеси с определенными допущениями вычисляется по формуле [34]

$$\rho_c = \rho \cdot (1 - \varphi), \quad (2.36)$$

где ρ – плотность жидкой фазы, кг/м³;

φ – коэффициент газосодержания смеси или объемная концентрация дисперсной фазы (воздуха),

$$\varphi = \frac{W_B}{W_c}; \quad (2.37)$$

здесь W_B и W_c – объемы воздуха и смеси, м³.

Кинематический коэффициент вязкости водовоздушной смеси находится по эмпирической зависимости при $\varphi \leq 0,15$ [28]:

$$v_c = v \frac{1 + \frac{9}{2} \cdot \varphi}{1 - \varphi}, \quad (2.38)$$

где v – кинематический коэффициент вязкости жидкой фазы, м²/с.

Таким образом, для определения масштаба наименьших вихрей λ_0 по (2.34) при известном газонасыщении иловой смеси необходимо знать среднее значение удельной мощности $N_{уд}$, которая находится по уравнению (2.35) и связана с расходом энергии на перемешивание E соотношением

$$N_{уд} = \frac{E}{V_c \cdot t}, \quad (2.39)$$

где V_c – объем камеры смешения (ствола ЭГДУ), м³;

t – время смешения иловой жидкости с воздухом в стволе ЭГДУ, с.

Расход удельной (отнесенной к единице массы) энергии на перемешивание в стволе высотой $h_{ств}$ между сечениями 2-2 и 3-3 (см. рис. 2.3) определяется из соотношения

$$E = \frac{\Delta p_c}{\rho_c} + gh_{ств} + \frac{v_a^2}{2} = \frac{\Delta p_c}{\rho_c} + E_{п.уд} + E_{к.уд}, \text{ м}^2/\text{с}^2, \quad (2.40)$$

где Δp_c – располагаемые потери давления, $\Delta p_c = p_2 - p_0$, Па;

v_a – осредненная абсолютная скорость движения потока в стволе, м/с;

$E_{п.уд}$ – располагаемая энергия положения, $E_{п.уд} = gh_{ств}$;

$E_{к.уд}$ – удельная кинетическая энергия потока, $м^2/с^2$.

Величину скоростного напора для осредненной абсолютной скорости можно записать как полусумму квадратов средних окружных и продольных скоростей потока в стволе

$$\frac{v_a^2}{2} = 0,5(v_{ок}^2 + v_{ств}^2). \quad (2.41)$$

Тогда

$$E_{к.уд} = \frac{v_a^2}{2} = 0,5(v_{ок}^2 + v_{ств}^2). \quad (2.42)$$

Для случая истечения в атмосферу $p_0 = p_{атм} = 0$.

Тогда

$$E = \frac{p_2}{\rho_c} + E_{п.уд} + E_{к.уд}. \quad (2.43)$$

Расчетные потери давления на перемешивание в общем случае определяются по соотношению

$$\Delta p_c^{расч} = \rho_c (\xi_M + \xi_{тр}) \frac{v_{ств}^2}{2}, \quad (2.44)$$

где ξ_M и $\xi_{тр}$ – коэффициенты местных сопротивлений и потерь на гидравлическое трение по длине ствола;

$v_{ств}$ – скорость выхода иловой смеси из ствола ЭГДУ, м/с.

При незначительной длине ствола ЭГДУ ($h_{ств} < 1$ м) $\xi_M \gg \xi_{тр}$ и последним значением в расчетах можно пренебречь

$$\Delta p_c^{расч} = \rho_c \xi_M \frac{v_{ств}^2}{2}. \quad (2.45)$$

Коэффициент ξ_M для последовательно расположенных дисков 6 (см. рис. 2.4) находится по соотношению, применяемому для расчета центральных вставок гидравлического трубчатого смесителя [14] при расстоянии между вставками $r_{ств} \leq l_B \leq 2 r_{ств}$:

$$\xi_M = 1,78 \cdot n_B \cdot \frac{S_B}{S_C} \left(\frac{S_C}{S_C - S_B} \right)^2 = 1,78 \cdot n_B \cdot K_B, \quad (2.46)$$

где n_B – количество вставок (внутренних дисков);

S_B – площадь вставок, м²;

S_c – площадь поперечного сечения ствола ЭГДУ, м²;

K_B – коэффициент стеснения площади поперечного сечения ствола.

Для предотвращения подпора иловой смеси в сечении 2-2 ствола ЭГДУ и с учетом соотношений (2.45) и (2.46) запишем условие нормальной работы нижней зоны ЭГДУ в режиме смешения

$$\Delta p_c^{\text{расч}} = \rho_c \cdot 1,78 \cdot n_B \cdot K_B \frac{v_{\text{СТВ}}^2}{2} \leq p_2 + (E_{\text{п.уд}} + E_{\text{к.уд}}) \cdot \rho_c \quad (2.47)$$

Данное условие является определяющим для выбора количества и размеров внутренних вставок, размещаемых в стволе вихревого аппарата. Полученное расчетное значение $\Delta p_c^{\text{расч}}$ подставляется в формулу (2.40) для нахождения фактической энергии, затрачиваемой на перемешивание.

Градиент G , создаваемый в стволе ЭГДУ, может быть определен из соотношения [14]

$$E = G^2 t V_c \rho_c v_c \quad (2.48)$$

С учетом (2.39)-(2.46) формула для определения градиента скорости в стволе ЭГДУ приобретает вид:

$$G = \sqrt{\frac{\xi_M v_{\text{СТВ}}^2}{t \cdot v_c}} = \sqrt{\frac{1,78 \cdot n_B \cdot K_B \cdot v_{\text{СТВ}}^2}{t \cdot v_c}}, 1/\text{с}. \quad (2.49)$$

Время смешения иловой жидкости с воздухом

$$t = \frac{V_c}{Q_{\text{в.и}} + Q_{\text{в}}}, \quad (2.50)$$

где $Q_{\text{в.и}}$ и $Q_{\text{в}}$ – расходы жидкой фазы и воздуха, м³/с.

Таким образом, задавая расходные и реологические характеристики иловой жидкости и воздуха, а также задавая конструктивные параметры ствола ЭГДУ, можно оценить энергетические затраты на смешение и создание турбулентных вихрей требуемого масштаба, обеспечивающего эффективное дробление хлопьев активного ила.

Например, при заданных значениях $p_2 = 0,5 \cdot 10^5$ Па, $\rho = 1000$ кг/м³, $v = 2 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\varphi = 0,1$, $Q_{\text{в.и}} = 100$ м³/ч, $K_{\Gamma} = 4$, $d_{\text{СТВ}} = 2$ м, $r_{\text{СТВ}} = 0,15$ м скорость иловой смеси в стволе $v_{\text{СТВ}} = 1,5$ м/с. Окружная скорость по (2.32) $v_{\text{ок}} = 7$ м/с. Плотность смеси по (2.36) $\rho_c = 1000 \cdot 0,9 = 900$ кг/м³. При высоте ствола $h_{\text{СТВ}} = 0,9$ м и расстоянии между вставками (внутренними дисками) $l_B = 0,09$ м количество вставок составит:

$$n_B = \frac{0,9}{0,09} = 10 \text{ шт.}$$

Принимая для критического случая $(E_{п.уд} + E_{к.уд}) \cdot \rho_c + p_2 = \Delta p_c^{расч}$ из формулы (2.47), определяем максимальный коэффициент стеснения:

$$K_B^{max} = \frac{p_2 + E_{п.уд} + E_{к.уд}}{1,78 \cdot n_B \cdot 0,5 \cdot v_{ств}^2} = \frac{0,5 \cdot 10^5}{900} + 9,8 \cdot 0,9 + 0,5(49 + 2,25) = 3,85.$$

Для данного коэффициента при $S_c = 0,0177 \text{ м}^2$ площадь одного диска составит $S_B \approx 0,087 \text{ м}^2$, отсюда диаметр вставки $d_B \approx 0,10 \text{ м}$.

При объеме смесителя $V_c = h_{ств} \cdot \frac{\pi d_{ств}^2}{4} = 0,016 \text{ м}^3$ время смешения по (2.50) составит $t = 0,52 \text{ с}$. В соответствии с (2.39) и (2.4) удельные затраты мощности

$$N_{уд} = \frac{\Delta p_c^{расч}}{t} = \frac{p_2 + (E_{п.уд} + E_{к.уд}) \cdot \rho}{t} = \frac{0,58 \cdot 10^5}{0,52} = 1,54 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3.$$

Из (2.35) находим среднее значение рассеиваемой мощности

$$\varepsilon_0 = \frac{N_{уд}}{\rho_c} = \frac{1,54 \cdot 10^5}{0,9 \cdot 10^3} = 1,38 \cdot 10^2 \text{ Вт/кг}.$$

Кинематический коэффициент вязкости смеси из (2.38) $\nu_c = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Масштаб наименьших вихрей в стволе по (2.34) составит:

$$\lambda_0 = \sqrt[4]{\frac{(3,2 \cdot 10^{-6})^3}{1,38 \cdot 10^2}} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Учитывая, что радиус хлопка ила равен $5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ [25], можно предположить, что в стволе ЭГДУ будут происходить диспергация хлопьев ила и активное обновление поверхностей бактериальных клеток микроорганизмов.

Величина градиента скорости в соответствии с формулой (2.49) составляет:

$$G = \sqrt{\frac{1,78 \cdot 6 \cdot 4,33}{0,52 \cdot 3,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1,50^2}{2}} = 5,8 \cdot 10^3 \text{ 1/с},$$

т.е. находится на уровне, характерном для рабочих диапазонов механических смесителей. Критерий Кэмпбелла при этом равен $Gt = 5,8 \cdot 10^3 \cdot 0,52 = 3 \cdot 10^3$.

Отметим, что данный расчетный случай является критическим, т.е. располагаемая удельная энергия $(\frac{p_2}{\rho_c} + E_{п.уд} + E_{к.уд})$ полностью затрачивается на преодоление расчетных потерь давления $\Delta p_c^{расч}$. При конструировании вихревых аппаратов для обеспечения гарантированного предотвращения подпора в верхней части ствола, а также на входе в

ЭГДУ при расчете располагаемой энергии вместо (2.43) рекомендуется принимать следующее условие:

$$E_p = K_n \left(\frac{P_2}{\rho_c} + E_{п.уд} + E_{к.уд} \right), \quad (2.51)$$

где K_n – понижающий (гарантийный) коэффициент, $K_n=0,7-0,8$.

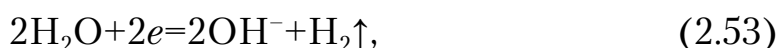
Условия (2.51) и (2.30) позволяют сконструировать вихревые аппараты, а также найти технологические параметры их работы при заданных характеристиках $Q-H$ рециркуляционных насосов.

2.3.2. Электрообработка активного ила

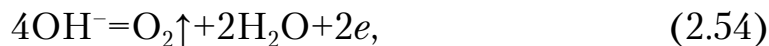
Как было отмечено в подразд. 1.2.1, обработка активного ила постоянным или переменным электрическим током улучшает его окислительные свойства по отношению к органическим примесям и аммонийному азоту. В ряде работ [18, 19, 59, 61] подчеркивается, что наиболее стабильные результаты получаются при воздействии на активный ил постоянного тока, образующегося в водной среде между катодными и анодными участками электролизера (ЭГДУ).

Поскольку осевые скорости потоков в ЭГДУ (электролизере) превышают подвижность водородных и гидроксильных ионов, в камерах происходят электродные процессы, обуславливающие изменение рН и Eh среды.

На катоде наблюдается разряд водородных ионов и молекул воды, в результате повышается рН среды



На аноде происходит разряд гидроксильных ионов и молекул воды, обуславливающий понижение рН среды



Разряд ионов, имеющих в воде, изменяет Eh среды. При электролизе содержащихся в иловой смеси хлоридов на аноде протекает реакция выделения газообразного хлора, имеющего более электроотрицательный потенциал, чем кислород, что обуславливает понижение Eh среды.



На катоде протекают процессы, непосредственно связанные с эмиссией электронов. Происходит восстановление органических соединений



и далее превращение молекул органических веществ в органические анионы



При этом второй стадией процесса будет нейтрализация аниона с образованием продукта гидрирования



Возможно также одновременное участие в разряде ионов водорода и молекул органического вещества



В некоторых случаях на катоде могут восстанавливаться растворенные органические соединения с образованием нерастворимых продуктов. На аноде происходят реакции окисления органических веществ.

В прианодной области протекают окислительные процессы, приводящие к деструкции органических соединений до углекислого газа, воды, аммонийного азота. В данной области обычно образуются нетоксичные продукты, не оказывающие угнетающего действия на активный ил. В подразд. 1.2.1 было отмечено положительное влияние окислителей, в частности перекиси водорода, на окислительную способность ила. Анализ экспериментальных данных показывает, что воздействие электрического тока на активный ил происходит по двум основным направлениям:

1. Увеличение активности микроорганизмов вследствие повышения проницаемости мембран, сопровождающееся ускорением внутриклеточных метаболических процессов.

2. Активация микроорганизмов вследствие повышения активности внеклеточных ферментов и ряда поверхностно расположенных рецепторов клетки.

Механизм активации и частичной регенерации возвратного ила при его обработке в смеси с воздухом в электрогидродинамическом устройстве может быть также объяснен на основе анализа внутреннего строения хлопков активного ила. Результаты электронной микроскопии хлопков ила показывают, что хлопок активного ила неоднороден и состоит из отдельных скоплений бактерий (клонов), разделенных

прослойками биополимера. Размер отдельных клонов составляет около 10 мкм, размер самого хлопка активного ила достигает 100 мкм. Трудноокисляемые органические вещества и продукты автолиза, оставшиеся в хлопке активного ила после аэротенка и вторичного отстойника, образуют внеклеточные накопления. Можно предположить, что вокруг каждой сорбированной частицы образуется локальная зона с дефицитом кислорода и избытком продуктов анаэробного разложения частицы, угнетающих процессы биохимического окисления. При традиционной регенерации активного ила происходят разложение трудноокисляемых органических частиц и окисление продуктов их распада, что приводит к повышению его активности.

Можно считать, что при интенсивном перемешивании хлопков активного ила в среде с повышенным содержанием кислорода токсичные соединения – продукты анаэробного распада трудноокисляемых и органических частиц – будут выделяться из внеклеточного полимера и выводиться из хлопка наружу, активный ил как бы подвергается «проветриванию». Таким образом, хлопок активного ила восстанавливает свою окислительную способность, не разлагая токсичные соединения, как в процессе традиционной регенерации, а выделяя их из себя, что требует значительно меньших затрат.

Одним из актуальных вопросов эксплуатации ЭГДУ является предотвращение пассиваций электродов органическими примесями и продуктами их разложения, а также за счет образования окисной пленки на аноде. Как указывалось в подразд. 1.2.2, для облегчения эксплуатации ЭГДУ в качестве анодного участка целесообразно использовать весь ствол ЭГДУ, а катод наиболее удобно выполнять в виде иглы или стержня и устанавливать его по осевой линии входной камеры (рис. 2.5).

При таком расположении электродов пассивация анода (ствола) будет предотвращена очисткой его поверхности абразивными примесями минерального происхождения (песок, шлак и т.п.), которые будут отбрасываться к внутренней поверхности ствола 5 за счет центробежной силы, а также за счет высокотурбулентного перемешивания иловоздушной смеси. Очистка же поверхности катода 2 может быть обеспечена пузырьками воздуха, образующимися в непосредственной близости от выходного сечения воздушной трубки 3. В этом случае целесообразным является устройство центрального стержневого или игольчатого катода 2 внутри воздушной трубки 3 с образованием единого функционального узла.

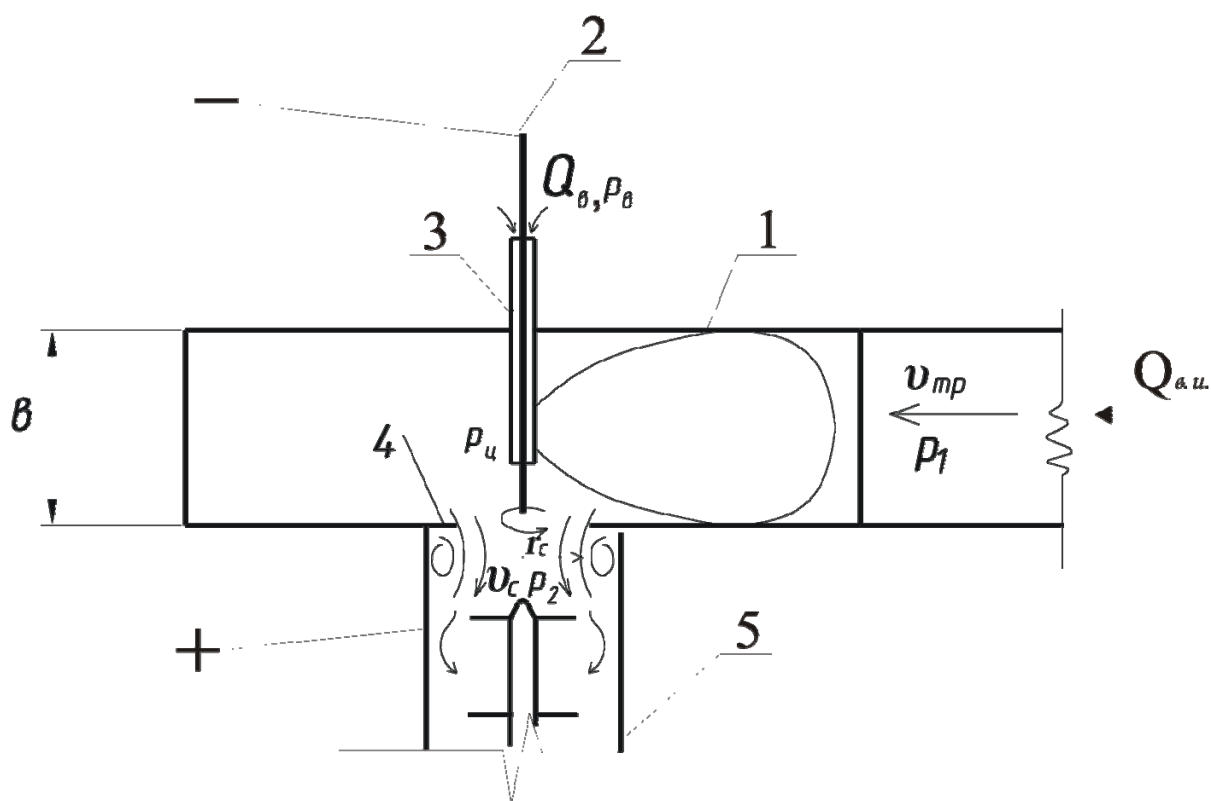


Рис. 2.5. Схема устройства катода в трубке подвода воздуха ЭГДУ:
 1 – входная камера; 2 – катод; 3 – воздушная трубка; 4 – разделительная диафрагма; 5 – ствол

При подаче воздуха на центральный катод возникает возможность осуществления процесса катодного восстановления кислорода с образованием перекиси водорода. По данным [50], пероксид водорода образуется при плотности тока выше 200 А/м^2 в широком диапазоне значений рН.

Таким образом, в предлагаемой конструкции ЭГДУ синтез окислителей возможен как на катоде, так и на аноде, что должно привести к дополнительному увеличению окислительной способности активного ила в отношении органических примесей и соединений азота.

Эффективность воздействия электрического поля на возвратный ил с использованием предлагаемой электродной системы может быть оценена только экспериментальным путем на лабораторных и промышленных установках.

Выводы

1. Эффективность регенерации, а также целесообразность ее осуществления можно оценить как по электрокинетическим, так и по окислительно-седиментационным характеристикам активного ила, полученным в процессе отстаивания биологически очищенных сточных вод.

2. Применение электрогидродинамических установок для обработки возвратного ила позволяет осуществить его частичную регенерацию за счет вывода из хлопка ила в жидкую фазу продуктов анаэробного разложения высокомолекулярных соединений при условии интенсивного перемешивания иловой смеси с повышенным содержанием кислорода, а также увеличить активность микроорганизмов ила за счет повышения проницаемости клеточных мембран в электрическом поле.

3. Предложена новая конструкция ЭГДУ, функционально разделенная на верхнюю (организации вращательного движения потока и подачи сжатого воздуха) и нижнюю (смешения иловой жидкости с воздухом) зоны, обеспечивающая высокие массообменные характеристики аппарата, электрообработку ила с высокой плотностью тока и удобство в эксплуатации.

4. Расчетным путем получены конструктивные и технологические параметры работы электрогидродинамических установок, обеспечивающие максимальное использование энергии рециркуляционных насосов для создания высокотурбулентного перемешивания иловоздушной смеси в стволе ЭГДУ. Обоснованы и выведены гидродинамические условия для обеспечения подачи требуемого расхода воздуха во входную камеру аппарата и предотвращения подпора иловой смеси на входе в ЭГДУ при заданных характеристиках $Q-H$ насосов подачи возвратного ила.

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОТЕНКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВИРОВАННОГО ВОЗВРАТНОГО ИЛА

3.1. Объект исследований, программа и методика проведения лабораторных исследований

3.1.1. Объект исследований

Объектом исследований являлись сточные воды г. Заречного, Пензенской области, а также активный ил биологических очистных сооружений. В связи с большим процентным содержанием хозяйственно-бытовых сточных вод, состав городского стока отличается относительным постоянством в течение года (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Показатели сточных вод, поступающих на очистные сооружения
г. Заречного, Пензенской области

Показатели сточных вод	Единицы измерения	Значения величин		
		Минимальные	Максимальные	Средние
рН		7,2	7,4	7,3
ХПК	мг/л	154	223	196
БПК ₅	мг/л	60,2	101,1	88
БПК ₂₀	мг/л	102	170	144
NH ₄ ⁺	мг/л	5,7	9,9	7,2
NO ₂ ⁻	мг/л	0,01	0,11	0,07
NO ₃ ⁻	мг/л	Отсутств.	Отсутств.	Отсутств.
Взвешенные вещества	мг/л	82,4	116,2	97,4
Сухой остаток	мг/л	401	467	425
Фосфаты	мг/л	7,1	12,6	10,2

Наблюдается неравномерность расхода и концентраций загрязнений сточных вод, поступающих на очистку в течение суток. Коэффициент часовой неравномерности $K_{ч}=1,25$. Активный ил аэротенков представляет собой хлопья темно-серого цвета, размером от едва различимых до 2-3 мм. На величину хлопья ила большое влияние оказывает

присутствие в нем нитчатых микроорганизмов, при этом чем больше нитчатых, тем больше размер хлопка. Активный ил обладает земляным запахом, который, возможно, обусловлен присутствием актиномицетов, обладающих этим запахом.

Результаты электронной микроскопии показывают, что хлопок активного ила неоднороден и состоит из отдельных скоплений бактерий (клонов), разделенных прослойками биополимера. Размер отдельных хлопков составляет около 10 мкм. Бактериальные клетки занимают примерно 20 % объема хлопка активного ила.

Установлено, что вязкость слизи межклеточного вещества стабильна в пределах рН=5-9. При величине рН<5 вязкость снижается.

Структуры, образующиеся в суспензии активного ила, довольно прочны.

Проведенные микробиологические исследования активного ила станции аэрации в г. Заречном показали следующие результаты: активный ил содержит микроорганизмы, входящие во все физиологические группы, принимающие участие в разложении органических веществ сточных вод. Группа аммонифицирующих микроорганизмов составляла $8,5 \cdot 10^8$ Кл/мл. В активном иле присутствовали хорошо сформированные, с развитой поверхностью зооглейные скопления бактерий, состоящих из культур *Zoogloea ramifera*, численность которых составляла 150-260 в одном мл иловой смеси.

В активном иле присутствовало 15 видов гидробионтов. Наибольшее число особей было следующих видов: *Operculair coarctata*, *Operculair qilomerata*, *Epistylis plicatit*, *Arcella disides*, *Vorticella convallaria*, *Aspidisia turrida*, *Vort convallaria*. Грибы активного ила представлены в основном р.р. *Penicillian*, *Asperqillum*, *Fhusarium* и *Mucor*.

3.1.2. Описание установки для проведения лабораторных исследований

Лабораторные исследования по активации возвратного ила и определению ее влияния на процесс биологической очистки проводились на лабораторной установке, смонтированной на территории канализационных очистных сооружений г.Заречного, Пензенской области. Схема установки показана на рис. 3.1.

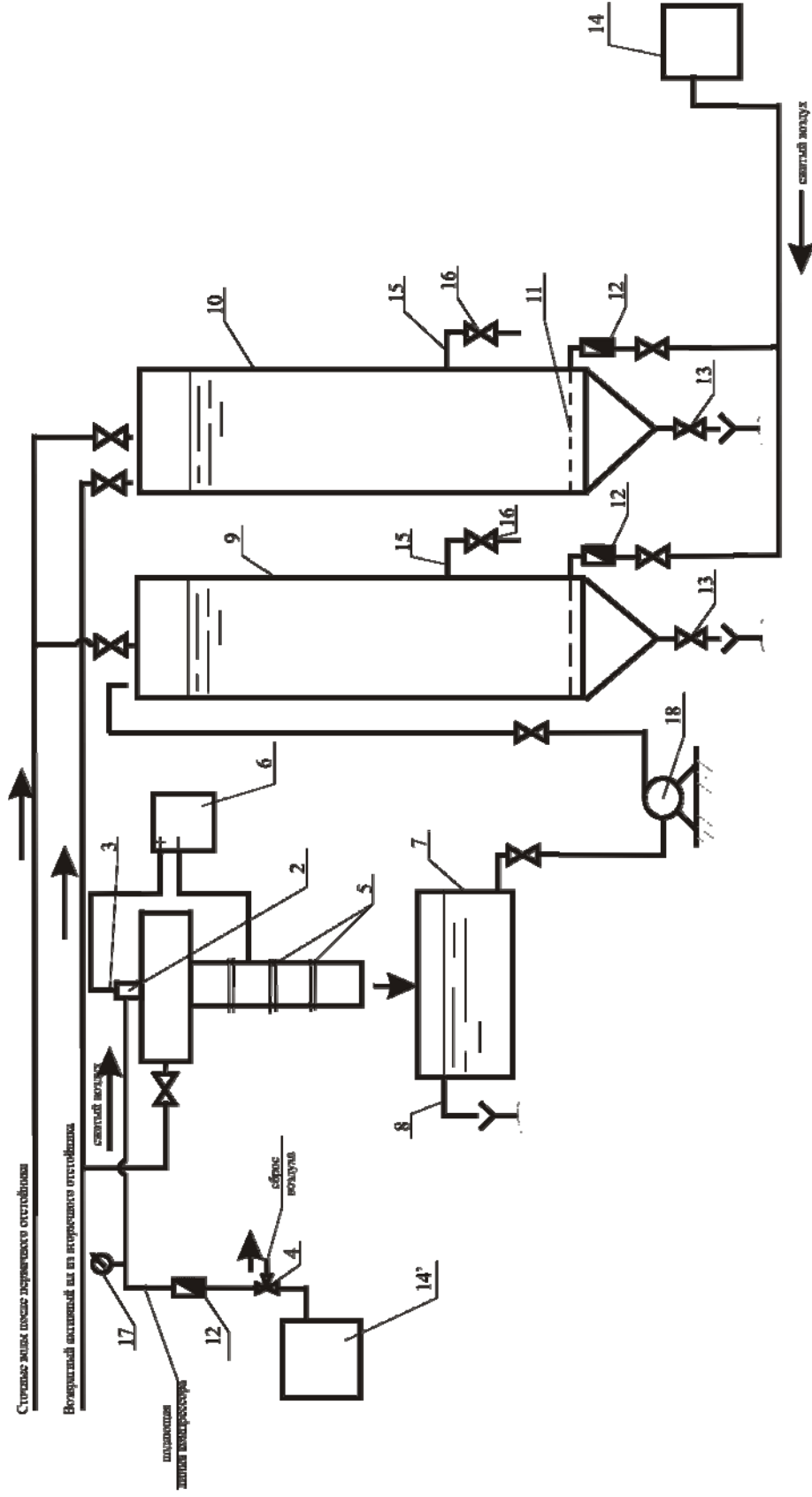


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки для исследования влияния активации возвратного ила на процесс биологической очистки:

- 1 – ЭГДУ; 2 – патрубок подачи сжатого воздуха; 3 – центральный электрод; 4 – трехходовой кран; 5 – муфтовые соединения ствола; 6 – выпрямительное устройство; 7 – промежуточный бак-дозатор; 8 – переливной патрубок;
- 9 – опытный аэротенк; 10 – контрольный аэротенк; 11 – системы аэрации; 12 – ротаметры; 13 – патрубок опорожнения аэротенка; 14 и 14' – компрессоры для подачи воздуха в аэротенк и ЭГДУ; 15 – патрубки отбора проб из аэротенков; 16 – запорная арматура; 17 – манометр для воздуха; 18 – насос

Лабораторная установка включала в себя опытный 9 и контрольный 10 аэротенки периодического действия емкостью по 0,1 м³ каждый. Аэротенки были снабжены системой пневматической мелкопузырчатой аэрации 11. Сжатый воздух в системе аэрации опытного и контрольного аэротенков подавался компрессором 14. Для контроля расхода воздуха установка была снабжена поплавковыми ротаметрами 12 типа РМ. Опытный и контрольный аэротенки были снабжены патрубками для отбора проб 15. Активный ил из напорного илопровода под давлением подавался в лабораторное ЭГДУ 1. Подача сжатого воздуха в ЭГДУ осуществлялась мембранным компрессором 14'. Расход воздуха, подаваемого в ЭГДУ, определялся по показаниям поплавкового ротаметра 12, установленного на нагнетательной линии после трехходового крана 4. Расход иловой смеси контролировался водомером типа ВК. На илопроводе также имелось ответвление для подачи необработанного возвратного ила в контрольный аэротенк 10.

Лабораторное электрогидродинамическое устройство (ЭГДУ) 1 имело камеру входа $D_y=70$ мм и ствол $d_y=20$ мм. На крышке входной камеры устанавливался диэлектрический патрубок 2 подачи сжатого воздуха, внутри которого с необходимым зазором для прохождения воздуха был расположен тонкий стержневой центральный электрод 3 диаметром 2 мм и длиной 20 мм. В ряде экспериментов стержневой электрод заменялся на игольчатый того же диаметра и длины. Нижняя коническая (игольчатая) часть этого электрода имела длину 8 мм. Ствол ЭГДУ состоял из участков труб, последовательно соединенных между собой резьбовыми муфтами 5 для обеспечения возможности изменения длины ствола. Внутри каждого из трубчатых участков ствола с целью интенсификации процесса перемешивания иловой смеси устанавливались поперечные перегородки, представляющие собой сегменты круга. К центральному электроду и корпусу ЭГДУ подводился электрический потенциал от выпрямительного устройства 6.

В состав установки также входил промежуточный бак-дозатор 7, снабженный переливным патрубком 8 и трубопроводом подачи иловой смеси в опытный аэротенк.

3.1.3. Программа и методика проведения лабораторных исследований

Программа первого этапа лабораторных исследований технологии активации возвратного ила предусматривала смешение иловой смеси с воздухом в стволе ЭГДУ без воздействия электрического тока и определение степени влияния интенсивности перемешивания на

окислительную способность ила. В ходе проведения первого этапа лабораторных экспериментов решались следующие задачи:

1. Исследование кинетики окисления органических примесей в контрольном и опытном аэротенках с использованием необработанного и обработанного в ЭГДУ возвратного ила при его предварительной регенерации и без нее.

2. Исследование кинетики процессов нитрификации в контрольном и опытном аэротенках с использованием необработанного и обработанного в ЭГДУ возвратного ила при его предварительной регенерации и без нее.

Таким образом, целью лабораторных экспериментов первого этапа было установление влияния конструктивных параметров ствола ЭГДУ и критериев, характеризующих степень перемешивания, – градиента скорости G и критерия Кэмпса Gt – на эффективность биологической очистки сточных вод в модельных аэротенках.

Эксперименты по активации возвратного ила проводились в проточном режиме подачи иловой смеси и воздуха. Определение расходов иловой смеси осуществлялось объемным способом на излив потока из ствола ЭГДУ в бак-дозатор 7 (см. рис. 3.1). Расход воздуха на подающей линии мембранного компрессора 14/ определялся с помощью ротаметра 12 и регулировался трехходовым краном 4. Расход воздуха, подаваемого в ЭГДУ, задавался равным 10-15 % от расхода иловой смеси. Градиент скорости при перемешивании иловой жидкости с воздухом в стволе ЭГДУ вычислялся по формуле (2.49):

$$G = \sqrt{\frac{\xi_M}{t \cdot v_c} \cdot \frac{v_{\text{СТВ}}^2}{2}} = \sqrt{\frac{\Delta p_c}{\rho_c \cdot t \cdot v_c}}, 1/\text{с}, \quad (3.1)$$

где Δp_c – располагаемые потери давления, определяемые по соотношению (2.40),

$$\Delta p_c = p_2 - p_0. \quad (3.2)$$

Так как поток иловоздушной смеси выходил из ствола ЭГДУ в атмосферу, то в расчетах принималось $p_0 = p_{\text{атм}} = 0$. Давление p_2 в начальном сечении ствола в соответствии с (2.29) и (2.30) принималось равным значению давления p_B сжатого воздуха, которое подавалось компрессором 14/ и, в свою очередь, определялось по показаниям манометра 17 (см. рис. 3.1). Таким образом, градиент скорости находился по формуле

$$G = \sqrt{\frac{p_B}{\rho_c \cdot t \cdot v_c}}, 1/\text{с}. \quad (3.3)$$

Плотность ρ_c и вязкость ν_c иловоздушной смеси определялись по (2.36) и (2.38). Интенсивность перемешивания оценивалась также по критерию Кэмпса Gt .

Время перемешивания t иловоздушной смеси определялось, исходя из средней скорости движения потока $v_{\text{СТВ}}$ и длины ствола $l_{\text{СТВ}}$, которая изменялась в зависимости от количества участков, соединяемых между собой муфтами 5:

$$t = \frac{l_{\text{СТВ}}}{v_{\text{СТВ}}} . \quad (3.4)$$

В процессе экспериментов величина G изменялась в пределах от $3,4 \cdot 10^3$ до $8,5 \cdot 10^3$ 1/с, а критерий Кэмпса – от $2,1 \cdot 10^3$ до $5,1 \cdot 10^3$.

Программа второго этапа лабораторных исследований технологии активации возвратного ила предусматривала смешение иловой смеси с воздухом в стволе ЭГДУ с одновременным воздействием постоянного тока на иловоздушную смесь. Целью данного этапа являлось выявление степени влияния параметров электрообработки – напряжения поляризации, удельного расхода электричества – на эффективность биологической очистки стоков в опытном аэротенке. Для сравнения исследовался процесс биологической очистки сточных вод с необработанным возвратным илом. Кроме того, в обоих аэротенках были проведены лабораторные эксперименты по оценке влияния регенерации ила на процессы биологического окисления примесей. При осуществлении первого и второго этапов исследований определялись следующие показатели исходных и очищенных сточных вод: ХПК, БПК₅, азот аммонийный, нитриты, нитраты, фосфаты.

3.1.4. Методика проведения химических анализов

Химические анализы на определение концентраций различных загрязняющих компонентов в исходной и биологически очищенной сточной воде проводились в соответствии с рекомендациями [5, 42].

Используемый метод определения ХПК основан на том, что бихромат калия при кипячении в серноокислой среде окисляет большинство органических веществ и некоторые минеральные вещества, присутствующие в сточной воде. Для полноты окисления органических веществ и связывания хлоридов добавлялся сульфат серебра. В качестве аппаратуры применялись прибор для определения ХПК (холодильник и коническая колба на 250 мл) и песчаная баня. В лабораторных исследованиях использовались следующие реактивы [5, 42]:

- 1) Серная кислота плотностью 1,84 г/мл.
- 2) Сульфат серебра кристаллический.

- 3) Бихромат калия $K_2Cr_2O_7$, 0,25 н водный раствор.
- 4) Соль Мора, 0,25 н (водный раствор сульфата железа и аммония).
- 5) Ферроин, индикатор. В бидистилляте растворяли 1,485 г 1,10-фенантролина и 0,695 г $FeSO_4 \cdot H_2O$, объем доводили до 100 мл.

6) *N*-фенилантраниловая кислота, индикатор. Растворяли 0,25 г реактива в 12 мл 0,1 н водного раствора NaOH и разбавляли дистиллированной водой до 250 мл.

В ходе лабораторных исследований по определению ХПК отбирали 20 мл сточной воды и помещали в колбу аппарата. Добавляли 10 мл 0,25 н водного раствора бихромата калия $K_2Cr_2O_7$, 0,4 г кристаллического сульфата серебра Ag_2SO_4 и стеклянные шарики. Смесь перемешивали и приливали 30 мл концентрированной серной кислоты H_2SO_4 , вставляли в колбу шлифованный обратный холодильник и кипятили 2 ч на песчаной бане. После окончания кипячения и остывания смеси отсоединяли холодильник, смывали продукты реакции из холодильника в колбу 25 мл дистиллированной водой. Содержимое реакционной колбы переносили в колбу Эрленмейера вместимостью 500 мл. Реакционную колбу тщательно промывали (4-5 раз) дистиллированной водой (200 мл). Добавляя 7-8 капель раствора ферроина (в некоторых опытах 5 капель раствора *N*-фенилантраниловой кислоты), титровали солью Мора до перехода окраски из темно-зеленой в изумрудно-зеленую.

При холостом опыте вместо сточной воды брали такое же количество дистиллированной воды и проводили весь анализ, как описано выше. Бихроматную окисляемость (мг/л) определяли по формуле:

$$X = \frac{(a - b) \cdot N \cdot k \cdot \delta \cdot 1000}{V}, \quad (3.5)$$

где *a* – объем соли Мора, израсходованный на титрование в холостом опыте, мг;

b – объем того же раствора, израсходованный на титрование пробы, мг;

k – поправочный коэффициент к точно 0,25 н раствору соли Мора;

N – нормальность титрованного раствора соли Мора;

δ – количество кислорода, соответствующее 1 мл бихромата калия, мг;

V – объем пробы, взятой для анализа.

Результаты, полученные по формуле (3.5), округлялись до целых долей миллиграмма на литр.

Определение БПК₅ производилось по изменению содержания растворимого кислорода в исследуемых пробах.

Для определения растворенного в сточной воде кислорода использовался йодометрический метод, основанный на выделении из пробы воды в начале и в конце срока инкубации свободного йода, количество которого эквивалентно содержанию растворенного кислорода. Пробы воды, отобранные для определения растворенного кислорода, фиксировались во избежание уменьшения его содержания в результате биохимических процессов между 10 мл сульфаминовой кислоты и хлоридом ртути(II).

Определение кислорода в лабораторных условиях производилось в соответствии с рекомендациями [5, 42]. В откалиброванную склянку вместимостью 250 мл с помощью резиновой трубки, опущенной на дно, осторожно наливалась доверху исследуемая вода. Далее на дно склянки с помощью пипетки доливалось по 1 мл раствора хлористого марганца и щелочной смеси (KOH+KJ). Склянка закрывалась пробкой и взбалтывалась, образовывался бурый осадок Mn(OH)₂. Далее осадок растворялся путем прибавления 2-3 мл концентрированной соляной кислоты. Полученный раствор перемешивался и переливался в чистую коническую колбу. Выделившийся йод оттитровывался 0,01 н раствором тиосульфата натрия в присутствии 1 мл раствора крахмала до исчезновения синей окраски. Количество растворенного в воде кислорода в мг/л определялось по формуле

$$A = \frac{V_1 \cdot N_1 \cdot E \cdot 1000}{(V_2 - V_3)}, \quad (3.6)$$

где V_1 – объем рабочего раствора Na₂S₂O₃ на титрование, мл;

N_1 – нормальность рабочего раствора Na₂S₂O₃;

E – эквивалент кислорода, $E=8$;

V_2 – объем пробы воды, мл;

V_3 – объем прибавленных реактивов, мл.

Величину БПК₅ определяли по формуле

$$\text{БПК}_5 = A_1 - A_2, \text{ мг/л}, \quad (3.7)$$

где A_1 – концентрация кислорода в пробе до начала инкубации, мг/л;

A_2 – концентрация кислорода в пробе после 5 суток инкубации, мг/л.

Для определения ионов NH₄⁺ в сточной воде использовался фотометрический метод с реактивом Несслера [5, 42]. В лабораторных исследованиях применялись следующие реактивы:

1. Щелочной раствор K₂ [HgJ₄] (реактив Несслера).

2. Сегнетова соль $\text{KN}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ – раствор 50 %-й концентрации.

3. Стандартный раствор хлорида аммония. Исходный стандартный раствор NH_4Cl , содержащий 1000 мг/л азота, готовился по навеске: 3,819 г химически чистого хлористого аммония, предварительно взвешенного при 110 °С, растворяли в мерной колбе на 1 л и доводили объем до метки. Рабочие стандартные растворы готовились путем добавления к 10 мл исходного раствора 990 мл безаммиачной дистиллированной воды, 1 мл рабочего стандартного раствора соответствовал 0,01 мг азота.

4. Безаммиачная дистиллированная вода получалась прибавлением к дистиллированной воде химически чистого карбоната натрия до слабо-щелочной реакции и упариванием на четверть объема.

5. Сульфат меди. 100 г медного купороса ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) растворялось в безаммиачной воде, и объем раствора доводился до 1 л.

Для построения калибровочной кривой в мерные колбы вместимостью 100 мл последовательно вносили 1, 2, 3, ..., 20 мл стандартного рабочего раствора, добавляли бидистиллят и реактивы для определения азота аммонийных солей, доливали до метки, получая концентрации азота от 0,01 до 0,2 мг. Далее строили графики зависимости оптической плотности от содержания азота аммиака. Для определения аммонийного азота 50 мл исследуемой сточной воды вливали в мерную колбу на 100 мл. Для осаждения белков добавляли 2 мл сульфата меди и 2 мл едкого натра, после тщательного перемешивания доливали дистиллированной водой до метки, вновь перемешивали и оставляли стоять на 1-1,5 часа. После отстаивания осадок фильтровался через бумажный фильтр. Далее 5 мл фильтрата помещали в мерную колбу на 100 мл, заполненную до половины бидистиллятом. Добавляли 2-4 капли сегнетовой соли и 2 мл реактива Несслера, после тщательного перемешивания доводили до метки безаммиачной водой и через 10 мин производили измерение на ФЭКе.

Количество аммонийного азота определялось по формуле

$$x = \frac{C \cdot 1000}{V}, \quad (3.8)$$

где C – концентрация аммонийного азота, определенная по калибровочной кривой, мг;

V – объем исследуемой воды, взятой для определения аммонийного азота,

$$V = 50 \cdot 5 / 100 = 2,5;$$

здесь 50 – объем пробы, взятой для осаждения белков, мл;

100 – объем разбавленной пробы, мл;

5 – объем взятой пробы после фильтрования, мл.

Исследуемый метод определения нитритов в сточной воде основан на способности азота нитритов в кислой среде образовывать с ароматическими аминами диазосоединения. Сульфаниловая кислота диазотируется азотистой кислотой, а образовавшиеся диазосоединения с α -нафтиламином образуют азокраситель малинового цвета. В качестве аппаратуры применялся фотоэлектроколориметр. В лабораторных исследованиях были использованы следующие реактивы [42]:

1. Реактив Грисса (готовый) – 10 %-й водный раствор, представляющий собой смесь сульфаниловой кислоты и α -нафтиламина.

2. Стандартный раствор нитрита натрия. Растворялось 0,4926 г нитрита натрия в 1 л дистиллированной воды. В 1 мл стандартного раствора содержалось 0,1 мг азота нитритов. Раствор консервировался добавлением 1 мл хлороформа и хранился в холодном месте.

3. Рабочий раствор I. Разбавляли 100 мл стандартного раствора дистиллированной водой до 1 л. В 1 мл этого раствора содержалось 0,01 мг азота нитритов.

4. Рабочий раствор II. Доводили 50 мл рабочего раствора I до 1 л дистиллированной водой. В 1 мл раствора содержалось 0,0015 мг азота нитритов. Для построения калибровочной кривой готовили 1; 2; 3; 4; ... 10 мл рабочего раствора II, что соответствовало 0,0005; 0,0010; 0,0015; ..., 0,005 мг азота нитритов, далее объемы доводили дистиллированной водой до 100 мл. Измеряли оптическую плотность растворов на ФЭКе и строили калибровочную кривую.

Определение нитритов велось в исходной сточной воде, профильтрованной через бумажный фильтр. Так как вода содержала тонкую взвесь, то добавлялось по 2 мл раствора гидроокиси алюминия на каждые 100 мл воды. После отстаивания в течение нескольких минут пробы фильтровались. В мерную колбу на 100 мл помещали до 10 мл профильтрованной исследуемой сточной воды, доливали дистиллированной водой до половины объема, добавляли 2 мл 10 %-го водного раствора реактива Грисса и доводили до метки дистиллированной водой. Содержимое тщательно перемешивали, затем колбу ставили на 20 мин в термостат при температуре 20°C, после этого снимали показания на ФЭКе. Количество азота нитритов определялось по формуле

$$X_1 = \frac{C_1 \cdot 1000}{V}, \quad (3.9)$$

где C_1 – концентрация азота нитритов, мг, определенная по калибровочной кривой;

V – объем исследуемой воды.

Для определения нитратов в сточной воде использовался метод Грандвалля. При добавлении фенола в серной кислоте к нитратам образуется пикриновая кислота, которая после прибавления аммиака дает пикрат аммония – соединения желтого цвета. В качестве аппаратуры применялся фотоэлектроколориметр. В лабораторных исследованиях использовались следующие реактивы [42]:

1. Сульфифеноловый реактив. К 1 г чистого фенола добавляли 6,7 мл концентрированной серной кислоты и нагревали в колбе кипящей водяной баней в течение 6 часов. Реактив хранился в темной склянке с притертой пробкой в темном месте.

2. Аммиак, 25 %-й водный раствор.

3. Раствор сернокислого серебра осаждения хлоридов. В 1 л дистиллированной воды растворяли 4,44 Ag_2SO_4 , 1 мл раствора эквивалентен 1 мг хлора.

4. Стандартный раствор нитрата калия. В дистиллированной воде растворяли 0,7216 г незакристаллизованного нитрата калия и объем раствора доводили до 1 л. Для консервации к раствору добавляли 1 мг хлороформа. В 1 мл раствора содержалось 0,1 мг азота нитратов.

5. Рабочий раствор нитрата калия. Выпаривали 50 мл стандартного раствора на водяной бане досуха, затем смачивали 2 мл сульфифенолового реактива, растирали до полного смешения стеклянной палочкой и разбавляли до 500 мл дистиллированной водой. В 1 мл раствора содержалось 0,01 мг азота нитратов.

Для построения калибровочной кривой в мерные колбы на 100 мл вносилось 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1; 1,5; 2; 3,5; 6; 10; 15; 20 и 30 мл стандартного раствора KNO_3 , что соответствовало 0,001; 0,003; 0,005; 0,007; 0,01; 0,015; 0,02; 0,035; 0,06; 0,1; 0,15; 0,2 и 0,3 мг азота нитратов, добавлялось 2 мл сульфифенолового реактива и такое же количество раствора аммиака, какое прибавлялось к пробе. Объем раствора доводился до метки и перемешивался. Далее измерялись оптические плотности окрашенных растворов и строились кривые зависимости оптической плотности от концентрации азота нитратов. В ходе лабораторных исследований по определению нитратов исходную воду предварительно осветляли гидроокисью алюминия. В зависимости от содержания в воде нитратов отбирали пипеткой от 1 до 10 мл сточной воды с таким расчетом, чтобы в объеме взятой пробы количество азота нитратов было в пределах 0,01-0,5 мг. Проба сточной профильтрованной воды помещалась в фарфоровую чашку вместимостью 50 мл и выпаривалась на водяной бане досуха.

Так как исходная вода предварительно обрабатывалась активным хлором и в ней находилось значительное количество хлоридов, то для

их осаждения в эквивалентном количестве добавлялось сернокислое серебро.

После выпаривания в охлажденную чашку помещали 1 мл сульфенолового реактива и тщательно растирали стеклянной палочкой до полного смешения с высушенным остатком. Добавляли 5-10 мл дистиллированной воды, и осторожно приливали при помешивании 6-7 мл 25 %-го раствора аммиака до щелочной реакции, при этом появлялась желтая окраска раствора. Далее раствор переносили в мерную колбу вместимостью 100 мл и доводили дистиллированной водой до метки. Окрашенный раствор колориметрировался. Из найденного значения вычитали оптическую плотность холостой пробы (дистиллированная вода с реактивами), и по калибровочной кривой находилось содержание азота нитритов. Количество азота нитратов определялось по формуле

$$X_2 = \frac{C_2 \cdot 1000}{V}, \quad (3.10)$$

где C_2 – концентрация азота нитратов, определенная по калибровочной кривой, мг;

V – объем исследуемой воды, мл.

Определение фосфатов основано на реакции с молибдатом аммония в кислой среде. Образующаяся при этом желтая гетерополиоксида под действием хлорида олова(II) превращается в интенсивно окрашенное синее соединение. В химических анализах по исследованию концентраций фосфатов в исходной и биологически очищенной сточной воде использовались следующие реактивы [42]:

1. Серная кислота, 5 н раствор.
2. Сульфаминовая кислота, 10 %-й раствор.
3. Аскорбиновая кислота, 2 %-й раствор.
4. Антимонилтартрат калия (сурьмено-виннокислый калий), раствор который приготавливался растворением 0,345 г $\text{KSbH}_4\text{O}_5 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ в 500 мл дистиллированной воды .
5. Молибдат аммония, 3 %-й раствор (реактив I).
6. Молибдат аммония, 2,5 % кислый раствор (реактив II). В мерной колбе вместимостью 1 л растворяли 25г $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ в 600 мл дистиллированной воды и осторожно (охлаждая) приливали 337 мл серной кислоты плотностью 1,84 г/см³. После охлаждения доводили до метки дистиллированной водой.
7. Смешанный реактив. Смешивали 12,5 мл 5 н раствора серной кислоты, 5 мл 3 %-го молибдата аммония (реактив I), 5 мл 2 %-й

аскорбиновой кислоты, 2,5 мл антимоилтартрата калия и, в случае присутствия нитритов, добавляли 1 мл 1 %-й сульфаминовой кислоты.

8. Хлорид олова, раствор: а) основной раствор. Растворяли 1,95 г $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в 50 мл разбавленной хлористоводородной кислоты (18,4 мл кислоты плотностью 1,19 г/см³ разбавляли до 50 мл дистиллированной водой); б) рабочий раствор готовили разбавлением 2,5 мл основного раствора хлорида олова(II) дистиллированной водой до объема 10 мл.

9. Стандартные растворы ортофосфатов: а) основной раствор. Однозамещенный ортофосфат калия KH_2PO_4 высушивали в течение 2 часов при 105 °С (до постоянной массы) и охлаждали в экстракторе. Растворяли 0,1433 г высушенного препарата в мерной колбе вместимостью 1 л и доводили объем до метки дистиллированной водой. В 1 мл раствора содержалось 0,1 мг фосфатов (PO_4^{3-}); б) рабочий раствор. Разбавляли в мерной колбе вместимостью 1 л 10 мл основного раствора и доводили объем до метки дистиллированной водой. В 1 мл раствора содержалось 0,001 мг фосфатов (PO_4^{3-}).

Для построения калибровочного графика в мерные колбы вместимостью 50 мл вносили 0-0,5-1-2-5-10-20 мл рабочего стандартного раствора, что соответствовало содержанию фосфатов 0-0,0005-0,001-0,002-0,005-0,01-0,02 мг. Доводили объем до метки дистиллированной водой, фотометрировали и строили калибровочный график в координатах оптическая плотность – содержание фосфатов (мг).

При определении концентрации фосфатов проба воды фильтровалась в день отбора через плотный бумажный фильтр. К 50 мл профильтрованной воды (при необходимости разбавленной дистиллированной водой) прибавляли 2 мл смешанного реактива, перемешивали и через 10 мин фотометрировали при красном светофильтре ($\lambda = 690-720$ нм) в кюветах с толщиной оптического слоя 2-5 см. Исследования также проводили, используя в качестве восстановителя хлорид олова(II). Для этого к 50 мл профильтрованной воды прибавляли 1 мл кислого молибдата аммония (реактив II) и через 5 мин 0,1 мл рабочего раствора хлорида олова, перемешивали и через 10 мин фотометрировали.

Концентрацию фосфатов (мг/л) вычисляли по формуле

$$X = \frac{A \cdot 1000}{V}, \quad (3.11)$$

где A – содержание фосфатов, найденное по калибровочному графику, мг;

V – объем пробы, взятой для анализа, мл.

3.2. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов обработки возвратного ила в лабораторном ЭГДУ на кинетику процессов биологической очистки сточных вод

Испытания проводились на лабораторной установке, включающей модели ЭГДУ, а также опытный и контрольный аэротенки (см. рис. 3.1). На первом этапе исследований возвратный активный ил смешивался с воздухом в стволе ЭГДУ 1 при значениях числа Кэмпса Gt от $2,1 \cdot 10^3$ до $5,1 \cdot 10^3$ и насосом 18 перекачивался в опытный аэротенк 9. Газонасыщение иловоздушной смеси составляло 10-15 %. Туда же подавалась предварительно осветленная сточная вода после первичных отстойников. В контрольный аэротенк 10 поступал необработанный (не прошедший ЭГДУ) возвратный ил непосредственно из рециркуляционного трубопровода. Доза ила в аэротенках поддерживалась в пределах 1,8-2,1 г/л. Биологическая очистка в аэротенках осуществлялась в течение 5 часов при интенсивности аэрации 6-7 м³/(м²·ч). Отбор проб производился через 1,5; 3 и 5 часов очистки. В некоторых сериях экспериментов перед началом биологической очистки в аэротенках активный ил подвергался регенерации в течение 1,5 часа.

Графики изменений ХПК и БПК₅ сточных вод в процессе биологической очистки в опытном и контрольном аэротенках показаны на рис. 3.2 и 3.3.

Экспериментально установлено, что при использовании для биологической очистки не обработанного в ЭГДУ активного ила после 5-часовой аэрации в контрольном аэротенке наблюдалось снижение: ХПК сточных вод (см. рис. 3.2, а) – с 158 до 68 мг/л (эффект очистки 57 %), БПК₅ (см. рис. 3.3, а) – с 80 до 21,5 мг/л (эффект очистки 74,4 %). Для не обработанного в ЭГДУ возвратного ила, прошедшего регенерацию, после аэрации в течение $T_a=5$ ч происходило снижение ХПК сточных вод (см. рис. 3.2, б) с 158 до 47 мг/л (эффект очистки 70,2 %), а БПК₅ уменьшалось (см. рис. 3.3, б) с 80 до 13,5 мг/л (эффект очистки 83,1 %).

Для осветленных сточных вод при их смешении с обработанным в ЭГДУ возвратным илом степень очистки по ХПК и БПК₅ в опытном аэротенке зависела от интенсивности обработки активного ила, характеризуемой критерием Кэмпса.

При увеличении Gt с $2,1 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$ остаточное содержание ХПК в очищенных сточных водах (см. рис. 3.2, а) снижалось с 59 до 37 мг/л (эффект очистки соответственно увеличивался с 62,6 до 76,5 %). В случае использования обработанного в ЭГДУ возвратного ила, прошедшего регенерацию, при увеличении Gt в заданных пределах остаточное содержание ХПК в стоках после 5-часовой аэрации (см. рис. 3.2, б) снижалось с 40,5 до 28 мг/л, а эффект очистки соответственно возрастал с 74,3 до 82,2 %.

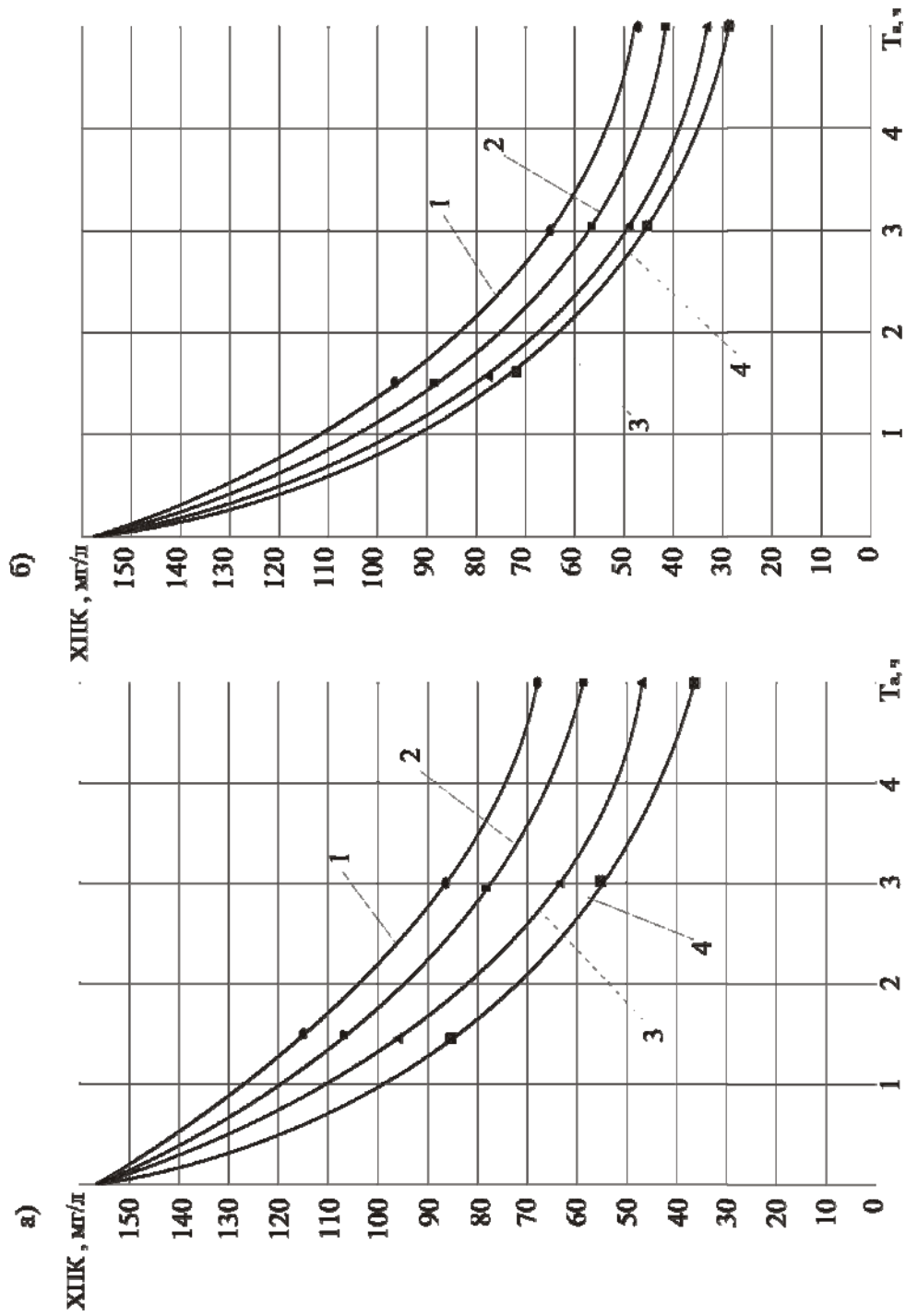


Рис. 3.2. Графики изменения ХПК предварительно осветленных сточных вод в процессе биологической очистки в опытном и контрольном аэротенках:

а – без регенерации ила; б – с регенерацией ила;
 1 – необработанный ($Gt=0$) возвратный ил; 2, 3 и 4 – возвратный ил, обработанный в ЭГДУ
 при $Gt = 2,1 \cdot 10^3$; $3,8 \cdot 10^3$ и $5,1 \cdot 10^3$

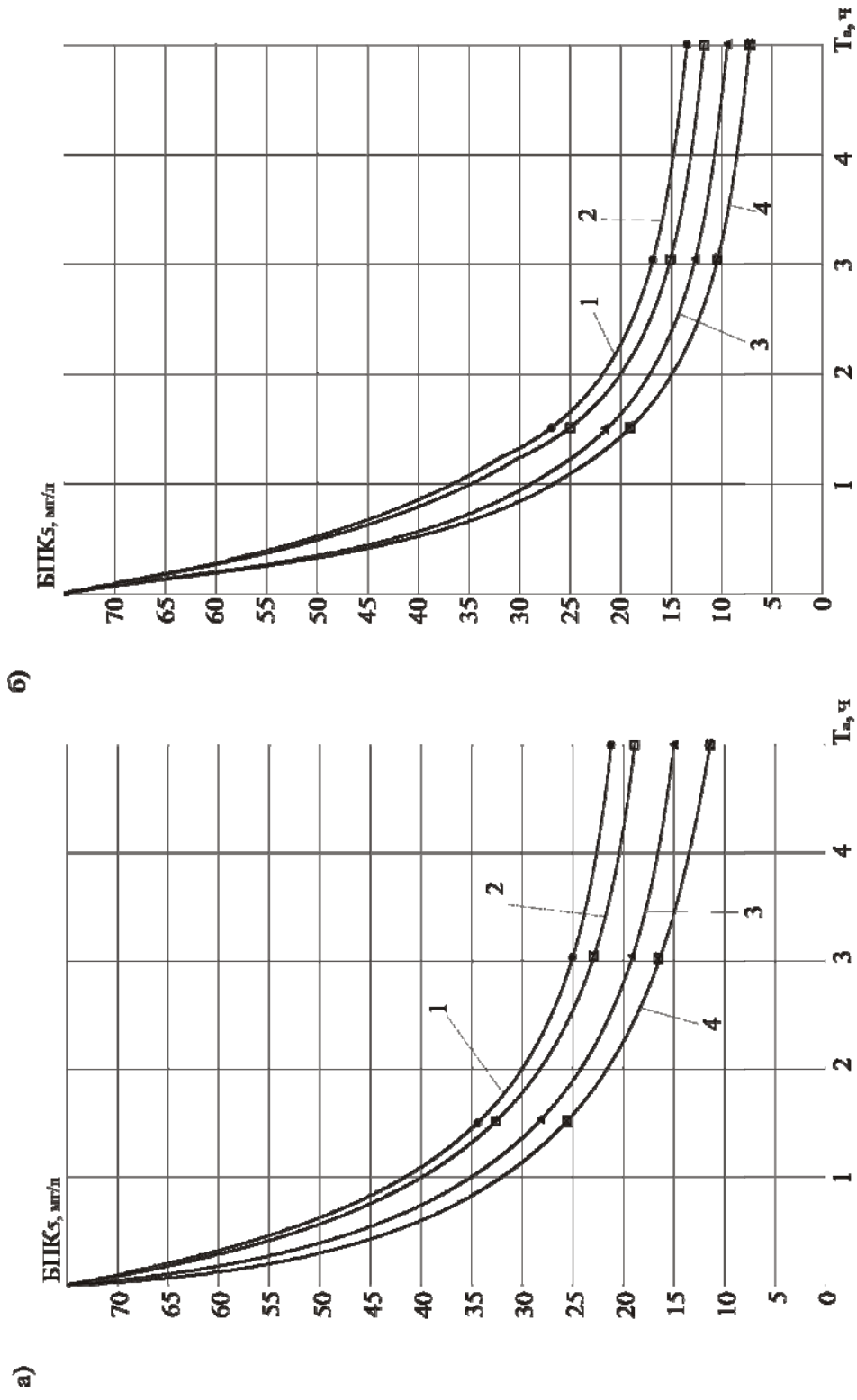


Рис. 3.3. Графики изменения БПК₅ предварительно осветленных сточных вод в процессе биологической очистки в опытном и контрольном аэротенках:

а – без регенерации ила; б – с регенерацией ила;
 1 – необработанный ($Gt = 0$) возвратный ил; 2, 3 и 4 – возвратный ил, обработанный в ЭГДУ
 при $Gt = 2,1 \cdot 10^3$; $3,8 \cdot 10^3$ и $5,1 \cdot 10^3$

Остаточное содержание БПК₅ в очищенных сточных водах в смеси с обработанным в ЭГДУ активным илом, но не прошедшим регенерацию (см. рис. 3.3, а) при увеличении Gt с $2,1 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$ снижалось с 18 до 12,5 мг/л (эффект очистки соответственно увеличивается с 77,5 до 84,3 %). При использовании обработанного в ЭГДУ возвратного ила, прошедшего регенерацию, с увеличением критерия Кэмпбелла в заданных пределах остаточное содержание БПК₅ в сточных водах для $T_a=5$ ч (см. рис. 3.3,б) снижалось с 12,5 до 7 мг/л, а эффект очистки соответственно увеличивался с 84,4 до 91,5 %.

Таким образом, как регенерация, так и обработка возвратного активного ила в ЭГДУ приводила к улучшению эффекта биологической очистки сточных вод в аэротенках. Необходимо также отметить, что в случае использования приема регенерации зависимость улучшения качества очистки стоков по ХПК и БПК₅ в аэротенках от повышения интенсивности обработки возвратного ила в ЭГДУ проявлялась не так значительно, как в экспериментах без применения регенерации активного ила.

Диаграммы концентраций ионов NH_4^+ , NO_2^- и NO_3^- в биологически очищенных сточных водах после 5-часовой аэрации в опытном и контрольном аэротенках представлены на рис. 3.4-3.6. Концентрация ионов NH_4^+ в предварительно осветленной исходной сточной воде, подаваемой на аэротенки, составляла 6,8-7,4 мг/л; нитритные и нитратные соединения отсутствовали.

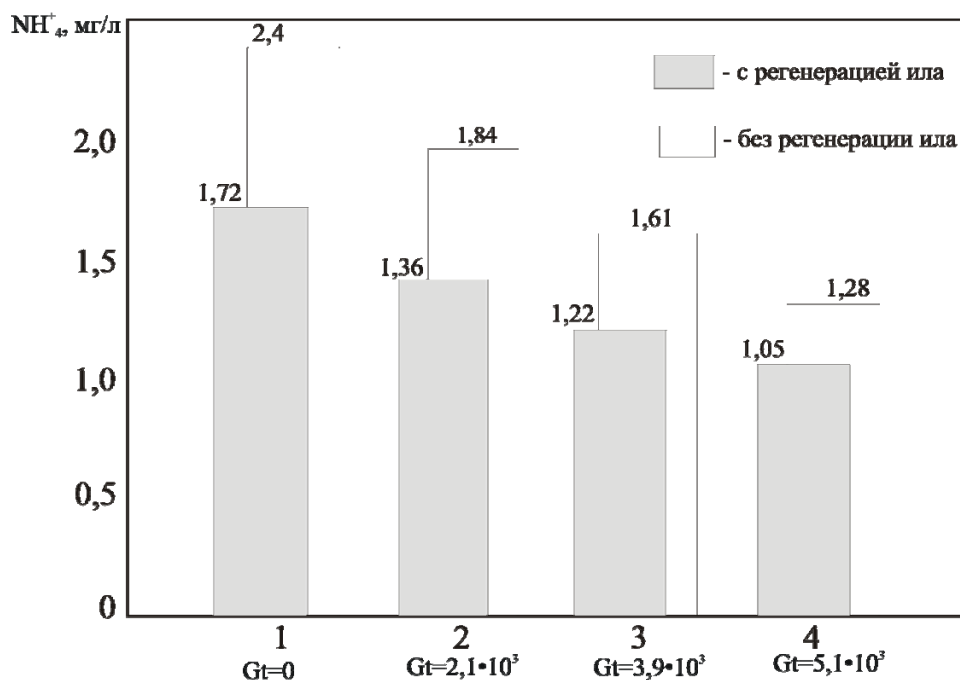


Рис. 3.4. Диаграммы остаточных концентраций аммонийного азота для биологически очищенных сточных вод ($T_a=5$ ч) в контрольном (1) и опытном (2-4) аэротенках

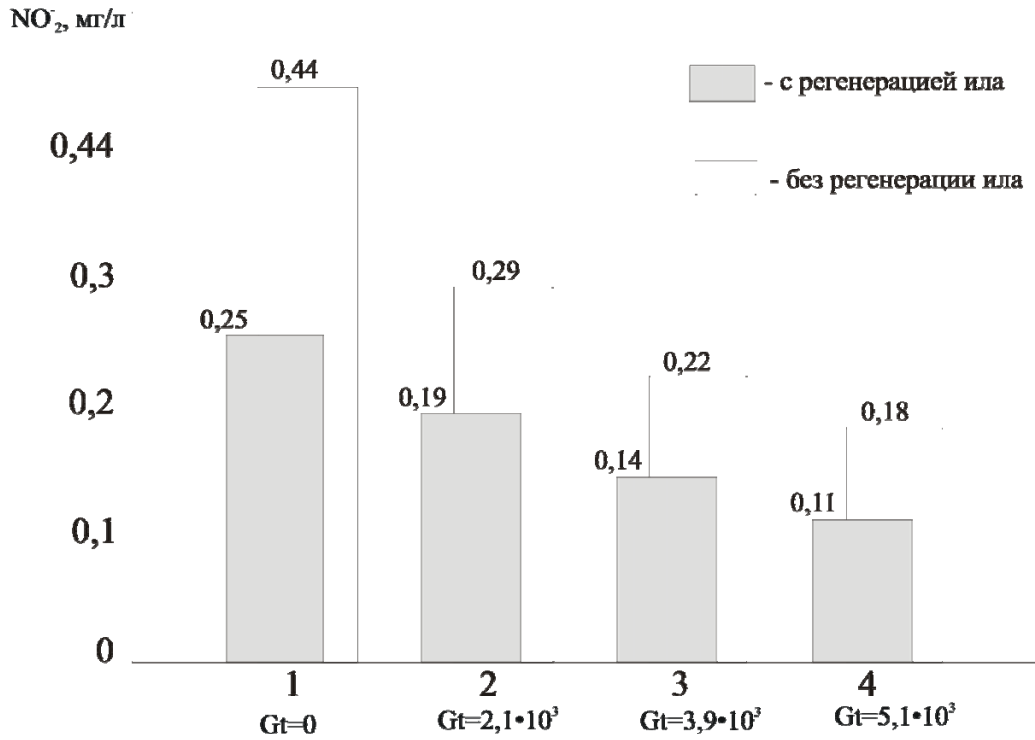


Рис. 3.5. Диаграммы концентраций нитритного азота для биологически очищенных сточных вод ($T_a=5$ ч) в контрольном (1) и опытном (2-4) аэротенках

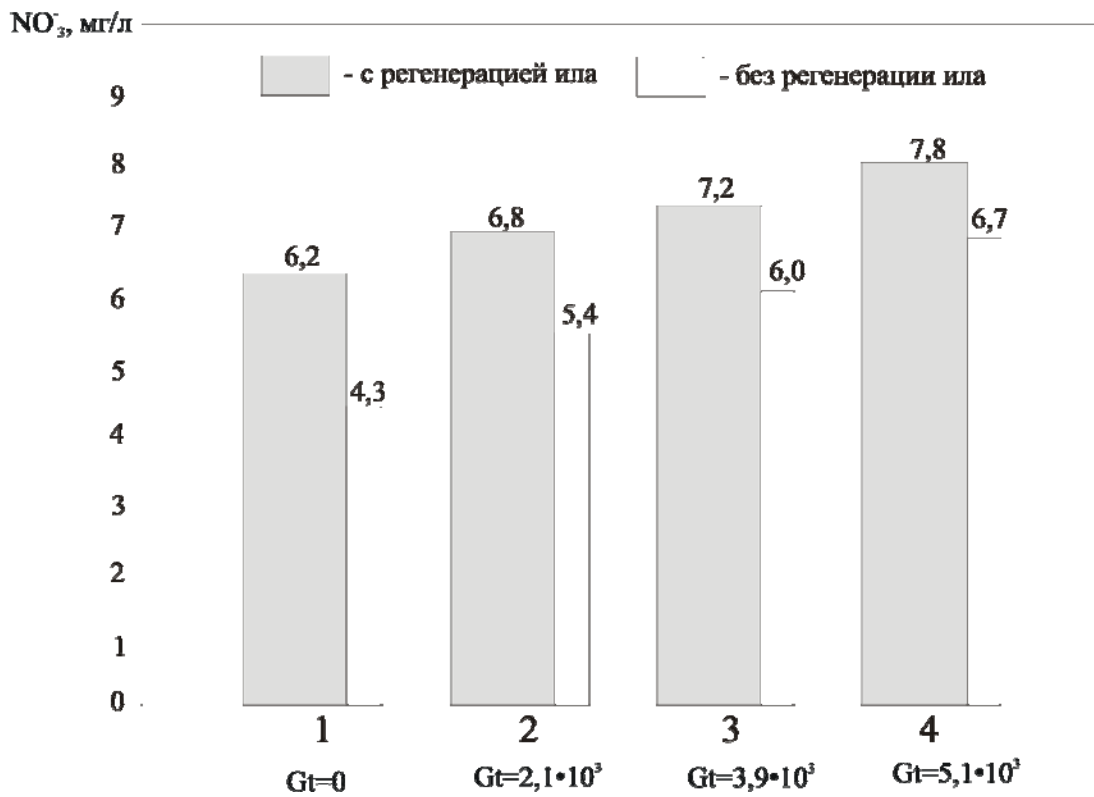


Рис. 3.6. Диаграммы концентраций нитратного азота для биологически очищенных сточных вод ($T_a=5$ ч) в контрольном (1) и опытном (2-4) аэротенках

Остаточные концентрации аммонийного азота в биологически очищенных стоках, как показали эксперименты, снижались по мере увеличения интенсивности обработки иловой смеси в ЭГДУ (см. рис. 3.4) с $Gt=2,3 \cdot 10^3$ до $Gt = 5,1 \cdot 10^3$ как в случае предварительной регенерации активного ила, так и без регенерации. Наилучший эффект снижения концентраций ионов NH_4^+ (с 7,2 до 1,05 мг/л) наблюдался для значений критерия Кэмп при обработке возвратного ила в ЭГДУ $Gt=5,1 \cdot 10^3$ с регенерацией ила и составлял 85,4 %. Для не обработанного в ЭГДУ активного ила с регенерацией эффект очистки по аммонийному азоту был равен 74,7 % (при снижении концентрации NH_4^+ с 7,1 до 1,72 мг/л).

Концентрации ионов NO_2^- , характеризующие прохождение промежуточной стадии нитрификации сточных вод, так же, как и концентрации ионов NH_4^+ , снижались при увеличении критерия Кэмп при обработке возвратного ила в ЭГДУ (см. рис. 3.5). Наименьшие значения содержания нитритных соединений в биологически очищенной воде (0,11 мг/л) наблюдались при использовании регенерированного ила, предварительно обработанного в ЭГДУ при $Gt=5,1 \cdot 10^3$. При использовании в контрольном аэротенке не обработанного в ЭГДУ регенерированного ила значение концентрации ионов NO_2^- в сточных водах после 5-часовой аэрации составило 0,25 мг/л.

Наибольшее содержание нитратов (NO_3^-) в биологически очищенных стоках имело место при использовании регенерированного возвратного ила как в опытном, так и в контрольном аэротенке (см. рис. 3.6). Для обработанного при максимальных значениях критерия Кэмп активного ила концентрация нитратов в стоке после 5-часовой аэрации составила 7,8 мг/л, для необработанного ила – 6,7 мг/л.

Интенсивность обработки активного ила в ЭГДУ также влияла на остаточное содержание в очищенных стоках ионов PO_4^{3-} (рис. 3.7). При использовании в процессе очистки регенерированного и обработанного в ЭГДУ при $Gt=5,1 \cdot 10^3$ возвратного ила концентрация фосфатов в опытном аэротенке снижалась с 9,8-10,1 до 1-1,1 мг/л (эффект очистки до 89,8 %). В контрольном аэротенке с регенерацией ила остаточное содержание фосфатов было не ниже 2,2 мг/л (эффект очистки 78,1 %).

Анализ диаграмм, представленных на рис. 3.4-3.7, позволил сделать вывод об улучшении эффекта нитрификации и очистки по фосфатным соединениям при биологической очистке сточных вод с регенерированным и обработанным в ЭГДУ при больших числах Gt активным илом. Как и при удалении органических примесей, эффективность процессов нитрификации и удаления ионов PO_4^{3-} при использовании

регенерированного ила в меньшей степени зависела от повышения интенсивности его обработки в ЭГДУ по сравнению с опытами, где при биологической очистке стоков применялся нерегенерированный возвратный ил.

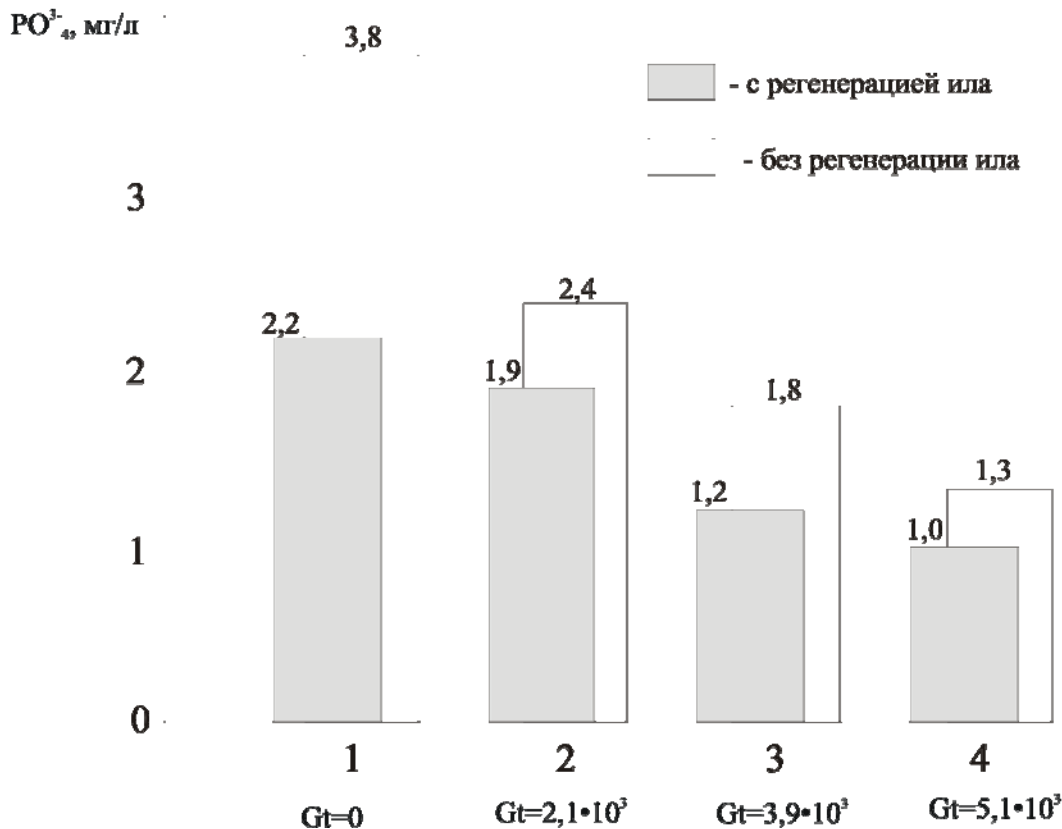


Рис. 3.7. Диаграммы остаточных концентраций фосфатов для биологически очищенных сточных вод ($T_a=5$ ч) в контрольном (1) и опытном (2-4) аэротенках

Второй этап исследований предусматривал перемешивание возвратного активного ила с воздухом в ЭГДУ с одновременной обработкой иловоздушной смеси постоянным током. Центральный электрод 3 и корпус 2 ЭГДУ (см. рис. 3.1) в экспериментах поочередно присоединялись к положительному и отрицательному полюсам источника постоянного тока 6 (выпрямительного устройства). Испытания проводились со стержневым центральным электродом диаметром 2 мм, длиной 20 мм, выполненным из нержавеющей стали.

Величина электропотенциала, подводимого к ЭГДУ, в процессе лабораторных испытаний изменялась от $U=6$ В до $U=24$ В. Сила тока – в пределах от $I=1,2$ мА (плотность тока $i=10$ А/м²) до $I=5,8$ мА ($i=48$ А/м²), удельное количество электричества – от $A_{уд}=0,5 \cdot 10^{-3}$ до $A_{уд}=2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³. В отдельных опытах величина электропотенциала поднималась до $U=30$ В, сила тока – до $I=7,2$ мА ($i=60$ А/м²).

Смешение возвратного ила с воздухом осуществлялось в стволе ЭГДУ при числах Кэмпса от $2,1 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$, разовые сравнительные эксперименты проводились при $Gt=6,5 \cdot 10^3$. Обработанный в ЭГДУ активный ил подавался на опытный аэротенк 9 (см. рис. 3.1). Доза ила в опытном аэротенке поддерживалась в пределах 2,0-2,3 г/л, биологическая очистка осуществлялась в течение 5 часов при интенсивности аэрации 6-7 м³/(м²·ч). Отбор проб производился через 1,5; 3 и 5 часов очистки в экспериментах как с регенерацией, так и без регенерации.

Значение ХПК исходных стоков поддерживалось в пределах 155-160 мг/л. При поступлении стоков с более высокими значениями ХПК они разбавлялись водопроводной водой в опытном аэротенке.

Графики изменения ХПК сточных вод в процессе биологической очистки в опытном аэротенке показаны на рис. 3.8 -3.10.

Экспериментальные данные показали, что при электрообработке илово-здушной смеси в ЭГДУ с электропотенциалом $U=6$ В и удельным расходом электричества $A_{уд}=0,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ после 5-часовой биологической очистки сточных вод в опытном аэротенке эффективность снятия ХПК изменялась в зависимости от интенсивности перемешивания возвратного ила с воздухом в стволе ЭГДУ (числа Кэмпса), а также от знака поляризации центрального электрода и ствола. При использовании в процессе биологической очистки сточных вод нерегенерированного возвратного ила, активированного в ЭГДУ с анодной поляризацией центрального стержня, остаточное содержание ХПК в очищенной воде изменялось (рис. 3.8, а) от 58 мг/л при $Gt=2,1 \cdot 10^3$ до 39,5 мг/л при $Gt=5,0 \cdot 10^3$ (эффект очистки от 63,3 до 75 %). При использовании для биологической очистки стоков нерегенерированного ила, обработанного в ЭГДУ с катодной поляризацией центрального стержня, остаточное содержание ХПК в очищенной воде для этого же интервала чисел Кэмпса при обработке ила находилось в пределах от 45 до 30 мг/л (эффект очистки от 71,5 до 81 %).

При использовании в опытном аэротенке регенерированного возвратного ила, обработанного в ЭГДУ с анодной поляризацией центрального стержня, остаточное содержание ХПК в очищенной воде (см. рис. 3.8, б) изменялось от 47,7 до 37,7 мг/л при увеличении интенсивности перемешивания иловой смеси Gt с $2,1 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$ (эффект очистки стоков возрастал с 69,8 до 76,1 %). Для регенерированного ила, обработанного в ЭГДУ с катодной поляризацией центрального стержня при том же интервале чисел Кэмпса, остаточное содержание ХПК в очищенной воде находилось в пределах от 36,3 до 24,5 мг/л (эффект очистки стоков – от 77 до 84,5 %).

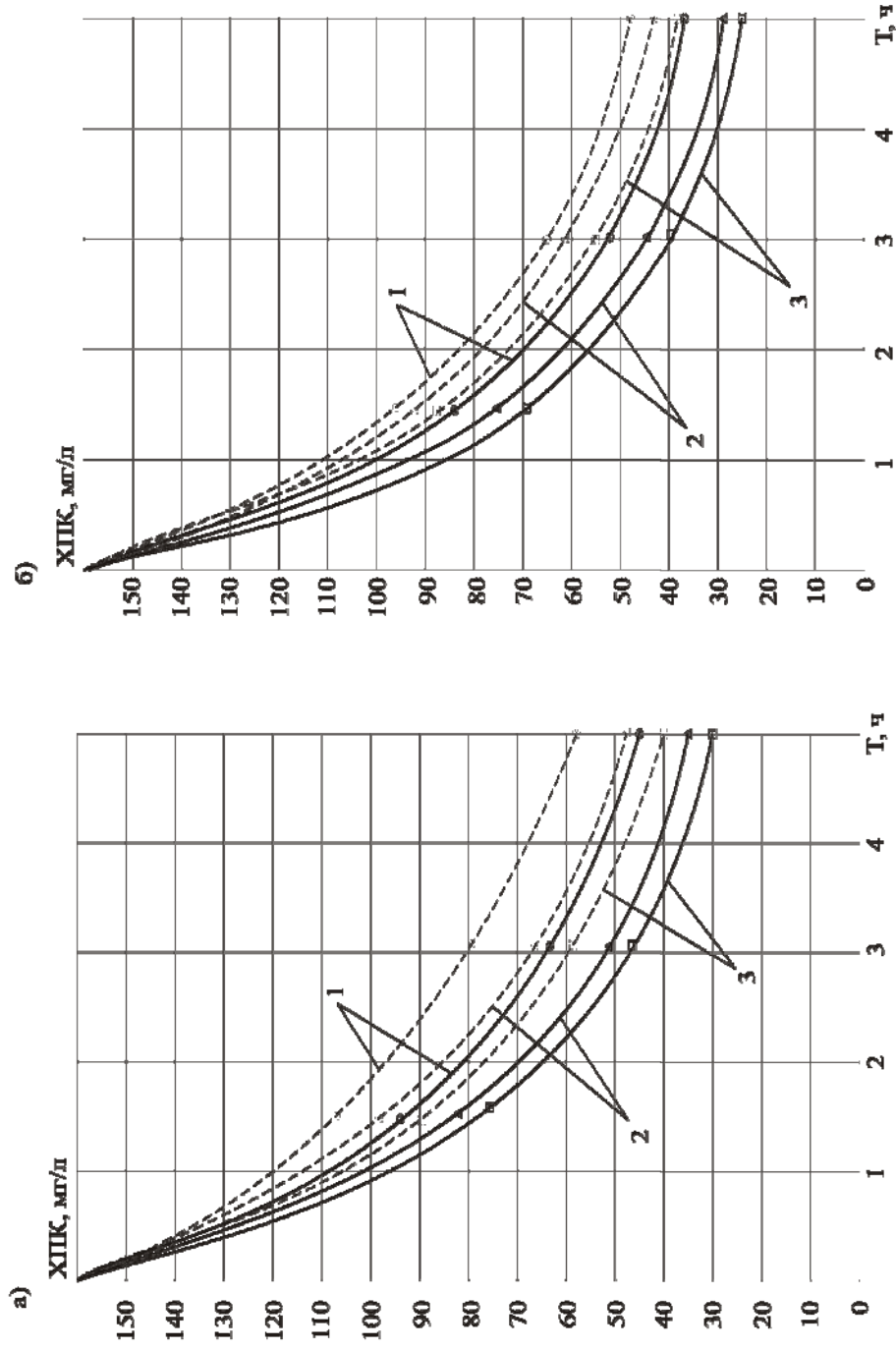


Рис. 3.8. Графики изменения ХПК предварительно осветленных сточных вод в процессе биологической очистки в опытном аэротенке при электрообработке иловоздушной смеси в ЭГДУ с центральным электродом при $U=6$ В, $A_{уд}=0,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³, $i=10$ А/м²:

а – без регенерации ила; б – с регенерацией ила;

1 – при $Gt=2,1 \cdot 10^3$; 2 – при $Gt=3,7 \cdot 10^3$; 3 – при $Gt=5,0 \cdot 10^3$

—— — отрицательная поляризация электрода; - - - - - положительная поляризация электрода

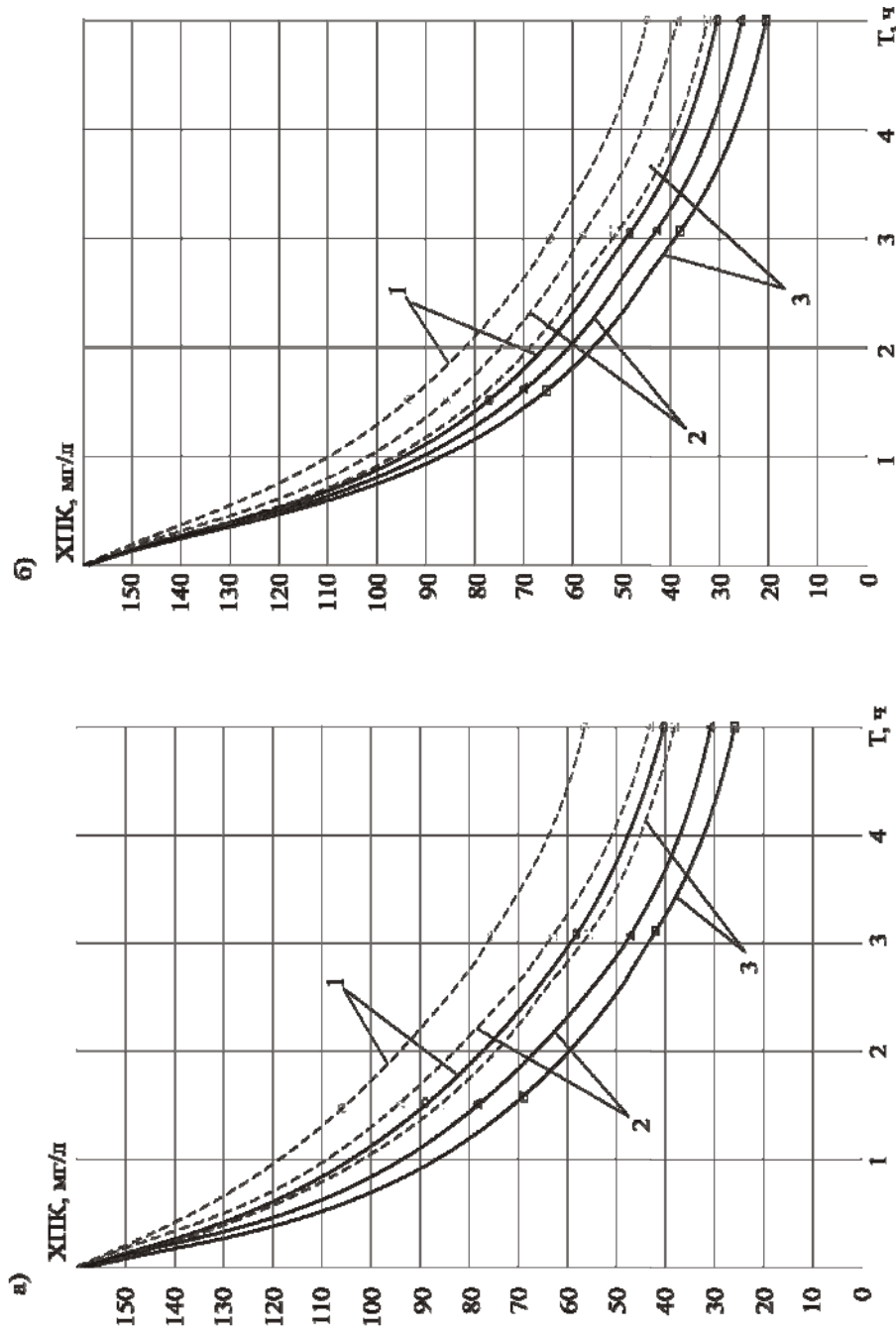


Рис. 3.9. Графики изменения ХПК предварительно осветленных сточных вод в процессе биологической очистки в опытно-аэротенке при электрообработке иловоздушнoй смеси в ЭГДУ с центральным электродом при $U=12 \text{ В}$,

$$A_{\text{уд}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{ч}/\text{м}^3, \quad i = 24 \text{ А}/\text{м}^2.$$

а – без регенерации ила; б – с регенерацией ила;

1 – при $Gt=2,1 \cdot 10^3$; 2 – при $Gt=3,7 \cdot 10^3$; 3 – при $Gt=5,0 \cdot 10^3$

———— отрицательная поляризация электрода; - - - - - положительная поляризация электрода

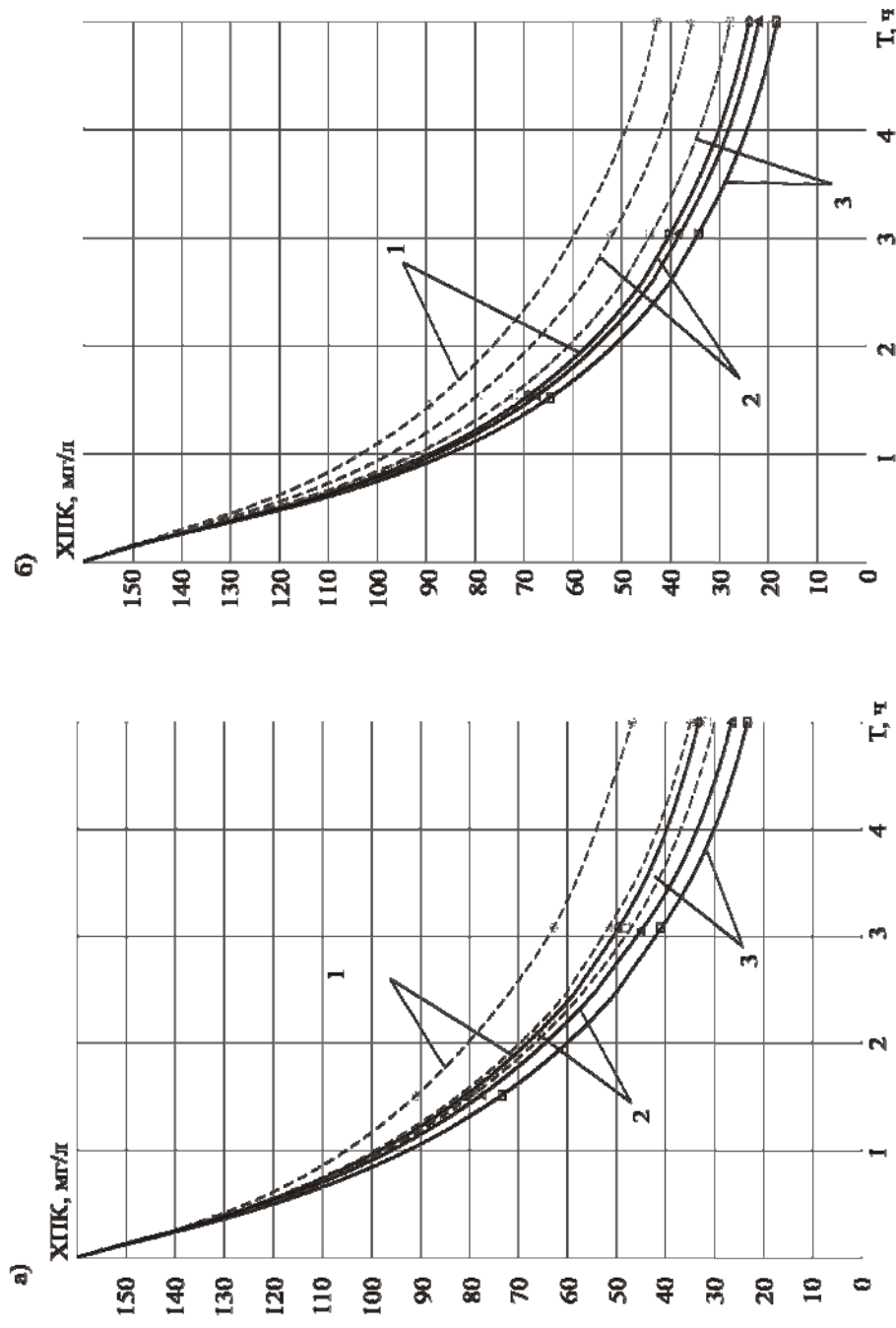


Рис. 3.10. Графики изменения ХПК предварительно осветленных сточных вод в процессе биологической очистки в опытном аэротенке при электрообработке иловоздушной смеси в ЭГДУ с центральным электродом

при $U=24 \text{ В}$, $A_{\text{уд}}=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$, $i=48 \text{ А}/\text{м}^2$:

а – без регенерации ила; б – с регенерацией ила;

1 – при $Gt=2,1 \cdot 10^3$; 2 – при $Gt=3,7 \cdot 10^3$; 3 – при $Gt=5,0 \cdot 10^3$

— — отрицательная поляризация электрода; - - - - - положительная поляризация электрода

При электроактивации иловоздушной смеси в ЭГДУ с потенциалом $U=12$ В и удельным расходом электричества $A_{уд}=1,2 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ лучший эффект снятия ХПК в процессе биологической очистки сточных вод наблюдался в экспериментах, где использовалась отрицательная поляризация центрального стержня. Для нерегенерированного возвратного ила в интервале чисел Кэмпса от $Gt=2,1 \cdot 10^3$ до $Gt=5,1 \cdot 10^3$ эффект снятия ХПК (см. рис. 3.9, а) изменялся в пределах от 74,7 до 83,5 % (при остаточных концентрациях от 40 до 26 мг/л). В случае использования активного ила после регенерации для данного интервала значений Gt и отрицательной поляризации центрального стержня ЭГДУ, остаточные концентрации ХПК в биологически очищенных стоках (см. рис. 3.9, б) варьировались от 30 до 20,5 мг/л (эффект очистки от 81 до 87 %).

Увеличение значения поляризации электродной системы ЭГДУ до 24 В при обработке возвратного ила не привело к значительному улучшению эффекта снятия ХПК в процессе биологической очистки сточных вод по сравнению с результатами, полученными с использованием активного ила, обработанного в ЭГДУ при $U=12$ В. Для нерегенерированного возвратного ила, обработанного с воздухом в ЭГДУ с отрицательной поляризацией центрального стержня при числах Кэмпса от $2,1 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$, остаточные концентрации ХПК в биологически очищенной воде после 5-часовой аэрации (см. рис. 3.10, а) составляли от 32 до 23 мг/л (эффект очистки от 79,7 до 85,4 %). При использовании в процессе очистки регенерированного возвратного ила (применительно к этим же условиям обработки в ЭГДУ) остаточные концентрации ХПК в очищенной воде (см. рис. 3.10, б) варьировались от 25 до 19 мг/л (эффект очистки от 84,1 % до 88 %).

В сериях экспериментов, проводимых с обработкой иловоздушной смеси с воздухом в ЭГДУ с катодной поляризацией центрального стержня при $U=24$ В и $A_{уд}=2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³, пробы биологически очищенной воды исследовались также на остаточные концентрации БПК₅. Для нерегенерированного возвратного ила в интервале интенсивности его обработки в ЭГДУ $Gt=2,1 \cdot 10^3 \div 5,0 \cdot 10^3$ остаточные концентрации БПК₅ в очищенной воде (см. рис. 3.11, а) составляли от 12 до 6 мг/л (эффект очистки от 85 до 92,5 % при БПК₅ исходного осветленного стока, равной 80 мг/л). При использовании для биологической очистки стоков регенерированного активного ила, предварительно обработан-

ного в ЭГДУ при этих же условиях, остаточные концентрации БПК₅ в очищенной воде после 5-часовой аэрации составляли (см. рис. 3.11, б) от 10,5 до 4,5 мг/л (эффект очистки от 86,9 до 94,4 %). Увеличение интенсивности обработки иловоздушной смеси в ЭГДУ до значения $Gt=6,5 \cdot 10^3$ не оказало существенного влияния на улучшение эффекта очистки (93,8 % – при использовании нерегенерированного ила и 95 % – регенерированного возвратного ила). Увеличение напряжения на электродной системе ЭГДУ до $U=30$ В не приводило к повышению эффекта очистки стоков по БПК₅, а в некоторых опытах с регенерированным илом ухудшало снятие органических загрязнений.

Результаты, полученные при использовании игольчатого центрального электрода в ЭГДУ для обработки активного ила, аналогичны опытным данным, полученным с использованием стержневого центрального электрода.

Анализ экспериментальных данных по кинетике снижения ХПК и БПК₅ в процессе биологической очистки сточных вод в опытном аэротенке позволил определить наиболее рациональные режимы обработки иловоздушной смеси в ЭГДУ. Смешение возвратного активного ила с воздухом целесообразно производить при числах Кэмпса Gt от $3,7 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$ с электрообработкой смеси при удельных затратах электричества от $1,2 \cdot 10^{-3}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ и катодной поляризацией центрального стержня ЭГДУ с плотностью тока до 48 А/м². Регенерация возвратного активного ила при таких параметрах его обработки в ЭГДУ приводит к незначительному улучшению эффекта окисления органических примесей в процессе биологической очистки сточных вод; поэтому решение о возможности использования регенерации должно приниматься исходя из конкретных производственных условий работы аэротенков на канализационных очистных сооружениях.

Диаграммы концентраций ионов NH_4^+ , NO_2^- и NO_3^- в очищенных сточных водах после 5-часовой аэрации с активным илом в опытном аэротенке показаны на рис. 3.12-3.14. Данные диаграммы были получены для экспериментов с использованием возвратного ила, обработанного в ЭГДУ с катодной поляризацией центрального стержня при $U=12$ В и $A_{\text{уд}}=1,2 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³.

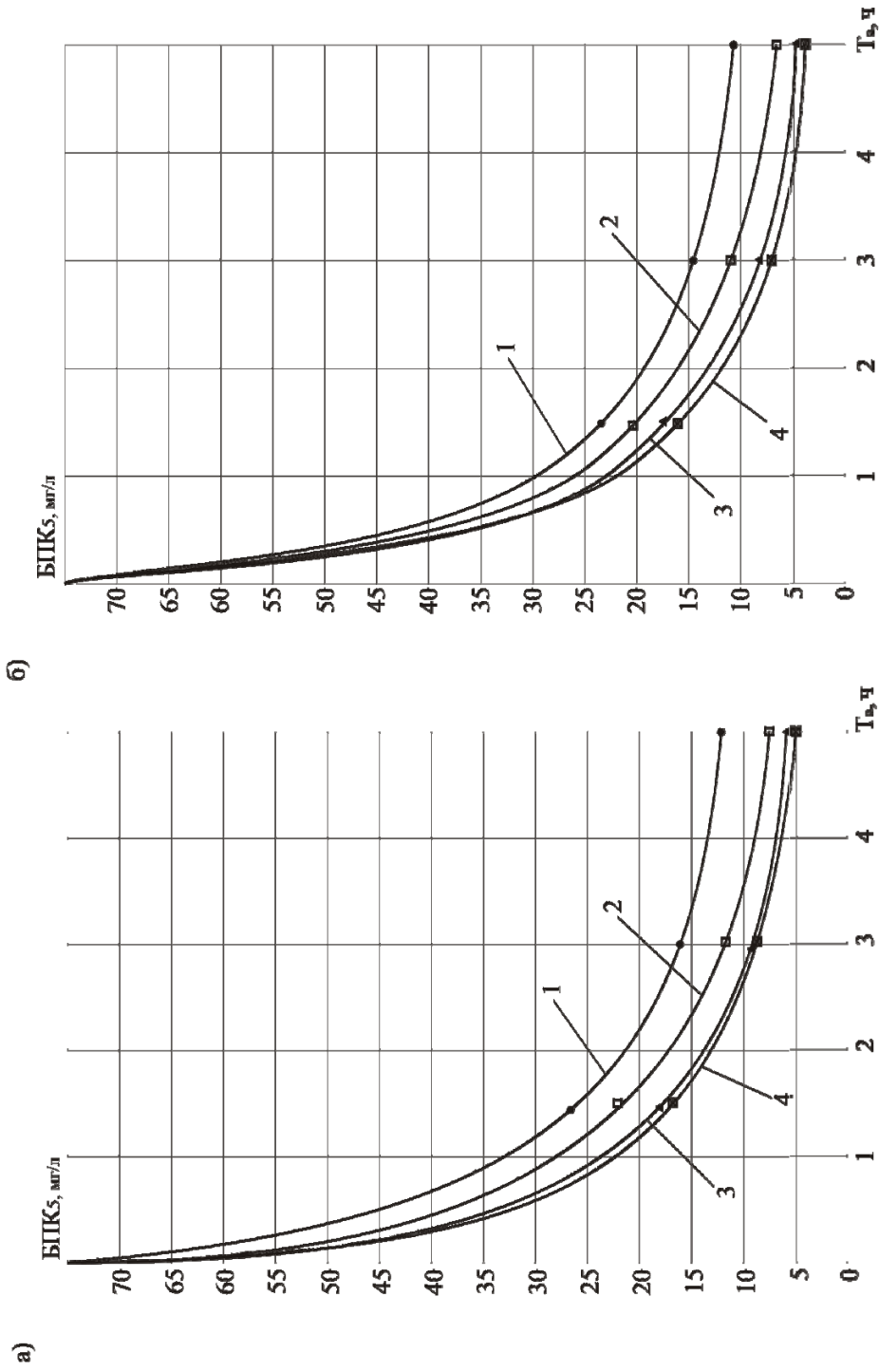


Рис. 3.11. Графики изменения БПК₅ предварительно осветленных сточных вод в процессе биологической очистки в опытно-аэротенке при электрообработке иловоздушной смеси в ЭГДУ с центральным стержневым катодом при $U=24V, A_{уд}=2,5 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{ч}/\text{м}^3, i=48 \text{ A}/\text{м}^2$:

а – без регенерации ила; б – с регенерацией ила;

1 – при $Gt=2,1 \cdot 10^3$; 2 – при $Gt=3,7 \cdot 10^3$; 3 – при $Gt=5,0 \cdot 10^3$; 4 – при $Gt=6,5 \cdot 10^3$

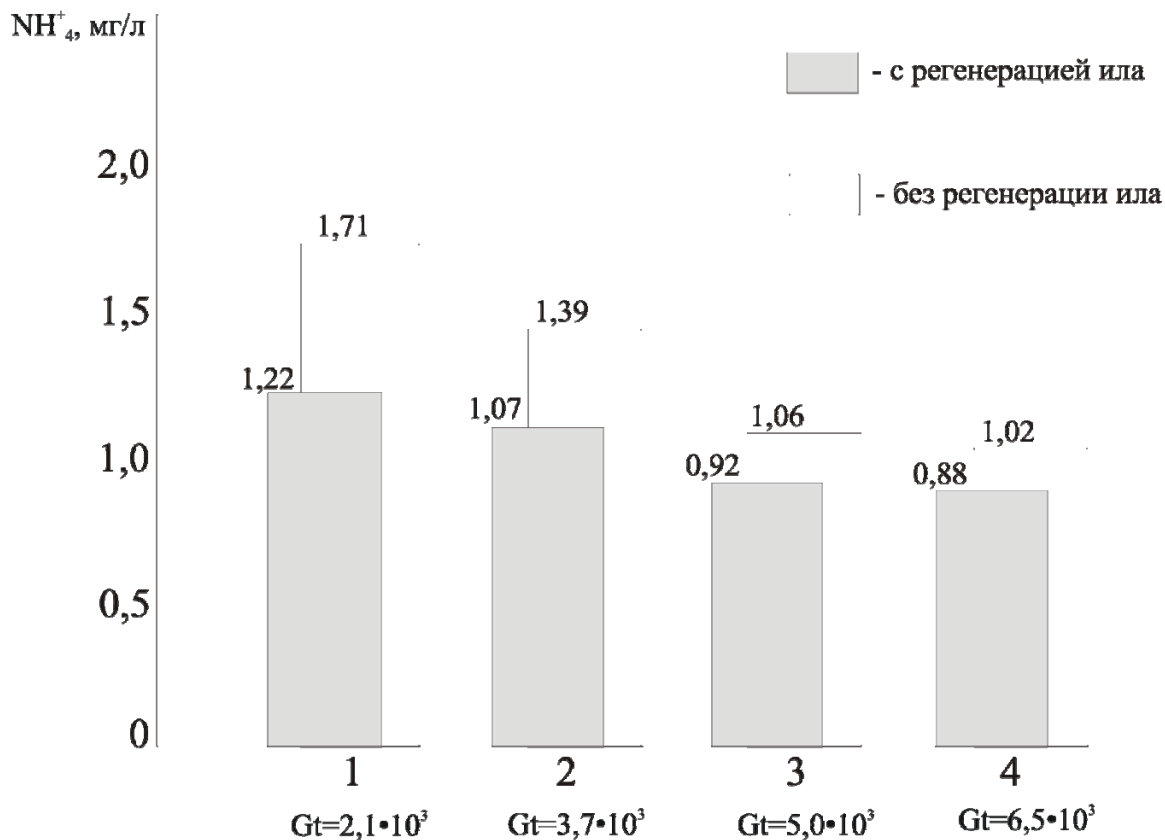


Рис. 3.12. Диаграммы остаточных концентраций аммонийного азота для биологически очищенных сточных вод ($T_a=5$ ч) с использованием обработанного в ЭГДУ возвратного ила при $Gt=(2,1\div 6,5) 10^3$, $U=12$ В и $A_{уд}=1,2\cdot 10^{-3}$ А·ч/м³, $i=24$ А/м²

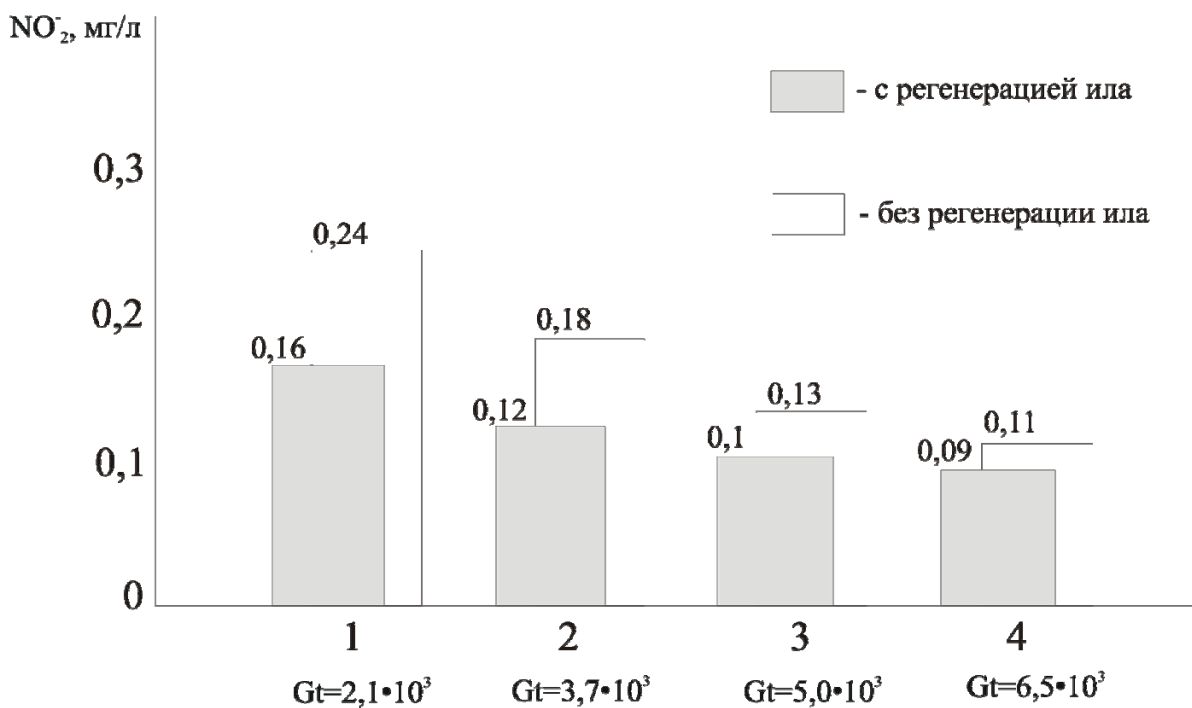


Рис. 3.13. Диаграммы концентраций нитритного азота для биологически очищенных сточных вод ($T_a=5$ ч) с использованием обработанного в ЭГДУ возвратного ила при $Gt=(2,1\div 6,5) 10^3$, $U=12$ В и $A_{уд}=1,2\cdot 10^{-3}$ А·ч/м³, $i=24$ А/м²

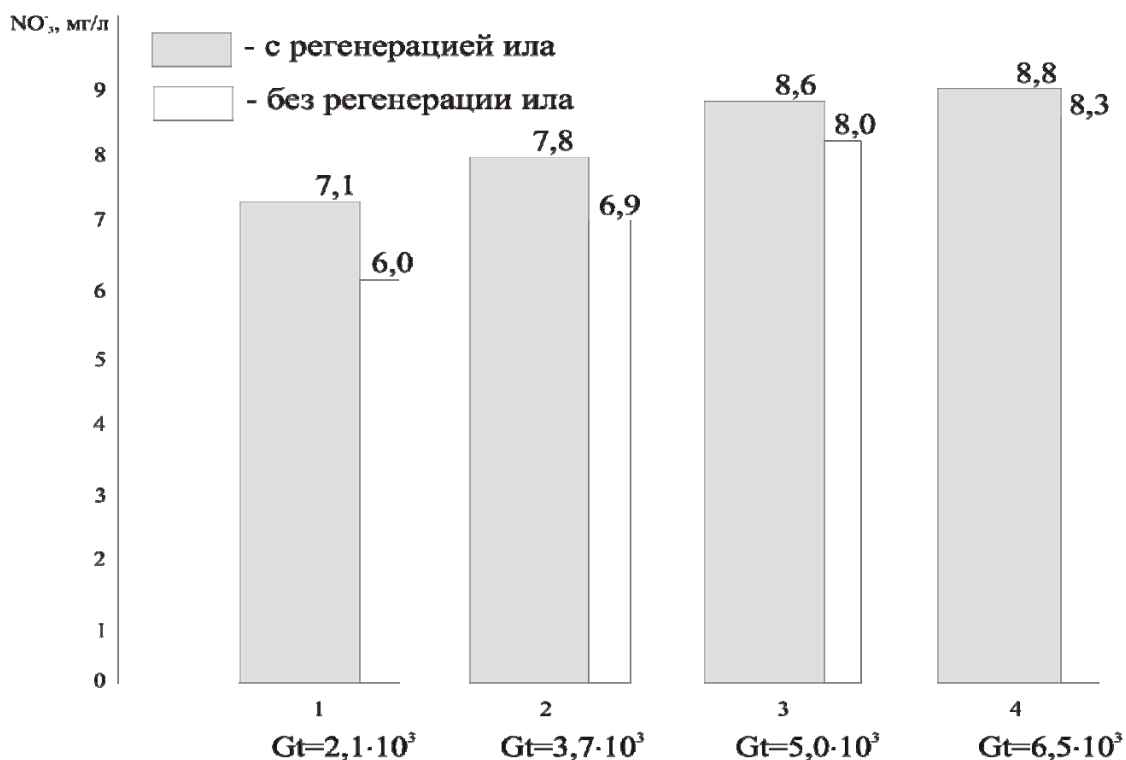


Рис. 3.14. Диаграммы концентраций нитратного азота для биологически очищенных сточных вод ($T_a=5$ ч) с использованием обработанного в ЭГДУ возвратного ила при $Gt=(2,1\div 6,5) \cdot 10^3$, $U=12$ В и $A_{уд}=1,2 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³, $i=24$ А/м², $i=24$ А/м²

Увеличение напряжения до 24 В и удельного расхода электричества до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ не приводило к существенному улучшению процесса нитрификации. Обработка опытных данных показала, что наиболее глубокое удаление аммонийного азота из сточных вод достигалось при использовании возвратного ила, обработанного в ЭГДУ при величинах Gt от $5,0 \cdot 10^3$ до $6,5 \cdot 10^3$ (см. рис. 3.12). Для нерегенерированного ила при концентрации ионов NH_4^+ в исходных стоках 7,0-7,3 мг/л остаточное содержание аммонийного азота в воде после биологической очистки составляло 1,02-1,06 мг/л (эффект очистки от 85,3 до 85,8 %), а для регенерированного ила – 0,88-0,92 мг/л (эффект очистки от 87,4 до 87,8 %). Минимальные концентрации нитритного азота в биологически очищенных стоках также наблюдались при использовании в процессе очистки активированного ила, обработанного в ЭГДУ при Gt от $5,0 \cdot 10^3$ до $6,5 \cdot 10^3$ (см. рис. 3.13). Для нерегенерированного ила содержание нитритов в очищенной воде составляло 0,11-0,13 мг/л, для регенерированного ила концентрация ионов NO_2^- изменялась от 0,09 до 0,1 мг/л.

Концентрации нитратных ионов в очищенных стоках также зависели от интенсивности обработки возвратного ила в ЭГДУ. При $Gt=5,0 \cdot 10^3$ и $Gt=6,5 \cdot 10^3$ имели место максимальные концентрации ионов NO_3^- в воде после биологической очистки (от 8,0 до 8,3 мг/л –

для нерегенерированного ила и от 8,6 до 8,8 мг/л – для регенерированного ила).

На рис. 3.15 представлены диаграммы остаточных концентраций фосфатов в биологически очищенных сточных водах. Наименьшие концентрации ионов PO_4^{3-} имели место при использовании для биологической очистки активного ила, обработанного в ЭГДУ при числах Кэмпбелла Gt от $5,0 \cdot 10^3$ до $6,5 \cdot 10^3$ с напряжением $U=12$ В, удельным расходом электричества $A_{\text{уд}}=1,2 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ и катодной поляризацией центрального электрода. Эффект очистки по фосфатам при их начальной концентрации 9,9-10,2 мг/л изменялся от 89,1 до 91,1 % для нерегенерированного ила (остаточные концентрации ионов PO_4^{3-} от 0,9 до 1,1 мг/л) и от 92,1 до 93,1 % для регенерированного ила (остаточные концентрации ионов PO_4^{3-} от 0,7 до 0,8 мг/л). При увеличении напряжения на электродной системе ЭГДУ до $U=24$ В и значения $A_{\text{уд}}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ изменение концентраций фосфатов в очищенной воде было незначительным.

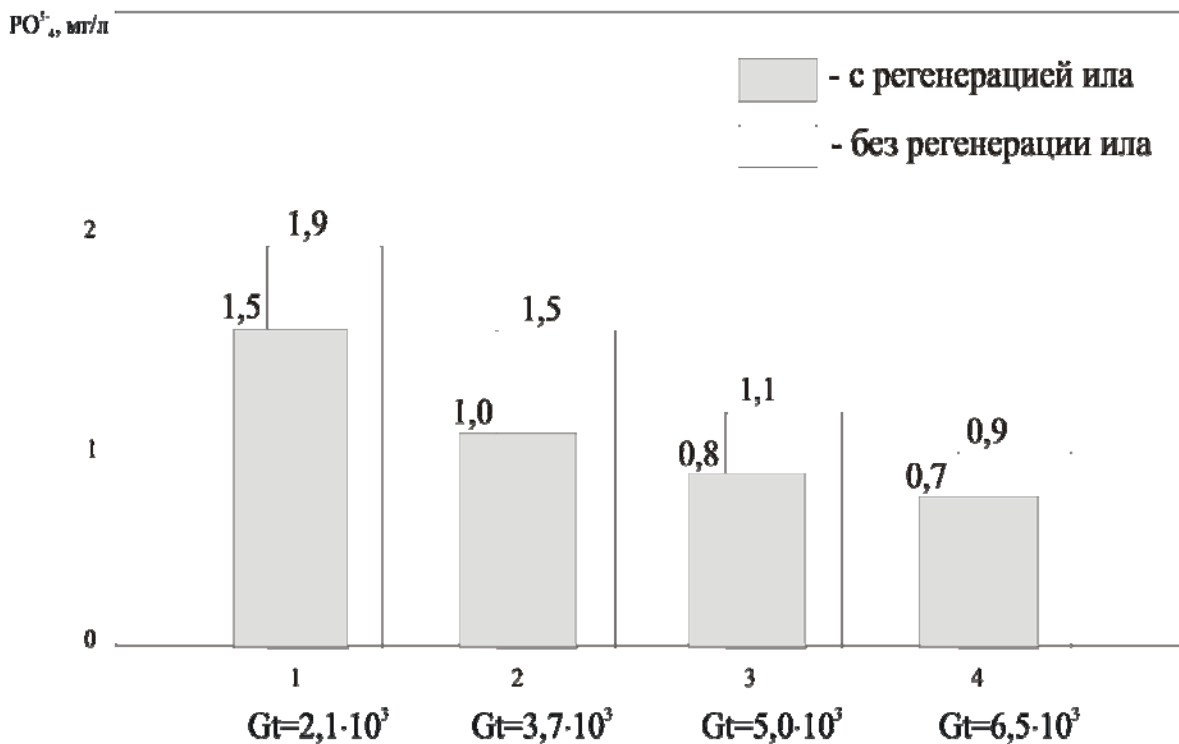


Рис. 3.15. Диаграммы остаточных концентраций фосфатов для биологически очищенных сточных вод ($T_a=5$ ч) с использованием обработанного в ЭГДУ возвратного ила при $Gt=(2,1 \div 6,5) 10^3$, $U=12$ В и $A_{\text{уд}}=1,2 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³, $i_c=24$ А/м²

Анализ диаграмм, характеризующих кинетику нитрификации и дефосфатации сточных вод в процессе их биологической очистки, показал, что эффективное удаление аммонийного азота и фосфатных соединений, так же, как и органических примесей, наблюдалось в случае использования активного ила, обработанного в ЭГДУ при числе Кэмпбелла $5,0 \cdot 10^3$ и удельном расходе электричества $A_{уд} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³. Увеличение значений Gt до $6,5 \cdot 10^3$ и $A_{уд}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ при обработке возвратного ила в ЭГДУ не приводит к существенному улучшению эффекта снятия ионов NH_4^+ и PO_4^{3-} в очищенной воде и может быть экономически целесообразным только для насосов возвратного активного ила с достаточной установленной фактической мощностью.

3.5. Оценка достоверности полученных экспериментальных данных. Разработка математической модели процесса окисления органических примесей с использованием активированного возвратного ила

Математическая модель процесса удаления БПК₅ при биологической очистке сточных вод была разработана для случая активации возвратного ила с воздухом в ЭГДУ с катодной поляризацией центрального электрода и напряжением постоянного тока 12-24 В.

Достоверность полученных экспериментальных результатов оценивалась по их воспроизводимости, полученной в трех сериях опытов. Повторение опытов производилось в одинаковых условиях.

При оценке достоверности экспериментальных данных определялись следующие показатели:

1. Среднеарифметическое значение определяемого параметра X_i при числе повторенных опытов $n=3$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^3 X_i}{n}. \quad (3.12)$$

2. Величина отклонения для рассматриваемого измерения

$$a_i = X_i - \bar{X}. \quad (3.13)$$

3. Величина среднеквадратической ошибки серии опытов

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 a_i^2}{n-1}}. \quad (3.14)$$

4. Ошибка репрезентативности серии опытов

$$m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (3.15)$$

5. Погрешность серии опытов с числом степеней свободы $V=n-1=3-1=2$ при требовании надежности измерений $\beta=0,95$ и показателе надежности (стандартное значение критерия Стьюдента) $T=3,2$

$$\Delta = m \cdot T, \quad (3.16)$$

6. Коэффициент вариации серии опытов

$$K_l = \frac{100\sigma}{\bar{X}}, \quad \% \quad (3.17)$$

Коэффициент вариации во всех случаях не превышал значения 5 %, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Анализ зависимостей, полученных при изучении кинетики процесса биологической очистки, показал, что изменение концентрации органических веществ в сточных водах при биоокислении полисубстрата (органических загрязнений) хозяйственно-бытовых сточных вод адаптированным илом, прошедшим активацию в ЭГДУ, весьма корректно описывается уравнением первого порядка

$$L_t = \frac{L_0}{1 + K_{oa}T}, \quad (3.18)$$

где L_0 и L_t – соответственно БПК₅ смеси сточных вод с активным илом в начальный момент биологической очистки (мг/л) и через некоторый промежуток времени длительностью T часов;

K_{oa} – константа скорости биохимического окисления органических загрязнений активированной в ЭГДУ иловой смесью, ч⁻¹.

Обработка опытных данных позволила получить следующую математическую зависимость для константы скорости биохимического окисления:

$$K_{oa} = K_o \cdot B \cdot Gt^m \cdot A_{уд}^m \quad (3.19)$$

где Gt – критерий Кэмпбелла, $Gt = (3,7 \div 5,1) \cdot 10^3$;

$A_{уд}$ – удельный расход электричества при обработке иловоздушной смеси с газонасыщением 10-15 % в ЭГДУ,

$$A_{уд} = (1,2 - 2,5) \cdot 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{ч} / \text{м}^3;$$

B, K_o – коэффициенты, $B = 2,4 \cdot 10^{-3}$, $K_o = 0,9$;

n, m – показатели степени, $n = 1,0$, $m = 0,2$.

Оценка адекватности математических зависимостей осуществлялась по критерию Фишера. Проведенный анализ показал, что полученные зависимости адекватно описывают процесс снижения БПК₅ осветленного хозяйственно-бытового стока при его биохимической

очистке в аэротенке для времени аэрации в пределах 5 ч с использованием возвратного активного ила, предварительно обработанного в смеси с воздухом в электрогидродинамическом устройстве.

Выводы

1. С увеличением интенсивности смешения возвратного ила с воздухом в ЭГДУ при числах Кэмпса до $6,5 \cdot 10^3$ и удельного расхода электричества при электроактивации смеси до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ эффективность биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод непрерывно повышается (по БПК₅ – с 74,4 до 92,5 %, по ХПК – с 57 до 85,4 %, по ионам NH₄⁺ – с 66,7 до 85,8 %, по фосфатам – с 62 до 91,1 %).

2. Наиболее значимое снижение ХПК и БПК₅ в очищенной воде после пятичасовой аэрации с активированным в ЭГДУ возвратным илом наблюдается при числах Кэмпса от $3,7 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$ с одновременной электрообработкой иловоздушной смеси при удельных затратах электричества от $1,2 \cdot 10^{-3}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ и катодной поляризации центрального стержневого электрода ЭГДУ с плотностью тока до 48 А/м². Использование центрального игольчатого электрода в ЭГДУ не приводит к увеличению окислительной способности.

3. Глубокое удаление органических примесей на стадии биологической очистки хозяйственно-бытовых стоков с активированным возвратным илом позволяет интенсифицировать процессы нитрификации в аэрационном бассейне. Эффективное удаление аммонийного азота (с 7,2 до 0,88 мг/л) и фосфатных соединений (с 10 до 0,7 мг/л) имеет место при использовании активного ила, предварительно обработанного в ЭГДУ при $Gt=5,0 \cdot 10^3$, $A_{уд}=1,2 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ и катодной поляризации центрального стержня. Увеличение значений Gt до $6,5 \cdot 10^3$ и $A_{уд}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ при обработке возвратного ила в ЭГДУ не приводит к существенному улучшению эффекта снятия ионов NH₄⁺ и PO₄³⁻ в очищаемой воде.

4. Регенерация возвратного активного ила при вышеуказанных параметрах его обработки в ЭГДУ обеспечивает незначительное улучшение эффективности снятия органических загрязнений в процессе биологической очистки сточных вод; поэтому решение о возможности использования регенераторов в аэротенках должно приниматься исходя из конкретных производственных условий.

5. Получены математические зависимости, адекватно описывающие кинетику снижения БПК₅ осветленных хозяйственно-бытовых сточных вод в процессе их биологической очистки с активированным возвратным илом.

4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОГО ИЛА ОПЫТНОГО И КОНТРОЛЬНОГО АЭРОТЕНКОВ

4.1. Объект исследований, программа и методика лабораторных испытаний

4.1.1. Объект исследований

Объектом исследований являлся активный ил, выходящий вместе с биологически очищенными сточными водами из опытного и контрольного аэротенков (см. рис. 3.1). Зольность ила составляла в среднем 28-32 %, дозы ила в аэротенках варьировались от 1,5 до 3,5 г/л, средняя нагрузка при этом составляла от 0,05 до 0,15 г БПК_{полн} на 1 г беззольного сухого вещества ила в сутки.

4.1.2. Описание установки для проведения лабораторных исследований

Эксперименты проводились на опытном цилиндре-отстойнике, установленном в лабораторном корпусе на КОС (г. Заречный, Пензенской области). Цилиндр-отстойник имел высоту 800 мм и диаметр 80 мм. В нижней части лабораторного отстойника имелось коническое днище (рис. 4.1), имеющее объем 170 мл.

Общий объем цилиндра-отстойника составлял 4 литра. В экспериментах по определению илового индекса и концентрации взвешенных веществ в осветленной воде иловая смесь из опытного или контрольного аэротенка заливалась в цилиндр-отстойник и отстаивалась в течение заданного времени. Отбор проб осветленной воды 6 осуществлялся с помощью двух кранов-пробоотборников 5, расположенных на высоте 300 мм и 650 мм от конического днища. После окончания экспериментов отстоенный ил и осветленная вода сбрасывались в канализацию открытием крана 3.

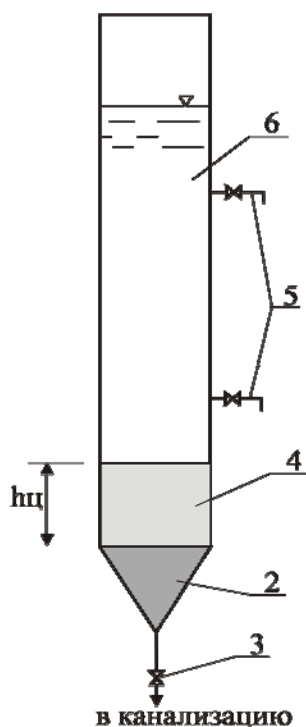


Рис. 4.1. Схема лабораторного цилиндра-отстойника:
1 – цилиндрический корпус;
2 – коническое днище; 3 – сбросной кран; 4 – отстоенный ил; 5 – краны-пробоотборники; 6 – осветленная вода

4.1.3. Программа и методика лабораторных исследований

Программа лабораторных исследований седиментационных характеристик активного ила предусматривала отбор проб смеси биологически очищенных сточных вод с илом после опытного и контрольного аэротенков с последующим их отстаиванием в цилиндре-отстойнике при различных концентрациях активного ила. Объем каждой отбираемой пробы смеси очищенных сточных вод с активным илом составлял 4 литра.

Целью экспериментов являлось подтверждение теоретических предпосылок о влиянии предварительной обработки возвратного ила в ЭГДУ, а также дозы активного ила на величину илового индекса и концентрацию взвешенных веществ в биологически очищенной сточной воде после вторичного отстаивания. В ходе проведения лабораторных испытаний решались следующие задачи:

1. Нахождение величины илового индекса при 30-минутном отстаивании выходящего в смеси с биологически очищенными стоками из опытного и контрольного аэротенков активного ила с дозами от 1,5 до 3,5 мг/л.

2. Определение осредненной концентрации взвешенных веществ в слое осветленного стока после 30-90-минутного отстаивания в цилиндре-отстойнике.

Объем осажденного ила после отстаивания в цилиндре-отстойнике определялся по формуле

$$V_{\text{ил}} = V_{\text{к}} + \omega_{\text{ц}} \cdot h_{\text{ц}}, \quad (4.1)$$

где $V_{\text{к}}$ – объем конической части цилиндра-отстойника, $V_{\text{к}} = 170$ мл;

$\omega_{\text{ц}}$ – площадь цилиндрического корпуса (см. рис. 4.1), $\omega_{\text{ц}} = 50,3$ см²;

$h_{\text{ц}}$ – высота цилиндрической части отстойника, занимаемая слоем отстоенного ила (см. рис. 4.1), см.

Осредненная концентрация взвеси в осветленной воде после отстаивания вычислялась по формуле

$$C = 0,5 (C_{\text{в}} + C_{\text{н}}), \quad (4.2)$$

где $C_{\text{в}} + C_{\text{н}}$ – концентрации взвешенных веществ в осветленной воде, взятой из верхнего и нижнего пробоотборников цилиндра-отстойника (см. рис. 4.1).

Доза ила, концентрация взвеси в осветленной воде после отстаивания, а также иловый индекс определялись на основе данных химических анализов.

4.1.4. Методика проведения химических анализов

При проведении лабораторных исследований концентрацию взвешенных веществ в осветленной воде, иловый индекс и доза активного ила находили в соответствии с рекомендациями [5, 42].

Определение концентрации взвешенных веществ в осветленной сточной воде после биологической очистки производилось гравиметрическим методом.

Заданный объем воды (до 500 мл) профильтровывали через плотный фильтр (диаметром 9-11 см), предварительно высушенный в течение 1,5-2 часов при 150 °С и взвешенный в закрытом бюксе на аналитических весах. После фильтрования загрязненный фильтр с осадком переносили в тот же бюкс, высушивали 1,5-2 ч при 105-110 °С, охлаждали в эксикаторе и взвешивали на аналитических весах в закрытом бюксе. Содержание взвешенных веществ в исследуемой сточной воде рассчитывали по формуле

$$C = \frac{1000(g_1 - g_2)}{V}, \quad (4.3)$$

где g_1 – масса бюкса с просушенным фильтром после фильтрования воды, мг;

g_2 – масса бюкса с просушенным фильтром до фильтрования воды, мг;

V – объем профильтрованной воды, мг.

Для определения дозы активного ила использовались следующие материалы и оборудование:

- 1) воронка Бюхнера (с диаметром 55 мм) с колбой Бунзена;
- 2) эксикатор;
- 3) водоструйный насос (вакуум-насос);
- 4) цилиндр мерный на 50 мл;
- 5) беззольный фильтр (черная или розовая лента);
- 6) сушильный шкаф;
- 7) аналитические весы.

Активный ил из аэротенков хорошо перемешивали и отбирали порцию иловой смеси точно 25 или 50 мл в мерный цилиндр с таким расчетом, чтобы количество сухого вещества в пробе не превышало 0,3-0,4 г. Соединяли колбу Бунзена с вакуум-насосом и вкладывали в воронку Бюхнера предварительно высушенный фильтр. Фильтр помещали так, чтобы он плотно прилегал к стенкам воронки. Отмеренное количество иловой смеси из цилиндра пропускали через фильтр, распределяя его равномерно по поверхности фильтра. Приставший к стенкам цилиндра ил смывали на фильтр наибольшими порциями

дистиллированной воды, приливая ее после того, как вся жидкость пройдет через фильтр, во избежание взмучивания ила.

После того как жидкость на фильтре была хорошо отфильтрована, фильтр с илом переносили на лист фильтровальной бумаги и помещали в сушильный шкаф. Замечали время, когда температура поднималась до 105 °С, после чего сушили в течение 30-60 минут до постоянного веса. Высушенный ил охлаждали в эксикаторе и взвешивали на аналитических весах.

Дозу или концентрацию активного ила по сухому веществу определяли по формуле

$$a = \frac{(b - c) \cdot 1000}{V}, \quad (4.4)$$

где a – доза активного ила, г/л;

b – масса фильтра с илом, г;

c – масса фильтра без ила, г;

V – объем профильтрованной иловой смеси, мл.

Для определения илового индекса использовали цилиндр-отстойник (см. рис. 4.1) и часы.

Пробу иловой смеси аэротенка тщательно взбалтывали, наливали объем смеси $V_{см}$ в цилиндр-отстойник и производили отсчет времени. По истечении 30 минут отмечали объем, занимаемый илом, в мл, и при известной дозе ила в этой пробе определяли ее иловый индекс по соотношению

$$ИИ = \frac{V_{ил}}{G_{и}}, \quad (4.5)$$

где ИИ – иловый индекс, мл/г;

$V_{ил}$ – объем ила после 30-минутного отстаивания, мл, определяемый по (4.1);

$G_{и}$ – масса ила в исследуемой пробе иловой смеси, г,

$$G_{и} = a V_{см}; \quad (4.6)$$

здесь a – доза ила в исследуемом объеме смеси, г;

$V_{см}$ – объем смеси в цилиндре-отстойнике, $V_{см} = 4$ л.

4.2. Результаты экспериментальных исследований седиментационных характеристик иловой смеси

Испытания проводились на лабораторной установке с опытным и контрольным аэротенками (см. рис. 3.1) с использованием цилиндра-отстойника (см. рис. 4.1). Биологически очищенная сточная вода в смеси с активным илом поочередно отбиралась из опытного и контрольного аэротенков в цилиндр-отстойник, где происходил процесс

вторичного отстаивания смеси с образованием осадка (отстоенного ила) и осветленной воды.

Графики изменения концентраций взвешенных веществ в осветленной воде после 30-90-минутного отстаивания иловой смеси при дозе активного ила 1,5-3,5 г/л показаны на рис. 4.2–4.4. Диаграммы изменения иловых индексов после 30-минутного отстаивания иловой смеси при различных дозах активного ила приведены на рис. 4.5.

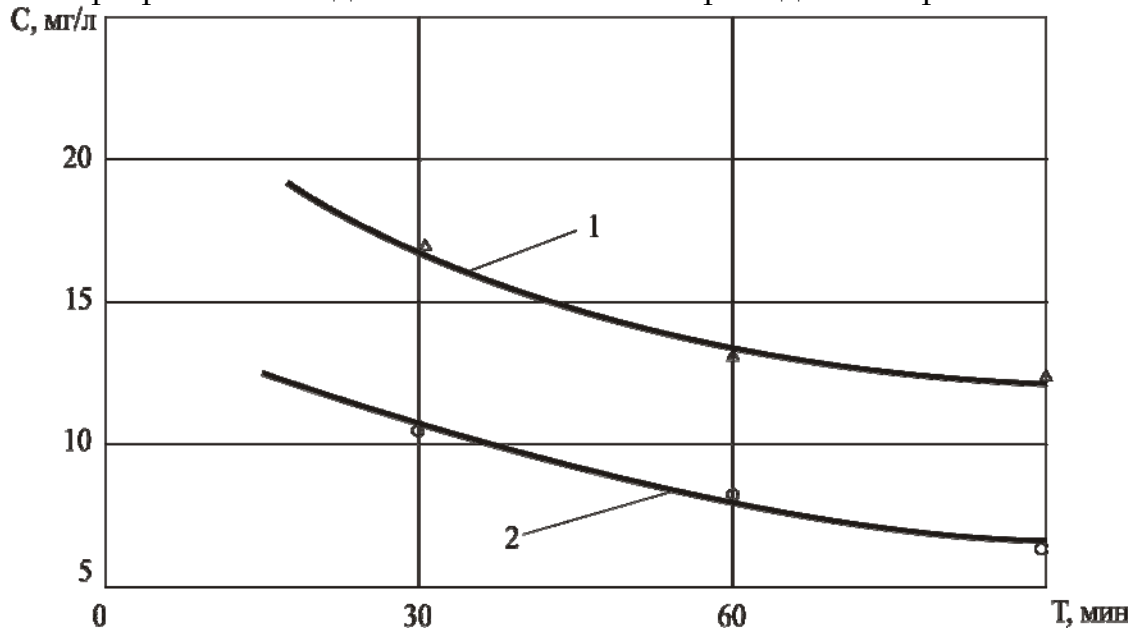


Рис. 4.2. Графики изменения мутности осветленной воды в процессе вторичного отстаивания иловой смеси при дозе ила $a=1,5$ г/л: 1 – после контрольного аэротенка; 2 – после опытного аэротенка

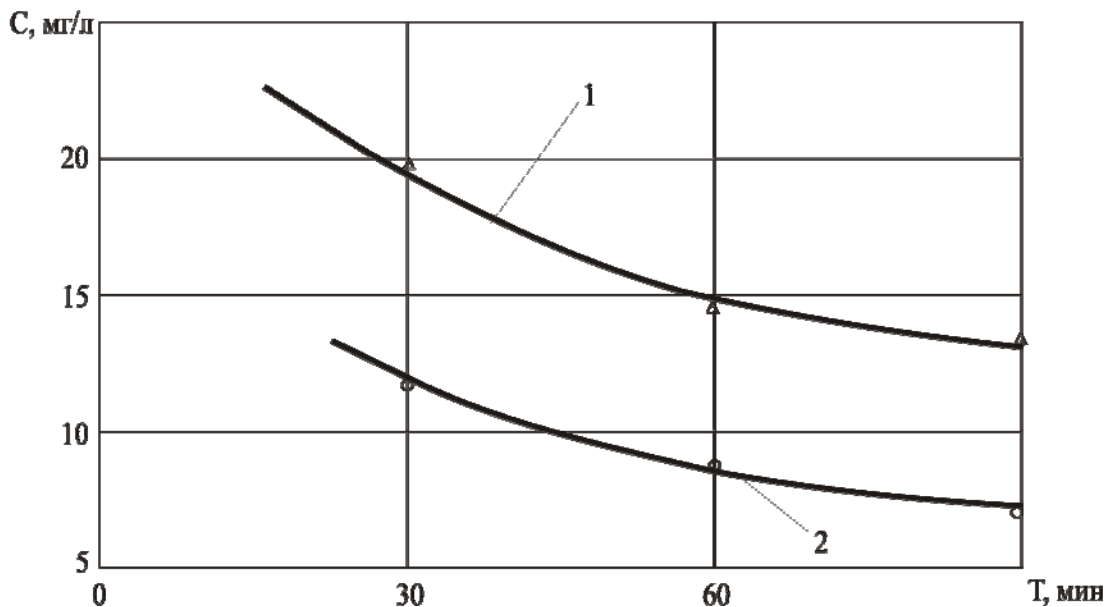


Рис. 4.3. Графики изменения мутности осветленной воды в процессе вторичного отстаивания иловой смеси при дозе ила $a=2,5$ г/л: 1 – после контрольного аэротенка; 2 – после опытного аэротенка

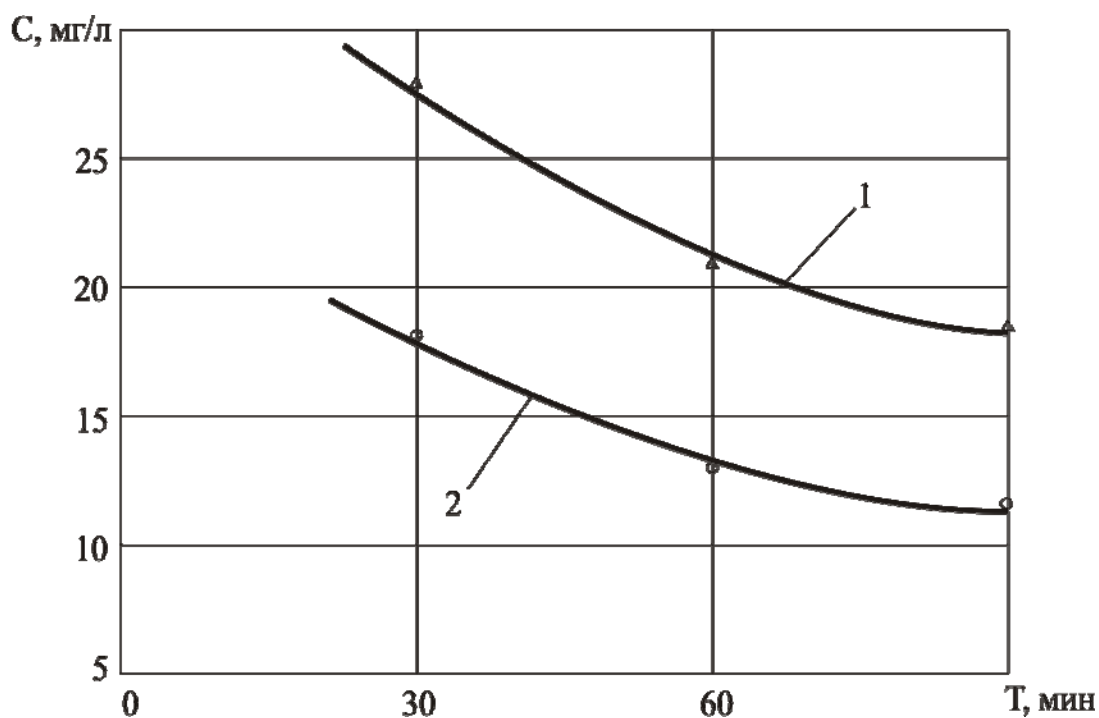


Рис. 4.4. Графики изменения мутности осветленной воды в процессе вторичного отстаивания иловой смеси при дозе ила $a=3,5$ г/л:
 1 – после контрольного аэротенка; 2 – после опытного аэротенка

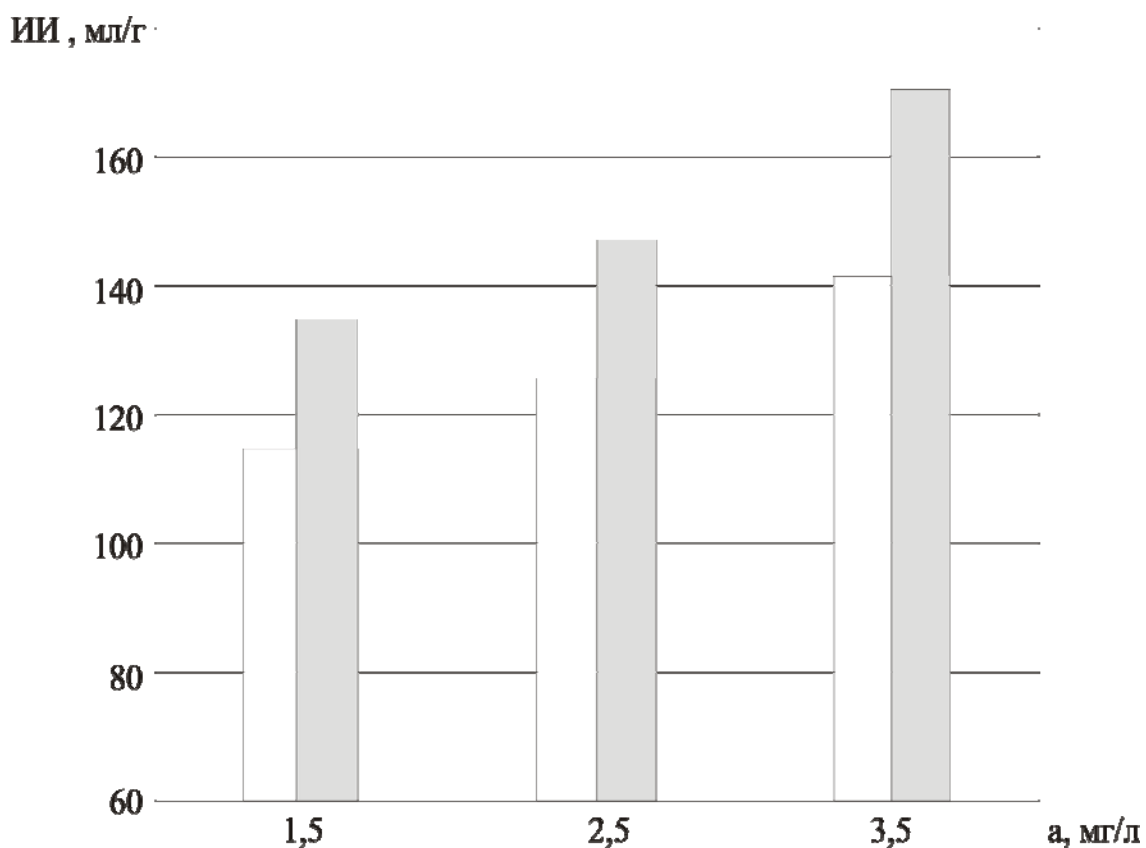


Рис. 4.5. Величины иловых индексов при различных дозах активного ила:
 □ – иловая смесь после опытного аэротенка;
 ■ – иловая смесь после контрольного аэротенка

При отстаивании хозяйственно-бытовых стоков после биологической очистки активным илом с дозами 1,5 г/л, концентрация взвешенных веществ в осветленной воде в течение времени пребывания в цилиндре-отстойнике T от 30 до 90 минут снижалась от 17 до 12 мг/л для проб, взятых из контрольного аэротенка (см. рис. 4.2, график 1). Для иловой смеси, взятой из опытного аэротенка, за данный промежуток времени отстаивания концентрация взвешенных веществ в осветленной воде снижалась от 10,5 до 6 мг/л (см. рис. 4.2, график 2).

При отстаивании иловой смеси с дозами активного ила 2,5 г/л для проб, взятых из контрольного аэротенка, концентрация взвешенных веществ в осветленной воде составляла 18,5 мг/л для времени отстаивания $T=30$ мин (см. рис. 4.3, график 1) и равнялась 13 мг/л при $T=90$ мин. Для проб иловой смеси, взятых из опытного аэротенка, при той же дозе активного ила концентрация взвеси в осветленной воде для времени отстаивания $T=30$ мин составляла 12,3 мг/л (см. рис. 4.3, график 2) и снижалась до 7,5 мг/л при $T=90$ мин. При отстаивании иловой смеси с дозами активного ила 3,5 г/л для проб, взятых из контрольного аэротенка, осредненная концентрация взвеси в слое осветленной воды цилиндра-отстойника составляла 27,2 мг/л для времени отстаивания $T=30$ мин (см. рис. 4.4, график 1) и равнялась 18,5 мг/л при $T=90$ мин. Для проб иловой смеси, взятых из опытного аэротенка, при той же дозе активного ила концентрация взвеси в осветленной воде для времени отстаивания $T=30$ мин составляла 17,7 мг/л (см. рис. 4.4, график 2) и снижалась до 11,2 мг/л при $T=90$ мин.

Анализ графиков, приведенных на рис. 4.2–4.4, позволяет сделать вывод о том, что предварительная обработка ила в ЭГДУ перед опытным аэротенком улучшает флокулирующие свойства хлопьев ила в процессе биологической очистки и способствует снижению концентрации взвешенных веществ в осветленной воде при вторичном отстаивании иловой смеси. При времени отстаивания $T=90$ мин остаточная концентрация взвеси в осветленной воде для иловой смеси с дозами активного ила 3,5 г/л после опытного аэротенка была приблизительно на том же уровне, что и концентрация взвеси в осветленной воде для иловой смеси с дозами активного ила 1,5 г/л. Анализ диаграмм, показанных на рис. 4.5, также позволяет сделать вывод о лучших седиментационных свойствах активного ила, предварительно обработанного в ЭГДУ. При увеличении доз активного ила с 1,5 до 3,5 г/л в иловой смеси, взятой после контрольного аэротенка, иловый индекс увеличивался с 135 до 170 мл/г, тогда как для этого же интервала доз активного ила в иловой смеси, взятой после опытного аэротенка, ило-

вый индекс изменялся от 115 до 142 мл/г, что находилось в пределах, характерных для хорошо оседающего ила ($60 < \text{ИИ} < 150$ мл/г).

Таким образом, предварительная обработка активного ила в ЭГДУ позволяет вести процесс биологической очистки с увеличенными дозами ила без существенного ухудшения седиментационных свойств иловой смеси.

Выводы

1. Предварительная обработка активного ила в ЭГДУ позволяет осуществлять биологическую очистку сточных вод в аэротенке с повышенными (до 3,5 г/л) дозами ила, сохраняя стабильные значения илового индекса (менее 150 мл/г) при вторичном отстаивании иловой смеси.

2. При одинаковых дозах активного ила в лабораторных аэротенках концентрация взвешенных веществ в осветленной воде, полученной в результате отстаивания иловой смеси, прошедшей биологическую очистку в опытном аэротенке, была в среднем на 5-6 мг/л ниже, чем концентрация взвешенных веществ в осветленной воде, полученной после отстаивания иловой смеси, выходящей из контрольного аэротенка, что является подтверждением гипотезы, касающейся улучшения флокулирующих свойств активного ила, обработанного в ЭГДУ.

5. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ВОЗВРАТНОГО ИЛА АЭРОТЕНКОВ

5.1. Производственные испытания технологий обработки потока возвратного активного ила с использованием ЭГДУ различных конструкций

Сравнительные производственные испытания ЭГДУ различных конструкций были проведены на канализационных очистных сооружениях (КОС) в г. Заречном, Пензенской области, производительностью 30 тыс. м³ в сутки. В состав очистных сооружений входил блок, состоящий из четырех секций трехкоридорных аэротенков по ТП 902-2-83, оснащенных мелкопузырчатой сис темой аэрации. На двух секциях аэротенков были установлены новые ЭГДУ однопоточной конструкции (см. рис. 2.3), на двух остальных – ЭГДУ старой двухпоточной конструкции (см. рис. 1.16), разработанные С.Н. Хазовым [61] и введенные в эксплуатацию в 2001 г. Схемы обработки возвратного ила аэротенков с использованием ЭГДУ старой двухпоточной и новой однопоточной конструкций представлены на рис. 5.1. Подача возвратного ила на все группы ЭГДУ через общий магистральный трубопровод осуществлялась двумя параллельно работающими центробежными насосами марки СМ 200-150-400 ($n=960$ об/мин) с напором до 18 м и общим расходом до 440 м³/ч. Значение избыточного давления в начале всех распределительных линий, подводящих возвратный ил к установкам, поддерживалось постоянным на уровне $0,7 \cdot 10^5$ Па для всех секций за счет открытия или закрытия входных задвижек на линиях. Вследствие больших потерь напора в эжекторах двухпоточных ЭГДУ для двух секций аэротенков, где были установлены ЭГДУ старой конструкции, более 50 % от общего расхода возвратного ила поступало в распределительную чашу (рис. 5.1), а затем самотеком в первые коридоры данных аэротенков.

Общий вид ЭГДУ новой однопоточной конструкции, а также общий вид секции аэротенка с работающим ЭГДУ показаны на рис. 5.2 и 5.3. На центральный катод ($l=120$ мм, $d=9$ мм) и корпус ЭГДУ подавалось напряжение 24 В от источника постоянного тока. Перемешивание потока возвратного ила с воздухом в стволе ЭГДУ осуществлялось при числе Кэмпса $Gt=3,2 \cdot 10^3$. Подача воздуха с расходом 12 м³/ч (11 % от расхода возвратного ила) осуществлялось из распределительного коллектора штатной системы аэрации аэротенков. Удельный расход электричества при обработке возвратного ила в ЭГДУ составил $(1,5-1,8)10^{-3}$ Ач/м³, плотность тока на катоде была равна 50 А/м².

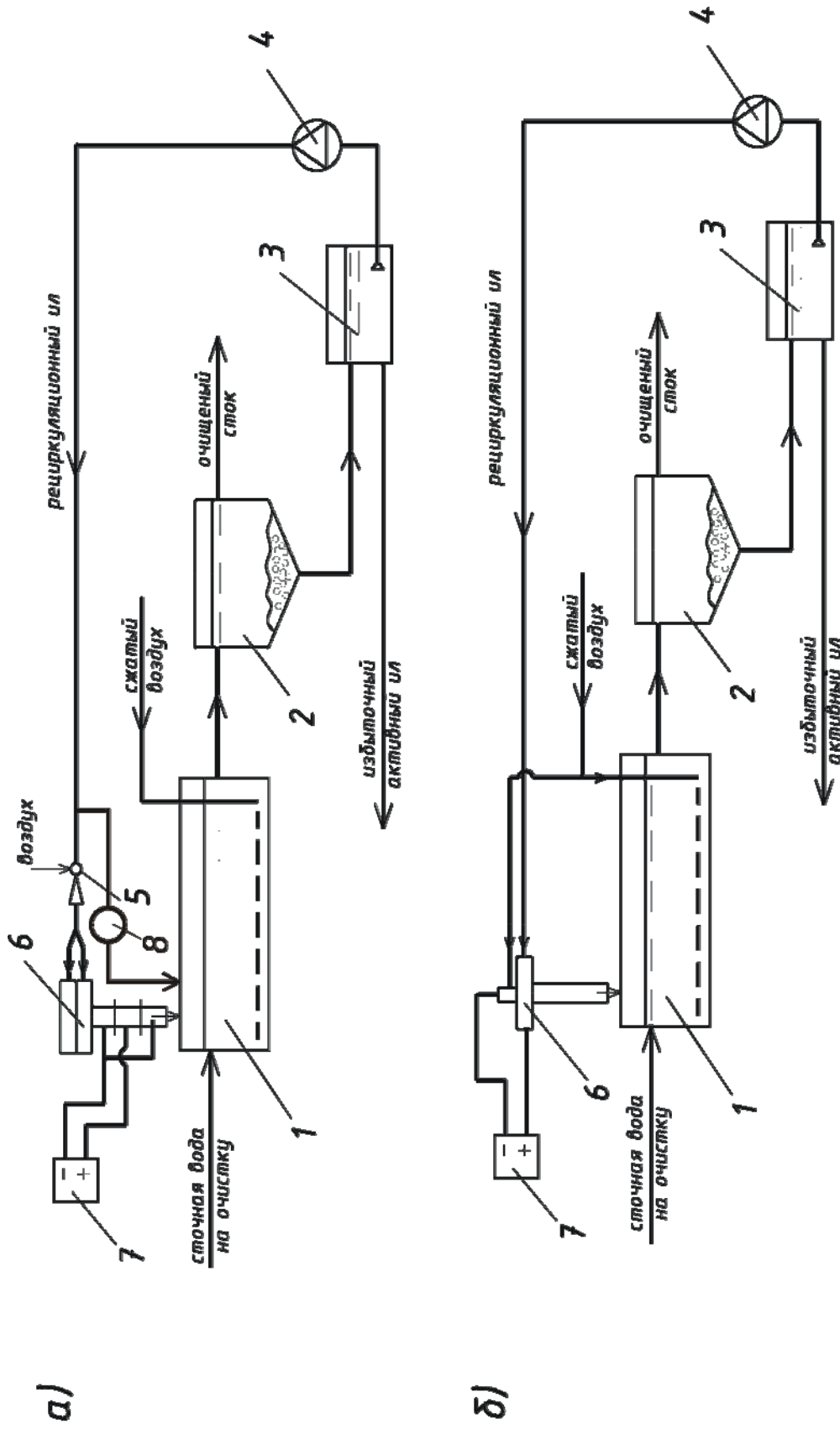


Рис. 5.1. Схемы обработки возвратного ила аэротенков:

а – с ЭГДУ старой конструкции; б – с ЭГДУ новой конструкции;

1 – аэротенк; 2 – вторичный отстойник; 3 – иловый резервуар; 4 – рециркуляционный насос; 5 – эжектор; 6 – ЭГДУ; 7 – источник постоянного тока; 8 – распределительная чаша возвратного ила (иловая камера)



Рис. 5.2. Общий вид ЭГДУ новой конструкции



Рис. 5.3. Общий вид секции аэротенка КОС (г. Заречный, Пензенской области) с работающим ЭГДУ

В течение первых трех месяцев испытаний все блоки аэротенков работали в режиме активации возвратного ила с 33 %-й регенерацией (1 коридор – регенератор, 2 коридор – аэротенки) и в течение последующих трех месяцев – в режиме без регенерации (все 3 коридора – аэротенки). Результаты сравнительных производственных испытаний ЭГДУ старой и новой конструкций по основным показателям работы аэротенков приведены в табл. 5.1.

Испытания показали, что в двух секциях аэротенков с новыми однопоточными ЭГДУ остаточное содержание ХПК в очищенных стоках составляло 20-22 мг/л, БПК_{полн} было на уровне 7-8 мг/л, а концентрации фосфатов снижались до 1,1-1,3 мг/л, в то время как в секциях, где были установлены двухпоточные ЭГДУ остаточное содержание ХПК в очищенной воде составляло 35-38 мг/л, БПК_{полн} снижалось до 14-18 мг/л, а концентрации фосфатов 2,0-2,2 мг/л.

В секциях с однопоточными ЭГДУ достаточно интенсивно осуществлялся процесс нитрификации стоков. Очищенная вода содержала остаточные концентрации аммонийного азота на уровне 1,2-1,5 мг/л, нитраты увеличивались до 8,0-8,4 мг/л, а нитриты в среднем составляли 0,15-0,2 мг/л. В секциях аэротенков с двухпоточными ЭГДУ концен-

трации ионов NH_4^+ снижались до 3,4-3,6 мг/л, а содержание ионов NO_2^- , NO_3^- увеличивалось соответственно до значений 0,6-0,8 и 6,4-6,7 мг/л.

Т а б л и ц а 5.1

Результаты производственных испытаний технологий обработки возвратного ила аэротенков с использованием ЭГДУ

Показатели	Концентрация в сточных водах, поступающих на очистные сооружения, мг/л	Концентрация в сточных водах на выходе с очистных сооружений, мг/л			
		При обработке возвратного ила в ЭГДУ двухпоточной конструкции		При обработке возвратного ила в ЭГДУ однопоточной конструкции	
		Без регенерации	С регенерацией 33 %	Без регенерации	С регенерацией 33 %
1	2	3	4	5	6
Взвешенные вещества	78-112	16-20	14-18	12-15	12-15
ХПК	150-280	39-43	35-38	22-24	20-22
БПК _{полн}	110-200	19-22	14-18	8-9,6	7-8
NH_4^+	18-30	3,7-4,0	3,4-3,6	1,6-1,8	1,2-1,5
NO_2^-	0-0,02	0,7-0,9	0,6-0,8	0,22-0,27	0,15-0,2
NO_3^-	0	4,2-4,7	6,4-6,7	7,2-7,8	8,0-8,4
PO_4^{3-}	2,5-3,1	2,2-2,5	2,0-2,2	1,4-1,6	1,1-1,3
Иловый индекс, $\text{см}^3/\text{г}$		150-170	150-170	130-140	130-140

Обработка возвратного ила в новых однопоточных ЭГДУ также улучшала седиментационные свойства иловой смеси после биологической очистки сточных вод. Иловый индекс в очищенных стоках, прошедших первые две секции аэротенков составлял 130-140 $\text{см}^3/\text{г}$, а для остальных двух секций (с двухпоточными ЭГДУ) был на уровне 150-170 $\text{см}^3/\text{г}$ при одинаковой дозе ила.

Анализ экспериментальных данных позволил сделать следующие выводы:

- получено удовлетворительное соответствие результатов производственных и лабораторных испытаний по биологической очистке сточных вод в аэротенках с использованием ЭГДУ новой конструкции;
- прием 33 %-й регенерации в секциях аэротенков позволил повысить эффективность очистки стоков по основным показателям на 10-15 %;
- внедрение однопоточных ЭГДУ на аэротенках КОС (г. Заречный, Пензенской области) позволило значительно улучшить качество очистки сточных вод по органическим примесям, аммонийному азоту и

фосфатам, а также снизить иловый индекс на 15-20 % по сравнению с аэротенками, где были установлены ЭГДУ старой конструкции.

- при работе ЭГДУ новой конструкции требуемый напор рециркуляционного насоса снизился с 26 до 18 м по сравнению с использованием двухпоточных ЭГДУ, что дало ежедневную экономию электроэнергии в количестве 150 кВт ч.

5.2. Расчет экономической эффективности технологии обработки возвратного ила с использованием ЭГДУ новой конструкции

Эффективность использования ЭГДУ новой конструкции при обработке возвратного ила для КОС (г. Заречный, Пензенской области) была определена в соответствии с рекомендациями [48].

В экономических расчетах в качестве загрязняющих веществ были выбраны аммонийный азот, нитритные и фосфатные соединения. Сокращение массы веществ, сбрасываемых в водоем, за счет внедрения на КОС новых конструкций ЭГДУ для обработки возвратного ила определялось по формуле

$$\Delta M_i = Q(C_{\phi} - C_n) \cdot T \cdot 10^{-6}, \text{ т}, \quad (5.1)$$

где Q – суточный расход сточных вод, $Q=30\,000 \text{ м}^3/\text{сут}$;

C_{ϕ} – фактическая концентрация вредных веществ в очищенных сточных водах до внедрения новых ЭГДУ, $\text{г}/\text{м}^3$;

C_n – концентрация вредных веществ в очищенных сточных водах после внедрения новых ЭГДУ, $\text{г}/\text{м}^3$;

T – продолжительность сброса, сут.

При определении годового экономического эффекта принимаем $T=365$ сут. Осредненные данные по C_{ϕ} и C_n взяты из табл. 5.1. Таким образом, сокращение массы сбрасываемых веществ по формуле (5.1) составило:

– для аммонийного азота

$$\Delta M_1 = 3 \cdot 10^4 (2,30 - 1,35) \cdot 365 \cdot 10^{-6} = 23,5 \text{ т};$$

– для нитритов

$$\Delta M_2 = 3 \cdot 10^4 (0,35 - 0,18) \cdot 365 \cdot 10^{-6} = 5,7 \text{ т};$$

– для фосфатов

$$\Delta M_3 = 3 \cdot 10^4 (1,9 - 1,2) \cdot 365 \cdot 10^{-6} = 9,85 \text{ т}.$$

Сокращение платы за негативное воздействие вредных веществ на окружающую среду определялось по формуле [48]

$$\Delta\Pi_i = \Delta M_i \cdot N_i \cdot 5 \cdot K_B \cdot K_{ин} \cdot K_{доп}, \text{ руб.}, \quad (5.2)$$

где N_i – норматив платы за сброс одной тонны загрязняющего вещества в пределах установленных допустимых нормативов сброса, руб./т;

5 – повышающий коэффициент за сверхлимитный сброс;

K_B – коэффициент, учитывающий экологические факторы (для бассейна р. Волги в Пензенской области $K_B = 1,31$);

$K_{ин}$ – коэффициент индексации, учитывающий инфляцию, $K_{ин} = 1,15$;

$K_{доп}$ – дополнительный коэффициент для особо охраняемых природных территорий (для р. Суры $K_{доп} = 1$).

Сокращение годовой платы за сброс по каждому из вышеуказанных веществ в соответствии с (5.2):

– для аммонийного азота ($N_i = 551$ руб./т)

$$\Delta\Pi_1 = 23,5 \cdot 551 \cdot 5 \cdot 1,31 \cdot 1,15 \cdot 1 = 97\,534 \text{ руб.};$$

– для нитритов ($N_i = 3444$ руб./т)

$$\Delta\Pi_2 = 5,7 \cdot 3444 \cdot 5 \cdot 1,31 \cdot 1,15 \cdot 1 = 147\,866 \text{ руб.};$$

– для фосфатов ($N_i = 1378$ руб./т)

$$\Delta\Pi_3 = 9,85 \cdot 1378 \cdot 5 \cdot 1,31 \cdot 1,15 \cdot 1 = 102\,241 \text{ руб.}$$

Суммарный годовой экономический эффект от сокращения сброса загрязняющих веществ в р. Суру составил:

$$\mathcal{E} = \Delta\Pi_1 + \Delta\Pi_2 + \Delta\Pi_3, \text{ руб.} \quad (5.3)$$

или $\mathcal{E} = 97\,534 + 147\,866 + 102\,241 = 347\,641$ руб.

Таким образом, внедрение новой технологии обработки возвратного ила на аэротенках КОС (г. Заречный, Пензенской области) позволило за счет сокращения сброса загрязняющих веществ в водоем достичь годового экономического эффекта на сумму более 340 тыс. руб.

5.3. Методика расчета устройств, входящих в предложенную технологическую схему активации возвратного ила аэротенков

Данная методика применяется для определения конструктивных параметров однопоточных ЭГДУ, а также для нахождения требуемых характеристик Q - H рециркуляционного насоса, подающего возвратный ил в аэротенке.

В начале расчета задаются исходные данные: расход возвратного ила на один аэротенк $Q_{\text{вн}}$, давление воздуха в штатной системе аэрации $p_{\text{в}}$, плотность ρ и вязкость ν возвратного ила, требуемая величина газонасыщения иловоздушной смеси ϕ в стволе ЭГДУ (задается в пределах 10-12 %).

Расчетная схема для определения конструктивных размеров ЭГДУ показана на рис. 5.4.

Технологические расчеты ЭГДУ рекомендуется осуществлять в следующей последовательности:

1. Определяется диаметр подающего (входного) патрубка возвратного ила d_0 из соотношения

$$Q_{\text{вн}} = \frac{\pi d_0^2}{4} \cdot v_{\text{вх}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (5.4)$$

где $v_{\text{вх}}$ – рекомендуемая скорость иловой смеси в подающем патрубке, $v_{\text{вх}} = 1,5-1,8$ м/с.

2. При известном d_0 находятся диаметры входной камеры $d_{\text{вх}}$, ствола $d_{\text{ст}}$ и диафрагмы $d_{\text{д}}$ (см. рис. 5.4) по соотношениям:

$$d_{\text{вх}} = K_{\text{г}} \cdot d_{\text{д}}, \text{ м}, \quad (5.5)$$

$$d_{\text{ст}} = d_0, \text{ м}, \quad (5.6)$$

$$d_{\text{д}} = (0,7 \div 0,9) \cdot d_{\text{ст}}, \text{ м}, \quad (5.7)$$

где $K_{\text{г}}$ – геометрический коэффициент, $K_{\text{г}} = 3 \div 5$.

3. Вычисляется максимально допустимое давление иловой смеси в створе диафрагмы $p_2^{\text{доп}}$ из условия пропускания во входную камеру ЭГДУ необходимого расхода воздуха с использованием соотношений

$$Q_{\text{в}} = (0,1 \div 0,12) \cdot Q_{\text{вн}} \geq \frac{\pi d_{\text{вп}}^2}{4} \cdot v_{\text{вп}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (5.8)$$

где $d_{\text{вп}}$ – диаметр подающего патрубка для воздуха, $d_{\text{вп}} = 0,015-0,02$ м;

$v_{\text{вп}}$ – скорость движения воздуха в подающем патрубке, рассчитываемая при малом перепаде давлений по формуле [1]

$$v_{\text{вп}} = \sqrt{\frac{2(p_{\text{в}} - p_2^{\text{доп}})}{\rho_{\text{в}}}}, \text{ м/с}, \quad (5.9)$$

где $p_{\text{в}}$ – давление воздуха в штатной системе аэрации, Па;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³,

$$\rho_{\text{в}} = \frac{p_{\text{в}}}{R(273 + t)}; \quad (5.10)$$

здесь R – газовая постоянная, $R = 287$ м²/(с²·град);

t – температура воздуха, °С.

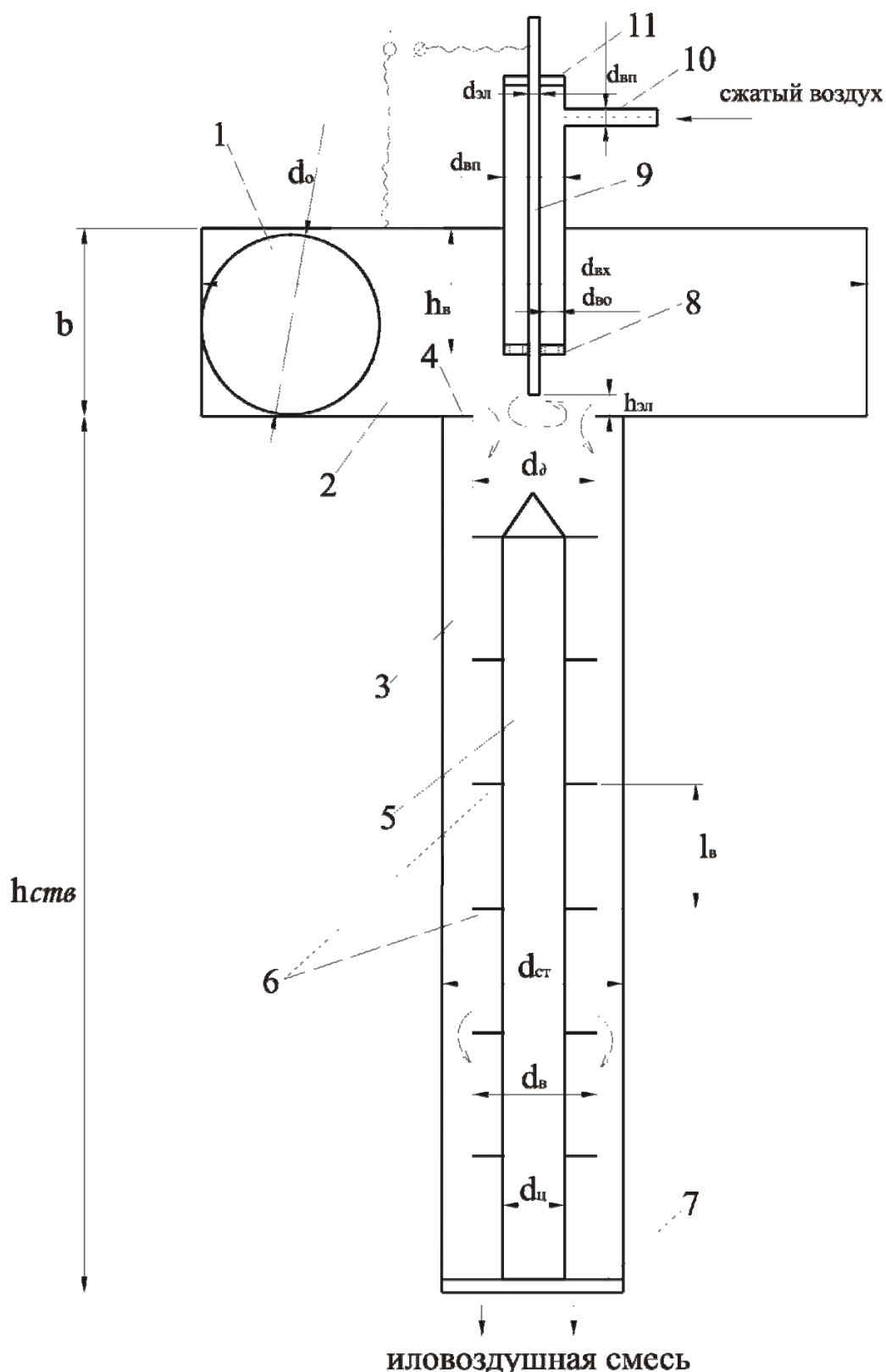


Рис. 5.4. Расчетная схема для определения конструктивных размеров однопоточного ЭГДУ:
 1 – патрубок подачи возвратного ила; 2 – входная камера; 3 – ствол; 4 – диафрагма; 5 – опорная труба (стержень); 6 – внутренние диски; 7 – опорные швеллеры; 8 – диэлектрическая вставка с периферийными отверстиями; 9 – центральный электрод; 10 – патрубок подачи сжатого воздуха; 11 – сплошная диэлектрическая вставка

Фактическое (расчетное) давление p_2 должно выбираться по соотношению $p_2 \leq p_2^{\text{доп}}$.

4. По формуле (2.32) определяется скорость $v_{\text{ок}}$ в стволе ЭГДУ непосредственно за диафрагмой.

5. По соотношению (2.27) находится величина $\zeta_{\text{вх}}$, а по [56] – значение коэффициента местных сопротивлений в диафрагме $\zeta_{\text{д}}$. По формуле (2.31) вычисляется значение коэффициента m .

6. В соответствии с (2.29) находится расчетное давление иловой смеси во входном патрубке ЭГДУ

$$p_1 = p_2 + 0,5 \cdot \rho (m \cdot v_{\text{вх}}^2 + v_{\text{ок}}^2). \quad (5.11)$$

7. Требуемый напор насоса для подачи иловой смеси в ЭГДУ определяется по формуле

$$H_{\text{н}}^{\text{тр}} = H_{\text{г}} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + h_{\text{дл}} + \sum h_{\text{м}}, \quad (5.12)$$

где $H_{\text{г}}$ – геометрическая высота подъема, рассчитываемая как разница отметок от входного патрубка ЭГДУ и отметки уровня в иловом резервуаре 3 (см. рис. 5.1), м;

$h_{\text{дл}}$ – потери по длине в трубопроводах, соединяющих ЭГДУ, рециркуляционный насос и иловый резервуар;

$\sum h_{\text{м}}$ – сумма местных сопротивлений при движении иловой смеси по трубопроводам.

Определяется суммарный расход возвратного ила на аэротенки

$$Q_{\text{вн}}^{\text{сум}} = Q_{\text{вн}} \cdot n, \quad (5.13)$$

где n – общее количество секций аэротенков, на которых устанавливается ЭГДУ.

8. Для найденных значений $H_{\text{н}}$ и $Q_{\text{вн}}^{\text{сум}}$ подбираются марка и количество проектируемых насосов. При реконструкции КОС в случае наличия уже работающих насосов производится сравнение фактического напора $H_{\text{н}}^{\text{ф}}$ действующих насосов и требуемого напора, найденного по формуле (5.12). При неудовлетворении условия

$$H_{\text{н}}^{\text{ф}} \geq H_{\text{н}}^{\text{тр}} \quad (5.14)$$

задаются новые (увеличенные) конструктивные размеры ЭГДУ ($d_0, d_{\text{вх}}, d_{\text{д}}, d_{\text{ст}}$), и расчет повторяется снова до удовлетворения условия (5.14).

9. Далее осуществляется расчет ствола ЭГДУ. Ориентировочно, в первом приближении, задаются высота ствола ($h_{\text{ст}} \approx 0,8 - 1,5$ м), объем ствола $V_{\text{с}}$, и определяется удельная энергия положения

$$E_{\text{п.уд}} = g \cdot h_{\text{ст}}, \text{ Па.} \quad (5.15)$$

По формуле (2.42) рассчитывается величина удельной кинетической энергии потока в стволе, $E_{к,уд}$.

10. По уравнению (2.51) вычисляется значение располагаемой энергии E_p на перемешивание потока иловоздушной смеси.

11. Определяется в первом приближении количество вставок (внутренних дисков) по формуле

$$n_B = \frac{h_{ст}}{l_B}, \text{ шт.}, \quad (5.16)$$

где l_B – расстояние между соседними вставками, задаваемое в пределах $0,5 d_{ст} \leq l_B \leq d_{ст}$.

12. Вычисляется величина коэффициента стеснения, входящего в выражения (2.46) и (2.47):

$$K_B = \frac{E_p}{1,78 \cdot n_B \cdot 0,5 \cdot v_{стB}^2}. \quad (5.17)$$

Из соотношения

$$K_B = \frac{S_B}{S_{стB}} \left(\frac{S_{ст}}{S_{ст} - S_B} \right)^2, \quad (5.18)$$

где $S_{ст}$ – поперечная площадь ствола ЭГДУ, $S_{ст} = \frac{\pi d_{ст}^2}{4}$, м²,

находятся величины площади одной вставки S_B и диаметра вставки d_B .

13. Производится проверка условия

$$d_{ст} - d_B \geq \Delta, \quad (5.19)$$

где Δ – минимальная величина кольцевого зазора между вставкой и стенкой ствола ЭГДУ, предотвращающего застревание в узком сечении ствола крупных включений иловой смеси, $\Delta=0,02$ м.

14. При неудовлетворении условия (5.19) высота ствола увеличивается, и расчет повторяется с п.9 до удовлетворения условия (5.19). Диаметр опорной трубы (стержня) определяется по конструктивным соображениям $d_{ц}=(0,5 \div 0,7) \cdot d_B$.

15. По формулам (2.49) и (2.50) вычисляются величины градиента скорости перемешивания G и времени смешения иловой жидкости с воздухом t .

16. Находится значение критерия Кэмпса Gt , которое должно быть не менее $3 \cdot 10^3$. При меньшем значении данного критерия задаются новые размеры диафрагмы и ствола, и расчет повторяется с п.2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе проведенного анализа показано, что обработка смеси возвратного активного ила с воздухом постоянным электрическим током при низких удельных энергозатратах в условиях интенсивного массообмена позволяет осуществлять частичную регенерацию ила, существенно увеличить окислительную способность микроорганизмов и соответственно интенсифицировать процессы биологической очистки стоков в аэротенке.

2. Предложен новый способ активации возвратного ила аэротенка в однопоточном электрогидродинамическом устройстве (ЭГДУ), конструкция которого позволяет наиболее полно использовать энергию рециркуляционного илового насоса для создания в корпусе ЭГДУ режима высокотурбулентного перемешивания иловой жидкости с воздухом, поступающим из штатной системы аэрации, в сочетании с высокоэффективной электрообработкой возвратного ила за счет применения центрального стержневого катода.

Расчетным путем получены конструктивные и технологические параметры ЭГДУ, обеспечивающие необходимые гидродинамические условия его устойчивой работы при заданных характеристиках $Q-H$ рециркуляционного илового насоса и фактическом (располагаемом) давлении воздуха в штатной системе аэрации аэротенка.

3. Изучено влияние интенсивности смешения возвратного ила с воздухом в корпусе ЭГДУ на эффективность последующей биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в опытной аэротенке. Установлено, что наиболее значимое снижение ХПК и БПК₅ в очищенном стоке после биологической очистки с предварительно активированным в ЭГДУ возвратным илом наблюдается при числах Кэмпса от $3,0 \cdot 10^3$ до $5,0 \cdot 10^3$, удельных затратах электричества от $1,2 \cdot 10^{-3}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³ и катодной поляризации центрального стержневого электрода ЭГДУ с плотностью тока до 50 А/м². Получены математические зависимости, адекватно описывающие кинетику снижения БПК₅ хозяйственно-бытовых сточных вод в процессе биологической очистки с обработанным в ЭГДУ возвратным илом.

4. Доказано, что глубокое удаление органических примесей в аэротенке с использованием активированного возвратного ила позволяет интенсифицировать процессы нитрификации и дефосфатации очищаемых стоков. Наиболее интенсивно удаление аммонийного азота и фосфатов осуществляется при очистке стоков с активированным илом, предварительно обработанным в ЭГДУ с центральным стержневым

катодом при числах Кэмпса до $5,0 \cdot 10^3$ и удельных затратах электроэнергии порядка $1,2 \cdot 10^{-3}$ А·ч/м³.

5. Предварительная обработка возвратного ила в однопоточном ЭГДУ с центральным катодом позволяет сохранять стабильные значения илового индекса (менее 150 мл/г) при увеличении дозы ила с 2 до 3,5 г/л в процессе биологической очистки сточных вод в аэротенке, обеспечивая при этом высокую эффективность удаления взвешенных веществ в процессе вторичного отстаивания биологически очищенной сточной воды.

6. Технология обработки возвратного активного ила с использованием однопоточных ЭГДУ внедрена на КОС (г. Заречный, Пензенской области) производительностью 30 тыс. м³/сут. В результате промышленного внедрения предложенной технологии концентрация загрязняющих веществ снизилась по взвешенным веществам в 1,15-1,2 раза, ХПК – в 1,25-3 раза, БПК_{полн} – в 1,4-1,5 раза, азоту аммонийному – в 1,6-1,8 раза, нитритам – в 1,8-2 раза, фосфатам – в 1,5-1,6 раза; иловый индекс уменьшился со 150-170 до 130-140 мл/г. Годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил более 340 тыс. руб. (в ценах 2012 г.).

7. Разработаны методические рекомендации по расчету устройств, входящих в предлагаемую схему обработки возвратного активного ила аэротенка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика [Текст] / А.Д. Альтшуль. – М.: Энергия, 1987.
2. Андреев, С.Ю. Новая технология активации потока возвратного ила [Текст] / С.Ю. Андреев, С.Н. Хазов // Гидротехническое строительство, водное хозяйство и мелиорация земель на современном этапе: сб. материалов Международ. науч.-практ. конф. – Пенза: ПДЗ, 1999.
3. Андреев, С.Ю. Экспериментальные исследования по влиянию электрообработки на ферментативную активность возвратного ила аэротенков [Текст] / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, С.Н. Хазов, С.В. Ишев // Водохозяйственный комплекс России: состояние, проблемы, перспективы: сб. ст. V Всерос. науч.-практ. конф. – Пенза: МНИЦ ПГСХА, 2007. – С. 30-31.
4. Арутюнян, К.Г. Технология очистки сточных вод в аэротенках-отстойниках [Текст] / К.Г. Арутюнян // Городская канализация. – М.: АКХ им.Памфилова, 1968. – Вып.56. – № 4.
5. Баранова, А.Г. Практикум по химии воды [Текст] / А.Г. Баранова, П.Р. Таубе. – Пенза: ПГАСА, 1997.
6. Базякина, Н.А. Очистка концентрированных промышленных сточных вод [Текст] / Н.А. Базякина. – М.: Госстройиздат, 1958.
7. Болотина, О.Т. Состав и свойства активного ила в условиях регенерации [Текст] / О.Т. Болотина // Водоснабжение и санитарная техника. – 1960. – №10.
8. Бондарев, А.А. Биологическая очистка промышленных сточных вод в аэротенках с флотационным илоотделителем [Текст] / А.А. Бондарев // Сооружения и технологические процессы механической и биологической очистки промышленных сточных вод. – М., 1981. – С.3-10. – (Тр. ин-та / ВНИИ ВОДГЕО).
9. Бондарев, А.А. Технологический расчет сооружений для биологической очистки сточных вод от соединений азота [Текст] / А.А. Бондарев, Н.В. Захватаева, Н.М. Ильинская, Н.С. Будько // Совершенствование методов расчета сооружений по очистке сточных вод и обработке осадков. – М., 1983. – С.15-18. – (Тр. ин-та / ВНИИ ВОДГЕО).
10. Бондарев, А.А. Интенсификация биологической очистки сточных вод с использованием гидродинамических излучателей [Текст] / А.А. Бондарев, Е.А. Корнеева, О.С. Троян, А.С. Шеломков // Сооружения для очистки сточных вод и обработки осадков. – М., 1987. – С.42-45. – (Тр. ин-та / ВНИИ ВОДГЕО).

11. Бондарев, А.А. Биологическая очистка промышленных сточных вод от соединений азота [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук. /А.А. Бондарев. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1990. – 401 с.
12. Бондарев, А.А. Методика измерения электрокинетического потенциала частиц активного ила [Текст] /А.А. Бондарев, Л.О. Никифорова // Технология физико-химической очистки промышленных сточных вод. Аналитический контроль процессов очистки. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1990. – С. 58-60. – (Тр. ин-та / ВНИИ ВОДГЕО).
13. Вавилин, В.А. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом [Текст] /В.А. Вавилин, В.Б. Васильев. – М.: Наука, 1979. – 118 с.
14. Вейцер, Ю.М. Высокомолекулярные флокулянты в процессе очистки воды [Текст] /Ю.М. Вейцер, Д.М. Минц. – М.: Стройиздат, 1984.
15. Водоотводящие системы промышленных предприятий [Текст] под ред. С.В. Яковлева / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, Ю.В. Воронов.– М.: Стройиздат, 1990.
16. Воронов, Ю.В. Реконструкция и интенсификация работы канализационных очистных сооружений [Текст] /Ю.В. Воронов, В.П. Соломеев [и др.]. – М.: Стройиздат, 1990. – 224 с.
17. Гаврина, Е.В. Разработка и исследование высокоэффективных конструкций аэраторов пневматического типа для биологической очистки сточных вод [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Гаврина. – Пенза: ПГАСА, 2000. – 128 с.
18. Гришин, Б.М. Повышение эффективности работы аэротенков с использованием электрогидродинамических устройств [Текст] / Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, С.Н. Хазов, С.В. Ишев // Экология и безопасность жизнедеятельности: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МНИЦ, 2006.
19. Гришин, Б.М. Активация потока возвратного ила аэротенков в электрическом поле [Текст] / Б.М. Гришин, С.В. Ишев, С.Н. Хазов, Е.А. Савицкий // Актуальные проблемы современного строительства: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2007. – С. 100-102.
20. Гришин, Б.М. Оценка работы электрогидродинамического устройства как смесителя при обработке возвратного активного ила [Текст] / Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, М.В. Бикунова, С.Н. Хазов, С.В. Ишев // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: ПГУАС, АОНН «Приволжский дом знаний», 2007. – С. 209-211.

21. Гришин, Б.М. Оценка эффективности работы новых конструкций гидродинамических устройств в различных схемах очистки сточных вод [Текст] / Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, С.В. Максимова, Л.Б. Гришин, С.В. Ишев // Вода: проблемы и решения: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – Тюмень: Тюменский гос. архит.-строит. ун-т, 2007. – С. 76-80.

22. Гришин, Б.М. Новые технологии интенсификации работы городских канализационных очистных сооружений [Текст] / Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, М.В. Бikuнова, Е.А. Савицкий, С.В. Ишев // Региональная архитектура и строительство.– Пенза: ПГУАС, 2007. – №2 (3). – С. 52-59.

23. Гришин, Б.М. Совершенствование конструкций электрогидродинамических устройств, используемых для обработки возвратного активного ила аэротенков [Текст] / Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, М.В. Бikuнова, С.В. Ишев // Известия вузов. Строительство. – 2008. – №8. – С. 50-55.

24. Гюнтер, Л.И. К выбору математической модели процесса биохимической очистки сточных вод [Текст] / Л.И. Гюнтер, Б.С. Запрудский // Микробиологическая промышленность. – 1971. – №5.

25. Евилевич, М.А. Оптимизация биохимической очистки сточных вод [Текст] / М.А. Евилевич, Л.Н. Брагинский. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1979. – 160 с.

26. Иванов, В.Н. Клеточный цикл микроорганизмов и гетерогенность их популяций [Текст] / В.Н. Иванов, Г.А. Угодчиков. – Киев: Наук. думка, 1984 – 280с.

27. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1961.

28. Иерусалимский, Н.Д. Основы физиологии микробов [Текст] / Н.Д. Иерусалимский. – М.: Изд-во АН СССР, 1963.

29. Иерусалимский, Н.Д. Биохимические основы регуляции скорости роста микроорганизмов [Текст] / Н.Д. Иерусалимский // Известия АН СССР. Серия биологическая. – 1967. – №3.

30. Ишев, С.В. Лабораторные исследования влияния режимов электрообработки возвратного активного ила на глубину биологической очистки стоков методом аэрации [Текст] / С.В. Ишев // Проблемы энергосбережения и экологии в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах: сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: ПГУАС, АОНН «Приволжский дом знаний», 2008. – С. 139-140.

31. Ишева, Н.И. Отрицательное воздействие тяжелых металлов на процесс биохимической очистки сточных вод [Текст] / Н.И. Ишева [и др.] // Водохозяйственный комплекс России: состояние, проблемы,

перспективы: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. – Пенза: МНИЦ ПГСХА, 2005. – С. 61-63.

32. Карелин, Я.А. Очистка производственных сточных вод в аэротенках [Текст] / Я.А. Карелин, Д.Д. Жуков, Журов, Б.Н. Репин. – М.: Стройиздат, 1973. – 223 с.

33. Карелин, Я.А., Репин Б.Н. Биохимическая очистка сточных вод предприятий пищевой промышленности [Текст] / Я.А. Карелин. – М.: Стройиздат, 1974. – 163 с.

34. Кафаров, В.В. Основы массопередачи [Текст] / В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1976.

35. Киселев, П.Г. Гидравлика. Основы механики жидкости [Текст] / П.Г. Киселев. – М.: Энергия, 1980.

36. Крупин, В.Д. Исследование влияния ультразвука на мембраны клеток [Текст] / В.Д. Крупин, С.В. Мысик, В.Н. Ткаченко, В.В. Товстяк // Взаимодействие ультразвука с биологической средой. – М., 1983.

37. Лукиных, Н.А. Применение напорной флотации в очистке сточных вод [Текст]: экспресс-информ. / Н.А. Лукиных, Н.А. Терентьева, Н.А. Залётова // МЖКХ РСФСР, сер.: Водоснабжение и канализация. – 1976. – №5.

38. Лукиных, Н.А. Флотационное разделение иловых смесей – прогрессивный метод в технологии очистки городских сточных вод [Текст] / Н.А. Лукиных [и др.] // Сер.9: Санитарная техника и инженерное оборудование зданий: рефератив. информ. / ЦИНИС Госстроя СССР. – М.: 1977. – Вып.10. – С.11-13.

39. Маликова, О.Я. Повышение эффективности работы коридорных аэротенков [Текст] / О.Я. Маликова // Наука и техника в городском хозяйстве. – Киев: Будівельник, 1977. – Вып.35. – С.67-72.

40. Некрасов, Б.Б. Гидравлика [Текст] / Б.Б. Некрасов. – М.: Машиностроение, 1967.

41. Никифорова, Л.О. Изменение электрокинетического потенциала поверхности активного ила при его отстаивании [Текст] / Л.О. Никифорова // Совершенствование методов биологической и физико-химической очистки производственных сточных вод. – М., 1990. – (Тр. ин-та ВНИИ ВОДГЕО).

42. Новиков, Ю.В. Методы и исследования качества воды водоемов [Текст] / Ю.В. Новиков, К.О. Ласточкина, З.Н. Болдина. – М.: Медицина, 1990.

43. Паттон, А. Энергетика и кинетика биохимических процессов [Текст] / А. Паттон. – М.: Мир, 1968.

44. Перт С. Основы культивирования микроорганизмов и клеток [Текст] / С.Перт. – М.: Мир, 1978. – 331с.

45. Печуркин, Н.С. Анализ кинетики роста и эволюции микробных популяций (в управляемых условиях) [Текст] / Н.С. Печуркин, И.А. Терсков. – Новосибирск, 1975. – 240с.

46. Попкович, Г.С. Системы аэрации сточных вод [Текст] / Г.С. Попкович, Б.Н. Репин. – М.: Стройиздат, 1986. – 136 с.

47. Проскуракова, Н.С. Кинетика изъятия загрязнений сточных вод и субстрата активным илом [Текст] / Н.С. Проскуракова [и др.] // Наука и техника в гор. хоз-ве. – Киев: Будівельник, 1977. – Вып.35. – С.43-54.

48. Расчет платы за негативное воздействие на окружающую среду. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.05.06 [Текст]. – № 456.

49. Саломеев, В.П. Интенсификация очистки сточных вод с использованием плоскостных модулей [Текст] / В.П. Саломеев, А.Л. Ивчатов, О.Б.Нетис // Исследование по интенсификации методов очистки сточных вод: сб. науч. тр. / МИСИ. – М.: МИСИ, 1987.

50. Селюков, А.В. Электросинтез пероксида водорода в технологии очистки сточных вод [Текст] / А.В. Селюков [и др.] // Научные исследования в области физико-химической очистки промышленных сточных вод. – М., 1989. – (Тр. ин-та ВНИИ ВОДГЕО).

51. Синёв, О.П. Расширение и реконструкция очистных сооружений [Текст] / О.П. Синёв, А.И. Мацнев, А.П. Игнатенко. – Киев: Будивельник, 1981. – 44 с.

52. Синёв, О.П. Интенсификация биологической очистки сточных вод [Текст] / О.П. Синёв. – Киев: Техника, 1983. – 110 с.

53. Скирдов, И.В. Исследование и разработка методов интенсификации работы сооружений биологической очистки сточных вод [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И.В. Скирдов. – М., 1976. – 400 с.

54. Скирдов, И.В. Основы проектирования и расчета сооружений биологической очистки сточных вод [Текст] / И.В. Скирдов, А.А. Бондарев, В.Н.Швецов // Совершенствование методов расчета сооружений по очистке сточных вод и обработке осадков. – М., 1983. – С.5-15. – (Тр. ин-та ВНИИ ВОДГЕО).

55. СНиП 2.04.03-85. Строительные нормы и правила. Канализация. Наружные сети и сооружения [Текст]. – М.: ЦИТП, 1986. – 72 с.

56. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / под ред. П.Г. Киселева. – М.: Энергия, 1972.

57. Справочник проектировщика. Канализация населенных мест и промышленных предприятий [Текст] / под ред. В.Н.Самохина. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1991. – 693 с.

58. Ткачук, Н.Г. Выяснение возможности интенсификации ферментативной активности микрофлоры ила ультразвуком [Текст] / Н.Г. Ткачук, М.М. Земляк, Г.А. Никитин // Микробиология очистки воды: тез. докл. Всесоюзной конференции. – Киев, 1982. – 198 с.

59. Ткачук, Н.Г. Интенсификация роста и ферментативной активности микроорганизмов ила очистных сооружений электрическим током и ультразвуком [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Н.Г. Ткачук. – Киев: КТИПП, 1983. – 152 с.

60. Уэбб, Ф. Ингибиторы ферментов и метаболизма [Текст] / Ф. Уэбб. – М.: Мир, 1966.

61. Хазов, С.Н. Интенсификация работы аэротенка с использованием избыточной энергии потока возвратного активного ила [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Хазов. – Пенза: ПГАСА, 2002.

62. Хеттлер, Ф. Технология биологической очистки городских сточных вод в шахтных аэротенках [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ф. Хеттлер. – Ленинград, 1985, 1985. – 24 с.

63. Хидзо, Ф. Усовершенствование аэротенка за счет увеличения его глубины [Текст] / Ф. Хидзо, И. Фукуда; пер.с яп. №-5810 УкрНИИТИ// Есуй тохайсуй. – 1974. – Т.16, № 9. – С.959-964.

64. Швецов, В.Н. Использование анализа кинетики ферментативных реакций для выбора схемы и параметров процесса биологической очистки сточных вод [Текст] / В.Н. Швецов, К.М. Морозова, Л.А. Петрова // Сооружения и технологические процессы механической и биологической очистки промышленных сточных вод. – М., 1981. – С.95-104. – (Тр. ин-та / ВНИИ ВОДГЕО).

65. Эльпинер, И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие [Текст] / И.Е. Эльпинер. – М.: Изд-во физ.-мат. литры, 1963.

66. Яковлев, В.А. Кинетика ферментативного катализа [Текст] / В.А. Яковлев. – М.: Наука, 1965.

67. Яковлев, С.В. Применение технического кислорода для биохимической очистки сточных вод [Текст] / С.В. Яковлев, И.В. Скирдов, В.Н. Швецов // Водоснабжение и санитарная техника. – 1972. – № 4. – С.8-12.

68. Яковлев, С.В. Очистка производственных сточных вод [Текст] / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, Ю.В. Воронов. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.

69. Яковлев, С.В. Биохимические процессы в очистке сточных вод [Текст] / С.В. Яковлев, Т.А. Карюхина. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.

70. Яковлев, С.В. Биологическая очистка производственных сточных вод. Процессы, аппараты и сооружения [Текст] / С.В. Яковлев, И.В. Скирдов, В.Н. Швецов. – М.: Стройиздат, 1985. – 208 с.
71. Яковлев, С.В. Научно-исследовательские работы в области очистки природных и сточных вод [Текст] / С.В. Яковлев // Водоснабжение и санитарная очистка. – 1986 – № 1. – С.2-4.
72. Яковлев, С.В. Водоотведение и очистка сточных вод [Текст] / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, Ю.М. Ласков, В.Н. Калицун. – М.: Стройиздат, 1996. – 591 с.
73. Andrews G.F., Chi Tien., An Analisis of Bacterial Growth in Fluidized – Bed Adsorbtion Colomn. AIChE J., Vol.28, №2, p.182-189, March, 1982.
74. Cooper, P. Biological fluidized bed treatment for Water and Waste Water. “Water Serv.”. – 1980 – Vol. 84. – №1014.
75. Gandy A.F., Vannng P.V., a Obayashi A.W. Studies on the total oxidation of activated sludge with and without hydrolytic pretreatment. J.W.P.C.F. – 1971. – Vol.1. – №43. – P. 40-53.
76. Hammer, M.J. Water and Waste Water Technology.-by John Willey Sons. Inc., 1975. – 400 p.
77. Kalinske, A.A. Effect of Dissolved Oxigen and Substrate Concentration on the Uptake Rate of Microbiol, Suspensions J.W.P.C.F. – 1971. – Vol.43. – №1.– P. 73-80.
78. Roper R.E., Grady C.P.L. A model for the bio-oxidation process which incorporates the viability consept. – Water Res., 1974. – Vol. 8. – №7. – P.471-483.
79. Rittman B.E., Mc.Carty P.L. Model of steady-state-biofilm kinetics. “Biotechnology and Bioengineering”. –1979. – Vol.22. – P.2343-2357.
80. Turai L.L., Parkinson C.M., Hornor S.A., Mitchell M.J. Effect of ultrasound on the biological of bacteria used in waste water treatment. TAPPI. – 1980. – Vol.63. – №7. – P.81-85.
81. Wuhrmann K. Effect of Oxygen Tension on Biochemical Reactions in Biological Treatments Plants. Proc.Third Conference Biological waste Treatment, Manhattan College. – 1960. – № 7. – P. 27-38.
82. Weddle C.L., Jenkins D. The viability and activity of activated sludge. Schneider Res. – 1971. – Vol. 5. – № 8. – P.621-640.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ РАБОТЫ АЭРОТЕНКОВ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	7
1.1. Состав и свойства активного ила	7
1.2. Анализ влияния физико-химических и гидродинамических факторов на показатели работы аэротенков	12
1.2.1. Физико-химические методы интенсификации биологической очистки сточных вод	13
1.2.2. Повышение эффективности биологической очистки сточных вод за счет использования устройств, обеспечивающих высокую турбулизацию иловой смеси.....	28
2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ВОЗВРАТНОГО ИЛА АЭРОТЕНКОВ	37
2.1. Регенерация активного ила и условия, определяющие необходимость ее осуществления.....	37
2.2. Кинетика ферментативных реакций биологического окисления загрязнений активным илом. Влияние начальных условий на процесс биологической очистки	41
2.3. Теоретическое обоснование конструкции электрогидродинамической установки для обработки возвратного ила аэротенка-вытеснителя	51
2.3.1. Гидравлический расчет установки.....	52
2.3.2. Электрообработка активного ила.....	62
3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОТЕНКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВИРОВАННОГО ВОЗВРАТНОГО ИЛА	67
3.1. Объект исследований, программа и методика проведения лабораторных исследований.....	67
3.1.1. Объект исследований	67
3.1.2. Описание установки для проведения лабораторных исследований....	68
3.1.3. Программа и методика проведения лабораторных исследований.....	70
3.1.4. Методика проведения химических анализов	72
3.2. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов обработки возратного ила в лабораторном ЭГДУ на кинетику процессов биологической очистки сточных вод	80
3.5. Оценка достоверности полученных экспериментальных данных. Разработка математической модели процесса окисления органических примесей с использованием активированного возвратного ила	97
4. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОГО ИЛА ОПЫТНОГО И КОНТРОЛЬНОГО АЭРОТЕНКОВ	100
4.1. Объект исследований, программа и методика лабораторных испытаний ..	100

4.1.1. Объект исследований	100
4.1.2. Описание установки для проведения лабораторных исследований.....	100
4.1.3. Программа и методика лабораторных исследований.....	101
4.1.4. Методика проведения химических анализов.....	102
4.2. Результаты экспериментальных исследований седиментационных характеристик иловой смеси.....	103
5. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ВОЗВРАТНОГО ИЛА АЭРОТЕНКОВ	108
5.1. Производственные испытания технологий обработки потока возвратного активного ила с использованием ЭГДУ различных конструкций.....	108
5.2. Расчет экономической эффективности технологии обработки возвратного ила с использованием ЭГДУ новой конструкции	112
5.3. Методика расчета устройств, входящих в предложенную технологическую схему активации возвратного ила аэротенков	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	120

Научное издание

Гришин Борис Михайлович
Андреев Сергей Юрьевич
Бикунова Марина Викторовна
Титов Евгений Александрович
Кочергин Александр Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ СООРУЖЕНИЙ
БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**
Монография

Редактор М.А. Сухова
Верстка Н.А. Сазонова

Подписано в печать 8.11.2013. Формат 60x84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл.печ.л. 7,44. Уч.-изд.л. 8,0. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.
Заказ №216.

Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.