

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи

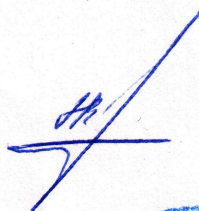


Заворотный Дмитрий Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЛОТДЕЛЕНИЯ В АЭРОТЕНКАХ-
ОСВЕТИТЕЛЯХ С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ
АЭРАЦИИ**


05.23.04 – Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных
ресурсов

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Научный руководитель:
Нездойминов Виктор Иванович
доктор технических наук, профессор

Идентичность всех экземпляров заверяю
Учёный секретарь диссертационного
совета Д 01.005.01



З.В. Удовиченко

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИЛООТДЕЛЕНИЯ В АЭРОБНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ	11
1.1 Актуальные вопросы биологической очистки городских сточных вод	11
1.1.1 Сравнение процессов, протекающих в аэробных биологических реакторах	11
1.1.2 Современные способы аэрации иловой смеси в аэротенках	13
1.1.3 Анализ способов илоотделения в аэробных биологических реакторах	17
1.2 Критический анализ существующих комбинированных биореакторов со взвешенным слоем	20
1.3 Анализ гидромеханических процессов в аэротенках-осветлителях	26
1.3.1 Теоретические зависимости расчёта гидродинамики жидких и газо- жидкостных сред в аэротенках	26
1.3.2 Основные теоретические закономерности осветления иловой смеси в условиях взвешенного слоя	32
1.4 Постановка задач по усовершенствованию илоотделения в аэротенке- осветлителе	35
РАЗДЕЛ 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ ИЛОВОЙ СМЕСИ В АЭРОТЕНКЕ-ОСВЕТИТЕЛЕ	37
2.1 Принцип работы аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации	37
2.2 Применение теории затопленных турбулентных струй к расчёту циркуляции в осветлителе	43
2.3 Определение параметров циркуляции иловой смеси в аэротенке- осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации.....	57
2.4 Выводы по второму разделу.....	61

РАЗДЕЛ 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОТЕНКА-ОСВЕТИТЕЛЯ С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ	62
3.1 Описание экспериментальной установки	62
3.2 Экспериментальное подтверждение теоретической зависимости производительности затопленного эрлифта от расхода воздуха	65
3.3 Определение угла раскрытия затопленной турбулентной струи в аэротенке-осветителе	72
3.4 Полный факторный эксперимент по определению допустимых гидродинамических параметров	76
3.5 Исследование задержания взвешенных веществ в осветителе в зависимости от гидродинамических параметров водоворотной зоны	87
3.6 Выводы по третьему разделу	94
РАЗДЕЛ 4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ АЭРОТЕНКА-ОСВЕТИТЕЛЯ С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ	95
4.1 Обоснование физического моделирования аэротенка-осветителя	95
4.1.1 Выбор критериев моделирования аэротенка-осветителя с затопленной эрлифтной системой аэрации	95
4.1.2 Исследование критической гидравлической нагрузки в полупромышленной модели аэротенка-осветителя	98
4.2 Разработка методики расчёта аэротенка-осветителя	103
4.3 Выводы по четвёртому разделу	109
РАЗДЕЛ 5 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ АЭРОТЕНКОВ-ОСВЕТИТЕЛЕЙ С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ	111
5.1 Экономический эффект от внедрения аэротенков-осветителей с затопленной эрлифтной системой аэрации в УЗВ рыбной фермы	111

5.1.1 Расчёт параметров аэротенков-осветлителей для замкнутого водоснабжения рыбной фермы	111
5.1.2 Расчёт экономического эффекта от внедрения аэротенков-осветлителей для замкнутого водоснабжения рыбной фермы	116
5.2 Экономический эффект от внедрения аэротенков-осветлителей для очистки городских сточных вод г. Стерлитамак	121
5.3 Выводы по пятому разделу	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	128
Приложение А Скорости нисходящего потока в зазоре модели аэротенка-осветлителя при различных величинах расхода воздуха	151
Приложение Б Вычисление коэффициентов регрессии	152
Приложение В Определение зависимости гидравлической нагрузки на осветлитель от интенсивности циркуляции в программе TableCurve 3D	157
Приложение Г Определение зависимости для расчёта концентрации взвешенных веществ в осветлённой жидкости в программной среде DataFit	162
Приложение Д Справки о внедрении результатов работы	165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Для очистки бытовых и некоторых производственных сточных вод широко используется аэробная биологическая очистка. Она включает биохимическую очистку стоков микроорганизмами активного ила и отделение частиц ила от очищенной жидкости. Биохимическая очистка и илоотделение может совмещаться в комбинированных биологических реакторах (аэротенках-отстойниках, аэротенках-осветлителях и т.д.). Комбинирование аэротенка и илоотделителя в одном сооружении позволяет снизить стоимость оборудования и электроэнергии.

В настоящее время наиболее распространённым способом илоотделения является отстаивание. Отстойники имеют большие объёмы и не позволяют поддерживать высокие концентрации активного ила в аэротенках. Наиболее перспективным является осветление иловой смеси во взвешенном слое ила. Активный ил необходимо постоянно обновлять – возвращать из взвешенного слоя в аэротенк, поскольку он склонен к изменению седиментационных свойств в результате протекания биологических процессов. В существующих аэротенках-осветлителях возврат иловой смеси из осветлителя в аэротенк осуществляется либо принудительно – соответствующим насосным оборудованием, либо естественно – за счёт использования кинетической энергии потоков, образующихся в результате работы аэрационных систем. Принудительная рециркуляция ила требует дополнительных экономических затрат на оборудование и эксплуатацию насосных установок. При естественной рециркуляции сложно обеспечивать требуемый расход возвратного активного ила, значительная часть общего объёма сооружения не используется в очистке. Во всех типах существующих аэротенков-осветлителей наблюдается периодическое залегание ила в застойных зонах, что приводит к нарушению процессов биологической очистки.

Для устранения вышеперечисленных недостатков нами разработан перспективный аэротенк-осветлитель, который отличается высокой долей полезного объёма, отсутствием застойных зон и возвратом ила из осветлителя без применения дополнительного насосного оборудования. Преимущества аэротенка-

осветлителя достигаются за счёт наклонного козырька, который способствует эжекции ила из взвешенного слоя осветлителя в циркуляционный поток аэротенка. Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью научного обоснования гидродинамических параметров разработанного аэротенка-осветлителя. В настоящее время практически не изучено влияние гидродинамики циркулирующих потоков иловой смеси в комбинированных биореакторах на параметры взвешенного слоя ила.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в совершенствование очистки сточных вод внесли С.В. Яковлев, И.В. Скирдов, А.Я. Карелин, Ю.В. Воронов, Н.И. Куликов, В.И. Нездойминов, Н.С. Серпокрылов и др. Изучению осветления воды во взвешенном слое осадка посвящены труды Д.М. Минца, Е.Ф. Кургаева, Е.Н. Тетеркина, И. Мацкрле, Т. Пейчева, Ю.Л. Сколубовича и др. Тема илоотделения в условиях взвешенного слоя остаётся не достаточно разработанной из-за сложной изменяющейся структуры частиц активного ила. Изучением осветления во взвешенном слое активного ила занимались В.П. Колпакова, Й. Чен, Л. К. Жанг, М. Дж. Нельсон и др.

Теоретические изыскания опираются на труды по гидродинамике, в частности, описывающие движение жидкости в аэробных биологических реакторах (Л.Н. Брагинский, М.А. Евилевич и др.) и при истечении затопленных струй (Г.Н. Абрамович, М.А. Михалёв, А.С. Гиневский и др.).

Цель исследования – повышение гидравлической нагрузки и снижение объёма отстойной части аэротенка-осветлителя за счёт обновления подвижного взвешенного слоя водоворотным потоком жидкости.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- выполнить критический анализ различных конструкций комбинированных биореакторов и определить возможные пути совершенствования процессов илоотделения в них;
- конструктивно обеспечить возврат активного ила из взвешенного слоя илоотделителя за счёт кинетической энергии циркуляционного потока эрлифтного реактора – без применения дополнительного насосного оборудования;

- теоретически обосновать влияние гидродинамических параметров аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации на обновление взвешенного слоя в водоворотной зоне, образуемой под действием затопленной турбулентной струи;

- получить зависимости между допустимой гидравлической нагрузкой на взвешенный слой ила в осветлителе, интенсивностью циркуляции иловой смеси и размерами аэротенка-осветлителя;

- разработать алгоритм расчёта аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации;

- оценить экономическую эффективность от внедрения аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Объект исследования – аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Предмет исследования – влияние гидродинамических параметров циркуляции иловой смеси на создание и обновление взвешенного слоя в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Научная новизна:

- разработана математическая модель гидродинамики потоков в эрлифтном биореакторе, который впервые скомбинирован с осветлителем со взвешенным слоем активного ила;

- получены научно-обоснованные зависимости, связывающие гидравлическую нагрузку на осветлитель с интенсивностью циркуляции иловой смеси в аэротенке;

- впервые разработан метод расчёта различных по конфигурации аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации для очистки сточных вод.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость работы:

- на основании теории турбулентных струй разработана математическая модель, позволяющая определить расход возвратного активного ила из зоны

осветления в аэротенк и скорость восходящего потока жидкости во взвешенном слое аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации;

- разработан алгоритм расчёта гидродинамических и геометрических параметров аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Практическая значимость работы:

- внедрение результатов работы позволяет снизить себестоимость очистки сточных вод в биологических реакторах, использующих затопленную эрлифтную систему аэрации;

- основанные на результатах диссертационных исследований рекомендации по расчёту и конструированию аэротенков-осветлителей внедрены на предприятии ЗАО «Гидроинжстрой» (г. Москва) для повышения эффективности сооружений по очистке сточных вод;

- результаты исследований используются в ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» при подготовке бакалавров по направлению «Строительство», профиль «Водоснабжение и водоотведение» в дисциплине «Канализационные очистные сооружения», а также при подготовке магистров по направлению «Строительство», программа «Современные методы очистки природных и сточных вод» в дисциплине «Малоотходные технологии систем водоснабжения и водоотведения»;

- на основании исследований предложена новая конструкция аэротенка-осветлителя, что нашло отражение в патенте Украины на полезную модель № 132076 от 11.02.2019 г. «Аэротенк-осветлитель».

Методология и методы исследования. В работе использованы теоретические, экспериментальные и общелогические методы исследования. Применённые теоретические методы включают: формализацию при составлении алгоритмов и математическом описании исследуемых гидродинамических параметров, гипотетико-дедуктивный метод при анализе результатов экспериментов, аксиоматический метод при выводе зависимостей, опирающихся на литературные источники и т.п. Основным эмпирическим методом в работе является экспериментальное исследование. Эксперименты осуществлялись на лабораторном и полупромыш-

ленном оборудовании. Выполнялись измерения геометрических и гидродинамических параметров аэротенка-осветлителя, физико-химических свойств иловой смеси, концентрации взвешенных веществ в очищенной жидкости и т.д.

Положения, выносимые на защиту.

- устройство аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации, используемый в нём способ илоотделения и рециркуляции возвратного активного ила;
- результаты теоретических исследований, направленных на определение зависимости расхода возвратного активного ила и скорости восходящего потока жидкости в осветлителе от интенсивности циркуляции иловой смеси в аэротенке;
- влияние интенсивности циркуляции, геометрических параметров аэротенка-осветлителя и концентрации активного ила на допустимую гидравлическую нагрузку на взвешенный слой;
- алгоритм расчёта аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 05.23.04 – Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов, а именно п. 3 «Методы очистки природных и сточных вод, технологические схемы и конструкции используемых сооружений, установок, аппаратов и механизмов», п. 8 «Гидравлические закономерности, определяющие эффективность работы водопроводных и канализационных сооружений и устройств, их отдельных элементов, систем водоподачи и водоотведения».

Степень достоверности и апробация полученных результатов. Достоверность результатов обеспечивается использованием современных средств научных исследований и основополагающих теоретических положений.

Основные результаты работы и главные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XV Международная конференция молодых учёных, аспирантов, студентов «Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий» (г. Макеевка, ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», 22-23 апреля

2016 г.); Многодиалоговая видеоконференция авторов студенческих исследований «Массовые информационные процессы в студенческих научных исследованиях» (Приднестровская Молдавская Республика, ГОУ «Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко», 26 мая 2016 г.); XI Международная научная конференция аспирантов и студентов «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» (г. Донецк, ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», 11-13 апреля 2017 г.); I Международный строительный форум «Строительство и архитектура 2017» (г. Макеевка, ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», 20-22 апреля 2017 г.); X Международная научно-практическая конференция «ТЕХНОВОД–2017» (г. Астрахань, Музейно-выставочный комплекс «Цейхгауз», 5-6 октября 2017 г.); ЕЕСЕ 2018 : Международная научная конференция «Энергетика, экология и строительство» (г. Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 19-24 ноября 2018 г.); XI Международная научно-практическая конференция «ТЕХНОВОД-2018» (г. Сочи, Красная Поляна, 11-14 декабря 2018 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертационных исследований опубликованы автором и в соавторстве в 11 печатных научных работах общим объёмом 6,31 п.л., лично автора 3,14 п.л. В том числе, 5 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий ВАК ДНР, 1 – в зарубежном издании, индексируемом международной наукометрической базой Scopus, 3 – публикации по материалам научных конференций, 1 – публикации в других научных изданиях. По результатам исследований получен 1 патент Украины на полезную модель.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Диссертация содержит 168 страниц машинописного текста, включает 22 таблицы, 37 рисунков, 5 приложений. Список использованной литературы охватывает 168 источников.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ИЛООТДЕЛЕНИЯ В АЭРОБНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ РЕАКТОРАХ

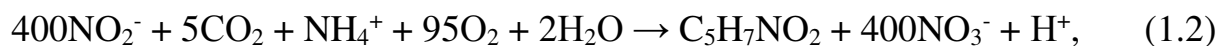
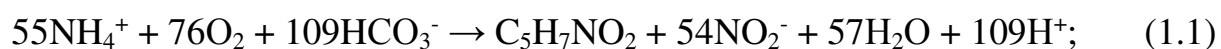
1.1 Актуальные вопросы биологической очистки городских сточных вод

Мероприятия по защите окружающей среды, в том числе водных ресурсов, имеют весьма высокую социальную и экономическую значимость и регламентируются соответствующими нормативно-правовыми актами [1-3]. Внедряемые методы очистки сточных вод должны соответствовать или превосходить по эффективности современные технологические решения, которые доступны для применения на отечественных канализационных очистных станциях, т.е. относятся к наилучшим доступным технологиям [4]. В настоящее время остаётся актуальной необходимость в совершенствовании существующих технологий очистки сточных вод.

В последнее время основными направлениями интенсификации аэробной биологической очистки являются совершенствование аэрационных систем [5-8], повышение эффективности илоотделения [9-11], внедрение технологии нитриденитрификации [11-15]. Актуальным является вопрос повышения возраста активного ила [16, 17].

1.1.1 Сравнение процессов, протекающих в аэробных биологических реакторах

Процесс аэробной обработки сточной жидкости активным илом описывается уравнениями (1.1) (реакция, проводимая бактериями родов *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosospira*, *Nitrosolobus* и т.д.) и (1.2) (окисление азота нитритов в азот нитратов бактериями рода *Nitrobacter*, *Nitrospina*, *Nitrosospira* и т.д.) [18, 19].



где $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ – символ состава органического вещества образующихся клеток микроорганизмов.

За нитрификацией следует анаэробный процесс денитрификации, описываемый уравнениями (1.3-1.4) [8, 20, 21]



Как видно из формул (1.1-1.4), использование денитрификации позволяет осуществлять более глубокий биохимический распад органического вещества. Процессы нитрификации сопровождаются снижением pH, что угнетает процессы жизнедеятельности нитрифицирующих бактерий в обработанной жидкости. В результате денитрификации уровень pH повышается [22, 23].

Преобладание нитрификации или денитрификации определяется концентрацией растворённого кислорода, поддерживаемой в объёме биореактора: аэробные микроорганизмы активнее перерабатывают вещества при высоких концентрациях кислорода, а денитрифицирующие бактерии – при низких. Поддержание постоянной концентрации растворённого кислорода повышает расход энергии на аэрацию на 1...4% [24], поэтому по мере протекания биологической очистки целесообразно периодически менять концентрацию растворённого кислорода. В зоне протекания нитрификации концентрацию кислорода рекомендуется поддерживать равной 2,0 мг/дм³ [25-28]. Для денитрификации рекомендуется 0,5...1,0 мг/дм³ растворённого кислорода. Ил в зоне снижения концентрации растворённого кислорода должен находиться в течение времени, рассчитываемого по формуле (1.5) [29, 30]

$$\tau_{mp} = \frac{C_1 - C_0}{\rho \cdot a_i \cdot (1 - A)}, \quad (1.5)$$

где C_1 – концентрация растворённого кислорода в иловой смеси после прохождения зоны насыщения кислородом воздуха, мг/дм³;

C_0 – рекомендуемая концентрация растворённого кислорода в зоне протекания денитрификации, мг/дм³;

a_i – концентрация активного ила, г/дм³;

A – зольность активного ила;

ρ – удельная скорость окисления, мг/(г·ч).

Возраст активного ила непосредственно влияет на его седиментационные свойства, скорость переработки органических веществ, требуемую эффективность системы аэрации и т.д. и зависит от используемой системы илоотделения. В зависимости от вида биореактора, возраст ила в нём может поддерживаться как 1...5 суток [31] (в системах аэротенк-вытеснитель – вторичный отстойник), так и 20...100 суток (в мембранных биореакторах) [32]. По сравнению со свежим активным илом, ил с большим возрастом характеризуется следующими преимуществами [31]:

- более глубокая биохимическая очистка;
- устойчивость к неравномерности поступления загрязняющих веществ;
- меньшая восприимчивость к содержанию в стоках токсических веществ;
- более эффективное использование объёма биореактора;
- низкое значение илового индекса и хорошие влаготдающие свойства;
- высокая степень минерализации и снижение расхода избыточного ила [32].

Минимальный возраст активного ила в сооружении аэробной биологической очистки определяется исходя из времени, необходимого для развития и аккумуляции соответствующих бактерий [33].

Концентрацию и возраст активного ила ограничивают из-за того, что высококонцентрированная иловая смесь требует больших энергетических затрат на насыщение её объёма кислородом, а также осложняет процесс илоотделения. Верхний предел возраста ила может назначаться в результате экономической нецелесообразности увеличения мощности системы аэрации, осложнения предотвращения выноса избыточного активного ила с очищенной жидкостью и т.д.

1.1.2 Современные способы аэрации иловой смеси в аэротенках

Работа любого сооружения аэробной биологической очистки невозможна без системы аэрации, которая выполняет ряд функций [34-36]:

- 1) обеспечение необходимых для протекания аэробных процессов биохимических условий: насыщение жидкости кислородом для дыхания аэробных организмов и отдувка газообразных продуктов жизнедеятельности;

2) обеспечение гидродинамических условий, способствующих развитию аэробных микроорганизмов: предотвращение залегания ила, осреднение в объёме концентрации загрязнений, перемещение иловой массы между различными зонами биологического реактора.

Аэрация является весьма энергоёмким технологическим процессом. Насыщение очищаемой сточной жидкости кислородом воздуха составляет около двух третей от всего энергопотребления на станциях очистки городских сточных вод (Рис. 1.1) [37].

- Аэрация (67 %)
- Перекачивание жидкостей (21 %)
- Освещение (3 %)
- Прочие потребители (9 %)

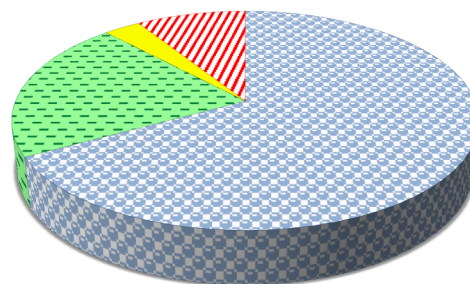


Рисунок 1.1 – Процентное распределение потребления энергии на городских канализационных очистных станциях

Анализ современных технологий биологической очистки показывает, что за счёт модернизации воздухоудного оборудования можно сократить энергопотребление на 20%, а посредством установки новых аэрационных систем и внедрения технологии нитри-денитрификации – сэкономить до 30% затрат на электроэнергию [38]. В связи с этим, выбор системы аэрации весьма значим при проектировании аэробных биологических реакторов.

Основными типами аэрационных систем, используемыми для искусственного насыщения иловой смеси аэротенков кислородом воздуха, являются пневматическая, механическая, пневмомеханическая и струйная.

Струйные аэраторы включают в себя насосную установку, снабжённую струйным насосом (эжектором). Эжектор струйной системы аэрации подмешивает атмосферный воздух в проходящий через него поток иловой смеси. Иловая смесь забирается из биореактора, смешивается с кислородом воздуха при помощи эжектора и возвращается в объём аэротенка. Струйная аэрация производит контакт кислорода с жидкостью под повышенным напором, что повышает его

растворимость (КПД растворения кислорода до 70% [39]). В насосе, осуществляющем циркуляцию иловой смеси через систему аэрации, хлопья активного ила измельчаются, что приводит к увеличению площади контакта растворённого газа с активным илом и интенсификации аэробных процессов [40]. Поскольку в хлопке активного ила, помимо аэробных микроорганизмов, получают развитие микроаэрофилы и анаэробные микроорганизмы [31], измельчение сформировавшихся иловых частиц является отрицательным фактором.

Механические аэраторы относятся к эффективным системам диспергирования воздуха в воде. К их недостаткам относятся большое потребление электроэнергии, сложность монтажа и обслуживания [41], высокие скорости сдвига и др. [42]. Обычная механическая аэрация производит насыщение жидкости кислородом воздуха на малой глубине. Для повышения эффективности растворения газа в жидкости предпочтительна подача воздуха на глубину сооружения, поскольку глубинная аэрация способствует увеличению длительности контакта пузырька с жидкостью, а также увеличению равновесной концентрации газа в жидкости ввиду большего давления. В системах пневмомеханической аэрации механические аэраторы применяются для диспергирования воздуха, подаваемого в аэротенки под напором посредством воздуходувного оборудования. Относительно прочих аэрационных систем, пневмомеханические системы аэрации обеспечивают наиболее высокую массопередачу кислорода в объём обрабатываемой жидкости [42, 43].

Наиболее распространены в технологиях очистки сточных вод в аэротенках пневматические системы аэрации. Простейшие пневматические аэраторы, которые представляют собой перфорированные трубы, применяются с начала XX века [44]. Пневматическая аэрация основана на подаче сжатого воздуха при помощи аэродинамических машин. Воздух подаётся от высоконапорных вентиляторов, воздуходувок или компрессоров по системе воздухопроводов и распределяется в аэрационном объёме аэротенка при помощи диспергирующих устройств [5]. Основными критериями оценки эффективности диспергирующих устройств в пневматических системах аэрации являются объёмный коэффициент

массопередачи кислорода k_{VT} , $ч^{-1}$, КПД, %, окислительная способность, $кг/(ч \cdot м^3)$ и эффективность аэрации (ЭА) по производству растворенного в жидкости кислорода, $кгO_2/(кВт \cdot ч)$, а также изменение этих параметров в процессе эксплуатации аэраторов [45]. В настоящее время большинство систем пневматической аэрации являются мелкопузырчатыми. Современные пневматические системы аэрации в стандартных условиях позволяют достигать эффективности переноса кислорода 18...26% [46].

Помимо способа насыщения сточной жидкости кислородом воздуха, эффективность системы аэрации определяется наличием различного рода направляющих перегородок. Расположенные в объёме биологического реактора направляющие, в зависимости от их конфигурации, могут способствовать улучшению следующих аспектов биологической очистки:

- значительное снижение размера застойных зон в объёме аэротенка за счёт расположения над аэратором направляющей пластины [47];
- осуществление рециркуляции активного ила в аэротенк из осветлителя в комбинированных сооружениях за счёт течений, образованных под воздействием восходящих водо-воздушных потоков [41, 48, 49];
- увеличение продолжительности контакта жидкости с воздухом благодаря снижению скорости подъёма воздушных пузырьков в нисходящем закрученном потоке, который создаётся за счёт работы вихревого эрлифтного устройства [5];
- протекание в биореакторе одноиловой нитрификации-денитрификации путём поочерёдного прохождения иловой смеси через отделённые аэрируемые и бескислородные зоны [15, 50];
- предотвращение залегания ила в биореакторах значительной глубины за счёт использования затопленной эрлифтной системы аэрации [36].

Особого внимания заслуживает затопленная эрлифтная система аэрации, в которой вызванный газлифтным эффектом восходящий поток отделён от нисходящего вертикальной затопленной перегородкой. Она используется в отечественной практике в течение последних нескольких лет [15, 51]. В зарубежных источниках биологические реакторы, в которых применяется такая

аэрационная система, называют «эрлифтными реакторами» («airlift reactors») [42, 52-56]. Первые эрлифтные реакторы запатентованы в 1955 году во Франции [57]. Для очистки сточных вод используются эрлифтные реакторы с наружной циркуляцией (external loop ALR) или с внутренней циркуляцией (internal loop ALR). В биореакторах с наружной циркуляцией восходящее и нисходящее движения иловой смеси осуществляются по двум отдельным вертикальным колоннам, которые сообщаются в их верхних и нижних частях. Реакторы с внутренней циркуляцией устраиваются в одной ёмкости. Разделение затопленного эрлифта и остального пространства реактора с внутренней циркуляцией может осуществляться при помощи плоской разделительной стенки или вертикальной концентрической трубы [58, 59]. Дальнейшее совершенствование эрлифтных биореакторов открывает новые возможности в обработке сточных вод активным илом.

1.1.3 Анализ способов илоразделения в аэробных биологических реакторах

В процессе биохимической переработки органических соединений в аэробных биореакторах происходит прирост активного ила. После стадии биохимической очистки активный ил извлекается из очищаемой жидкости при помощи гравитационного осаждения, осветления во взвешенном слое, фильтрации сквозь сетчатые фильтры или флотации.

Наиболее простым и распространённым на станциях очистки бытовых сточных вод способом илоразделения является гравитационное осаждение во вторичных отстойниках. На станциях с малой производительностью получили распространение скомбинированные сооружения – аэротенки-отстойники, которые представляют собой аэротенк-смеситель и вторичный отстойник, сблокированные в одном сооружении [60]. Гравитационное отстаивание подразумевает использование значительных объёмов для илоразделения и поддержание относительно низкой концентрации активного ила в зоне аэробной очистки (обычно не более 3 г/дм^3), что приводит к значительному увеличению габаритов и, соответственно, капитальной стоимости биореакторов. На зарубежных очистных станциях наибольшее распространение получили аэротенки-отстойники

«оксиконтакт» и «оксирапид» французской фирмы Дегремон (Degrémont) [61, 62], в которых объём отстойной части превышает объём аэротенка [63]. Для повышения эффективности работы отстойных сооружений, они могут дополняться блоками параллельных пластин, которые обеспечивают тонкослойное отстаивание. Применение тонкослойных модулей не повышает эффективность отстаивания без обеспечения равномерного распределения потоков жидкости. При равномерном распределении очищаемой жидкости между ярусами блоков возможно использование только 50...80% тонкослойного объёма [64]. Поверхности тонкослойных модулей, используемых при вторичном отстаивании, неизбежно обрастают адгезионным слоем активного ила. Это требует изготовления специальных модулей с минимальной адгезией ила к поверхности и дополнительного оборудования, обеспечивающего их периодическую регенерацию [65].

Аэротенки-осветлители с илоразделением во взвешенном слое ила, относительно аэротенков-отстойников с гравитационным илоотделением, позволяют поддерживать более высокую концентрацию и возраст активного ила при меньших размерах зоны осветления. Такие сооружения находят применение на небольших городских канализационных очистных станциях. В аэротенках-осветлителях со взвешенным слоем ила не допускается длительное нахождение иловой смеси в зоне осветления. Ограничение времени пребывания ила в объёме взвешенного слоя необходимо для предотвращения вспухания (повышения илового индекса до величины свыше $150 \text{ см}^3/\text{г}$, и соответствующего снижения скорости осаждения активного ила), к которому приводит длительное нахождение активного ила в бескислородных условиях [66-68].

Фильтротенки являются наиболее компактными из аэробных биореакторов, совмещённых с сооружением илоотделения. Применение сетчатых фильтров для отделения биологически очищенной жидкости от взвесей позволяет значительно увеличить возраст активного ила в биологическом окислителе. В фильтротенке может поддерживаться доза ила до 20 г/дм^3 [67] и более [69], что значительно превышает концентрацию иловой смеси в аэротенках-осветлителях со взвешенным слоем, где эта величина обычно не превышает $4...6 \text{ г/дм}^3$ [70]. Сопротивление

фильтрующих насадок фильтротенков возрастает по мере засорения ячеек фильтрующей сетки. При работе фильтротенка фильтрующие насадки работают попеременно в двух режимах: фильтрация иловой смеси сквозь сетчатый фильтр и регенерация фильтрующей сетки посредством обратной продувки её сжатым воздухом [71]. Для регенерации фильтрующих мембран требуется чистая вода и реагенты [72]. Фильтротенки используются преимущественно для биологической очистки производственных сточных вод. В мембранных биореакторах (МБР), как и в фильтротенках, осуществляется аэробная биологическая очистка производственных стоков [73-75]. В МБР применяется микрофильтрация или ультрафильтрация, что позволяет исключить вынос с очищенной жидкостью взвешенных веществ и многих растворимых соединений [74]. Концентрация взвешенных веществ в профильтрованной жидкости, не превышает 3 мг/дм^3 [75].

Во флототенках илоотделение производится посредством напорной флотации: на частицах ила образуются пузырьки воздуха, выделяемые из подаваемого в объём флототенка пересыщенного водо-воздушного потока. Избыточный и рециркуляционный ил изымается с поверхности флототенка в виде пены (флотационного шлама). По сравнению с осаждением, флотационное илоразделение требует меньше времени, позволяет поддерживать более высокие (оптимально $5...8 \text{ г/дм}^3$) дозы активного ила в биореакторе, обеспечивает постоянное нахождение ила в аэробных условиях, способно осуществляться без уплотнения избыточного ила. Недостатками использования напорной флотации для илоотделения является большое энергопотребление флотационных насосов, частый повышенный вынос активного ила с очищенной жидкостью и необходимость установки илоотделителей внутри помещений для предотвращения замерзания флотационного шлама в зимний период [76].

Большой объём сооружений биологической очистки с гравитационными отстойниками и высокая себестоимость флотационного илоотделения и фильтрования через мембраны делают перспективным осветление иловой смеси во взвешенным слое.

1.2 Критический анализ существующих комбинированных биореакторов со взвешенным слоем

Среди различных видов аэротенков высокой концентрацией иловой смеси и компактностью отличаются такие биологические реакторы, которые объединяют в одном сооружении аэротенк и сооружение для осветления иловой смеси. В настоящее время аэротенки-отстойники широко распространены на станциях очистки бытовых сточных вод малой и средней производительности. При этом большинство из них для разделения иловой смеси используют технологию осветления во взвешенном слое ила с последующим гравитационным осаждением оставшихся в осветлённой жидкости частиц. В отечественной литературе для обозначения сооружений, в которых процессы биохимической очистки активным илом совмещены с процессами его отделения от воды посредством фильтрации сквозь взвешенный слой, используются различные термины: «аэротенк-отстойник» [41, 48, 77], «аэротенк-осветлитель» [49, 78], «аэротенк» [79].

Аэротенки-отстойники в мировой практике применяются с конца 40-х годов XX века [69]. Первое отечественное сооружение биологической очистки, совмещающее в себе аэротенк и вторичный отстойник, было запроектировано И.С. Постниковым в Академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова в 1953 г. [63]. Аэротенк-отстойник состоит из двух камер (Рис. 1.2). В камере аэрации 4 образуется циркуляционный поток: пузырьки воздуха создают эрлифтный эффект и над аэратором 10 возникает восходящее движение газо-жидкостной смеси. Поднявшаяся иловая смесь возвращается вниз в противоположной от аэратора части камеры реакции и вновь вовлекается в восходящий поток. Проходя у дна, жидкость обладает достаточной скоростью для предотвращения залегания взвешенных частиц. Такую же циркуляцию можно наблюдать в поперечном разрезе аэротенка-вытеснителя. В данной конструкции имеется ещё один циркуляционный поток. За перегородкой 2 – в камере отстаивания 5 также осуществляется перемешивание иловой смеси. Ил попадает туда через окна 8 и подтягивается обратно в камеру аэрации через зазор 9 из-за разности давлений газожидкостного столба с одной стороны и иловой смеси с другой [79].

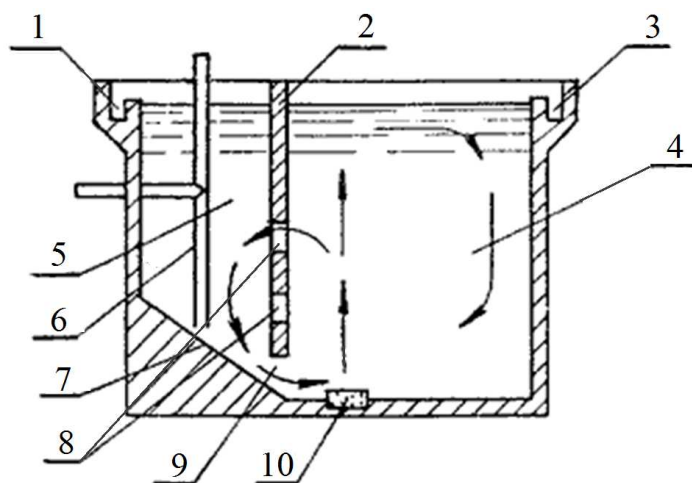


Рисунок 1.2 – Аэротенк-отстойник И.С. Постникова [79]:

1 – подводящий лоток; 2 – перегородка; 3 – лоток отвода очищенной жидкости; 4 – камера аэрации; 5 – камера отстаивания; 6 – трубопровод отвода уплотнённого избыточного ила; 7 – наклонное дно камеры отстаивания; 8 – окна; 9 – зазор; 10 – аэратор.

Подобный принцип перекачивания возвратного активного ила из зоны осветления (за счёт воздействия циркуляционных потоков) использован во многих разработанных позднее аэротенках-отстойниках. Достаточно широкое распространение получила разработанная ГПИ «Эстонпроект» компактная установка БИО (Рис. 1.3 а) [61]. Более интенсивное перемешивание активного ила под зоной осветления происходит в аэротенке-отстойнике, который разработан в 1979 г. в Макеевском инженерно-строительном институте. Здесь для перемещения жидкости используется не только разрежение возле места впуска воздуха, но и захват части нисходящего потока при помощи наклонных козырьков под впускными окнами (Рис. 1.3 б) [77].

Продолжительное нахождение активного ила в бескислородных условиях приводит к развитию филаментных микроорганизмов, которые вызывают вспухание. Длительное отсутствие перемешивания массы активного ила приводит к его всплыванию под действием скапливающихся газообразных продуктов метаболизма [67]. В случае всплывания находящегося во взвешенном слое ила будет происходить его вынос с очищенной жидкостью [68]. Аэротенки-отстойники, которые представлены на рисунках 1.2 и 1.3, не предусматривают рециркуляции

иловой смеси из зоны освещения 5 в аэротенк. Из-за этого ил во взвешенном слое часто подвергается всплытию, что подтверждалось в ходе исследований очистки стоков активным илом в моделях аэротенков-осветлителей со взвешенным слоем. Низкая надёжность и сложность эксплуатации, связанные со склонностью взвешенного слоя к всплытию, являются серьёзными, требующими устранения недостатками описанных выше конструкций.

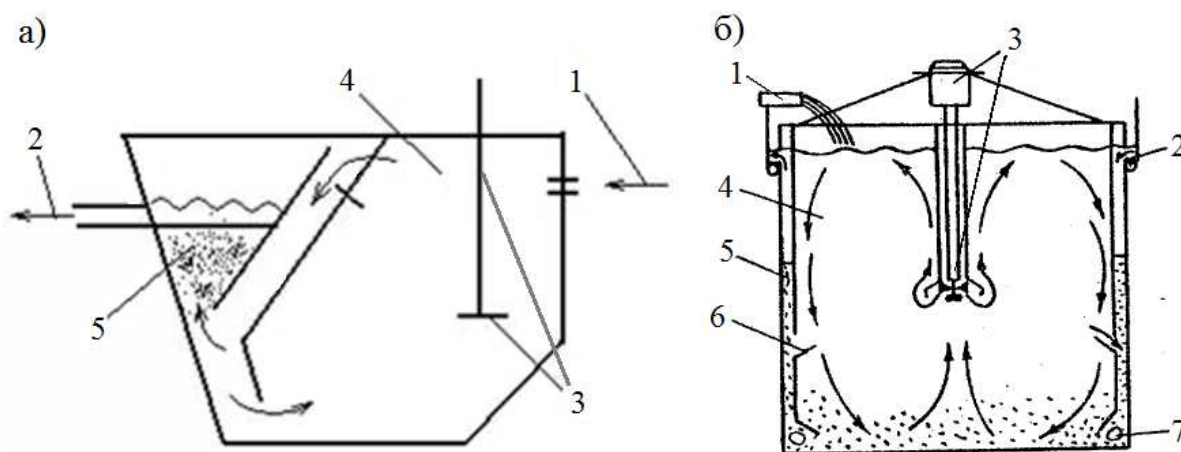


Рисунок 1.3 – Конструкции аэротенков-отстойников с интенсивным движением иловой смеси под зоной освещения во взвешенном слое:

а – компактная установка БИО; б – аэротенк-отстойник конструкции Макеевского инженерно-строительного института:

1 – подача сточной жидкости; 2 – отвод очищенных сточных вод; 3 - система аэрации; 4 – камера аэрации; 5 – зона освещения; 6 – окно для впуска иловой смеси, оборудованное наклонным козырьком; 7 – трубопровод удаления избыточного ила.

Всплытие активного ила во взвешенном слое можно предотвратить посредством продлённой аэрации, которая приводит к минерализации активного ила. По мере минерализации происходит снижение количества питательных веществ и, следовательно, сокращение возможности всплытия активного ила. В аэротенках-отстойниках БИО цикл аэрации составляет 24 часа [61], что не всегда целесообразно и требует значительного повышения объёмов сооружения. Другим распространённым способом предотвращения всплытия активного ила в зоне отстаивания является рециркуляция иловой смеси из взвешенного слоя аэротенка-осветлителя или прямка аэротенка-отстойника в зону аэрации. Возврат ила из осветлителя в аэротенк может производиться принудительно – при помощи

соответствующего насосного оборудования (как правило, эрлифтов) [78, 80], или только за счёт движения циркуляционных потоков, возникающих в результате действия аэрационных систем [48].

Основным недостатком принудительной рециркуляции (Рис. 1.4 а) ила являются дополнительные экономические затраты на оборудование и эксплуатацию насосных установок. При использовании эрлифта для перекачивания возвратного ила требуется подавать от 1 до 5 м³ сжатого воздуха на каждый кубический метр иловой смеси, что требует заметных потерь электроэнергии.

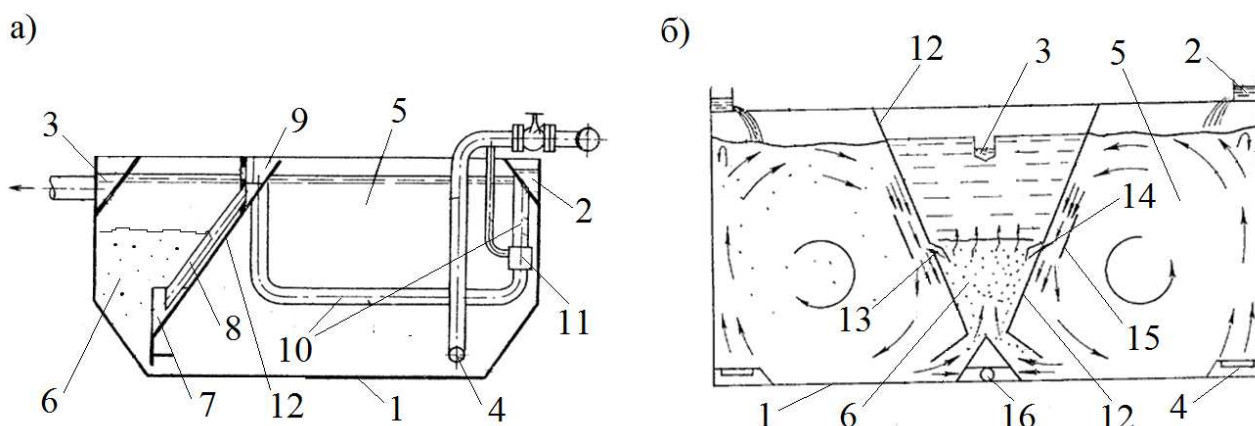


Рисунок 1.4 – Рециркуляция иловой смеси из взвешенного слоя аэротенков-осветлителей:

а – аэротенк-осветлитель с принудительным возвратом ила [78]; б – аэротенк-отстойник, обеспечивающий стабильный уровень взвешенного слоя за счёт естественной циркуляции [48]:

1 – корпус аэротенка-осветлителя; 2 – подводный лоток; 3 – сборный лоток очищенной жидкости; 4 – аэраторы; 5 – зона аэрации; 6 – взвешенный слой; 7 – иловый бункер; 8 – иловыжимные трубы; 9 – иловый лоток; 10 – эрлифт; 11 – форсунка; 12 – разделительные перегородки; 13 – циркуляционные отверстия; 14 – козырёк; 15 – щит; 16 – трубопровод отвода избыточного ила.

Недостатками аэротенков-осветлителей, в которых возврат ила из осветлителя осуществляется за счёт кинетической энергии циркуляционных токов, образуемых в результате аэрации иловой смеси, заключаются в сложности обеспечения требуемого расхода возвратного активного ила и значительной части неиспользуемого объёма сооружения. Так, часть аэротенка-осветлителя (Рис. 1.4 б), которая не

принимает участия в биохимической обработке загрязнений активным илом, составляет 30...50% от общего рабочего объёма сооружения. В литературных источниках отсутствуют данные для расчёта расхода возвратного ила. Из-за козырьков 14 верхний слой ила не возвращается в аэрируемую зону 5 через циркуляционные отверстия 13, что приводит к всплыванию части ила в осветлителе.

В отличие от аэротенка-осветлителя Разумовского и Непаридзе (Рис. 1.4 б) [48], конструкция аэротенка-отстойника, разработанная М.М. Земляком, М.Е. Кигелем и С.К. Колобановым [41, 49], включает около 20% неиспользуемого объёма и менее склонна к образованию застойных зон. Биологический реактор разделён перегородкой 5 (Рис. 1.5) на зоны аэрации 6 и осветления 7. За счёт газлифтного эффекта, в нижней части зоны аэрации 6 гидростатическое давление ниже, чем в зоне осветления 7, а в верхней части большее гидростатическое давление наблюдается в зоне аэрации. Поток жидкости, которая перетекает через отверстие 8 из зоны аэрации направляется вдоль разделительной перегородки 5 посредством перегородки 9 с козырьком 10. Иловая смесь возвращается в зону аэрации через щель 11. Движение потока жидкости из зоны 12 к щели 11 инициирует циркуляционное движение в зоне осветления.

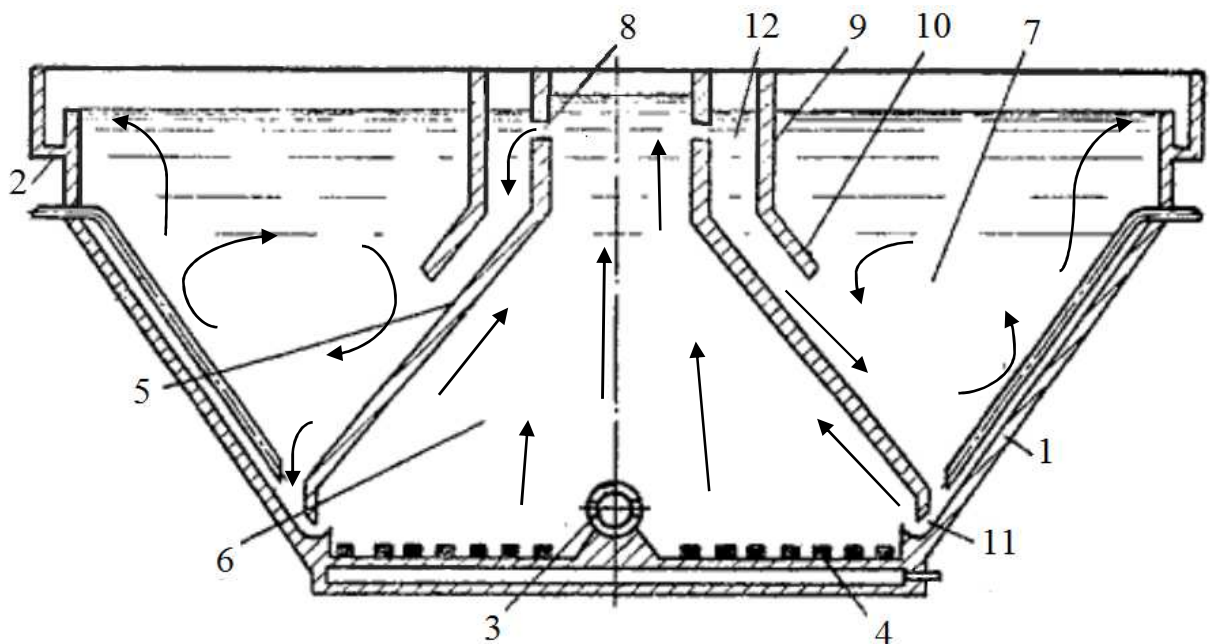


Рисунок 1.5 – Схема аэротенка-осветлителя М.М. Земляка [49]:

1 – корпус; 2 – лоток отвода очищенной сточной воды; 3 – труба подвода сточной жидкости; 4 – аэраторы; 5 – разделительная перегородка; 6 – зона аэрации;

7 – зона осветления; 8 – отверстия для протекания иловой смеси в зону осветления; 9 – перегородка; 10 – наклонный козырёк; 11 – придонная щель; 12 – зона гашения пульсации потока.

В данном аэротенке-осветлителе достигается относительно низкая гидравлическая нагрузка, поскольку, из-за циркуляции в осветлителе, она неравномерно распределяется по взвешенному слою. В литературных источниках отсутствует информация касательно требуемых гидродинамических параметров движения газожидкостной смеси в зоне 6 и иловой смеси в зоне 7, которые препятствуют залеганию ила над зазором 11 и не приводят к выносу ила через лоток 2 в результате взмучивания.

Похожий принцип действия наблюдается в колонном аэротенке [81, 82]. Под каждой из расположенных одна над другой наклонных перегородок (Рис. 1.6) образуется взвешенный слой, обновляемых за счёт движения потока из зоны циркуляции 6 в зону аэрации 5 через щели 4, 12. Данный аэротенк-осветлитель отличается весьма малым объёмом и занимаемой площадью, высокой степенью задержания взвешенных веществ, но обладает высокой материалоемкостью и требует большой (до 20 м) строительной высоты [82].

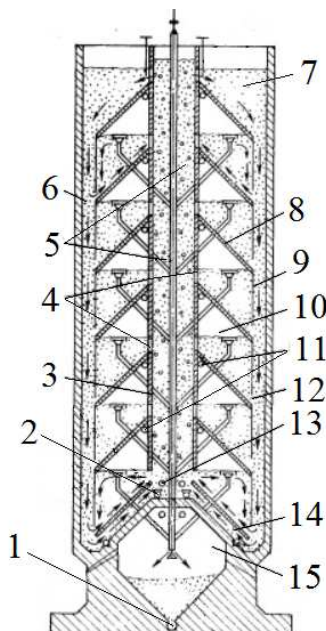


Рисунок 1.6 – Колонный аэротенк [81]:

1 – трубопровод удаления избыточного ила; 2 – аэраторы; 3 – вертикальные перегородки; 4 – щелевые отверстия; 5 – зона аэрации; 6 – зона циркуляции; 7 – зона

дегазации; 8 – наклонные перегородки; 9 – вертикальные козырьки; 10 – зона осветления; 11 – отвод очищенной жидкости; 12 – щелевые каналы; 13 – подвод очищаемой жидкости; 14 – рециркуляционный канал; 15 – зона уплотнения.

Несмотря на теоретические преимущества, комбинированные биореакторы со взвешенным слоем не находят широкого применения. Это делает актуальным совершенствование осветлителей со взвешенным слоем ила и их комбинирование с современными реакторами биохимической очистки.

1.3 Анализ гидромеханических процессов в аэротенках-осветлителях

1.3.1 Теоретические зависимости расчёта гидродинамики жидких и газо-жидкостных сред в аэротенках

В любом из сооружений аэробной биологической очистки наблюдается соответствующее течение иловой смеси. Для предотвращения залегания ила, осреднения концентраций загрязняющих веществ в объёме, движения иловой смеси по сооружению и других целей имеют значение как величины, так и направления скоростей движения потоков. В настоящее время существует большое количество как эмпирических, так и теоретических зависимостей для расчёта гидродинамических параметров течения жидкостей [36, 83-85].

К теоретическим зависимостям, позволяющим производить гидравлические расчёты, прежде всего, относятся фундаментальные уравнения и параметры, описанные Даниилом Бернулли, Джорджем Габриэлем Стоксом, Клодом-Луи Навье, Юлиусом Людвигом Вейсбахом, Осборном Рейнольдсом и т.д.

Для предотвращения образования донных отложений активного ила в сооружениях аэробной биологической очистки должны поддерживаться достаточные скорости. Отрыв частицы ила от дна осуществляется в случае превышения силы трения силой лобового воздействия жидкостного потока на частицу. Сила лобового воздействия является силой стокового сопротивления. Она прямо пропорциональна средней скорости течения на уровне центра тяжести частицы, динамической вязкости суспензии и эквивалентному диаметру частицы

взвеси [86, 87]. Сила трения, которая вызывает сцепление частицы с поверхностью, прямо пропорциональна прижимающей силе. Сила, прижимающая частицу к дну, складывается из силы тяжести и силы адгезии, за вычетом подъёмной силы, которая пропорциональна силе стокового сопротивления [86]. Формулы, которые выражают скорость влечения частиц, не учитывают форму частицы. Независимо от количества учитываемых факторов, зависимости, используемые для расчёта «незаиляющих» скоростей, являются приближёнными и содержат эмпирические коэффициенты [88]. Надёжным способом расчёта незаиляющей скорости иловой смеси в аэротенке, при которой не наблюдается устойчивого отложения и накопления иловых частиц на дне, является её расчёт по формуле [89]

$$v_{нз} = 5,3 \cdot v_{ос} \cdot H^{0,22}, \text{ м/с} \quad (1.6)$$

где $v_{ос}$ – скорость осаждения частиц активного ила, принимаемая около 3 мм/с (0,002...0,005 м/с, в зависимости от концентрации ила в аэротенке) [89];

H – рабочая глубина аэротенка, м.

Помимо температуры и химического состава, на физические свойства жидкости оказывают влияние присутствующие в ней нерастворимые соединения. Динамическую вязкость суспензий, в том числе иловой смеси, можно вычислять по формуле (1.7) [90-92]

$$\mu_{см} = \mu_{жс} \cdot \left[1 + 2 \cdot C_v \cdot \left(\frac{1 + C_v}{1 - C_v} \right)^2 \right], \quad (1.7)$$

где $\mu_{жс}$ – динамическая вязкость жидкой фазы суспензии, Па·с;

C_v – объёмная концентрация твёрдых частиц в суспензии, м³/м³.

Вязкость дисперсных систем не является постоянной – она зависит от скорости движения суспензии. При малых скоростях осадки сточных вод обладают большей вязкостью, при их движении наблюдаются более высокие значения потерь напора, чем при движении гомогенной жидкости. При высоких скоростях движения иловой смеси по трубам наблюдаются снижение шероховатости поверхности илопроводов и меньшие потери давления, чем при движении чистой воды [92]. Существующие модели, которые описывают реологические свойства

активного ила, имеют противоречия и неточности, что затрудняет рассмотрение иловой смеси как неньютоновской жидкости [93].

В аэротенках с пневматической аэрацией возникает принудительное движение аэрируемой иловой смеси в результате передачи ей энергии от сжатого воздуха [89]. Восходящие пузырьки воздуха за счёт газлифтного эффекта обуславливают появление циркуляционных потоков жидкости. Модель течения газожидкостного потока в затопленном эрлифте считается пузырьковой [94]. Расчёт количества жидкости, циркулирующей в аэротенках с затопленной эрлифтной системой аэрации основывается на равенстве приращения энергии потока, инициируемого газовыми пузырьками, и энергетических потерь, возникающих в результате действия гидравлических сопротивлений [36]

$$H_{air} + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} = \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} + \sum \frac{\zeta_i}{\omega_i^2} \cdot \frac{Q_a^2}{2 \cdot g}, \quad (1.8)$$

где H_{air} – подъёмный напор эрлифта, м. Подъёмный напор эрлифта равен разности гидростатических давлений, обеспечиваемых напором иловой смеси за пределами эрлифтной трубы и напором газожидкостной смеси внутри эрлифта [36]

$$H_{air} = h_a - \frac{\gamma_{см1} \cdot (h_a - z_1) + \gamma_{см2} \cdot z_1}{\gamma}, \quad (1.9)$$

где h_a – глубина расположения аэратора относительно свободной поверхности жидкости в биологическом реакторе, м;

z_1 – глубина погружения верха эрлифтной трубы под уровень свободной поверхности жидкости в биологическом реакторе, м;

$\gamma_{см1}$ – удельный вес газожидкостной смеси в затопленном эрлифте (от аэраторов до верха эрлифтной трубы), Н/м³;

$\gamma_{см2}$ – удельный вес газожидкостной смеси над эрлифтом, Н/м³;

γ – удельный вес иловой смеси в аэротенке, Н/м³.

α – коэффициент Кориолиса;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

v_2 – средняя скорость течения жидкости на входе в эрлифт, м/с, равная отношению расхода иловой смеси, циркулирующей через затопленный эрлифт, к площади его поперечного сечения;

$v_{ж}$ – средняя скорость течения жидкой фазы газожидкостной смеси в эрлифтной трубе, м/с;

Q_a – расход иловой смеси, циркулирующей через затопленный эрлифт, м³/с;

ζ_i – соответствующий коэффициент местного сопротивления на пути циркулирующего потока от выхода из сечения, в котором расположены аэраторы, до входа в это сечение. Коэффициенты местных сопротивлений определяются по соответствующим зависимостям, таблицам и графикам [95-99].

ω_i – занимаемая жидкой фазой часть поперечной площади потока, м², в сечении с местным сопротивлением, коэффициент которого составляет ζ_i .

Удельный вес газожидкостной смеси в эрлифтной трубе рассчитывается исходя из плотностей и площадей поперечного сечения газовой и жидкой фаз потока. Сумма площадей, занимаемых газовой и жидкой фазами соответствует общей площади поперечного сечения затопленного эрлифта

$$\omega_a = \frac{Q_a}{v_{жe}} + \frac{Q_{air}}{v_2}, \quad (1.10)$$

где ω_a – площадь поперечного сечения затопленного эрлифта, м²;

Q_{air} – расход воздуха, поступающий в затопленную эрлифтную систему аэрации, м³/с;

v_r – скорость течения газовой фазы в эрлифтной трубе, м/с.

Скорость всплытия пузырьков воздуха превышает скорость восходящего потока жидкости, в котором они находятся. Превышение скорости газовой фазы над скоростью жидкой фазы зависит от диаметра и формы пузырьков, плотности и межфазного поверхностного натяжения жидкости и т.д. В аэротенках с пневматической и пневмомеханической системами аэрации скорость восходящего движения пузырьков превышает скорость восходящего потока жидкости на 0,34 м/с [89, 100]. Удельный вес потока газожидкостной смеси вычисляется исходя

из площадей сечений и удельного веса соответствующих фаз потока. В пределах эрлифтной трубы удельный вес газожидкостной смеси $\gamma_{ц}$ составит

$$\gamma_{ц} = \frac{\gamma_{ж} \frac{Q_a}{v_{жс}} + \gamma_{г} \frac{Q_{air}}{v_{гс}}}{\omega_a}. \quad (1.11)$$

Над эрлифтом газожидкостный поток постепенно расширяется за счёт увлечения дополнительного количества жидкости. Угол границы потока относительно вертикали составляет 12° . Соответственно, расширение границы газожидкостного потока на единицу его длины составляет $\text{tg}(12^\circ) = 0,21$. В расширяющемся объёме смеси над эрлифтом находится такой же объём воздуха, какой находился бы в нём без расширения (с площадью основания, равной поперечному сечению эрлифта и высотой, равной расстоянию от верха затопленного эрлифта до свободной поверхности жидкости в азротенке). Удельный вес смеси над верхом затопленного эрлифта $\gamma_{к}$ составит [36]

$$\gamma_{к} = \frac{W_{ц} \cdot \gamma_{ц} + (W_{к} - W_{ц}) \cdot \gamma_{жс}}{W_{к}}, \quad (1.12)$$

где $W_{ц}$ – объём фигуры с площадью основания, равной поперечному сечению эрлифта и высотой, равной расстоянию от верха затопленного эрлифта до уровня размещения азраторов, м^3 (при круглом сечении затопленного эрлифта фигура является цилиндром);

$W_{к}$ – объём газожидкостной смеси над затопленным эрлифтом, м^3 (в случае круглого сечения эрлифта газожидкостная смесь над ним заключена в усечённый конус).

Для расчёта производительности затопленного эрлифта можно использовать систему уравнений (1.13), полученную посредством совместного решения уравнений (1.8-1.12) [36]

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_a = \frac{Q_a}{v_{жс}} + \frac{Q_{air}}{v_{жс} + 0,34} ; \\ h_a - \frac{(h_a - z_1)}{\omega_a} \cdot \left(\frac{Q_a}{v_{жс}} + \frac{\gamma_z \cdot Q_{air}}{\gamma_{жс} \cdot (v_{жс} + 0,34)} \right) - \left[W_{\eta} \cdot \left(\frac{Q_a}{v_{жс}} + \frac{\gamma_z \cdot Q_{air}}{\gamma_{жс} \cdot (v_{жс} + 0,34)} \right) + \frac{W_{\kappa} - W_{\eta}}{W_{\kappa}} \right] \cdot h_a + \\ + \frac{\alpha}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_a + Q_{air}}{\omega_a} \right)^2 = \frac{\alpha}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_a}{\omega_a} \right)^2 + \sum \frac{\zeta_i}{\omega_i^2} \cdot \frac{Q_a^2}{2 \cdot g} \end{array} \right. \quad (1.13)$$

В зависимости от скорости течения жидкости в эрлифтном реакторе, возможны различные варианты движения пузырьков после их выхода из затопленного эрлифта: при низких интенсивностях аэрации наблюдается практически вертикальное всплытие всех пузырьков воздуха; при более высоких скоростях пузырьки газа увлекаются потоком жидкости на некоторую глубину; при интенсивности аэрации, обеспечивающей скорость циркулирующей жидкости свыше 0,34 м/с, пузырьки воздуха достигают дна и повторно попадают внутрь затопленного эрлифта [99]. В аэротенке с затопленной эрлифтной системой аэрации растворение кислорода осуществляется внутри и над уровнем верха затопленного эрлифта. В нисходящем потоке аэротенка осуществляется падение концентрации кислорода [29], т.к. захват пузырьков воздуха нисходящим потоком жидкости практически не осуществляется.

На данный момент для анализа течения жидкостей разработан ряд компьютерных программ (Autodesk Simulation CFD, SolidWorks Flow Simulation, COSMOS FloWorks, OpenFOAM, AcuSolve, ANSYS и т.д.). Получены результаты численных решений задачи гидродинамических процессов в аэротенках с затопленной эрлифтной системой аэрации [53, 54, 101, 102]. Несмотря на развитие современных вычислительных технологий, расчёт вихревого течения жидкостей и газов в настоящее время более точно описывается аналитическими зависимостями, основанными на эмпирических исследованиях [103].

1.3.2 Основные теоретические закономерности осветления иловой смеси в условиях взвешенного слоя

До нынешнего времени теория осветления во взвешенном слое активного ила изучена не достаточно глубоко. Однако помимо осветления иловой смеси, очистка посредством фильтрования потока сквозь взвешенный слой частиц находит своё применение в осветлении, обесцвечивании, умягчении, обезжелезивании, обесфторивании и обескремнивании воды для хозяйственных и производственных нужд [90], фильтрация во взвешенном слое осуществляется в газодинамическом фильтре при очистке газа от твёрдых частиц. Принцип обработки воды во взвешенном слое был впервые запатентован Патерсоном (Великобритания) в 1889 году [90]. Существенный вклад в развитие теории осветления воды во взвешенном слое осуществлён Е.Н. Тетеркиным, С.Х. Азерьером, В.Т. Турчиновичем, Е.Ф. Кургаевым, Д.М. Минцем, Ю.Л. Сколубовичем, И. Мацкрле, Т. Пейчевым, А.Т. Дёминой, Г.Г. Первовым и др. [66, 90, 104, 105]. Ввиду широкого применения осветлителей со взвешенным слоем осадка (ОВСО), в настоящее время существуют хорошо проработанные теории, методики и рекомендации к проектированию сооружений для осветления воды сквозь находящийся во взвешенном состоянии осадок или зернистую загрузку.

Состояние, в котором пребывает взвешенный слой называют динамическим равновесием, т.к. частицы, из которых он состоит непрерывно хаотично перемещаются, а сам слой остаётся практически неподвижным. Средний диаметр частиц взвешенного слоя при стабильных условиях работы осветлителя остаётся постоянным. Размер отдельных хлопьев непрерывно изменяется вследствие их слипания и разрушения [90].

Нахождение твёрдых частиц во взвешенном состоянии обеспечивается равенством действующих на них сил тяжести и гидродинамического давления. Сила тяжести находящейся в жидкости частицы определяется с учётом противодействия ей силы Архимеда [106]

$$G = g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{жс}}) \cdot V_{\text{ч}} , \quad (1.14)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы, кг/м³;

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³;

$V_{\text{ч}}$ – объём частицы, м³.

Сила гидродинамического давления восходящего потока на частицу зависит от его скорости и размеров взвешенной частицы. Сила гидродинамического давления на слой частиц единичной площади прямо пропорциональна потере напора, которая возникает при протекании восходящего потока жидкости через этот слой частиц. На рисунке 1.7 представлен график зависимости потерь напора $\Delta p_{\text{сл}}$ в слое частиц от гидравлической нагрузки q , которую на него оказывает восходящий поток жидкости [107].

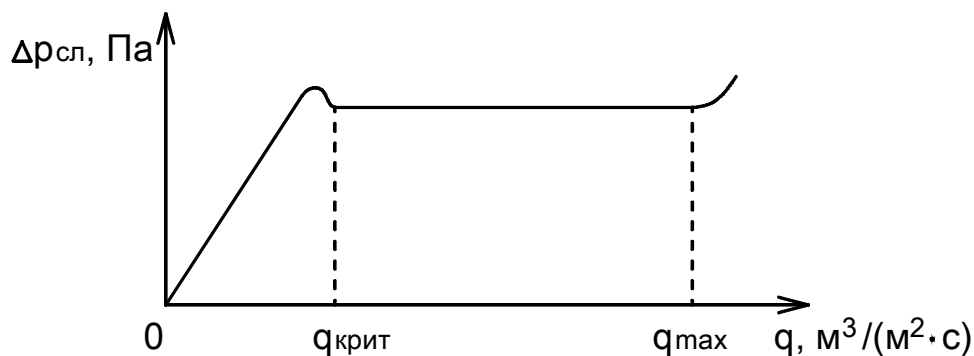


Рисунок 1.7 – График формирования взвешенного слоя

Проникая через частицы, вес которых превышает направленную вверх силу гидродинамического давления, поток теряет тем больше напора, чем больше его скорость. При этом зависимость потери напора от скорости линейная, поскольку в порах между твёрдыми частицами происходит ламинаризация потока. Некоторая критическая гидравлическая нагрузка $q_{\text{крит}}$ приводит к тому, что сила гидродинамического давления на слой частиц уравнивает силу тяжести и частицы переходят во взвешенное состояние. Дальнейшее увеличение нагрузки на взвешенный слой приводит к возрастанию его высоты и расстояния между твёрдыми частицами. Потери давления не зависят от восходящей гидравлической нагрузки. Они равняются суммарному весу взвешенных частиц, который приходится на единицу поперечной площади взвешенного слоя. Потери напора во взвешенном слое определяются по формуле, которую называют основным уравнением гетерофазной системы [10, 107, 108]

$$\Delta p_{cl} = g \cdot (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{жс}}) \cdot (1 - m) \cdot l_{cl}, \quad (1.15)$$

где m – пористость взвешенного слоя, определяемая как отношение объёма пустот во взвешенном слое к его общему объёму;

l_{cl} – высота взвешенного слоя, м.

Слой частиц, который остаётся неподвижным при движении сквозь него восходящего потока жидкости (при нагрузках меньше критической $q_{\text{крит}}$) называется фильтрующим слоем. Взвешенный слой может считаться расширенным (когда составляющие его частицы совершают колебательные движения) или псевдооживленным (когда пористость слоя высокая и частицы совершают свободное движение в объёме). Состояние, возникающее при превышении гидравлической нагрузки значения q_{max} , является выносом частиц из объёма [109].

Высота взвешенного слоя зависит от потерь напора и концентрации ила в нём. Если скорость потока, подходящего к слою частиц, достигает величины их гидравлической крупности, то происходит размывание взвешенного слоя – при любой пористости гидродинамическое давление восходящего потока на частицы превышает разность веса и архимедовой силы. Эффективная работа взвешенного слоя возможна только при таких гидравлических нагрузках, которые превышают критическое значение, при котором происходит псевдооживление, но не достигают максимальных, приводящих к размыванию взвешенного слоя. Значения допустимых гидравлических нагрузок на осветлитель зависят от критериального параметра $a_i \cdot I$, представляющего собой произведение концентрации ила на иловый индекс [107]. Рекомендуемые значения гидравлических нагрузок на илоотделители со взвешенным слоем осадка, в зависимости от критериального параметра $a_i \cdot I$ осветляемой иловой смеси, приведены в таблице 1.1 [25, 110, 111].

Таблица 1.1 – Нормативная гидравлическая нагрузка на осветлитель

$a_i \cdot I$, см ³ /дм ³	100	200	300	400	500	600
q , м ³ /(м ² ·ч)	5,6	3,3	1,8	1,2	0,8	0,7

На концентрацию взвешенных веществ в осветлённой жидкости влияют различные параметры. Гидродинамические, коллоидные (ван-дер-ваальсовы,

электростатические и др.), термодинамические и химические силы способны привести к разрушению сформировавшихся флокул и отрыву частиц из взвешенного слоя [112]. Повышение скорости жидкой фазы в слое взвешенных частиц активного ила значительно увеличивает концентрацию частиц над взвешенным слоем [9]. Между скоростью восходящего потока и размерами иловых хлопьев, которые образуют взвешенный слой, имеет место линейная зависимость [113]. Разрушение 2% флокул активного ила способно привести к возрастанию концентрации взвешенных веществ в осветлённой жидкости в 4...5 раз [114].

Необходимые параметры работы взвешенного слоя должны определяться экспериментально и пересчитываться в зависимости от количества, качества осветляемой жидкости и т.д. [91].

1.4 Постановка задач по усовершенствованию илоотделения в аэротенке-осветлителе

В настоящее время в области очистки городских сточных вод актуальными являются вопрос целесообразности повышения возраста активного ила, задача совместного использования процессов нитрификации и денитрификации в сооружениях аэробной биологической очистки, а также задача повышения эффективности использования кислорода воздуха, который подаётся системами аэрации. Высокая эффективность использования кислорода воздуха и контроль процессов очистки стоков активным илом осуществляется в биореакторах с затопленной эрлифтной системой аэрации. Совмещение биохимической очистки стоков активным илом и илоотделения в одном сооружении позволяет снизить материалоемкость биореакторов и энергозатраты на перекачивание иловой смеси.

Наиболее перспективным способом илоразделения является осветление иловой смеси во взвешенном слое ила. К проблемам, возникающим при эксплуатации современных аэротенков-осветлителей, можно отнести скопление активного ила в застойных неаэрируемых зонах, большой объём отстойных зон, не участвующих в биологической очистке, значительные затраты электроэнергии на

перекачивание возвратного активного ила. Необходимость разрешения этих проблем требует совершенствования технологии илоразделения.

В настоящее время широко развиты теория гидродинамики жидкостей, газожидкостных смесей и суспензий, а также использование информационных технологий для моделирования гидродинамических процессов. При этом существует не достаточно достоверной информации для выполнения теоретических расчётов механики пребывающих в жидкости соединений со сложной структурой, в частности активного ила. При расчётах гидродинамики иловой смеси, а также в условиях сложных течений жидкости, которые образуют вихревые потоки, как правило, применяются эмпирические данные.

Цель данной диссертационной работы состоит в усовершенствовании илоотделения в аэротенке-осветлителе и включает следующие задачи:

1. Разработать способ перекачивания возвратного активного ила из зоны освещения аэротенка-осветлителя за счёт кинетической энергии потоков, образующихся в результате действия аэрационной системы, без использования дополнительного насосно-компрессорного оборудования.
2. Повысить долю полезного (занятого активным илом) объёма аэротенка-осветлителя по сравнению с существующими сооружениями.
3. Обосновать возможность разделения иловой смеси в условиях работы разработанного аэротенка-осветлителя.
4. Обеспечить в аэротенке-осветлителе предлагаемой конструкции условия для осуществления биологической очистки в соответствии с существующими нормативными требованиями.
5. Разработать практические рекомендации по проектированию аэротенка-осветлителя предлагаемой конструкции.
6. Произвести технико-экономическое обоснование внедрения усовершенствованного аэротенка-осветлителя.

РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ ИЛОВОЙ СМЕСИ В АЭРОТЕНКЕ-ОСВЕТИТЕЛЕ

Для обеспечения аэробной биологической очистки большое значение имеют гидродинамические параметры жидких и газожидкостных потоков в биологических реакторах. Гидродинамика потоков имеет решающее значение при использовании взвешенного слоя для илоразделения. Важным для расчёта течения иловой смеси является исследование её гидромеханических свойств. Значительный вклад в изучение влияния гидродинамических процессов на работу сооружений аэробной биологической очистки внесли С.В. Яковлев, Л.Н. Брагинский, А.З. Евилевич, М.А. Евилевич, В.И. Нездойминов, В.Н. Кульков и др.

2.1 Принцип работы аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации

В соответствии с задачами исследований, которые были поставлены в предыдущем разделе диссертационной работы, предложена усовершенствованная конструкция аэротенка-осветлителя [115]. Разработанный аэротенк-осветлитель является аэробным биологическим реактором, работающим по принципу аэротенка-смесителя. В аэротенке-осветлителе совмещены биохимическая обработка сточной жидкости свободно плавающим активным илом и освещение иловой смеси во взвешенном слое. В разработанном аэротенке-осветлителе возврат иловой смеси из зоны илоотделения в зону аэрации производится только за счёт кинетической энергии движения жидкости, циркулирующей в биологическом реакторе в результате работы аэрационной системы [116]. По сравнению с существующими аэротенками-осветлителями, использующими циркуляционные токи аэротенка для обновления взвешенного слоя осветлителя [39, 40], аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации [117,

118] имеет малый объем защитной зоны и, соответственно, больший полезный (заполненный активным илом) относительный объём.

На рисунке 2.1 представлена схема аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации.

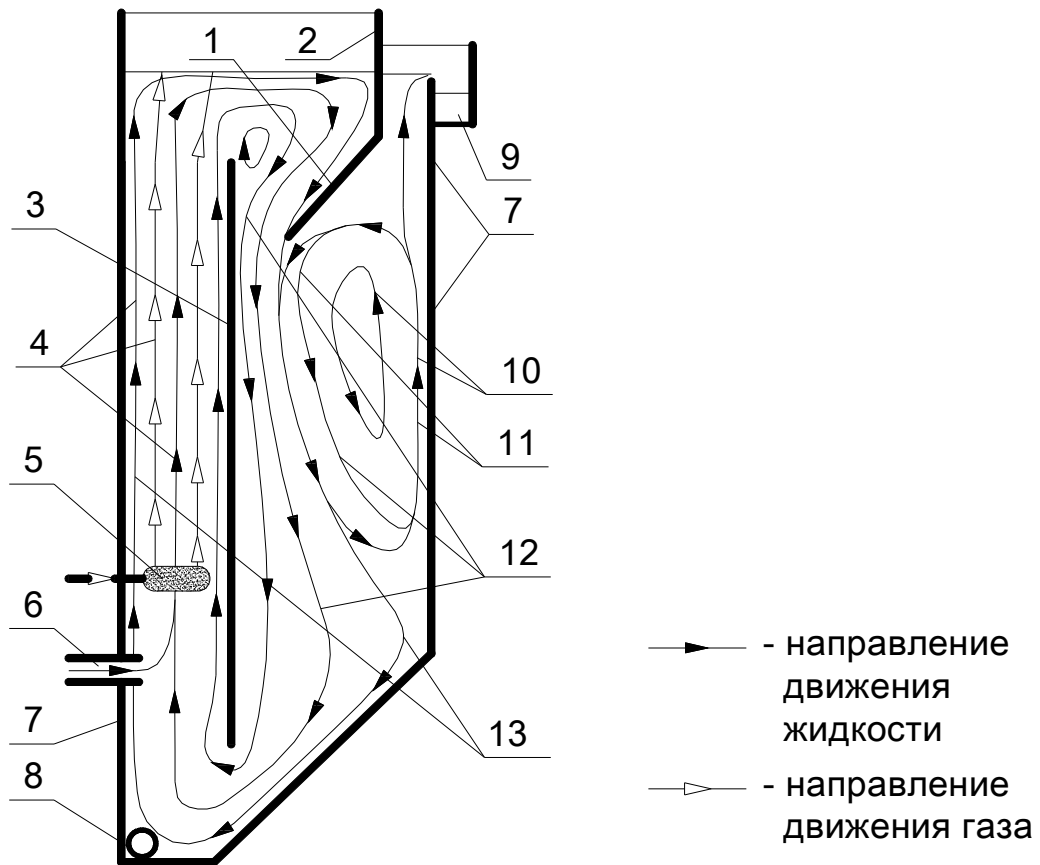


Рисунок 2.1 – Схематичные линии тока в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации:

1 – наклонный козырёк; 2 – вертикальная разделительная перегородка; 3 – затопленная перегородка; 4 – восходящий газожидкостный поток; 5 – диспергаторы воздуха; 6 – подвод исходной сточной жидкости; 7 – наружная стенка аэротенка-осветлителя; 8 – отвод избыточного активного ила; 9 – отводящий лоток очищенной жидкости; 10 – восходящий поток водоворотной зоны; 11 – водоворотная зона; 12 – нисходящий поток; 13 – основной циркуляционный поток.

Вертикальная разделительная перегородка 2 с наклонным козырьком 1 отделяют условную зону осветления со спокойным течением жидкости от аэротенка, в котором происходит интенсивное перемешивание иловой смеси.

Для насыщения сточной жидкости кислородом воздуха применяется затопленная эрлифтная система аэрации. Затопленный эрлифт отличается от традиционного воздушного подъёмника тем, что его верхний срез располагается ниже уровня поверхности жидкости. Перекачиваемая затопленным эрлифтом смесь не выбрасывается выше уровня жидкости в сооружении, а вовлекается в движение по замкнутому контуру – основной циркуляционный поток 13. Затопленный эрлифт состоит из диспергаторов воздуха 5 и затопленной перегородки 3. Низ затопленной перегородки приподнят над днищем аэротенка-осветлителя, а верх – опущен ниже свободной поверхности жидкости [15]. В результате газлифтного эффекта, над диспергаторами возникает ограниченный затопленной перегородкой восходящий газожидкостный поток 4, который за пределами затопленного эрлифта преобразуется в нисходящий поток 12.

Нисходящий поток 12 проходит через зазор между затопленной перегородкой 3 и наклонным козырьком 1 (далее по тексту «зазор»). Проходя вдоль наклонного козырька, нисходящий поток подвергается сжатию. В результате сжатия и соответствующего роста кинетической энергии потока в зазоре возникает некоторое разрежение. В результате эжекции [119], сжатый нисходящий поток пополняется иловой смесью из соседних с ним слоёв жидкости. Часть нисходящего потока возвращается в затопленный эрлифт через щель между его основанием и дном аэротенка-осветлителя. Другая часть нисходящего потока меняет направление движения и образует восходящий поток 10 вблизи наружной стенки аэротенка-осветлителя 7. Таким образом, основной циркуляционный поток 13 вызывает дополнительную циркуляцию под наклонным козырьком 1.

Образование под козырьком аэротенка-осветлителя вращательного движения соответствует возникновению водоворотной зоны за плохо обтекаемым телом, которое описано в теории затопленных турбулентных струй [120, 121].

Нисходящий поток 12, вытекающий через зазор, можно рассматривать как плоскую пристеночную затопленную турбулентную струю. Постепенно расширяясь и рассеиваясь, затопленная струя за счёт сил трения увлекает вниз поток жидкости, создавая ниже козырька вращательное движение, называемое водоворотной областью [120], циркуляционной зоной [121] или водоворотной зоной [122-124]. Начальным сечением затопленной струи можно считать зазор. Ширина поперечного (относительно направления течения струи) сечения водоворотной зоны уменьшается по мере увеличения глубины.

Скорости течения жидкости в водоворотной зоне 11 значительно меньше, чем в движущем её основном циркуляционном потоке. Из-за меньшей скорости течения, в условиях водоворотной зоны иловые частицы образуют более крупные хлопья, чем в области действия основного циркуляционного потока. В восходящем потоке водоворотной зоны, за счёт разницы плотностей твёрдой и жидкой фаз иловой смеси, скорость иловых частиц становится меньше, чем скорость потока жидкости. За счёт повышения площади поперечного сечения и эжекции части восходящего потока осветлителя в нисходящий поток аэротенка, скорость жидкости снижается по мере приближения к начальному сечению. В результате снижения восходящей скорости потока жидкости и увеличения гидравлической крупности частиц (вследствие их агломерации), по мере приближения потока к уровню поверхности илоразделения, в осветлителе происходит снижение восходящей скорости хлопьев активного ила. При нулевой вертикальной составляющей средней скорости иловых частиц образуется взвешенный слой. При подаче сточных вод в аэротенк-осветлитель жидкость проходит через взвешенный слой ила и поступает в лоток отвода очищенной жидкости 9.

За счёт горизонтального течения жидкости в верхней части водоворотной зоны, иловые частицы увлекаются из взвешенного слоя в сторону нисходящего потока. Происходит непрерывная рециркуляция иловых частиц из взвешенного слоя в нисходящий поток аэротенка.

Рисунок 2.2 содержит изображения объёмной модели аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации с указанием основных направлений течения циркулирующей жидкости.

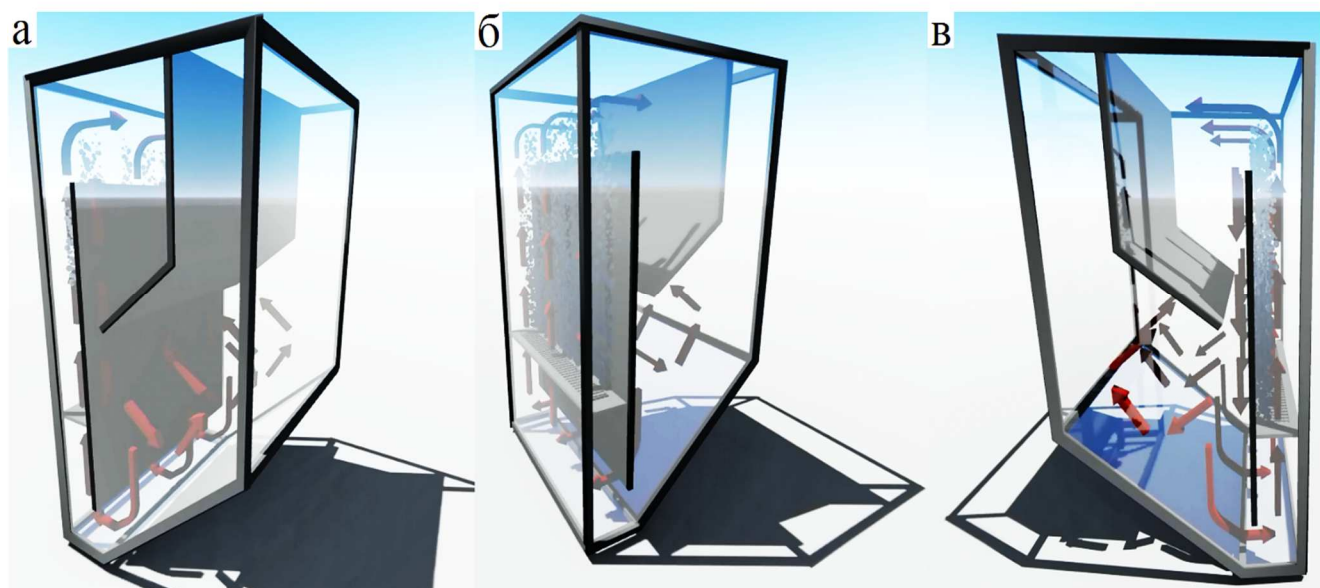


Рисунок 2.2 – Объёмная модель аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации

Особенности предложенной конструкции способствуют образованию трёх зон: аэротенк, осветлитель и защитная зона (отстойник). Условное распределение зон в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации представлено на рисунке 2.3. Защитной зоной является часть сооружения, заполненная осветлённой жидкостью. Защитная зона отделена от остальной части сооружения вертикальной перегородкой с наклонным козырьком, а также поверхностью илоразделения 3. Поверхность илоразделения можно условно считать горизонтальной. Уровень положения поверхности илоразделения определяется гидравлической нагрузкой и скоростью циркуляционного потока водоворотной зоны. При работе аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации глубина положения поверхности илоразделения должна быть приблизительно равна глубине нижней кромки наклонного козырька.

Часть иловой смеси, которая находится ниже поверхности илоразделения и в пределах которой имеет место восходящее движение жидкой фазы, образует зону осветлителя. В качестве границы между осветлителем и аэротенком принята

условная поверхность, характеризующаяся нулевыми значениями вертикальных составляющих средних скоростей течения жидкости.

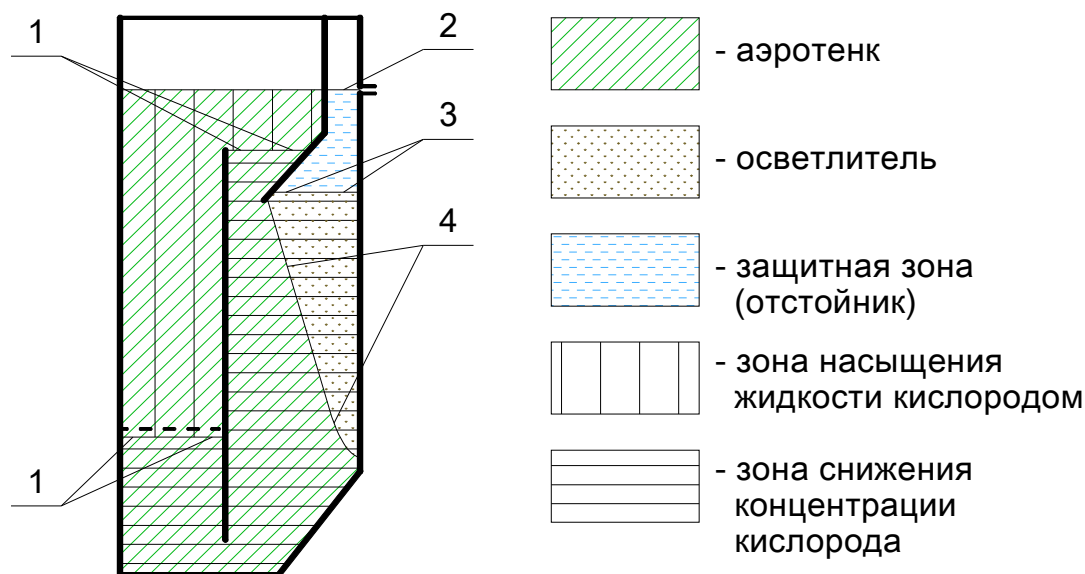


Рисунок 2.3 – Условные зоны аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации:

1 – условные границы между зоной насыщения иловой смеси кислородом воздуха и зоной снижения концентрации растворённого кислорода; 2 – зеркало защитной зоны; 3 – поверхность илоразделения; 4 – условная граница между осветлителем и аэротенком.

К аэротенку относится объём иловой смеси, циркулирующий через затопленную эрлифтную систему аэрации и спутные с ним потоки.

В аэротенк с затопленной эрлифтной системой аэрации поддерживаются условия, способствующие протеканию одноиловой нитри-денитрификации. Иловая смесь циркулирует через зоны, в которых осуществляется насыщение жидкости кислородом воздуха, и зоны, в которых происходит снижение концентрации растворённого кислорода [15, 29]. Условное распределение зон повышения и снижения концентрации растворённого кислорода в объёме аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации представлено на рисунке 2.3. Над аэраторами устанавливается зона насыщения иловой смеси кислородом воздуха, а в нисходящем потоке и осветлителе – область снижения концентрации растворённого кислорода. Биохимическая очистка органических

загрязнений и соединений азота осуществляется во всех зонах аэротенка-осветлителя, кроме защитной зоны.

Для подтверждения того, что отношение объёма защитной зоны к суммарному рабочему объёму предлагаемого сооружения меньше, чем в существующих сооружениях, необходимы дополнительные исследования, позволяющие рассчитывать рациональные соотношения геометрических параметров аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации.

2.2 Применение теории затопленных турбулентных струй к расчёту циркуляции в осветлителе

Теория турбулентных струй основывается на исследованиях Прандтля, Толмина, Фертмана, Трюпеля, Шлихтинга, Туркуса и т.д. Законы течения турбулентных струй описаны в фундаментальных работах Г.Н. Абрамовича [120, 125], а также в трудах А.С. Гиневского [126, 127], М.А. Михалёва [121], К.Н. Волкова [128-130], Л.А. Бендерского, Д.А. Любимова [131, 132], В.Б. Тупова [133] и др.

В соответствии с теорией турбулентных затопленных струй, плоская пристеночная струя условно делится на три зоны: ядро постоянной скорости, пристеночная часть струи и пограничный слой (Рис. 2.4) [134].

В пределах ядра скорость течения жидкости считается постоянной – равной средней скорости в зазоре. Если пренебречь начальной неравномерностью скоростей в турбулентной струе, то в начальном сечении ядро занимает всю поперечную площадь струи. По мере увеличения расстояния s от уровня нижней кромки наклонного козырька, ядро постоянной скорости постепенно сужается. Часть струи, в пределах которой можно выделить ядро постоянной скорости, называют начальным участком. Основной участок струи имеет место на глубинах свыше S_0 от уровня нижней кромки наклонного козырька и включает в себя только пристеночную часть и пограничный слой [108, 135].

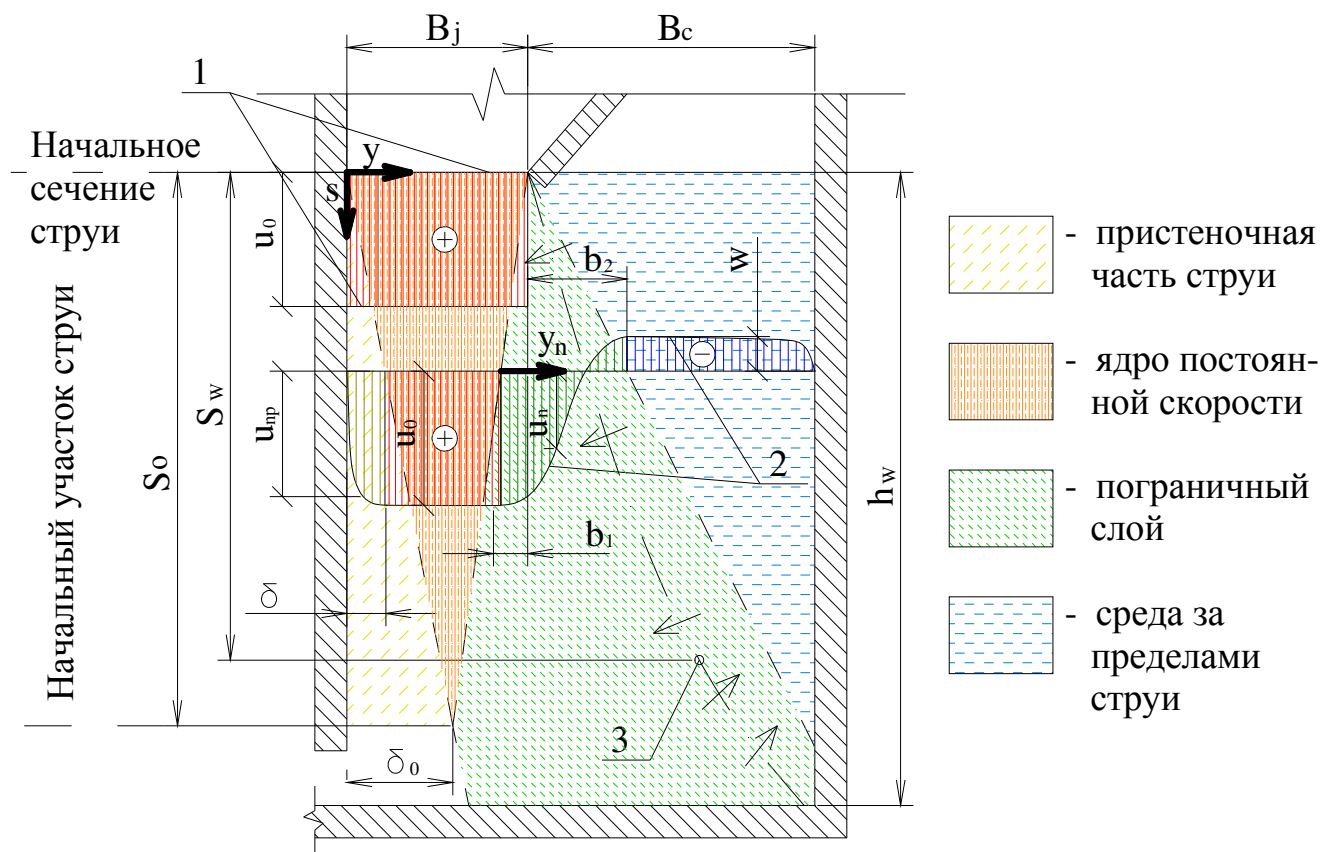


Рисунок 2.4 – Структура пристеночной затопленной турбулентной струи в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации:

1 – условная эпюра скоростей в начальном сечении струи; 2 – эпюра вертикальных составляющих скоростей в произвольном сечении начального участка струи; 3 – условный центр водоворотной зоны.

Если пренебречь нагрузкой на осветлитель, то результирующий расход в любом произвольном сечении является постоянным и представляет собой разность расхода жидкости в струе и расхода встречного потока за пределами струи. Разделяя струю на ядро постоянной скорости (при рассмотрении начального участка), пристеночную часть и пограничный слой, имеем формулу

$$Q_a = Q_\delta + Q_c + Q_b - Q_w, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.1)$$

где Q_a – расход иловой смеси в зазоре, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_δ – расход жидкости в пристеночной части нисходящей затопленной струи, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_c – расход жидкости в ядре постоянной скорости нисходящей струи, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_b – расход жидкости в пограничном слое турбулентной струи, $\text{м}^3/\text{с}$;

Q_w – расход жидкости в восходящем потоке за пределами струи, м³/с.

Ширина пограничного слоя определяется формулой

$$b = b_1 + b_2, \text{ м}, \quad (2.2)$$

где b_1 – величина поперечного смещения внутренней границы пограничного слоя в сторону оси струи, в пределах начального участка вычисляемая по формуле 2.3;

b_2 – величина поперечного смещения внешней границы пограничного слоя, в пределах начального участка вычисляемая по формуле 2.4.

$$b_1 = s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1), \text{ м}, \quad (2.3)$$

$$b_2 = s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2), \text{ м}, \quad (2.4)$$

где s – расстояние от уровня нижней кромки наклонного козырька до рассматриваемого горизонтального сечения, м;

α_1 – угол между вертикалью и внутренней границей пограничного слоя струи;

α_2 – угол между вертикалью и внешней границей пограничного слоя струи.

Ширина пограничного слоя в пределах начального участка затопленной турбулентной струи выражается формулой

$$b = c \cdot s, \text{ м}, \quad (2.5)$$

где c – константа турбулентности.

Константа турбулентности c равна сумме тангенсов углов α_1 и α_2 . Она является эмпирически определяемой величиной. Для затопленной турбулентной струи в условиях водоворотной зоны рекомендуется принимать $c = 0,3$ [120].

В условиях аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации следует принимать $\operatorname{tg}(\alpha_2) = 0,175$ [136]. Соответственно, при $c = 0,3$, тангенс угла наклона между вертикалью и внутренней границей пограничного слоя струи составляет $\operatorname{tg}(\alpha_1) = 0,125$.

Расчёт высоты начального участка пристеночной затопленной струи можно выполнять исходя из того, что на расстоянии S_0 ширина ядра постоянной скорости становится равной нулю. Соответственно

$$B_j = b_{1(0)} + \delta_0, \text{ м}, \quad (2.6)$$

где B_j – ширина зазора, м;

$b_{1(0)}$ – величина поперечного смещения внутренней границы пограничного слоя в сторону оси струи на расстоянии S_0 от нижней кромки наклонного козырька, м;

δ_0 – ширина пристеночной части струи на расстоянии S_0 от нижней кромки наклонного козырька, м. δ_0 рассчитывается исходя из высоты начального участка [120]

$$\delta_0 = \frac{0,37 \cdot S_0}{Re_{S_0}^{0,2}}, \text{ м}, \quad (2.7)$$

где

$$Re_{S_0} = \frac{\rho_{см} \cdot u_0 \cdot S_0}{\mu_{см}}, \quad (2.8)$$

где $\rho_{см}$ – плотность иловой смеси, кг/м³;

$\mu_{см}$ – динамическая вязкость иловой смеси Па·с;

u_0 – скорость течения в ядре струи, принимаемая равной средней скорости течения жидкости в зазоре, м/с.

$$u_0 = \frac{Q_a}{\omega_j}, \text{ м/с}, \quad (2.9)$$

где ω_j – площадь сечения зазора, м².

Конструкция аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации позволяет использовать как прямоугольную, так и круглую в плане форму биологического реактора. В обоих случаях струю можно рассматривать как вытекающую через плоскую щель [125]. Основные принятые обозначения линейных размеров прямоугольных и круглых в плане аэротенков-осветлителей приведены на рисунке 2.5. Изображённый на рисунке 2.5 а, 2.5 б прямоугольный аэротенк-осветлитель состоит из двух секций, объединённых общей системой аэрации. Расчёты гидродинамических параметров производятся для одной секции с шириной B .

Площадь сечения зазора ω_j вычисляется по формуле (2.10) при прямоугольной, или (2.11) – при круглой в плане форме аэротенка-осветлителя.

$$\omega_{j,np} = L \cdot B_j, \text{ м}^2; \quad (2.10)$$

$$\omega_{j,кольц} = \pi \cdot B_j \cdot (2 \cdot r_a + B_j), \text{ м}^2. \quad (2.11)$$

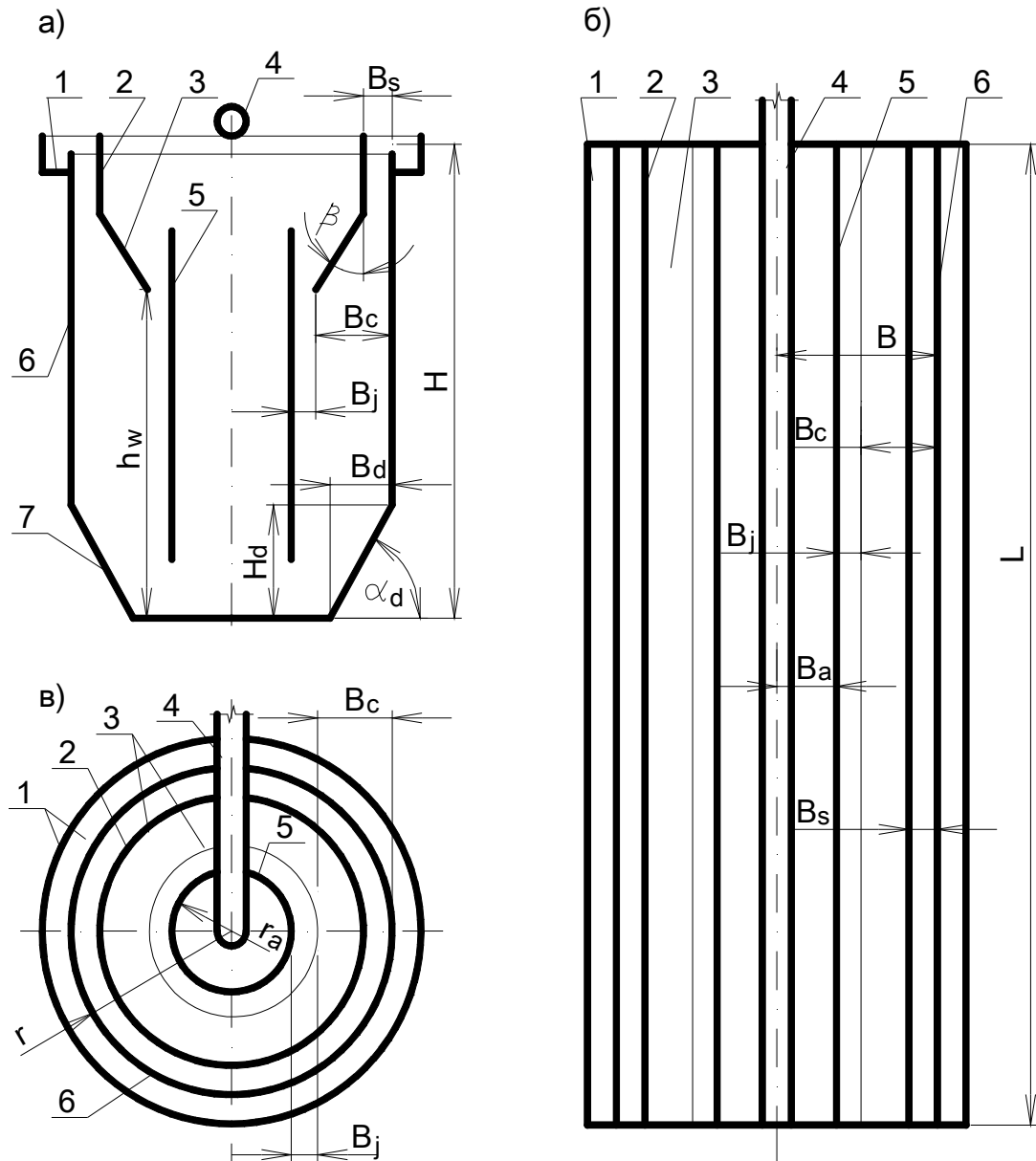


Рисунок 2.5 – Схемы аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации при различных формах в плане:

а – разрез; б – план при прямоугольной форме; в – план при круглой форме:

1 – сборный лоток очищенной жидкости; 2 – вертикальная разделительная перегородка; 3 – наклонный козырёк; 4 – подводящий лоток сточных вод; 5 – затопленная перегородка; 6 – наружная стенка корпуса аэротенка-осветлителя; 7 – наклонная часть днища аэротенка-осветлителя.

Длину начального участка плоской струи можно рассчитать из уравнения (2.12), составленного на основании формул (2.3), (2.6-2.8).

$$\frac{0,37 \cdot S_0^{0,8} \cdot \mu_{cm}^{0,2}}{\rho_{cm}^{0,2} \cdot u_0^{0,2}} + tg(\alpha_1) \cdot S_0 = B_j, \text{ м.} \quad (2.12)$$

Пристеночная часть струи постепенно расширяется по мере удаления от уровня нижней кромки наклонного козырька. Течение жидкости в пристеночной части затопленной турбулентной струи отличается от обычного турбулентного пограничного слоя. Оно развивается в условиях повышенной турбулентности внешнего струйного потока [132]. Продольные скорости течения в пристеночной части изменяются от нуля в точке соприкосновения с затопленной перегородкой до значения осевой скорости струи для данного сечения. В турбулентном пограничном слое пристеночной части затопленной струи профили скорости описываются уравнением (2.13) [125]

$$u_{np} = u_H \cdot \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/7}, \text{ м/с,} \quad (2.13)$$

где u_H – осевая скорость нисходящего потока в соответствующем сечении затопленной турбулентной струи, м/с. В пределах начального участка струи u_H постоянна и равна u_0 – скорости в ядре струи, м/с;

y – горизонтальная координата относительно затопленной перегородки, м;

δ – ширина пристеночной части для соответствующего сечения, м, в пределах начального участка турбулентной струи определяемая исходя из соотношения

$$\delta = \delta_0 \cdot \frac{s}{S_0}, \text{ м.} \quad (2.14)$$

Расход жидкости, протекающей через сечение пристеночной части струи вычисляется по формуле

$$Q_\delta = \int_0^\delta u_{np} \cdot C \cdot dy, \text{ м}^3/\text{с,} \quad (2.15)$$

где C – поперечная длина струи на расстоянии y_{np} от затопленной перегородки, м.

Если аэротенк-осветлитель прямоугольный в плане, то величина C является постоянной, равной длине L секции аэротенка-осветлителя. Формула расчёта расхода иловой смеси в соответствующем сечении пристеночной части струи в результате вычисления интеграла (2.15) с подстановкой (2.13) примет вид

$$Q_{\delta, np} = \int_0^{\delta} u_H \cdot \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/7} \cdot L \cdot dy = \frac{7}{8} \cdot u_H \cdot L \cdot \frac{y}{\delta^{1/7}} \Big|_0^{\delta},$$

$$Q_{\delta, np} = \frac{7}{8} \cdot u_H \cdot \delta \cdot L, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.16)$$

где L – длина прямоугольного в плане аэротенка-осветлителя, м (Рис. 2.5 б).

В случае круглой в плане формы аэротенка-осветлителя струя и её отдельные элементы, а также взвешенный слой осветлителя будут иметь кольцевые поперечные сечения. Величина C является длиной окружности и зависит от расстояния до вертикальной оси аэротенка-осветлителя. Формула расчёта расхода жидкости в пристеночной части струи для круглого в плане аэротенка

$$Q_{\delta, кольц} = \int_0^{\delta} u_H \cdot \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/7} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r_a + y) \cdot dy = 2 \cdot \pi \cdot u_H \cdot \int_0^{\delta} \left(r_a \cdot \frac{y^{1/7}}{\delta^{1/7}} + \frac{y^{8/7}}{\delta^{1/7}} \right) \cdot dy,$$

$$Q_{\delta, кольц} = 2 \cdot \pi \cdot u_H \cdot \left(\frac{7}{8} r_a \cdot \frac{y^{8/7}}{y^{1/7}} + \frac{7}{15} \cdot \frac{y^{15/7}}{y^{1/7}} \right) \Big|_0^{\delta},$$

$$Q_{\delta, кольц} = \pi \cdot u_H \cdot \left(1,75 \cdot r_a \cdot \delta + \frac{14}{15} \cdot \delta^2 \right), \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.17)$$

где r_a – наружный радиус трубы затопленного эрлифта, м (рисунок 2.5 в).

Расход иловой смеси в ядре постоянной скорости в основном участке струи равен нулю, а для сечений, которые расположены в пределах начального участка, рассчитывается из выражения (2.18) или (2.19), в зависимости от формы сооружения.

$$Q_{с. np} = L \cdot u_0 \cdot (B_j - \delta - b_1), \text{ м}^3/\text{с}; \quad (2.18)$$

$$Q_{с. кольц} = \pi \cdot u_0 \cdot \left((r_a + B_j - b_1)^2 - (r_a + \delta)^2 \right), \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.19)$$

где $Q_{с.пр}$ и $Q_{с.кольц}$ – значения расходов в ядре постоянной скорости рассчитываемые в случае прямоугольной или кольцевой формы поперечного сечения струи, соответственно, м³/с.

Профиль скорости в пределах пограничного слоя струи, вытекающей во встречный поток, описывается формулой (2.20) [121].

$$u_n = (u_n + w) \cdot [1 - (y_n / b)^{1,5}]^2 - w, \text{ м/с}, \quad (2.20)$$

где u_n – вертикальная составляющая скорости в определённом сечении пограничного слоя на расстоянии y_n от его внутренней границы, м/с;

y_n – горизонтальная координата относительно внутренней границы пограничного слоя, м, равная $y - B_j + b_1$;

w – скорость встречного потока за пределами струи, обусловленная вращательным движением в водоворотной зоне, м/с.

Зависимость расхода иловой смеси в пограничном слое определяется посредством интегрирования функции $dQ_b = C \cdot u_n \cdot dy_n$ в пределах от 0 до b . Тогда для любого сечения затопленной турбулентной струи расход в пограничном слое выражается формулой (2.21) или (2.22), в зависимости от формы аэротенка-осветлителя.

$$\begin{aligned} Q_{b.пр} &= \int_0^b L \cdot [(u_n + w) \cdot [1 - (y_n / b)^{1,5}]^2 - w] \cdot dy_n = L \cdot \int_0^b [(u_n + w) \cdot [1 - 2 \cdot (y_n / b)^{1,5} + (y_n / b)^3] - w] \cdot dy_n, \\ Q_{b.пр} &= L \cdot (u_n + w) \cdot \int_0^b [1 - 2 \cdot (y_n / b)^{1,5} + (y_n / b)^3] \cdot dy_n - L \cdot w \cdot \int_0^b dy_n = \\ &= L \cdot (u_n + w) \cdot \left[b - \frac{2 \cdot b^{2,5}}{2,5 \cdot b^{1,5}} + \frac{b^4}{4 \cdot b^3} \right] - L \cdot w \cdot b = L \cdot b \cdot [u_n \cdot (1 - 0,8 + 0,25) + w \cdot (1 - 0,8 + 0,25 - 1)], \\ Q_{b.пр} &= b \cdot L \cdot (0,45 \cdot u_n - 0,55 \cdot w), \text{ м}^3/\text{с}; \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} Q_{b.кольц} &= \int_0^b 2 \cdot \pi \cdot (r_a + B_j - b_1 + y_n) \cdot [(u_n + w) \cdot [1 - (y_n / b)^{1,5}]^2 - w] \cdot dy_n = \\ &= 2 \cdot \pi \cdot \int_0^b (r_a + B_j - b_1) \cdot [(u_n + w) \cdot [1 - 2 \cdot (y_n / b)^{1,5} + (y_n / b)^3] - w] \cdot dy_n + \\ &\quad + 2 \cdot \pi \cdot \int_0^b y_n \cdot [(u_n + w) \cdot [1 - 2 \cdot (y_n / b)^{1,5} + (y_n / b)^3] - w] \cdot dy_n, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{b,кольц} &= 2 \cdot \pi \cdot (r_a + B_j - b_1) \cdot \left[(u_n + w) \cdot \left(b - \frac{2 \cdot b^{2,5}}{2,5 \cdot b^{1,5}} + \frac{b^4}{4 \cdot b^3} \right) - w \cdot b \right] + \\
&+ 2 \cdot \pi \cdot \left[(u_n + w) \cdot \left(\frac{b^2}{2} - \frac{2 \cdot b^{3,5}}{3,5 \cdot b^{1,5}} + \frac{b^5}{5 \cdot b^3} \right) - w \cdot \frac{b^2}{2} \right], \\
Q_{b,кольц} &= 2 \cdot \pi \cdot b \cdot [(r_a + B_j - b_1) \cdot [0,45 \cdot u_n - 0,55 \cdot w] + b \cdot [0,129 u_n - 0,371 w]], \\
Q_{b,кольц} &= 2 \cdot \pi \cdot b \cdot [u_n \cdot (0,45 \cdot (r_a + B_j - b_1) + 0,129 \cdot b) - \\
&- w \cdot (0,55 \cdot (r_a + B_j - b_1) + 0,371 \cdot b)], \text{ м}^3/\text{с}.
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Изменением скорости по ширине встречного по отношению к струе потока можно пренебречь [120, 121]. Расход восходящего потока за пределами затопленной струи без учёта расхода очищаемой жидкости можно выразить формулой (2.23) или (2.24), в зависимости от формы аэротенка-осветлителя

$$Q_{w,np} = (B_c - b_2) \cdot L \cdot w, \text{ м}^3/\text{с}; \tag{2.23}$$

$$Q_{w,кольц} = \pi \cdot w \cdot [r^2 - (r_a + B_j + b_2)^2], \text{ м}^3/\text{с}, \tag{2.24}$$

где B_c – расстояние от нижней кромки наклонного козырька до наружной стенки аэротенка-осветлителя, м;

r – радиус корпуса круглого в плане аэротенка-осветлителя, м.

В соответствии с формулами (2.1), (2.23), (2.24), скорость восходящего потока в осветлителе без учёта гидравлической нагрузки, в зависимости от формы аэротенка-осветлителя в плане, составит

$$w_{np} = \frac{Q_{\delta,np} + Q_{c,np} + Q_{b,np} - Q_a}{(B_c - b_2) \cdot L}, \text{ м/с} \tag{2.25}$$

или

$$w_{кольц} = \frac{Q_{\delta,кольц} + Q_{c,кольц} + Q_{b,кольц} - Q_a}{\pi \cdot [r^2 - (r_a + B_j + b_2)^2]} \text{ м/с}. \tag{2.26}$$

Для прямоугольного в плане аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации, в пределах начального участка, подставив в формулу (2.25) зависимости из формул (2.3-2.5), (2.9), (2.10), (2.14), (2.16), (2.18) и (2.21), получим

$$w_{np} = \frac{\frac{7}{8} \cdot u_0 \cdot \delta_0 \cdot \frac{s}{S_0} \cdot L + L \cdot u_0 \cdot (B_j - \delta_0 \cdot \frac{s}{S_0} - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1)) + s \cdot c \cdot L \cdot (0,45 \cdot u_0 - 0,55 w_{np}) - L \cdot B_j \cdot u_0}{(B_c - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2)) \cdot L},$$

$$w_{np} = \frac{u_0 \cdot \left(\frac{7}{8} \cdot \delta_0 \cdot \frac{s}{S_0} + B_j - \delta_0 \cdot \frac{s}{S_0} - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1) + 0,45 \cdot s \cdot c - B_j \right) - 0,55 \cdot s \cdot c \cdot w_{np}}{B_c - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2)},$$

$$w_{np} = \frac{u_0 \cdot s \cdot \left(\frac{7}{8} \cdot \frac{\delta_0}{S_0} - \frac{\delta_0}{S_0} - \operatorname{tg}(\alpha_1) + 0,45 \cdot c \right)}{(B_c - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2)) \cdot \left(1 + \frac{0,55 \cdot s \cdot c}{B_c - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2)} \right)} = \frac{u_0 \cdot s \cdot \left(0,45 \cdot c - \frac{1}{8} \cdot \frac{\delta_0}{S_0} - \operatorname{tg}(\alpha_1) \right)}{B_c - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2) + 0,55 \cdot s \cdot c}.$$

После подстановки $c = 0,3$, $\operatorname{tg}(\alpha_1) = 0,125$, $\operatorname{tg}(\alpha_2) = 0,175$ [136]:

$$w_{np} = \frac{u_0 \cdot s \cdot (0,01 - 0,125 \cdot \delta_0 / S_0)}{B_c - 0,01 \cdot s}, \text{ м/с.} \quad (2.27)$$

Для круглого в плане аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации, в пределах начального участка, подставив в формулу (2.26) зависимости из формул (2.3-2.5), (2.9), (2.10), (2.14), (2.17), (2.19), (2.22) и сократив число π в числителе и знаменателе получим

$$w_{кольц} = \frac{u_0 \cdot \left(1,75 \cdot r_a \cdot \delta_0 \cdot \frac{s}{S_0} + \frac{14}{15} \cdot \left(\delta_0 \cdot \frac{s}{S_0} \right)^2 \right) + u_0 \cdot \left((r_a + B_j - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1))^2 - (r_a + \delta_0 \cdot \frac{s}{S_0})^2 \right)}{r^2 - (r_a + B_j + s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2))^2} +$$

$$+ \frac{2 \cdot s \cdot c \cdot [u_0 \cdot (0,45 \cdot (r_a + B_j - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1)) + 0,129 \cdot s \cdot c) - w \cdot (0,55 \cdot (r_a + B_j - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1)) + 0,371 \cdot s \cdot c)]}{r^2 - (r_a + B_j + s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2))^2} +$$

$$+ \frac{-B_j \cdot (2 \cdot r_a + B_j) \cdot u_0}{r^2 - (r_a + B_j + s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2))^2},$$

а после подстановки $c = 0,3$, $\operatorname{tg}(\alpha_1) = 0,125$, $\operatorname{tg}(\alpha_2) = 0,175$

$$w_{кольц} = u_0 \cdot \frac{0,02 \cdot (r_a + B_j) + 0,0051 \cdot s - \frac{\delta_0}{S_0} \cdot \left(\frac{s \cdot \delta_0}{15 \cdot S_0} + 0,25 \cdot r_a \right)}{(2 \cdot r - B_c) \cdot B_c / s - 0,02 \cdot (r - B_c) - 0,0051 \cdot s}, \text{ м/с.} \quad (2.28)$$

Помимо циркуляционного потока аэротенка, на движение частиц в осветлителе оказывает влияние расход очищаемой жидкости $Q_{ст}$, м³/с. Потери напора при перетекании очищаемой жидкости из аэротенка в осветлитель незначительны. В пределах глубины h_w дна аэротенка-осветлителя относительно

нижней кромки наклонного козырька предполагается равномерное распределение расхода $Q_{ст}$. Тогда на уровне нижней кромки наклонного козырька секундный расход восходящего потока в осветлителе возрастёт на величину $Q_{ст}$, а на уровне дна поступление и отвод очищаемой жидкости не окажет на него влияния. На произвольной глубине s относительно низа козырька восходящий поток в осветлителе увеличится на величину $Q_{ст} \cdot (h_w - s)/h_w$. Дополнительный расход распределяется по сечению осветлителя, которое условно занимает пространство между струёй и наружными стенками аэротенка-осветлителя. Вертикальную составляющую скорости восходящего потока, учитывающую гидравлическую нагрузку на осветлитель, следует рассчитывать по формуле (2.29) для прямоугольных [137], или по формуле (2.30) – для круглых в плане аэротенков-осветлителей.

$$v_{v.пр} = w_{пр} + \frac{Q_{ст} \cdot (h_w - s)}{L \cdot (B_c - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2)) \cdot h_w}, \text{ м/с}; \quad (2.29)$$

$$v_{v.кольц} = w_{кольц} + \frac{Q_{ст} \cdot (h_w - s)}{\pi \cdot [r^2 - (r - B_c + s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2))^2] \cdot h_w}, \text{ м/с}, \quad (2.30)$$

где $v_{v.пр}$, $v_{v.кольц}$ – скорости восходящего потока жидкости в осветлителе при прямоугольной и круглой в плане форме аэротенка-осветлителя, м/с.

Расход восходящего потока в осветлителе при прямоугольной и кольцевой форме сечения

$$Q_{v.пр} = (B_c - s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2)) \cdot L \cdot v_{v.пр}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (2.31)$$

$$Q_{v.кольц} = \pi \cdot [r^2 - (r - B_c + s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2))^2] \cdot v_{v.кольц}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.32)$$

где $Q_{v.пр}$, $Q_{v.кольц}$ – расходы восходящего потока жидкости в осветлителе при прямоугольной и круглой в плане форме аэротенка-осветлителя, м³/с.

Обозначим скорость горизонтального течения жидкости через условную границу между осветлителем и аэротенком как скорость рециркуляции u_h . Скорость рециркуляции равна отношению приращения величины расхода Q_v восходящего потока жидкости в осветлителе, которое происходит при протекании

по участку с бесконечно малой длиной ds , к площади поверхности границы между аэротенком и осветлителем на этом участке

$$u_{h. np} = \frac{dQ_{v. np}}{L \cdot ds}, \text{ м/с}; \quad (2.33)$$

$$u_{h. кольцо} = \frac{dQ_{v. кольцо}}{2 \cdot \pi \cdot (r - B_c + s \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2)) \cdot ds}, \text{ м/с}, \quad (2.34)$$

где $u_{h. np}$, $u_{h. кольцо}$ – скорость рециркуляции, соответственно, при прямоугольной и круглой в плане форме аэротенка-осветлителя, м/с.

Пусть S_w – глубина условного центра вращения водоворотной зоны, м. Центром вращения водоворотной зоны считается горизонтальная ось, на которой вертикальная и горизонтальная составляющие скорости течения жидкости равны нулю. Выше центра водоворотной зоны поток движется в сторону затопленной струи, а на глубине свыше S_w иловая смесь поступает в осветлитель. Глубину условного центра водоворотной зоны S_w можно вычислить, подставив $u_h = 0$ в уравнение (2.31) или (2.32), в зависимости от формы аэротенка-осветлителя. Высота водоворотной зоны в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации ограничена дном. По расчёту значение величины S_w может превысить фактическую глубину h_w дна аэротенка-осветлителя относительно нижней кромки наклонного козырька, что практически невозможно. Рециркуляция возвратного активного ила из осветлителя в аэротенк, а также выход очищенной жидкости из биореактора не могли бы осуществляться в том случае, если бы иловая смесь не поступала из аэротенка в осветлитель. Сечение потока, протекающего между дном аэротенка-осветлителя и условным центром вращения водоворотной зоны должно быть положительным, то есть должно выполняться неравенство: $h_w > S_w$.

В теории турбулентных струй определена длина водоворотной зоны, образуемой за плохобтекаемым телом при неограниченной длине затопленной струи. При постоянном поперечном сечении пространства, в котором распространяется струя, длина водоворотной зоны в 6,1 раз превышает ширину обтекаемого тела. При неограниченной длине водоворотной зоны длина S_w струи

до условного центра водоворотной зоны в 5,1 раз больше ширины плохо обтекаемого тела [120]. В аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации ширина плохо обтекаемого тела равна B_c . Отношение расстояния от начального сечения затопленной турбулентной струи до центра водоворотной зоны к общей длине водоворотной зоны составляет $5,1/6,1 = 0,836$. По аналогии с неограниченной в продольном направлении водоворотной зоной, величину глубины условного центра вращения водоворотной зоны можно принимать не более 0,836 от глубины h_w . Расчёт глубины условного центра водоворотной зоны из уравнения (2.33) или (2.34) и условия $u_h = 0$ может быть справедливым при $S_w < 0,836 \cdot h_w$, когда величина глубины расположения центра водоворотной зоны снижается из-за влияния течения очищаемой жидкости в сторону выхода из сооружения. Если вычисленное по формуле (2.33) или (2.34) и условию $u_h = 0$ значение глубины условного центра водоворотной зоны S_w превышает $0,836 \cdot h_w$, то следует принимать $S_w = 0,836 \cdot h_w$.

Обновление взвешенного слоя ила характеризуется расходом возвратного активного ила, который вычисляется по формуле

$$Q_R = Q_{v(S_w)} - Q_{cm}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.35)$$

где $Q_{v(S_w)}$ – расход восходящего потока в осветлителе на уровне условного центра водоворотной зоны, $\text{м}^3/\text{с}$. В зависимости от формы аэротенка-осветлителя, этот расход вычисляется по формуле (2.31) или (2.32) при $s = S_w$.

Величина расхода Q_R позволяет подобрать такое значение подачи затопленного эрлифта, которое будет обеспечивать достаточное обновление взвешенного слоя при имеющейся производительности аэротенка-осветлителя.

На рисунке 2.6 представлен характер зависимости основных гидродинамических параметров от расстояния s между нижней кромкой наклонного козырька и соответствующим сечением осветлителя. Расчёты выполнены по представленным в данном подразделе формулам в среде Mathcad Application при следующих геометрических параметрах (Рис. 2.4): $L = 9$ м; $B_j = 0,3$ м, $B_c = 0,9$ м, $h_w = 2,1$ м. Значение расстояния s на графиках изменяется от 0 до S_w .

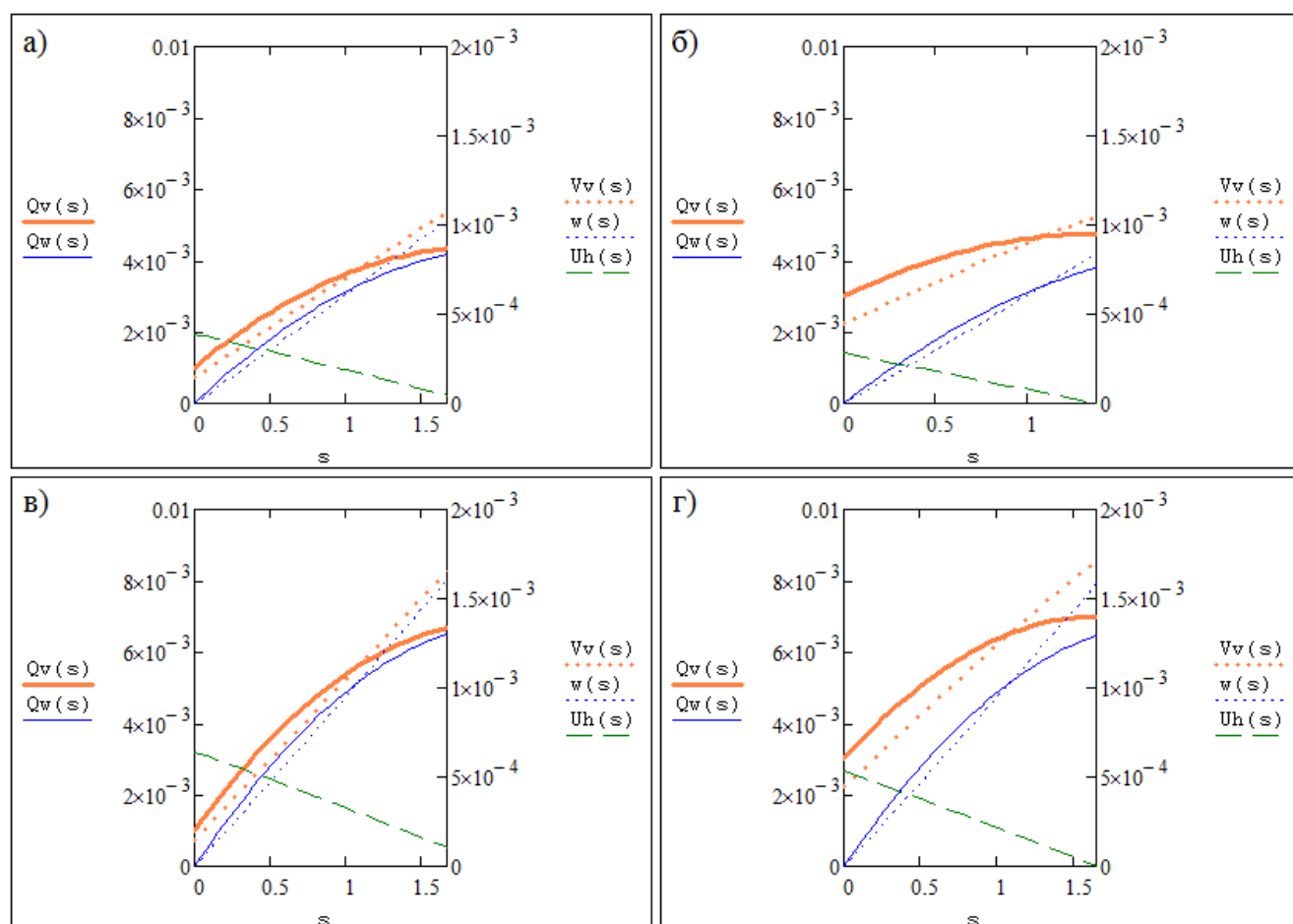


Рисунок 2.6 – Изменение основных гидродинамических параметров восходящего потока водоворотной зоны ($Q_v(s)$ – расход восходящего потока в осветлителе, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_w(s)$ – расход восходящего потока за пределами затопленной струи, без учёта расхода очищаемой жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; $V_v(s)$ – вертикальная составляющая средней скорости жидкости в осветлителе с учётом влияния расхода очищаемой жидкости, $\text{м}/\text{с}$; $w(s)$ – вертикальная составляющая средней скорости жидкости в осветлителе без учёта влияния расхода очищаемой жидкости, $\text{м}/\text{с}$; $U_h(s)$ – скорость рециркуляции, $\text{м}/\text{с}$) в зависимости от глубины сечения при различных значениях расходов в зазоре Q_a и в защитной зоне $Q_{\text{ст}}$:

а, б – $Q_a = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$; в, г – $Q_a = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$;

а, в – $Q_{\text{ст}} = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$; б, г – $Q_{\text{ст}} = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$.

Как видно из графиков рисунка 2.6, при подаче эрлифта $Q_a = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ и расходе очищаемых стоков $Q_{\text{ст}} = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ скорость восходящего потока v_v снижается от 0,4 мм/с на уровне условного центра водоворотной зоны до 0,12 мм/с на уровне зазора; при $Q_a = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{\text{ст}} = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ скорость v_v изменяется

от 0,39 мм/с до 0,23 мм/с; при $Q_a = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{ст}} = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$ – от 0,87 мм/с до 0,12 мм/с; при $Q_a = 0,2 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{\text{ст}} = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ – от 0,9 мм/с до 0,12 мм/с. Скорость v_v и расход Q_v восходящего потока взвешенного слоя снижаются по мере уменьшения расстояния s до начального сечения при всех рассмотренных значениях подачи затопленного эрлифта и производительности аэротенка-осветлителя. Скорость u_n течения жидкости из осветлителя в аэротенк возрастает по мере приближения к наклонному козырьку, и достигает более высоких значений (порядка 0,4 мм/с) при большей подаче затопленного эрлифта Q_a и при меньшем расходе очищаемых сточных вод $Q_{\text{ст}}$.

2.3 Определение параметров циркуляции иловой смеси в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации

В сооружениях биологической очистки сточных вод, в которых осуществляется биохимическая переработка загрязнений и/или илоотделение, необходимо соблюдать соответствующие гидродинамические условия. Скорости течения жидкости в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации могут ограничиваться из соображений поддержания ряда технологических процессов: осуществление перемешивания активного ила в биологическом реакторе, обеспечение условий для фильтрования иловой смеси во взвешенном слое, соблюдение времени пребывания биохимически очищаемой жидкости в соответствующей зоне аэротенка-осветлителя и т.д.

Течение жидкости в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации обуславливается протеканием очищаемой жидкости через объём биологического реактора и циркуляцией иловой смеси в аэротенке, которая возникает в результате работы аэрационной системы и инициирует циркуляцию в водоворотной зоне. В качестве основного критерия, характеризующего циркуляцию потока в аэротенке принята интенсивность циркуляции

$$I_u = \frac{Q_{a,u}}{\omega_j}, \quad \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (2.36)$$

где $Q_{a, ч}$ – часовой расход жидкости в зазоре, $м^3/ч$.

В зоне снижения концентрации растворённого кислорода (Рис. 2.3) происходит затухание процессов нитрификации и, соответственно, возникают условия для переработки активным илом нитритов и нитратов. Для протекания одноиловой нитри-денитрификации в зоне снижения концентрации растворённого кислорода должно происходить падение концентрации кислорода до соответствующего значения. Снижение концентрации растворённого кислорода обеспечивается временем пребывания иловой смеси в неаэрируемой части биореактора. Время пребывания в зоне снижения концентрации растворённого кислорода, которое требуется для протекания денитрификации, рассчитывается по формуле (1.5) [29]. Фактическое среднее время пребывания жидкости в зоне снижения концентрации растворённого кислорода равно отношению объёма этой зоны к сумме производительности затопленного эрлифта и производительности аэротенка-осветлителя.

Время пребывания иловой смеси в осветлителе превышает среднее время пребывания в зоне снижения концентрации растворённого кислорода. Максимальное время пребывания в зоне осветления диктуется свойствами активного ила для каждого конкретного случая и должно ограничиваться во избежание значительного изменения качественных характеристик активного ила из-за резкого ухудшения условий. Время пребывания иловой смеси в осветлителе можно рассчитать исходя из расхода возвратного активного ила, вычисляемого по формуле (2.35) и условного объёма осветлителя $W_{осв}$

$$\tau_w = \frac{W_{осв}}{Q_R}, \quad м^3/(м^2 \cdot ч). \quad (2.37)$$

Интенсивность циркуляции иловой смеси должна быть достаточной для предотвращения залегания иловых частиц на дне аэротенка-осветлителя. В зоне соударения нисходящей турбулентной струи о дно аэротенка и разворота потока имеет место значительная кривизна линий тока и изменение давления. Расположение этой зоны соответствует размеру сечения затопленной турбулентной струи перед её касанием к плоской поверхности дна. В связи с

интенсивным перемешиванием потока, при проверке заиляемости средние скорости течения иловой смеси в пределах всей ширины струи можно принимать постоянными и равными осевой скорости [139]. Минимальная интенсивность циркуляции с точки зрения предотвращения заиливания рассчитывается исходя из величины необходимой незаиляющей скорости, вычисляемой по формуле (1.6), и учитывает снижение осевой скорости в основном участке затопленной турбулентной струи.

$$I_{ц.нз} = 15900 \cdot v_{ос} \cdot H^{0,22} \cdot \sqrt{\frac{0,24 \cdot h_w}{B_j} + 0,41}, \quad (2.38)$$

где $I_{ц.нз}$ – минимальная интенсивность циркуляции, при которой предотвращается заиливание в зоне соударения нисходящей затопленной турбулентной струи с горизонтальным дном сооружения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Так как основная часть потока после его соударения с днищем аэротенка-осветлителя всасывается затопленным эрлифтом, течение в противоположном от системы аэрации направлении обладает значительно меньшей скоростью, чем в пределах сечения струи. За пределами зоны соударения струи с дном сооружения залегание ила предотвращается посредством устройства соответствующего уклона дна.

При работе взвешенного слоя необходимо соблюдать восходящую скорость в определённых пределах. Значение восходящей скорости не должно быть меньше такого, при котором начинается псевдооживление слоя частиц ила, но должно быть меньше таких значений, при которых происходит размыв и разрушение взвешенного слоя. В случае аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации повышение уровня взвешенного слоя над уровнем нижней кромки наклонного козырька сопровождается уменьшением площади поперечного сечения и соответствующим возрастанием местной величины гидравлической нагрузки. Отметка поверхности илоразделения зависит от скорости жидкости во взвешенном слое осветлителя. Скорость течения жидкости сквозь взвешенный слой аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации зависит не только от гидравлической нагрузки на зеркало

защитной зоны, которая продиктована производительностью биореактора, но и, в значительной мере, от интенсивности циркуляции. Вертикальная составляющая скорости в восходящей части водоворотной зоны, помимо гидродинамических параметров, зависит от соотношения геометрических размеров и является переменной по высоте.

Повышение гидравлической нагрузки на взвешенный слой приводит к возрастанию концентрации взвешенных веществ в очищенной жидкости [140]. Более качественному осветлению способствует хорошая склонность иловых частиц к хлопьеобразованию и низкие значения диаметра пор взвешенного слоя. Более высокой степени задержания взвешенных веществ можно добиться снижением скорости восходящего потока.

Ввиду сложных гидродинамических условий взвешенного слоя аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации, связь гидравлической нагрузки и интенсивности циркуляции с концентрацией взвешенных веществ в очищенной жидкости, а также их предельные значения, которые определяют возможность существования взвешенного слоя, весьма сложно определить теоретическим путём. Задачами экспериментальных исследований, направленных на определение допустимых параметров циркуляции иловой смеси в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации являются:

1. Получение зависимости максимальных значений гидравлической нагрузки на осветлитель, не приводящих к размытию взвешенного слоя при различных геометрических параметрах аэротенка-осветлителя, от интенсивности циркуляции.
2. Выяснение рациональных соотношений геометрических параметров аэротенка-осветлителя.
3. Определение концентрации взвешенных веществ в осветлённой жидкости при различных гидродинамических параметрах и концентрациях активного ила в исходной иловой смеси.

2.4 Выводы по второму разделу

1. Предложена усовершенствованная конструкция аэротенка-осветлителя, в которой используется затопленная эрлифтная система аэрации. Теоретически обоснованы преимущества аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации относительно существующих комбинированных биореакторов: отсутствие дополнительных затрат электроэнергии на перекачивание возвратного активного ила из осветлителя и возможность осуществления глубокой переработки соединений азота за счёт поочерёдного пребывания иловой смеси в зонах с низким и высоким содержанием растворённого кислорода.

2. Выведены зависимости для расчёта основных гидродинамических параметров в зоне осветления. Восходящая скорость жидкости в осветлителе составляет $0,1 \dots 1$ мм/с и снижается по мере восхождения потока. Горизонтальные скорости, обеспечивающие возврат ила из осветлителя в аэротенк достигают $0,4$ мм/с. Расход возвратного активного ила повышается при увеличении интенсивности циркуляции и снижении расхода очищаемой жидкости.

3. Обозначены процессы аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации, которые требуют соблюдения значений интенсивности циркуляции в определённых пределах. Описан расчёт минимальных допустимых значений интенсивности циркуляции в биореакторе. Поставлены задачи для экспериментальных исследований по определению максимальных допустимых значений интенсивности циркуляции и рациональных соотношений геометрических параметров.

РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОТЕНКА-ОСВЕТИТЕЛЯ С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ

3.1 Описание экспериментальной установки

Для подтверждения и дополнения теоретических изысканий был проведён ряд экспериментальных исследований процесса осветления иловой смеси в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации. С целью выполнения экспериментов была смоделирована лабораторная установка [116, 117, 124]. Схема лабораторной установки представлена на рисунке 3.1. Лабораторная установка включает модель аэротенка-осветлителя, устройство и принцип действия которого описаны в подразделе 2.1, систему подачи и отвода жидкости и систему подачи воздуха.

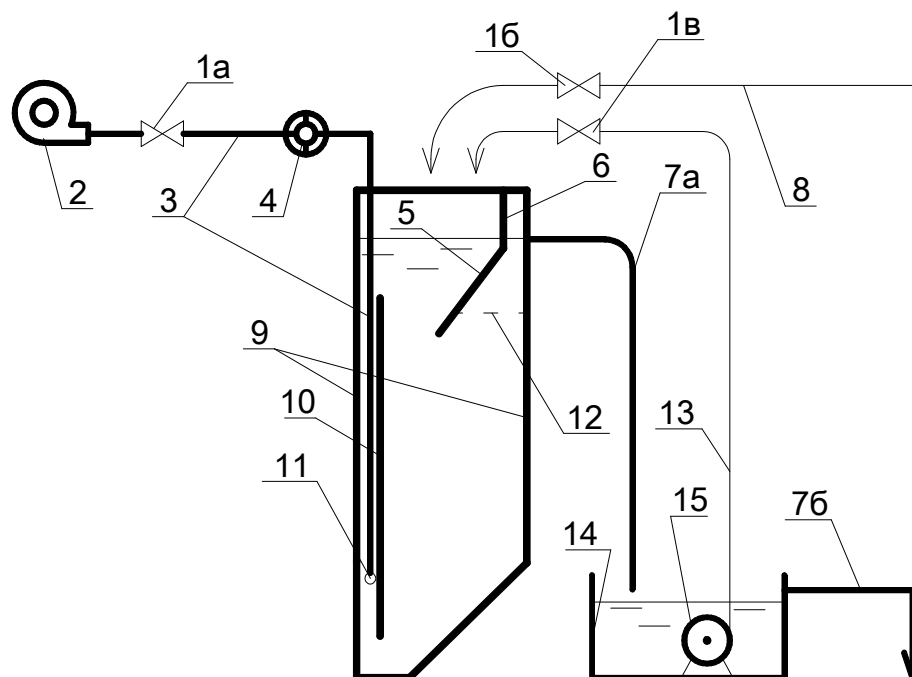


Рисунок 3.1 – Схема лабораторной установки:

1а, б, в – регулировочные вентили; 2 – микрокомпрессор; 3 – трубка подачи воздуха; 4 – газовый счётчик; 5 – наклонный козырёк; 6 – вертикальная разделительная перегородка; 7а, б – трубки отвода осветлённой жидкости; 8 – трубка подачи исходной жидкости; 9 – корпус модели аэротенка-осветлителя;

10 – затопленная перегородка; 11 – тканевый аэратор; 12 – поверхность илоразделения; 13 – трубка рециркуляции очищенной жидкости; 14 – промежуточная ёмкость; 15 – циркуляционный насос.

Корпус модели аэротенка-осветлителя 9 представляет собой ёмкость из поликарбоната общим объёмом 6,5 дм³. Активный ил для проведения экспериментальных исследований отбирался из аэротенка-вытеснителя канализационной очистной станции г. Макеевки.

Высоту расположения разделительной вертикальной перегородки 6 с наклонным козырьком 5 можно изменять посредством сдвига вдоль вертикальных направляющих. Стыки между боковыми стенками аэротенка-осветлителя и боковыми краями вертикальной разделительной перегородки и наклонного козырька, а также между вертикальной перегородкой и козырьком водонепроницаемы. Измерению уровня расположения поверхности илоразделения 12 способствует прозрачность стенок корпуса.

Система аэрации состоит из тканевого аэратора 11, затопленной перегородки 10, микрокомпрессора 2 марки SB-108 и трубки подачи воздуха 3. Регулирование подачи воздуха осуществляется при помощи вентиля 1а на основании показаний газового счётчика 4 (G 2,5).

Для обеспечения нагрузки на активный ил предусмотрена подача исходной жидкости по трубке 8, а также рециркуляция осветлённой жидкости через трубку 13. Выходящая из корпуса жидкость по трубке отвода осветлённой жидкости 7а переливается в промежуточную ёмкость 14. Из промежуточной ёмкости жидкость возвращается в аэротенк-осветлитель при помощи погружного циркуляционного насоса 15 (Resun B-400), а при её избытке – отводится трубкой 7б. Регулирование расхода подаваемой в аэротенк-осветлитель жидкости производился вентилями 1б, 1в на основании объёмного способа измерения расхода.

На рисунке 3.2 представлено фотоизображение лабораторной экспериментальной установки аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации. На рисунке 3.3 показаны участки боковых стенок корпуса

лабораторной модели аэротенка-осветлителя, сквозь которые визуально наблюдаются движение нисходящего потока иловой смеси в зазоре, поверхность илоразделения под наклонным козырьком и т.п. На рисунке 3.4 приведена схема лабораторной модели аэротенка-осветлителя с указанием принятых буквенных обозначений геометрических параметров.



Рисунок 3.2 – Фотоизображение лабораторной установки аэротенка-осветлителя

а)



б)



Рисунок 3.3 – Фотографии характерного участка корпуса лабораторной модели аэротенка осветлителя

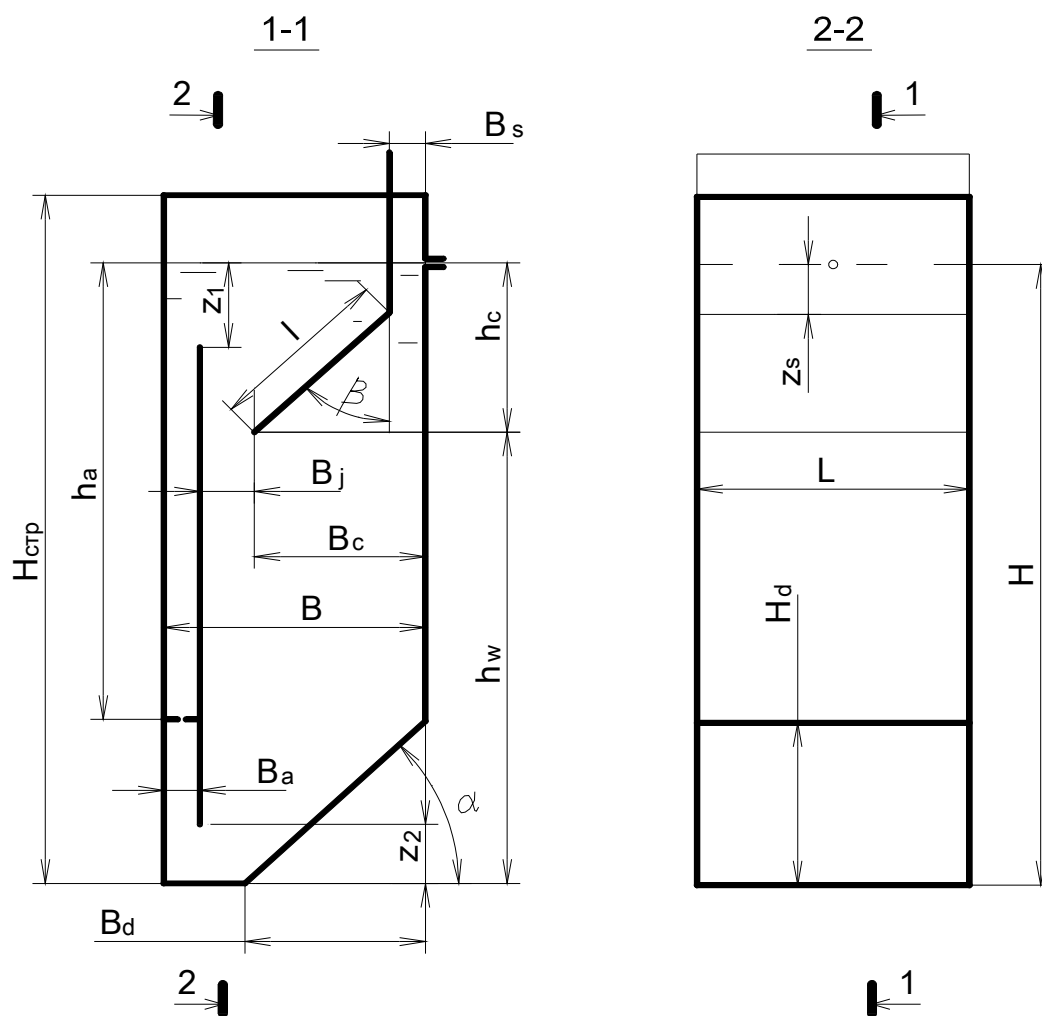


Рисунок 3.4 – Обозначение геометрических параметров модели аэротенка-осветителя с затопленной эрлифтной системой аэрации

Для проведения экспериментальных исследований лабораторной установки были применены современные методы планирования [141-146].

3.2 Экспериментальное подтверждение теоретической зависимости производительности затопленного эрлифта от расхода воздуха

В подразделе 1.3 представлена система уравнений (1.13), которая позволяет вычислять расход жидкости, циркулирующей в аэротенке с затопленной эрлифтной системой аэрации. Пренебрегая весом газовой фазы и выражая объёмы W_k и $W_{\text{ц}}$ газожидкостного потока через определяющие их геометрические размеры, систему уравнений (1.13) можно преобразовать в систему (3.1) (для прямоугольного в плане аэротенка-осветителя) или (3.2) (для аэротенка-

осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации, имеющего круглую в плане форму).

$$\left\{ \begin{array}{l} L \cdot B_a = \frac{Q_a}{v_{жс}} + \frac{Q_{air}}{v_{жс} + 0,34}; \\ h_a - \frac{(h_a - z_1) \cdot Q_a}{v_{жс} \cdot L \cdot B_a} - \frac{\frac{Q_a}{v_{жс}} \cdot z_1 + 0,21 \cdot z_1^2 \cdot \frac{L}{2}}{L \cdot [B_a + z_1 \cdot 0,105]} = \frac{\alpha \cdot v_{жс}^2}{2 \cdot g} + \frac{Q_a^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\sum \frac{\zeta_i}{\omega_i^2} - \frac{\alpha}{(L \cdot B_a)^2} \right). \end{array} \right. \quad (3.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \pi \cdot r_a^2 = \frac{Q_a}{v_{жс}} + \frac{Q_{air}}{v_{жс} + 0,34}; \\ h_a - \frac{(h_a - z_1) \cdot Q_a}{v_{жс} \cdot \pi \cdot r_a^2} - \frac{\frac{z_1 \cdot Q_a}{\pi \cdot v_{жс}} + 0,21 \cdot r_a \cdot z_1^2 + 0,0147 \cdot z_1^3}{r_a^2 + 0,21 \cdot r_a \cdot z_1 + 0,0147 \cdot z_1^2} = \frac{\alpha \cdot v_{жс}^2}{2 \cdot g} + \frac{Q_a^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\sum \frac{\zeta_i}{\omega_i^2} - \frac{\alpha}{(\pi \cdot r_a^2)^2} \right). \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Значение расхода жидкости Q_a , протекающего через зазор, вычисляется в зависимости от величины расхода воздуха Q_{air} и геометрических параметров сооружения. В зависимости от формы сооружения, расчёт можно производить посредством системы уравнений 3.1 или 3.2. Значимыми местными сопротивлениями считаются: сопротивление на выход жидкой фазы газожидкостного потока из эрлифта и её поворот на 180° ; сопротивление на сужение и внезапное расширение нисходящего потока аэротенка при прохождении его через зазор; сопротивление на разворот потока иловой смеси и её вход в затопленный эрлифт; сопротивление движению восходящего потока аэраторов, которые занимают часть сечения затопленного эрлифта.

Существуют данные экспериментального подтверждения достоверности системы (1.13) для условий круглого в плане аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации промышленных масштабов [15]. Исследуемая модель аэротенка-осветлителя отличается от известного сооружения формой, масштабом и некоторыми конструктивными элементами. Поэтому использование системы уравнений (3.1) для расчёта интенсивности циркуляции в модели аэротенка-осветлителя требует экспериментального подтверждения.

Целью экспериментального исследования является подтверждение достоверности расчёта расхода нисходящего потока жидкости в зазоре модели

аэротенка-осветлителя при помощи теоретической зависимости (3.1). Цель включает в себя задачи:

- разработать методику определения скорости нисходящего течения жидкости в потоке;
- провести опыты, позволяющие экспериментально найти значения скоростей нисходящего потока в зазоре при различных величинах расхода воздуха, подаваемого затопленной эрлифтной системой аэрации;
- вычислить теоретические значения скоростей нисходящего потока в зазоре при тех же величинах расхода подаваемого затопленной эрлифтной системой аэрации воздуха, что имели место при проведении опытов;
- сравнить значения скоростей, полученных экспериментальным и теоретическим путём;
- сделать выводы относительно возможности использования предположенной теоретической зависимости для расчёта интенсивности циркуляции иловой смеси в аэротенке-осветлителе.

Определение скорости нисходящего потока при помощи традиционных доступных измерительных устройств (ротационный расходомер, трубка Пито и т.п.) затрудняется малыми размерами лабораторной модели аэротенка-осветлителя и низкими значениями скоростей течения (около 0,1 м/с). Благодаря прозрачности стенок модели, движение потока можно фиксировать визуально. Для визуального наблюдения за движением потока в нём должны присутствовать чётко отличающиеся элементы, обладающие той же скоростью, что и жидкость в потоке.

Ёмкость модели аэротенка-осветлителя заполнялась чистой водой, в которую добавлялись твёрдые частицы, имеющие тёмный цвет и обладающие положительной гидравлической крупностью, не превышающей гидравлической крупности активного ила. При различных фиксированных значениях объёмного расхода воздуха, подаваемого аэрационной системой, производилась видеосъёмка области аэротенка-осветлителя вблизи зазора. На основании видео определялись вертикальные координаты отдельных частиц в различные моменты времени и

время, за которое происходило изменение этих координат. Координаты расположения частиц определялись относительно произвольно взятой условной плоскости, перпендикулярной по отношению к оси нисходящего потока аэротенка, при помощи зафиксированной линейки. Для возможности отслеживания положения частиц в интервалах времени, измеряемых долями секунд, полученные в процессе опытов видеоматериалы анализировались в программе Sony Vegas Pro. На рисунке 3.5 представлен пример определения изменения координат частицы за короткий промежуток времени для последующего вычисления вертикальной составляющей её скорости. Разница во времени между кадром 539 (Рис. 3.5 а) и 549 (Рис. 3.5 б) составляет $(549-539)/30 = 0,333$ с.

Скорость каждой частицы рассчитывалась как соотношение вертикальной составляющей пройденного частицей пути к отрезку времени между фиксациями начальной и конечной координат этой частицы. Результаты измерения скоростей движения твёрдых частиц приведены в приложении А. Средняя скорость u_0 потока в зазоре считалась равной вертикальной составляющей средней скорости частиц, выходящих из зазора. Интенсивность циркуляции $I_{\text{ц}}$ жидкости вычислялась исходя из средней скорости потока.

В таблице 3.1 представлены средние значения скоростей движения твёрдых частиц в сжатом сечении нисходящего потока аэротенка при соответствующих значениях объёмного расхода воздуха, который подавался через затопленную эрлифтную систему аэрации.

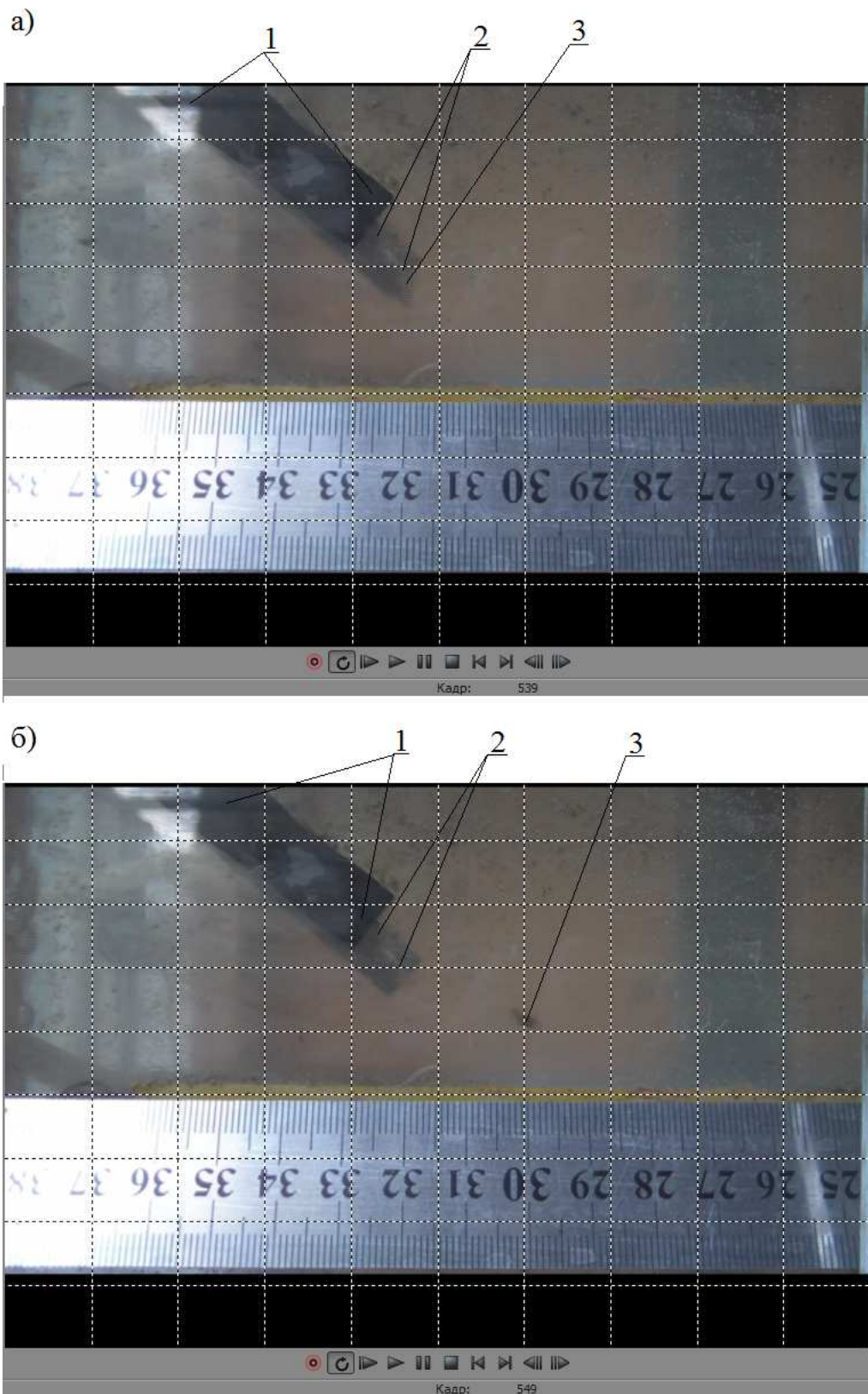


Рисунок 3.5 – Определение скорости частицы при помощи программы Vegas Pro:
 а – вертикальная координата частицы 320 мм, кадр 539; б – вертикальная координата частицы 300 мм, кадр 549:

1 – резиновая уплотняющая полоса между наклонным козырьком и боковой стенкой корпуса; 2 – нижняя кромка наклонного козырька; 3 – частица.

Таблица 3.1 – Статистический анализ результатов исследования зависимости интенсивности циркуляции от расхода подаваемого воздуха

Расход воздуха, $\text{дм}^3/\text{мин}$	0,98	1,25	1,54	2,81	3,56	4,12	5,77	11,25
Средняя скорость частиц, мм/с	55,35	65,58	69,06	85,62	99,12	102,4	115,9	150,0
Стандартное отклонение по выборке, мм/с	22,01	18,92	16,84	32,31	30,54	27,04	41,54	56,29
Предельное отклонение от средней скорости, мм/с	4,00	3,44	3,06	5,87	5,55	4,91	7,54	10,2
Среднее значение экспериментальной интенсивности циркуляции, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	199,3	236,1	248,6	308,2	356,8	368,8	417,2	539,9
Предельное отклонение от экспериментальной средней интенсивности циркуляции, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	14,39	12,37	11,01	21,12	19,96	17,68	27,15	36,79
Нижняя граница доверительного интервала, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	184,9	223,7	237,6	287,1	336,9	351,1	390,1	503,1
Верхняя граница доверительного интервала, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	213,6	248,5	259,6	329,4	376,8	386,5	444,4	576,7
Теоретическая интенсивность циркуляции, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	207,4	230,8	252,7	325,5	358,3	379,6	432,1	546,4

Стандартное отклонение по выборке рассчитывалось для каждой серии измерений по формуле (3.3)

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_{cp} - u_i)^2}{n_u - 1}}, \quad (3.3)$$

где u_i – скорость частицы в нисходящем потоке при i -ом измерении, мм/с;

n_u – количество измерений скорости частицы в пределах одного опыта, равное 30 шт.;

u_{cp} – среднеарифметическое значение скорости частиц по n_u измерениям, мм/с.

Предельное отклонение от средней скорости (доверительный интервал для среднего генеральной совокупности с использованием нормального распределения) вычислялось при уровне значимости $\alpha_1 = 0,32$. Уровень значимости был определён исходя из рекомендованной для случайных погрешностей измерений величины доверительной вероятности, равной 0,68 [144].

Значения средней экспериментальной скорости движения частиц в начале затопленной струи были переведены в средние значения экспериментальной интенсивности циркуляции. Аналогичным образом осуществлён пересчёт предельных отклонений средних экспериментальных скоростей в предельные отклонения экспериментальных интенсивностей циркуляции от соответствующих теоретических значений. Нижняя и верхняя границы доверительного интервала рассчитаны, соответственно, вычитанием или прибавлением величин предельного отклонения интенсивности циркуляции от средних экспериментальных значений $I_{ц}$.

Теоретическое значение интенсивности циркуляции вычислено как отношение подачи затопленного эрлифта, вычисленной по системе уравнений 3.1, к площади поперечного сечения зазора. Расчёты осуществлялись для тех же значений производительности системы аэрации, которые имели место при экспериментальных определениях скоростей движения жидкости в нисходящем потоке модели аэротенка-осветлителя. На рисунке 3.6 представлены графики зависимостей теоретических и экспериментальных значений интенсивности циркуляции жидкости от расхода воздуха, подаваемого системой аэрации.

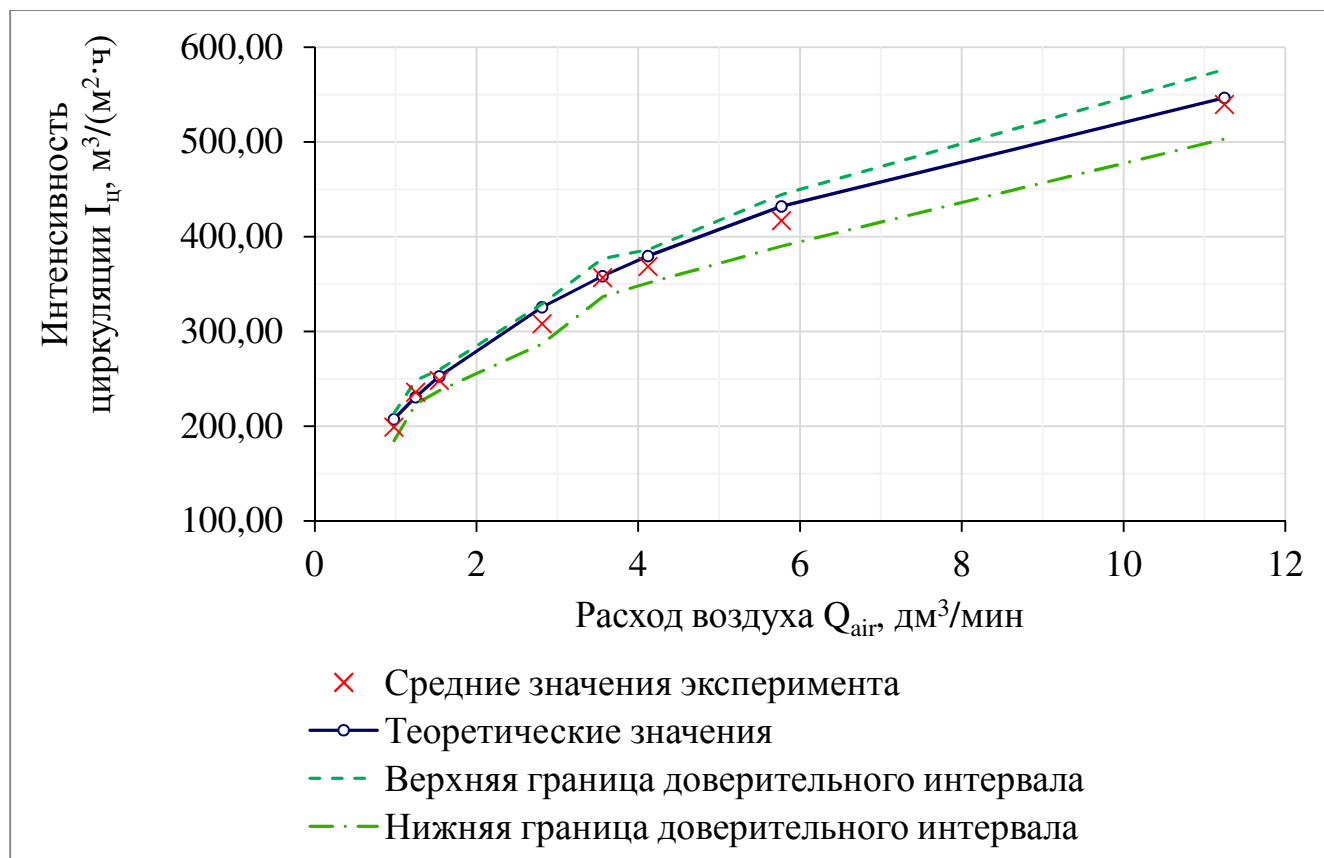


Рисунок 3.6 – Сравнение теоретических и экспериментальных значений интенсивности циркуляции при различных величинах подачи воздуха затопленной эрлифтной системой аэрации

Как видно из таблицы 3.1 и рисунка 3.6, все вычисленные теоретически значения интенсивности циркуляции попадают в доверительный интервал экспериментально полученных данных. Возможность достоверного определения интенсивности циркуляции иловой смеси в исследуемой модели аэротенка-осветлителя на основании вычислений по теоретической зависимости (3.1) подтверждена.

3.3 Определение угла раскрытия затопленной турбулентной струи в аэротенке-осветлителе

Тангенс угла расширения внешней границы пограничного слоя струи $\operatorname{tg}(\alpha_2) = 2,4 \cdot a$, тангенс угла сужения границы ядра постоянных скоростей $\operatorname{tg}(\alpha_1) = 0,96 \cdot a$, где a – коэффициент структуры плоской струи, по опытам Г.Ф. Проскуры равный 0,12 [125]. Тогда по формулам (2.2-2.5) $c = 0,4$.

Рекомендованная величина константы турбулентности для различных случаев течения струи в ограниченном пространстве может быть равна 0,22, 0,27 или 0,3 [120], в зависимости от конфигурации ограничивающих объектов. Следовательно, значение константы турбулентности, необходимое для произведения расчётов, описанных в разделе 2.2 диссертационной работы, не является постоянной для любого случая расширения пограничного слоя затопленной турбулентной струи.

Существуют известные эмпирические константы и зависимости для расчёта границ пограничного слоя турбулентной струи при истечении в тупик, при наличии встречного либо спутного потока во внешней среде, а также при образовании циркуляции за плохо обтекаемым телом. Пристеночная струя аэротенка-осветлителя развивается в условиях образования циркуляционной области и бьёт в поперечную стенку, представляющую собой дно биологического реактора. Невозможность теоретической идентификации имеющегося струйного потока как конкретного, исследованного и описанного в литературе, требует экспериментального определения границ пограничного слоя струи.

Проследить положение линий тока можно при помощи помещения в прозрачную жидкость непрозрачных веществ (жидкого красителя, твёрдых частиц и т.д.). При закреплении в потоке жидкости нити, обладающей нейтральной плавучестью, её положение приблизится к положению условной линии тока, проходящей мимо точки закрепления этой нити. На рисунке 3.7 представлено предполагаемое положение линий тока водоворотной зоны (при отсутствии расхода очищаемой жидкости), основанное на теории затопленных турбулентных струй. Характерной линией тока является граница ядра постоянной массы 10. Она начинается на нижней кромке наклонного козырька и является границей водоворотной зоны. На любой глубине z относительно уровня нижней кромки наклонного козырька в пределах водоворотной зоны восходящий и нисходящий расходы равны. То есть, расход Q_w , вычисляемый по формуле (2.23), равен той части расхода пограничного слоя, которая протекает на расстоянии от y_m до b от внутренней границы пограничного слоя струи

$$\int_{y_m}^b L \cdot [(u_n + w) \cdot (1 - (y_n/b)^{1,5})^2 - w] \cdot dy_n = Q_w, \quad (3.4)$$

где y_m – горизонтальное расстояние от ядра струи до границы ядра постоянной массы струи, м.

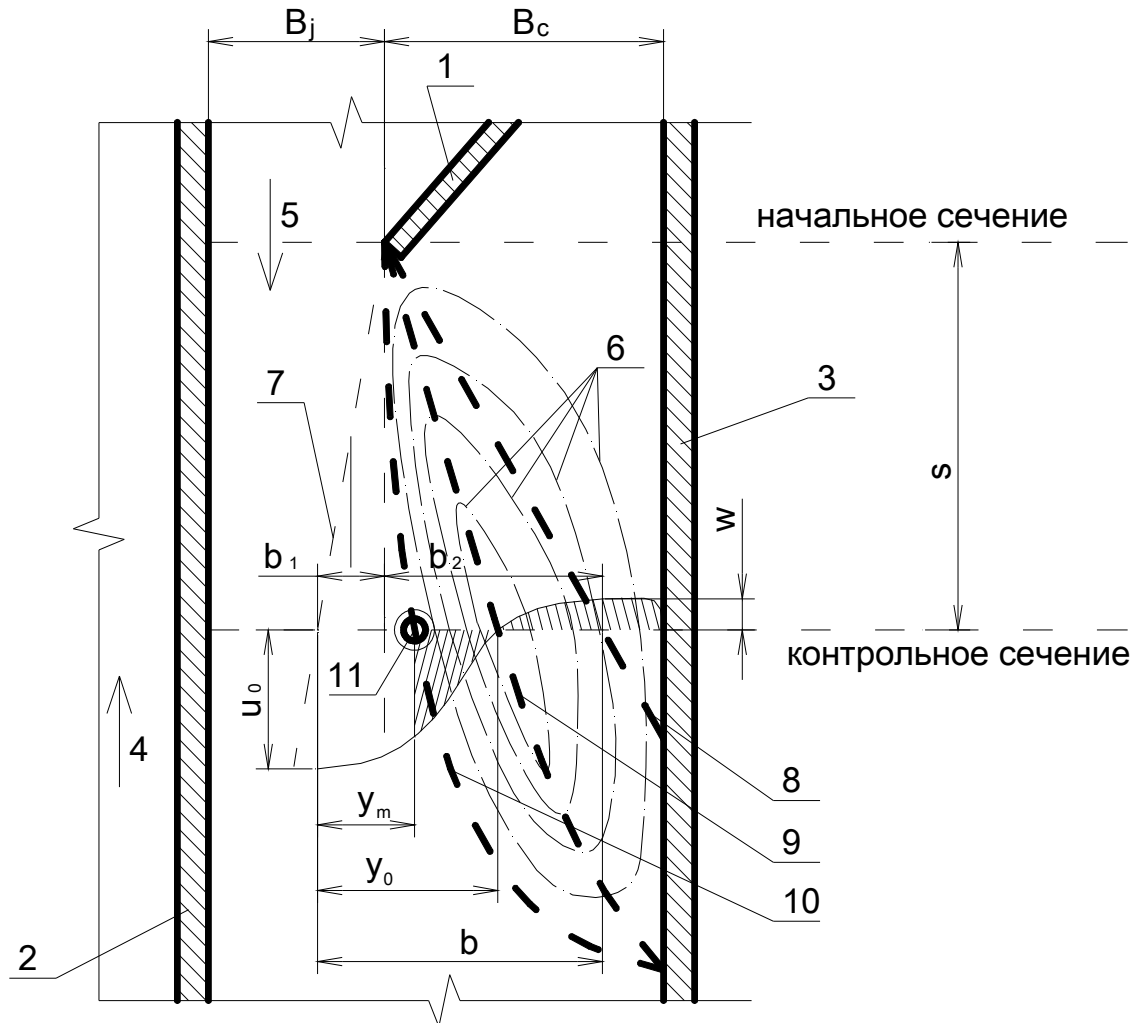


Рисунок 3.7 – Теоретическое положение линий тока водоворотной зоны:

1 – наклонный козырёк; 2 – затопленная перегородка; 3 – наружная стенка аэротенка-осветлителя; 4 – восходящий газожидкостный поток; 5 – нисходящий поток аэротенка; 6 – линии тока водоворотной зоны; 7 – внутренняя граница пограничного слоя струи; 8 – внешняя граница пограничного слоя струи; 9 – линия нулевых вертикальных составляющих скоростей жидкости (условная граница осветлителя); 10 – граница ядра постоянной массы струи (граница водоворотной зоны); 11 – контрольная точка.

При истечении турбулентной струи во встречный поток [120]

$$\operatorname{tg}(\alpha_1) = (0,416 - 0,134 \cdot w/u_n) \cdot c; \quad (3.5)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_2) = (0,584 + 0,134 \cdot w/u_H) \cdot c. \quad (3.6)$$

При значительном превышении нисходящей скорости u_H над встречной восходящей скоростью w : $\operatorname{tg}(\alpha_1) = 0,125$, $\operatorname{tg}(\alpha_2) = 0,175$.

После подстановки формул (2.3), (2.4), (2.23) и (2.27) в выражение (3.4), интегрирования и сокращения, получена формула (3.5), позволяющая численно определить координаты s и y_m границы ядра постоянной массы струи при $c = 0,3$ и $\operatorname{tg}(\alpha_2) = 0,175$

$$\left(\frac{1}{s} + \frac{0,00125 \cdot \delta_0 / S_0}{B_c - 0,01 \cdot s} \right) \cdot \left(0,135 \cdot s - 9,259 \cdot \frac{y_m^4}{s^3} - y_m - 4,869 \cdot \frac{y_m^{2,5}}{s^{1,5}} \right) + \\ + (y_m - 0,3 \cdot s) \cdot \frac{0,00125 \cdot \delta_0 / S_0}{B_c - 0,01 \cdot s} = (B_c - 0,175 \cdot s) \cdot \frac{0,00125 \cdot \delta_0 / S_0}{B_c - 0,01 \cdot s}. \quad (3.5)$$

Исходя из расчётов, выполненных при помощи Mathcad Application, для глубины контрольного сечения $s = 0,08$ м тождество (3.7) выполняется при $y_m = 0,0090$ м. На рисунке 3.8 представлено положение нитей, которые были закреплены на верхней поверхности наклонного козырька, зафиксированное в различные моменты времени при интенсивности циркуляции воды $I_{ц} \approx 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, ширине зазора $B_j = 0,030$ м и ширине осветителя $B_c = 0,095$ м. Значительное изменение положения нитей в определённые моменты времени вызвано поперечными пульсациями турбулентного потока.

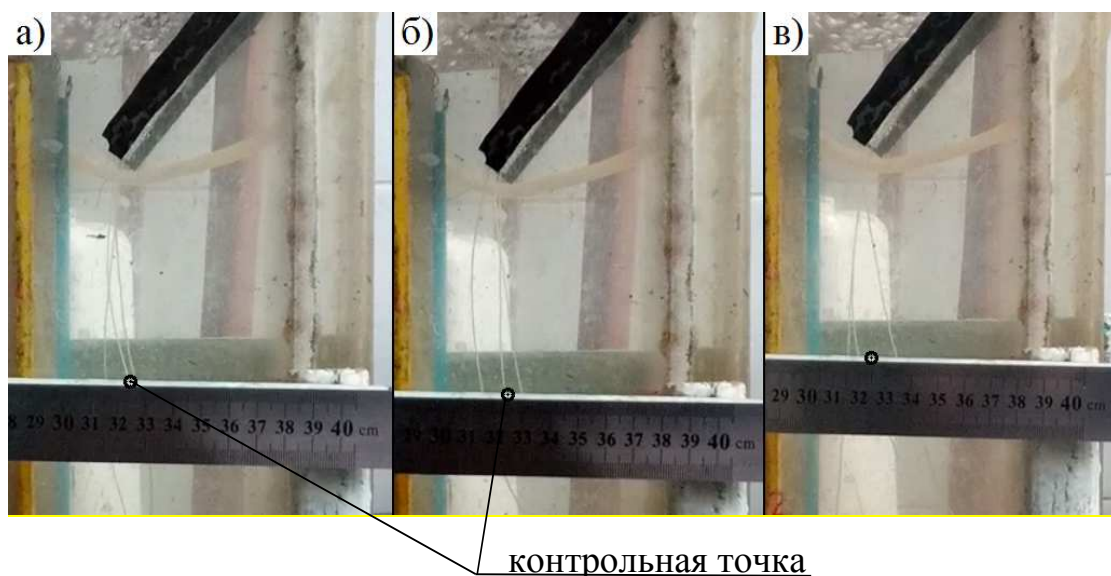


Рисунок 3.8 – Характерные положения ниток в потоке нисходящей турбулентной струи

Указанная на рисунке 3.8 контрольная точка обладает координатами $s = 80$ мм, $y_m = 9$ мм ($y = 29$ мм) и является перпендикулярной по отношению к плоскости рисунка. Данная линия находится в области, наиболее часто пересекаемой нитками. На основании совпадения преобладающего положения ниток с теоретическим положением линии тока можно сделать следующие выводы:

- описание движения жидкости в водоворотной зоне аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации при помощи теории турбулентных струй является целесообразным;
- для расчёта гидродинамических параметров водоворотной зоны аэротенка-осветлителя можно принимать $\text{tg}(\alpha_2) = 0,175$, $\text{tg}(\alpha_1) = 0,125$.

3.4 Полный факторный эксперимент по определению допустимых гидродинамических параметров

Целью экспериментального исследования является оценка зависимости максимально допустимой гидравлической нагрузки на осветлитель от физических свойств ила, геометрических параметров аэротенка-осветлителя и остальных влияющих на неё факторов.

Гравитационному осаждению иловых частиц противодействует сила гидродинамического давления восходящего потока жидкости. Как описано в подразделе 2.2 данной диссертационной работы, скорость восходящего потока, помимо гидравлической нагрузки на осветлитель, определяется интенсивностью циркуляции иловой смеси в аэротенке $I_{\text{ц}}$, расстоянием от нижней кромки наклонного козырька до внешней стенки биореактора B_c (шириной осветлителя) и т.д.

Задача опытов состояла в определении таких критических значений гидравлической нагрузки на осветлитель, при которых увеличение высоты взвешенного слоя не вызывает вынос иловых частиц непосредственно из его объёма. Осветлитель имеет переменную по высоте площадь поперечного сечения, и, соответственно, переменную по высоте гидравлическую нагрузку. Принятая в

качестве функции отклика нагрузка на осветлитель q_c рассчитывается как отношение расхода осветляемой жидкости к площади максимального поперечного сечения восходящего потока, которое расположено на уровне нижней кромки наклонного козырька. Выбор сечения основан на том, что уровень нижней кромки наклонного козырька является фиксированным, в отличие от, к примеру, уровня поверхности илоразделения.

$$q_c = \frac{Q_c}{\omega_c}, \quad \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (3.8)$$

где Q_c – часовая производительность аэротенка-осветлителя, $\text{м}^3/\text{ч}$;

ω_c – площадь сечения осветлителя на уровне нижней кромки наклонного козырька, м^2 , вычисляемая по формуле (3.9) при прямоугольной, или (3.10) – при круглой в плане форме аэротенка-осветлителя.

$$\omega_{c.пр} = L \cdot B_c, \quad \text{м}^2, \quad (3.9)$$

$$\omega_{c.кольц} = \pi \cdot (r^2 - (r - B_c)^2), \quad \text{м}^2. \quad (3.10)$$

К параметрам, которые влияют на значение функции отклика, в качестве которой принята допустимая гидравлическая нагрузка, отнесены:

- интенсивность циркуляции $I_{ц}$, влияющая на скорость восходящего потока, поддерживающего взвешенный слой;
- ширина зазора B_j (Рис. 3.4), которая при равном значении интенсивности циркуляции прямо пропорциональна расходу иловой смеси, циркулирующей в аэротенке;
- ширина осветлителя B_c , которая при равном значении гидравлической нагрузки на осветлитель прямо пропорциональна расходу протекающей через аэротенк-осветлитель жидкости;
- расстояние h_w от низа наклонного козырька до дна биореактора, которое, наряду с шириной осветлителя B_c , определяет форму водоворотной зоны;
- концентрация активного ила a_i , влияющая на пористость взвешенного слоя, динамическую вязкость иловой смеси и т.п.;
- плотность частиц ила $\rho_{ч}$, определяющая силы тяжести, действующие на иловые частицы;

- плотность жидкой фазы иловой смеси $\rho_{\text{ж}}$, определяющая выталкивающую силу, противодействующую седиментации частиц;
- угол наклона β козырька относительно вертикальной плоскости, который влияет на степень сжатия нисходящей струи и, следовательно, на гидродинамические параметры водоворотной зоны;
- эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}$ хлопьев активного ила, который влияет на величины действующих на частицу сил Архимеда, гравитации и гидродинамического давления восходящей жидкости.
- температура t иловой смеси, от которой зависит её вязкость.

Перед проведением многофакторного эксперимента произведено снижение количества факторов посредством объединения взаимозависимых и исключения тех, которые являются наименее значимыми.

От угла наклона козырька зависит степень сжатия нисходящего потока, поперечная площадь сечения восходящего потока и объём области, который заключён между наклонным козырьком и наружной стенкой осветлителя. Меньшее значение угла β между наклонным козырьком и вертикальной плоскостью (Рис. 3.4) при постоянной длине козырька соответствует меньшим площадям сечений осветлителя и защитной зоны, а при постоянном расстоянии B_c между нижней кромкой наклонного козырька и наружной стенкой – большему бесполезному (не занятому активным илом) объёму сооружения. Большее значение угла β соответствует большей степени сжатия нисходящего потока и более резкому снижению поперечного сечения при движении потока очищаемой жидкости на уровне наклонного козырька. Увеличение площади поперечного сечения осветлителя и обеспечение возможности колебания поверхности илоразделения, при постоянной величине длины l наклонного козырька, требует повышения объёма пространства, через которое проходит осветлённая жидкость. Величина угла β , которая соответствует максимальному объёму защитной зоны, зависит от соотношения ширины зеркала защитной зоны B_s и длины наклонного козырька l . Ввиду трапецевидной формы продольного сечения защитной зоны, её максимальный объём при постоянной длине козырька наблюдается при $\beta \approx 40^\circ$.

Так как обновление ила во взвешенном слое аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации основано на эжекции, угол β следует принимать близким к углу сужения стенок конфузора гидроструйного насоса. В соответствии с рекомендациями к конструированию гидроструйных насосов [147, 148], углы наклона стенок конфузоров эжектора относительно его продольной оси следует принимать равными 35° - 45° . Таким образом, угол β наклона козырька имеет оптимальное значение, не изменяемое в процессе эксплуатации аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации. Как и в планируемых натурных сооружениях, в процессе экспериментального исследования модельной установки фактор угла наклона козырька принимает постоянное значение.

Ввиду сложной структуры хлопьев активного ила, сложно определять не только текущие значения их плотности и эквивалентного диаметра, которые могут меняться в зависимости от условий, в которых пребывает ил, но и ориентировочные средние значения этих параметров. Вместо плотности и эквивалентного диаметра иловых частиц, для выражения седиментационных свойств активного ила часто используется произведение концентрации активного ила a_i на иловый индекс I – критериальный параметр $a_i \cdot I$. Концентрация иловой смеси по взвешенным веществам a_i и иловый индекс I являются сложно регулируемыми факторами. Иловый индекс был исключён из числа варьируемых факторов ввиду существования достаточно узких пределов его изменения при сохранении нормальной работы аэротенка.

В условиях используемой лабораторной установки величины V_c и V_j не являются независимыми. Ширину V_c невозможно варьировать отдельно от начальной ширины струи V_j , но можно вычислять исходя из значения V_j по линейной зависимости. При проведении экспериментов как варьируемый фактор учитывалась только ширина зазора V_j . Ширина осветлителя V_c изменялась на ту же величину, что и V_j , с противоположным знаком.

Необходимость поддержания биохимических процессов не позволяет значительного колебания температуры [149] и солесодержания иловой смеси в биологическом реакторе. Следовательно, температура и солесодержание не могут

изменяться в той степени, в которой они способны привести к значительному изменению плотности и вязкости жидкой фазы содержимого аэротенка. Относительное постоянство приемлемой плотности жидкой фазы иловой смеси позволяет исключить её из учитываемых факторов, влияющих на гидравлическую нагрузку аэротенка-осветлителя.

После отсеивания остаётся четыре значимых фактора: интенсивность циркуляции $I_{ц}$, ширина B_j , глубина h_w и концентрация a_i . Ввиду большого количества факторов, для проведения первого этапа многофакторного эксперимента использован двухуровневый план. При учёте четырёх влияющих факторов и двухуровневом планировании требуемое количество опытов составит $2^4 = 16$. Расширенное исследование осуществляется для факторов, которые наиболее значимы, исходя из результатов экспериментов, проведённых по двум уровням.

Основные параметры варьирования величин приведены в таблице 3.2. С целью упрощения обработки экспериментальных данных влияющие параметры представлены в виде кодированных факторов.

Таблица 3.2 – Основные параметры варьирования факторов для определения вида их зависимости на величину функции отклика

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-	0	+	
X_1	Интенсивность циркуляции $I_{ц}$, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	150	200	250	50
X_2	Начальная ширина струи B_j , м	0,03	0,05	0,07	0,02
X_3	Глубина от нижней кромки наклонного козырька до дна биореактора h_w , м	0,11	0,2	0,29	0,09
X_4	Концентрация активного ила a_i , г/дм^3	4,4	6,5	8,6	2,1

Зависимость между интенсивностью циркуляции $I_{ц}$ и критической гидравлической нагрузкой $q_{с\text{кр}}$, превышение которой приводит к размытию взвешенного слоя, при варьируемых значениях ширины зазора B_j и глубины h_w , а также различных значениях концентраций активного ила a_i в аэротенке, исследовалась на установке, описанной в подразделе 3.1. В таблице 3.3 приведены

результаты экспериментального исследования. Все опыты проводились в случайном порядке.

Таблица 3.3 – Зависимость критической гидравлической нагрузки на осветлитель от значений кодированных факторов

Номера опытов	Кодированные значения факторов				Функция отклика $Y (q_{с\text{ кр}}, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}))$
	X_1	X_2	X_3	X_4	
1	+	+	+	+	0,22
2	+	-	+	+	0,62
3	+	+	-	+	0,08
4	+	-	-	+	0,28
5	+	+	+	-	0,19
6	+	-	+	-	0,70
7	+	+	-	-	0,09
8	+	-	-	-	0,21
9	-	+	+	+	0,75
10	-	-	+	+	1,53
11	-	+	-	+	0,20
12	-	-	-	+	0,41
13	-	+	+	-	0,60
14	-	-	+	-	1,51
15	-	+	-	-	0,22
16	-	-	-	-	0,40

На основании данных многофакторного эксперимента можно составить уравнение регрессии, которое примет вид

$$\begin{aligned}
 Y = & b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + \\
 & + b_{34} \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{14} \cdot X_1 \cdot X_4 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{24} \cdot X_2 \cdot X_4 + b_{234} \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 + \\
 & + b_{134} \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 + b_{124} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + b_{123} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{1234} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4. \quad (3.11)
 \end{aligned}$$

Коэффициенты регрессии, вычисленные на основании анализа полученных данных при помощи онлайн-ресурса [150], приведены в таблице 3.4. Ход вычислений коэффициентов регрессии представлен в приложении Б.

Таблица 3.4 – Значения коэффициентов уравнения регрессии

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{23}	b_{34}
0,501	-0,202	-0,207	0,264	0,011	0,053	-0,118	0,004
b_{14}	b_{13}	b_{24}	b_{234}	b_{134}	b_{124}	b_{123}	b_{1234}
-0,009	-0,131	0,008	0,022	-0,018	-0,004	0,044	0,002

Ближкие значения коэффициентов b_1 , b_2 и b_3 указывают на приблизительно одинаковую значимость параметров X_1 , X_2 , и X_3 , причём повышению гидравлической нагрузки способствуют более низкие значения интенсивности циркуляции и ширины зазора и более высокие значения глубины сооружения относительно уровня расположения зазора. Низкие значения коэффициентов b_4 , b_{14} , b_{24} , b_{34} , b_{124} , b_{134} , b_{234} , b_{1234} указывает на низкую значимость параметра X_4 . Низкое влияние концентрации взвешенных веществ на функцию отклика можно объяснить тем, что концентрации взвешенных веществ в иловой смеси оказывает неоднозначное влияние на скорость осаждения иловых частиц. Повышение концентрации приводит к укрупнению хлопьев активного ила и соответствующему возрастанию их гидравлической крупности, но, в то же время, ухудшает условия стеснённого осаждения. Расширенное исследование допустимой гидравлической нагрузки проводится без учёта фактора X_4 , при поддержании его значений в тех же пределах, что и при проведении многофакторного эксперимента.

При проведении расширенных экспериментальных исследований в качестве основного фактора выбран X_1 , так как его изменение наиболее просто осуществляется как при проведении опытов, так и в процессе эксплуатации действующего аэротенка-осветлителя. Больше внимание при проведении расширенного экспериментального исследования по выявлению зависимости критической гидравлической нагрузки от влияющих факторов уделено тем уровням факторов X_2 и X_3 , при которых достигается более высокая гидравлическая нагрузка. Результаты измерений приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Зависимость критической гидравлической нагрузки на осветлитель от интенсивности циркуляции при различных геометрических параметрах водоворотной зоны

Параметр $a_i \cdot I$, $\text{см}^3/\text{дм}^3$	Интенсивность циркуляции $I_{\text{ц}}, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Критическая гидравлическая нагрузка $q_{\text{с кр}}, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$
$B_j = 70 \text{ мм}, B_c = 55 \text{ мм}, h_w = 290 \text{ мм}$		
410	250	0,19
640	248	0,22
650	151	0,75
330	149	0,60
$B_j = 75 \text{ мм}, B_c = 50 \text{ мм}, h_w = 290 \text{ мм}$		
600	135	0,89
600	114	1,18
620	68	1,72
$B_j = 50 \text{ мм}, B_c = 75 \text{ мм}, h_w = 290 \text{ мм}$		
300	288	0,43
770	259	0,41
750	240	0,46
250	235	0,49
740	230	0,59
720	228	0,69
240	227	0,68
240	177	0,79
760	180	0,73
690	168	0,99
700	166	0,83
610	160	1,15
240	143	0,97
690	130	1,23
680	128	1,46
$B_j = 30 \text{ мм}, B_c = 95 \text{ мм}, h_w = 290 \text{ мм}$		
880	423	0,37
640	313	0,52
850	279	0,50
640	277	0,68
630	267	0,71
400	251	0,70
660	250	0,62
910	243	0,64
800	195	1,34
630	190	1,09
750	186	1,07

Продолжение таблицы 3.5

Параметр $a_i \cdot I$, $\text{см}^3/\text{дм}^3$	Интенсивность циркуляции $I_{\text{ц}}, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Критическая гидравлическая нагрузка $q_{\text{с кр}}, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$
740	159	1,46
420	151	1,51
630	150	1,53
$B_j = 31 \text{ мм}, B_c = 94 \text{ мм}, h_w = 275 \text{ мм}$		
480	338	0,36
470	317	0,44
460	293	0,55
480	211	0,88
480	155	1,51
$B_j = 31 \text{ мм}, B_c = 94 \text{ мм}, h_w = 195 \text{ мм}$		
480	268	0,30
470	261	0,40
420	218	0,68
390	212	0,84
380	196	1,07
390	133	1,26
$B_j = 30 \text{ мм}, B_c = 95 \text{ мм}, h_w = 110 \text{ мм}$		
310	265	0,20
830	253	0,28
410	250	0,21
300	200	0,44
320	151	0,40
770	149	0,41
300	122	0,68
290	70	0,70
$B_j = 70 \text{ мм}, B_c = 55 \text{ мм}, h_w = 110 \text{ мм}$		
420	249	0,09
650	250	0,08
820	150	0,20
350	150	0,22

Для получения аналитической зависимости критической гидравлической нагрузки на осветлитель от значимых факторов экспериментальные данные были обработаны в программе TableCurve 3D. Зависимость (3.12) получена при значении величины $h_w = 290 \text{ мм}$, а формула (3.13) – при ширине зазора $B_j = 30 \text{ мм}$.

$$q_{\text{с кр}} = 51,5 \cdot I_{\text{ц}}^{-1,329} \cdot B_j^{-0,896}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}); \quad (3.12)$$

$$q_{\text{с кр}} = 0,766 \cdot I_{\text{ц}}^{-1,225} \cdot h_w^{1,203}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (3.13)$$

Коэффициент множественной детерминации, выражающий сходимость полученных зависимостей с данными эксперимента, составил $R_{qb}^2 = 0,912$ для формулы (3.12) и $R_{qh}^2 = 0,803$ – для формулы (3.13). Полученные значения коэффициентов детерминации свидетельствуют о высокой схожести уравнений с эмпирическими данными.

Геометрическими параметрами, которые оказывают значительное влияние на величину критической гидравлической нагрузки в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации являются глубина сооружения относительно нижней кромки наклонного козырька h_w и ширина зазора B_j . Согласно формулам (3.12-3.13), величины этих размеров имеют приблизительно равную значимость при расчёте критической гидравлической нагрузки на осветлитель. При этом устойчивость взвешенного слоя к воздействию восходящего потока повышается при снижении ширины B_j и при увеличении глубины h_w . Для упрощения формул (3.12-3.13) с исключением влияния масштаба сооружения на результат вычислений, основные геометрические параметры осветлителя представлены величиной, которая представляет собой отношение глубины h_w к ширине B_j

$$S' = \frac{h_w}{B_j}, \quad (3.14)$$

где S' – относительная длина затопленной струи, м/м.

Значения интенсивности циркуляции и гидравлической нагрузки из таблицы 3.5, соответствующие различным величинам относительной длины струи S' обработаны в программе TableCurve 3D (приложение В). В результате обработки данных экспериментальных исследований получена зависимость (3.15) критической гидравлической нагрузки на осветлитель от интенсивности циркуляции и относительной длины струи

$$q_{c\text{ кр}} = 74,2 \cdot \frac{S'^{1,053}}{I_{\text{ц}}^{1,248}}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (3.15)$$

Коэффициент множественной детерминации составил $R_q^2 = 0,824$, что указывает на высокую сходимость формулы (3.15) с результатами исследований,

произведённых на лабораторной установке. На рисунке 3.9 представлена криволинейная поверхность, построенная в среде TableCurve 3D (v4.0) по зависимости (3.15) в пределах исследуемых значений аргументов. На график нанесены точки, координаты которых соответствуют экспериментальным данным интенсивности циркуляции $I_{ц}$, относительной длины струи S' и критической гидравлической нагрузки на осветлитель $q_{с\text{ кр}}$.

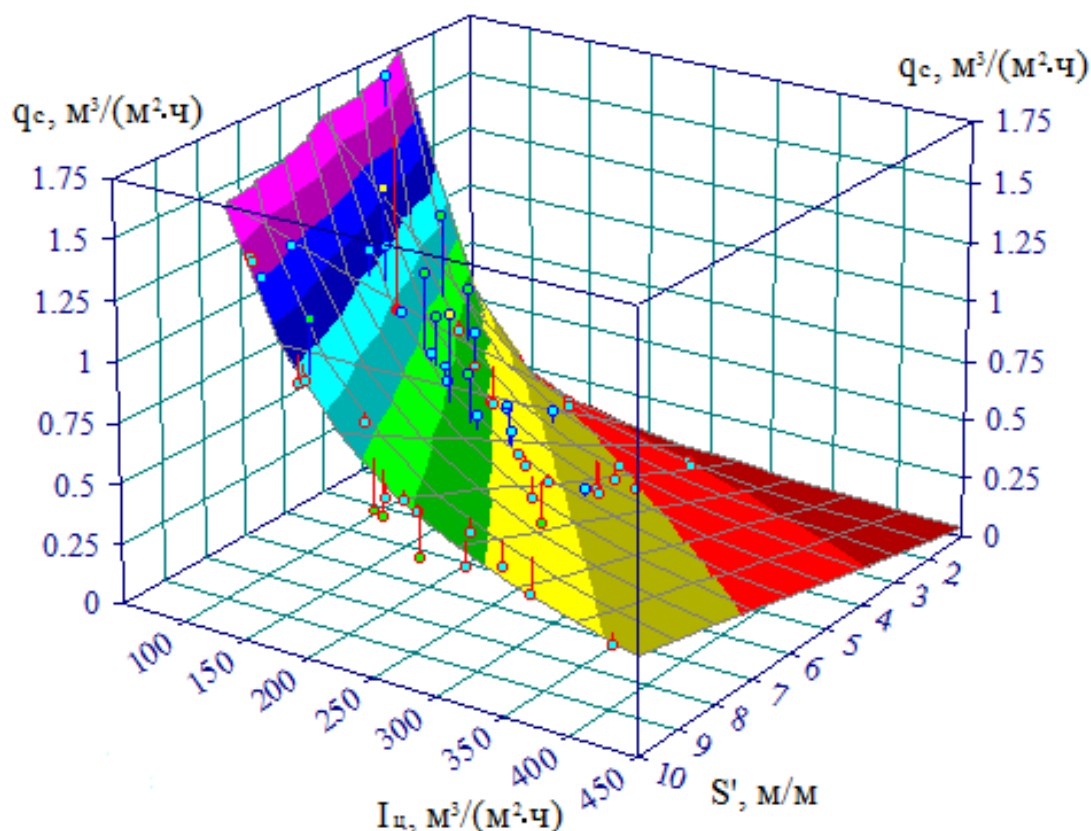


Рисунок 3.9 – График зависимости критической гидравлической нагрузки на осветлитель $q_{с\text{ кр}}$ от интенсивности циркуляции $I_{ц}$ и относительной длины струи S'

В процессе эксплуатации аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации недопустимо превышение критической гидравлической нагрузки, которое приведёт к значительному выносу активного ила с очищенной жидкостью. Максимально допустимую гидравлическую нагрузку следует принимать по нижнему пределу доверительного интервала – по формуле (3.16)

$$q_{с\text{ доп}} = q_{с\text{ кр}} - t_q \cdot \sigma_q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (3.16)$$

где t_q – критерий Стьюдента, определяемый по [142], при количестве степеней свободы $f > 30$ и уровне значимости $\alpha_q = 0,1$ составляет $t_q = 1,28$;

σ_q – стандартное отклонение, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, которое определено по формуле

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{c \text{ кр, расч}} - q_{c \text{ кр, эксп}})^2}{n_q}}, \quad (3.17)$$

где $q_{c \text{ кр, эксп}}$, $q_{c \text{ кр, расч}}$ – значения критических гидравлических нагрузок на осветлитель, определённые экспериментально или путём расчёта по формуле (3.15) соответственно, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, при i -ом значении опыта из таблицы 3.5;

n_q – количество опытов по определению критической гидравлической нагрузки на осветлитель, шт.

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{3,472}{68}} = 0,226.$$

Формула (3.16) примет вид

$$q_{c \text{ доп}} = q_{c \text{ кр}} - 1,282 \cdot 0,226 = 74,2 \cdot \frac{S^{1,053}}{I_{\text{ц}}^{1,248}} - 0,29, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Соответственно, при заданной гидравлической нагрузке на осветлитель q_c максимальная допустимая интенсивность циркуляции вычисляется по формуле

$$I_{\text{ц. max}} = \frac{31,5 \cdot S^{0,844}}{(q_c + 0,29)^{0,801}}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (3.18)$$

При гидродинамических параметрах, значения которых не превышают рассчитанных по формулам (3.16), (3.18) предотвращается чрезмерное поднятие уровня поверхности илоразделения, способное привести к выносу активного ила с очищенной жидкостью.

3.5 Исследование задержания взвешенных веществ в осветлителе в зависимости от гидродинамических параметров водоворотной зоны

Перед внедрением в производственном аэротенке-осветлителе технологии обновления взвешенного слоя, которая описана в разделе 2.1, необходимо экспериментальное подтверждение её способности к отделению иловых частиц.

Концентрация взвешенных веществ в очищенной аэротенком-осветлителем жидкости зависит от свойств активного ила и гидродинамических параметров водоворотной зоны. Повышение значения гидравлической нагрузки в защитной зоне препятствует последующему осаждению оторванных от взвешенного слоя частиц.

Седиментационные и фильтрующие свойства активного ила, которые определяют способность иловых частиц к коагуляции, а также их склонность к отрыву от образовавшихся хлопков, зависят от многих факторов: концентрация и зольность активного ила, pH жидкости, температура иловой смеси и т.д. Ввиду большого количества влияющих факторов, анализ результатов экспериментов должен учитывать только наиболее значимые факторы.

Варьируемыми параметрами были: концентрация активного ила a_i , интенсивность циркуляции $I_{\text{ц}}$ и гидравлическая нагрузка на зеркало защитной зоны q_s . Гидравлическая нагрузка на зеркало защитной зоны равна отношению расхода осветляемой жидкости к площади поверхности водного зеркала защитной зоны аэротенка-осветлителя

$$q_s = \frac{Q_q}{\omega_s} = q_c \cdot \frac{\omega_c}{\omega_s}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (3.19)$$

где ω_s – площадь зеркала защитной зоны, м^2 , которая вычисляется по формуле (3.20) при прямоугольной, или (3.21) – при круглой в плане форме аэротенка-осветлителя

$$\omega_{s, \text{пр}} = L \cdot B_s, \text{ м}^2; \quad (3.20)$$

$$\omega_{s, \text{кольц}} = \pi \cdot B_s \cdot (2 \cdot r - B_s), \text{ м}^2, \quad (3.21)$$

где B_s – расстояние между наружной стенкой аэротенка-осветлителя и вертикальной разделительной перегородкой, м..

Параметры, влияние которых на задержание взвешенных веществ не планируется варьировать, должны сохранять постоянные значения для предотвращения ошибки эксперимента, обусловленной флуктуациями этих параметров. Пределы значений не варьируемых параметров, поддерживаемые в процессе экспериментальных исследований, приведены в таблице 3.6. Свойства

активного ила (концентрация, иловый индекс, рН, температура, зольность) измерялись в соответствии со стандартными методиками [151, 152].

Таблица 3.6 – Свойства активного ила при проведении исследований задержания взвешенных веществ

Иловый индекс I, см ³ /г	рН иловой смеси	Температура t, °С	Зольность ила А, %.
85...100	7,3...7,8	21...25	24...27

Экспериментальные исследования включали определение концентрации взвешенных веществ на выходе из лабораторной модели аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации (рисунки 3.1-3.4). Соотношения геометрических размеров аэротенка-осветлителя при проведении опытов являлись фиксированными и назначались близкими к оптимальным, на основании результатов экспериментов, описанных в разделе 3.4. При проведения опытов по определению концентрации взвешенных веществ в осветлённой жидкости приняты: глубина дна относительно нижней кромки наклонного козырька $h_w = 290$ мм, ширина зазора $B_j = 30$ мм, ширина осветлителя $B_c = 95$ мм. Угол β положения наклонного козырька относительно вертикали принят равным 40° .

При одних и тех же уровнях влияющих факторов производится 3 опыта. Концентрация взвешенных веществ в осветлённой жидкости рассчитывается как среднее арифметическое из значений, полученных при одинаковых входящих параметрах. Экспериментальные исследования, выполняемые на различных уровнях варьируемых параметров, проводятся в случайном порядке, чтобы снизить влияние случайных отклонений неучтённых параметров на результаты опытов.

Осреднённые значения концентраций взвешенных веществ, полученные опытным путём при соответствующих гидродинамических параметрах потоков и концентрациях активного ила в модели аэротенка-осветлителя, представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Зависимость концентрации взвешенных веществ в осветлённой жидкости от концентрации ила в аэротенке-осветлителе, нагрузки на зеркало защитной зоны и интенсивности циркуляции

Значения варьируемых факторов			Концентрации взвешенных веществ на выходе, мг/дм ³							
			C _{в.в.і}			Среднее значение	C _{в.в.ф} по формуле (3.22)	Пределы доверительного интервала		
a _i , г/дм ³	q _s , м ³ /(м ² ·ч)	I _ц , м ³ /(м ² ·ч)	№ измерения					C _{в.в.ср}		Нижний
			1	2	3	C _{в.в.ниж}	C _{в.в.верх}			
2,72	1,59	262	19,25	17,4	24,7	20,45	17,56	9,23	25,90	
2,72	3,18	262	33,75	38	25,3	32,35	31,44	23,10	39,77	
2,72	4,77	262	37,75	46,2	43,5	42,48	44,19	35,86	52,53	
3,27	1,59	247	13,75	7,3	8,5	9,85	14,58	6,24	22,91	
3,27	1,59	318	17	17	17,3	17,10	25,31	16,97	33,64	
3,27	1,59	359	38,8	41,7	40,4	40,30	34,80	26,47	43,13	
4,35	1,59	135	9,7	7,9	9,2	8,93	5,48	-2,86	13,81	
4,35	2,58	170	11,5	10,2	11	10,90	10,80	2,47	19,14	
4,35	3,38	170	18,9	19,4	18,1	18,80	13,55	5,22	21,89	
6,97	1,59	247	7,9	8,8	7,5	8,07	10,94	2,61	19,28	

В результате анализа данных экспериментального исследования в программе DataFit (версия 9.0.59) была принята степенная зависимость концентрации взвешенных веществ на выходе из аэротенка-осветлителя от гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны q_s , интенсивности циркуляции иловой смеси $I_{ц}$ и концентрации активного ила в аэротенке a_i (формула 3.22). Коэффициент множественной детерминации составил $R_c^2 = 0,88$. Определение коэффициентов уравнения (3.22) в программной среде DataFit представлено в приложении Г.

$$C_{в.в.} = 2,27 \cdot a_i^{-0,379} \cdot q_s^{0,84} \cdot 1,0078^{I_{ц}}, \text{ мг/дм}^3, \quad (3.22)$$

где $C_{в.в.}$ – концентрация взвешенных веществ на выходе из аэротенка-осветлителя, мг/дм³.

Значения расчётной концентрации при соответствующих величинах варьируемых параметров представлены в таблице 3.7. При превышении гидравлической нагрузкой критической величины, определяемой по формулам (3.15), (3.19) концентрация взвешенных веществ на выходе из аэротенка-осветлителя значительно превышает результаты расчётов формулы (3.22), т.е. она справедлива только при $q_s < q_{s \text{ кр.}}$.

Критерий Стьюдента, при количестве измерений $n_c = 30$ шт. и доверительной вероятности $\alpha_c = 0,90$ составляет $t_c = 1,7$ [153]. Стандартное отклонение для измерения концентрации взвешенных веществ в осветлённой жидкости определяется по формуле

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{\text{в.в.и}} - C_{\text{в.в.ф.}})^2}{n_c}}, \quad (3.23)$$

где $C_{\text{в.в.и}}$, $C_{\text{в.в.ф.}}$ – значения концентраций взвешенных веществ в осветлённой жидкости, определённые экспериментально и по формуле (3.22) соответственно.

n_c – суммарное количество измерений, шт.

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{575,5}{30}} = 4,38 \text{ мг/дм}^3.$$

В таблице 3.7 приведены значения нижнего и верхнего пределов доверительного интервала, рассчитанные по формулам (3.24) и (3.25)

$$C_{\text{в.в.ниж.}} = C_{\text{в.в.ф.}} - t_c \cdot \sigma_c = 2,27 \cdot a_i^{-0,379} \cdot q_s^{0,84} \cdot 1,0078^{I_u} - 8,76, \text{ мг/дм}^3; \quad (3.24)$$

$$C_{\text{в.в.верх.}} = C_{\text{в.в.ф.}} + t_c \cdot \sigma_c = 2,27 \cdot a_i^{-0,379} \cdot q_s^{0,84} \cdot 1,0078^{I_u} + 8,76, \text{ мг/дм}^3. \quad (3.25)$$

На рисунке 3.10 представлен график зависимости концентрации взвешенных веществ в осветлённой жидкости от гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны при концентрации иловой смеси в аэротенке $a_i = 2,72 \text{ г/дм}^3$, иловом индексе $I = 90 \text{ см}^3/\text{г}$ и интенсивности циркуляции $I_u = 262 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. График построен по эмпирической формуле (3.22), границы доверительного интервала – по формулам (3.24), (3.25).

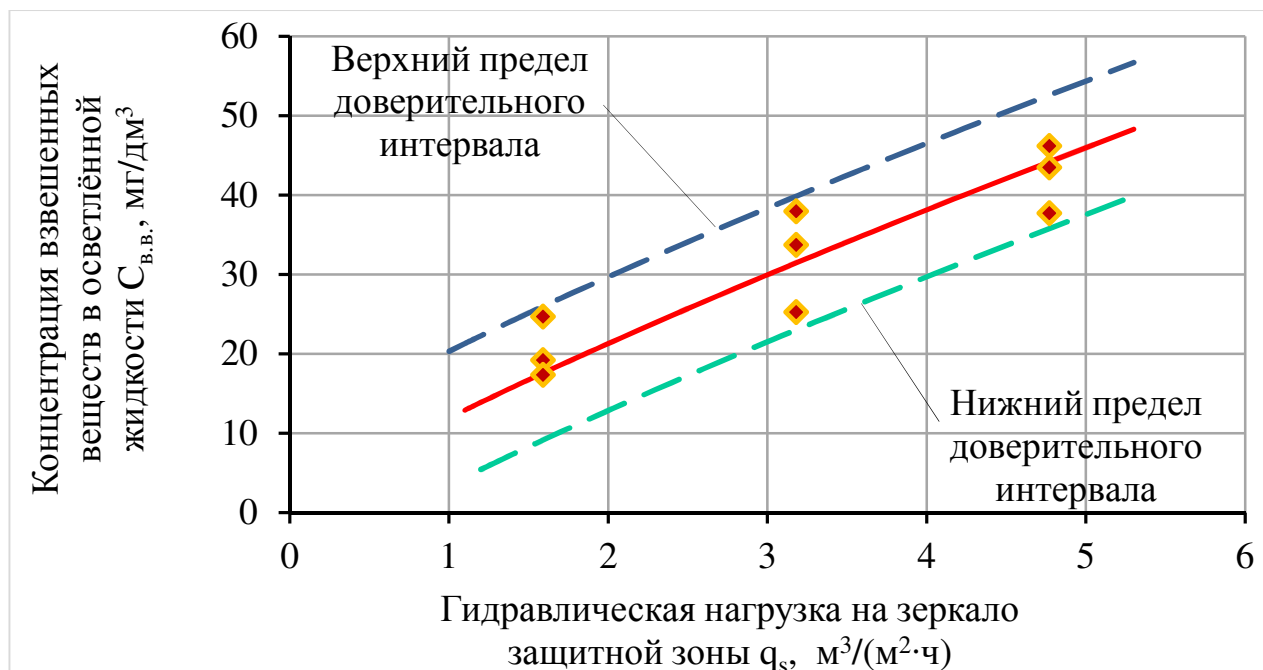


Рисунок 3.10 - График зависимости концентрации взвешенных веществ в осветлённой жидкости от гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны при концентрации иловой смеси в аэротенке $a_i = 2,72$ г/дм³, иловом индексе $I = 90$ см³/г и интенсивности циркуляции $I_c = 262$ м³/(м²·ч)

По формуле (3.26), которая получена путём преобразования формулы (3.22), задаваясь требуемыми значениями концентраций активного ила в аэротенке и взвешенных веществ в очищенной жидкости, можно вычислить максимальную гидравлическую нагрузку на зеркало защитной зоны в зависимости от интенсивности циркуляции

$$q_{s \max} = 0,377 \cdot \frac{C_{\text{в.в.}}^{1,19} \cdot a_i^{0,451}}{1,0078^{1,19 \cdot I_c}} \quad (3.26)$$

На рисунке 3.11 представлены графики зависимости максимальной гидравлической нагрузки от интенсивности циркуляции для различных концентраций активного ила в аэротенке-осветлителе. Графики построены на основании вычислений, выполненных по формуле (3.26), при расчётной концентрации взвешенных веществ в очищенной жидкости 15 мг/дм³. Расчёт концентрации взвешенных веществ справедлив для условий, в пределах которых не происходит размытие взвешенного слоя. Пределы существования устойчивого взвешенного слоя определены в предыдущем подразделе.

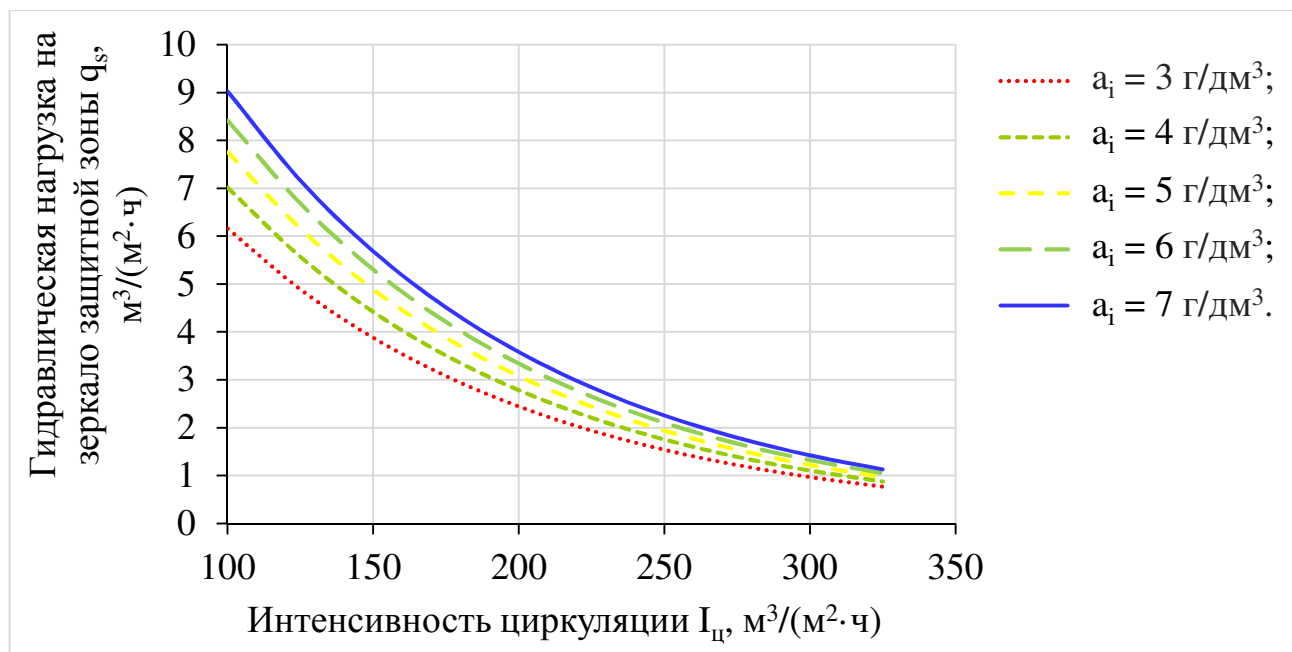


Рисунок 3.11 – расчётные значения максимальной гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны, соответствующие $C_{\text{в.в.}} = 15 \text{ мг/дм}^3$

Данные таблицы 3.5 и рисунка 3.11 свидетельствуют о том, что лучшего эффекта осветления можно достичь посредством снижения гидравлической нагрузки и уменьшения интенсивности циркуляции, а также за счёт увеличения концентрации активного ила в аэротенке-осветлителе.

Более высокую максимальную гидравлическую нагрузку на зеркало защитной зоны для более концентрированных смесей можно объяснить тем, что чем больше концентрация активного ила, тем меньше пористость взвешенного слоя, что приводит к более глубокой фильтрации через слой ила.

Интенсивность циркуляции и гидравлическая нагрузка приводят к повышению скорости восходящего потока во взвешенном слое. Соответственно, увеличение параметров $I_{\text{ц}}$ и q_s приводит к повышению направленного вверх гидродинамического давления на находящиеся в осветлителе частицы, которое противодействует их гравитационному осаждению. Повышение гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны снижает вероятность оседания оказавшейся в ней частицы. Движение потока в водоворотной зоне, обуславливаемое интенсивностью циркуляции, затрудняет агломерацию активного ила в более крупные хлопья. Это препятствует росту гидравлической крупности частиц во взвешенном слое, в особенности для концентрированных иловых смесей. Таким

образом объясняется падение допустимой гидравлической нагрузки при увеличении интенсивности циркуляции.

3.6 Выводы по третьему разделу

Для проведения экспериментальных исследований изготовлена лабораторная установка, включающая модель аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации и оборудование для подачи в неё воздуха, сточной жидкости и воды, а также для отвода осветлённой жидкости. Проведены следующие исследования:

- экспериментально подтверждена достоверность теоретических зависимостей для вычисления расхода жидкости, которая циркулирует в аэротенке-осветлителе в результате действия затопленной эрлифтной системы аэрации;

- выполнено исследование угла раскрытия затопленной турбулентной струи. Условия в аэротенке-осветлителе отличаются наличием поперечного ограничения на пути струйного потока, образующего водоворотную зону за плохо обтекаемым телом. Полученные значения совпали с коэффициентами, рекомендуемыми для случая течения неограниченной по длине турбулентной струи, которая образует водоворотную зону;

- исследована максимально допустимая гидравлическая нагрузка на осветлитель. Её зависимость от интенсивности циркуляции $I_{\text{ц}}$ и основных геометрических параметров осветлителя (ширины зазора B_j и глубины h_w) выражается зависимостью

$$q_{\text{с доп}} = 74,2 \cdot \frac{(h_w / B_j)^{1,053}}{I_{\text{ц}}^{1,248}} - 0,29, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч});$$

- экспериментально исследована зависимость задержания взвешенных веществ в жидкости, которая очищается в аэротенке-осветлителе, от гидродинамических параметров его работы и от концентрации активного ила.

РАЗДЕЛ 4

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ АЭРОТЕНКА-ОСВЕТИТЕЛЯ С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ

4.1 Обоснование физического моделирования аэротенка-осветлителя

4.1.1 Выбор критериев моделирования аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации

Перенос параметров лабораторной модели на натурный объект следует производить с соблюдением геометрического, кинематического и динамического подобия.

Соблюдение геометрического подобия означает сохранение одинаковых соотношений всех геометрических размеров для модели и для природы. При моделировании аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации: $V_{jн} = k_{\Gamma} \cdot V_{jм}$, $V_{сн} = k_{\Gamma} \cdot V_{см}$, $h_{wn} = k_{\Gamma} \cdot h_{wm}$, $\beta_n = \beta_m$ и т.д., где k_{Γ} – коэффициент геометрического подобия.

Соблюдение кинематического подобия при моделировании аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации означает, что $I_{цн} = I_{цм}$, $q_{сн} = q_{см}$ и т.д., где $I_{цн}$ и $I_{цм}$ – значения интенсивностей циркуляции для натурального и модельного объекта соответственно; $q_{сн}$ и $q_{см}$ – величины гидравлических нагрузок на зеркало защитной зоны, соответственно, натурального и модельного аэротенка-осветлителя.

Динамическое подобие заключается в пропорциональности величин и равенстве направлений векторов всех сил, действующих в сходственных точках кинематически и геометрически подобных потоков. Соблюдение динамического подобия обеспечивается за счёт равенства значений критериев подобия в модельном и натурном объекте, или за счёт того, что в условиях исследования модели и эксплуатации натурального объекта имеет место автомодельность по соответствующим критериям подобия. К критериям подобия, применяемым при

моделировании гидродинамических процессов относят числа Рейнольдса (Re), Фруда (Fr) и др. [88, 154-156].

Течение жидкости во взвешенном слое происходит в пористой среде, в которой режим движения восходящего потока определяется размерами пор [91]. Поэтому соответствие критериев Рейнольдса во взвешенных слоях модели и природы осуществляется за счёт поддержания постоянной пористости, без необходимости соблюдения равенства поперечных площадей осветлителей. Соблюдение подобия по числу Рейнольдса должно обеспечиваться в нисходящем потоке аэротенка, где за счёт турбулентности осуществляется массообмен с восходящим потоком осветлителя. Для выполнения автомодельности по критерию Рейнольдса достаточно, чтобы движение модельного и натурального потоков соответствовали квадратичной зоне сопротивления. Величину числа Рейнольдса в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации можно рассчитать для площади поперечного сечения потока иловой смеси в зазоре

$$Re = \frac{\rho_{см} \cdot u_0 \cdot d_{экр}}{\mu_{см}}, \quad (4.1)$$

где $d_{экр}$ – эквивалентный диаметр сечения зазора, вычисляемый по формуле

$$d_{экр} = \frac{4 \cdot \omega_j}{\chi}, \text{ м}, \quad (4.2)$$

где χ – периметр сечения зазора, м, равный $(B_j + L)/2$ при прямоугольной в плане форме аэротенка-осветлителя и $2\pi \cdot (2 \cdot r_a + B_j)$ – при круглой;

ω_j – площадь сечения зазора, м^2 .

В исследованной области лабораторной модели аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации число Рейнольдса составляло $Re \approx 2,5 \cdot 10^3 \dots 7 \cdot 10^3$. Это соответствует переходной или полутурбулентной (при $Re < 3000$) либо вполне турбулентной (при $Re > 3000$) струе [157]. При удалении от зазора число Рейнольдса возрастает, поскольку в результате эжекции скорость возрастает в большей степени, чем эквивалентный диаметр. Ввиду изменения поперечного сечения потока, определить область сопротивления представляется возможным только экспериментальным путём.

Критерий Фруда характеризует соотношение между внешней силой, в поле которой происходит движение жидкости (силой тяжести), и силой инерции. В аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации нисходящий поток инициирует образование восходящего потока водоворотной зоны, который поддерживает взвешенный слой ила. Сила гидростатического давления взвешенного слоя, которая пропорциональна его высоте, может рассматриваться как внешняя сила, оказывающая влияние на параметры водоворотной зоны. Автомодельность по критерию Фруда выполняется при $Fr < 0,05 \dots 0,1$ [154]. Для зазора величина критерия Фруда в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации рассчитывается по формуле

$$Fr = \frac{u_0^2}{g \cdot d_{\text{экв}}}. \quad (4.3)$$

Число Фруда для параметров, принятых при проведении многофакторного эксперимента, описанного в подразделе 3.4, составляет $Fr \approx (1,7 \dots 9,8) \cdot 10^{-3}$. Величина критерия Фруда в зазоре лабораторной модели аэротенка-осветлителя значительно ниже $0,05 \dots 0,1$. В натурном сооружении, при соблюдении геометрического и кинематического подобий, ввиду постоянства скорости u_0 и возрастания линейного размера $d_{\text{экв}}$, число Фруда примет ещё меньшие значения. Следовательно, по критерию Фруда в области значений, соответствующих условиям модельного и натурального аэротенка-осветлителя, условие автомодельности выполняется.

Зависимости (3.16) и (3.18), которые выражают связь между допустимыми гидродинамическими параметрами работы взвешенного слоя аэротенка-осветлителя и его геометрическими размерами, основаны на эмпирических данных. Для использования в расчётах производственных сооружений эмпирических зависимостей, полученных на лабораторной модели, необходимо соблюдение автомодельности по критериям Рейнольдса и Фруда. Гипотеза об отсутствии влияния масштаба сооружения на параметры работы осветлителя в исследуемой области требует экспериментального подтверждения.

4.1.2 Исследование критической гидравлической нагрузки в полупромышленной модели аэротенка-осветлителя

С целью проверки соблюдения динамического подобия между лабораторной установкой и геометрически подобными ей производственными сооружениями была собрана полупромышленная модель аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной аэрацией (Рис. 4.1) [158]. Полупромышленная модель аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации выполнена геометрически подобной по отношению к лабораторной модели, представленной в разделе 3 диссертационной работы, в масштабе 2:1.



Рисунок 4.1 – Фотоизображение полупромышленной модели аэротенка-осветлителя

Схема полупромышленной установки аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации аналогична схеме лабораторной установки, которая изображена на рисунке 3.1. Для аэрации в полупромышленном аэротенке-осветлителе использован компрессор HIBLOW HP-60. Контроль количества

воздуха, подаваемого через систему аэрации, осуществлялся газовым счётчиком G 2,5. Фотоизображение полупромышленной установки приведено на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Фотоизображение полупромышленной установки:

1 – газовый счётчик G 2,5; 2 – трубки подачи воздуха; 3 – компрессор HIBLOW HP-60; 4 – трубка подачи жидкости в аэротенк-осветлитель; 5 - полупромышленная модель аэротенка-осветлителя; 6 – трубки отвода осветлённой жидкости; 7 – промежуточная ёмкость.

Размеры лабораторной и полупромышленной моделей аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации представлены в таблице 4.1. Геометрические параметры, обозначения которых использованы в таблице 4.1, приведены на рисунке 3.4.

При соблюдении кинематического подобия, в соответствии с формулами (4.1-4.3), значения числа Рейнольдса в полупромышленной модели вдвое превышают числа Рейнольдса в лабораторной, а критерий Фруда для полупромышленного аэротенка-осветлителя – вдвое меньше критерия Фруда в лабораторной модели. Если осуществлять масштабирование с соблюдением геометрического и кинематического подобий, то критерий Рейнольдса в условиях натурного производственного аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации будет изменяться пропорционально, а критерий Фруда,

соответственно, обратно пропорционально по отношению к линейным размерам. Если в экспериментальных моделях числа Рейнольдса достигают значений, соответствующих квадратичной области, то и в натурном объекте будет иметь место зона квадратичного сопротивления. Таким образом, подтверждение автомодельности по критериям Рейнольдса и Фруда в области лабораторной и полупромышленной экспериментальных установок служит доказательством автомодельности в области действия производственного сооружения.

Таблица 4.1 – Размеры экспериментальных моделей

Наименование геометрического параметра	Значение соответствующего размера, мм	
	Лабораторная модель	Полупромышленная модель
Высота корпуса $H_{стр}$	407	814
Рабочая глубина H	370	740
Высота наклонной части дна H_d	96	191
Глубина дна относительно низа наклонного козырька h_w	290	580
Ширина наклонной части дна B_d	45	90
Длина корпуса L	151	302
Ширина корпуса B	145	288
Ширина эрлифта B_a	20	38
Ширина зазора B_j	30	60
Ширина осветлителя B_c	95	187

По аналогии с опытами, проведёнными на лабораторной модели аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации, в полупромышленной модели определялись такие критические значения гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны $q_{s\text{ кр}}$, при которых увеличение высоты взвешенного слоя не вызывает вынос с осветлённой жидкостью иловых частиц непосредственно из его объёма. Опыты проводились при варьируемых интенсивностях циркуляции ($I_{ц} = 100...300 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$). Концентрация взвешенных веществ в иловой смеси

составляла 4,3...5,9 г/дм³, иловый индекс – 90...100 см³/г, температура иловой смеси 22...24°C. Результаты экспериментов с указанием параметра $a_i \cdot I$ иловой смеси для каждого опыта сведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Зависимость критической гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны от интенсивности циркуляции в лабораторной и полупромышленной моделях аэротенка-осветлителя

Седиментационные свойства иловой смеси			Гидродинамические параметры, м ³ /(м ² ·ч)	
Концентрация a_i , г/дм ³	Иловый индекс I , см ³ /г	Параметр $a_i \cdot I$, см ³ /дм ³	Интенсивность циркуляции $I_{ц}$	Гидравлическая нагрузка на зеркало защитной зоны q_s
Данные испытания полупромышленной модели				
5,2	98	510	135	8,9
4,8	92	440	150	8,3
5,1	100	510	168	7,5
5,2	98	510	198	4,9
4,3	95	410	204	5,55
5,9	90	530	229	3,75
5,1	100	510	250	3,45
4,3	93	400	275	3,4
4,6	93	430	300	2,95
Данные испытания лабораторной модели				
8,9	99	880	423	1,85
7,9	81	640	313	2,6
8,8	97	850	279	2,5
7,9	81	640	277	3,4
8,5	74	630	267	3,55
4,4	91	400	251	3,5
8,6	77	660	250	3,1
8,9	102	910	243	3,2
8,7	92	800	195	6,7
8,5	74	630	190	5,45
8,1	93	750	186	5,35
8,0	93	740	159	7,3
4,4	95	420	151	7,55
8,6	73	630	150	7,65

На рисунке 4.3 представлены точки, построенные по данным испытаний полупромышленной и лабораторной моделей, которые приведены в таблице 4.2.

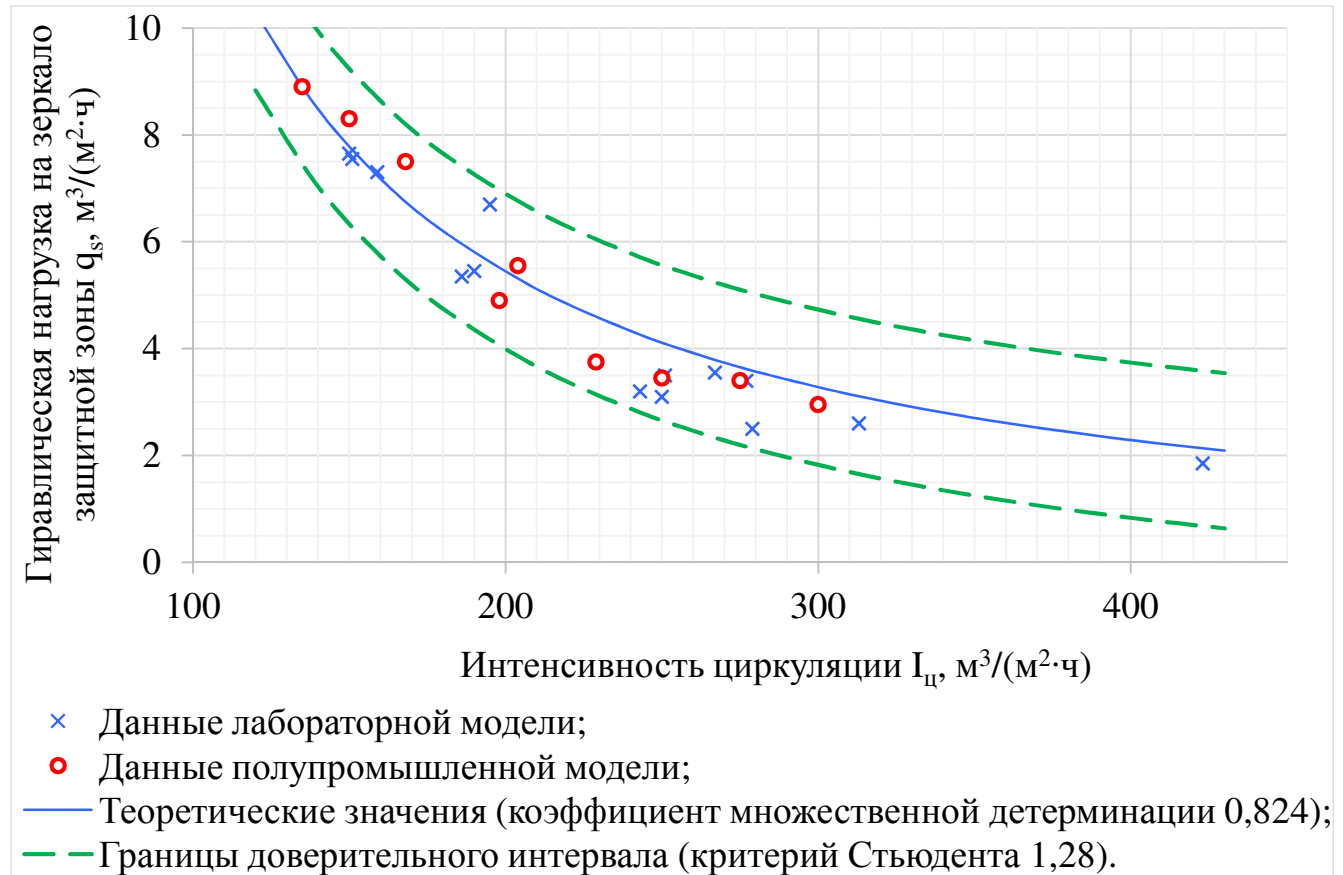


Рисунок 4.3 – Зависимость критической гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны от интенсивности циркуляции в геометрически подобных экспериментальных моделях аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации

Теоретические значения критических гидравлических нагрузок на осветлитель рассчитаны по эмпирической формуле (3.15), полученной на основании многофакторного испытания лабораторной модели. Координаты кривой, обозначающей нижнюю границу доверительного интервала рассчитаны по формуле (3.16). Положение верхней границы доверительного интервала вычислено по формуле (4.4)

$$q_c = 74,2 \cdot \frac{S^{1,053}}{I_u^{1,248}} + t_q \cdot \sigma_q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (4.4)$$

В соответствии с [142], при количестве степеней свободы $f > 30$ и уровне значимости $\alpha_q = 0,1$, критерий Стьюдента составляет $t_q = 1,28$, а стандартное отклонение, вычисленное по формуле (3.17) составило $\sigma_q = 0,226 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Гидравлические нагрузки q_s на зеркало защитной зоны лабораторной модели рассчитаны по соответствующим значениям гидравлических нагрузок на осветлитель q_c по формуле (3.19).

Как видно из рисунка 4.3, точки, полученные при исследовании зависимости критической гидравлической нагрузки от интенсивности циркуляции в полупромышленной модели аэротенка-осветлителя не выходят за пределы доверительного интервала, определённого на основании испытаний лабораторной модели. Совпадение результатов экспериментов, проведенных на двух геометрически подобных моделях аэротенка-осветлителя указывает на отсутствие значимости масштаба сооружения при определении его допустимых гидродинамических параметров. Эмпирические формулы для определения максимальной допустимой гидравлической нагрузки, которые были получены при испытании лабораторной модели, применимы для расчёта производственных аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации.

4.2 Разработка методики расчёта аэротенка-осветлителя

Исходными данными для проектирования аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации являются:

- количество сточных вод, выражаемое через суточную $Q_{\text{сут}}$, $\text{м}^3/\text{сут}$ и часовую $Q_{\text{ч}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$ производительности аэротенка-осветлителя;
- полное биологическое потребление кислорода в исходной сточной воде $L_{\text{ен}}$, $\text{мг}/\text{дм}^3$ и в очищенной жидкости $L_{\text{ех}}$, $\text{мг}/\text{дм}^3$;
- средняя концентрация активного ила в биореакторе a_i , $\text{г}/\text{дм}^3$;
- нагрузка на активный ил B_x , $\text{г}/(\text{г} \cdot \text{сут})$;
- удельная скорость окисления ρ , $\text{г}/(\text{г} \cdot \text{ч})$.

Требуемый полезный объём вычисляется по нагрузке на активный ил (формула (4.5)) [159, 160].

$$W = \frac{Q_{cym} \cdot (L_{en} - L_{ex})}{a_i \cdot (1 - A) \cdot 10^3 \cdot B_x}, \text{ м}^3. \quad (4.5)$$

где A – зольность активного ила.

Рассчитывается окислительная мощность биологического реактора

$$OM = \rho \cdot a_i \cdot (1 - A) \cdot W, \text{ кг/ч} \quad (4.6)$$

Вычисляется требуемый расход воздуха

$$Q_{air} = \frac{OC}{k_{исп} \cdot M_o}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (4.7)$$

где OC – окислительная способность аэрационной системы, принимаемая равной окислительной мощности аэротенка-осветлителя OM , кг/ч;

$k_{исп}$ – коэффициент использования кислорода воздуха, определяемый исходя из глубины и типа аэраторов;

M_o – массовое содержание кислорода в подаваемом воздухе, кг/м³.

Назначается интенсивность аэрации в затопленном эрлифте q_{air} , м³/(м²·ч). В соответствии с [15], принимается $q_{air} = 10 \dots 20$ м³/(м²·ч).

По расходу воздуха и принятой интенсивности аэрации рассчитывается поперечная площадь затопленного эрлифта

$$\omega_a = \frac{Q_{air}}{q_{air}}, \text{ м}^2. \quad (4.8)$$

Конструктивно назначается форма аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации. Рекомендуется принимать прямоугольную в плане форму при большой производительности и ограниченной глубине сооружений. Круглую в плане форму аэротенка-осветлителя рекомендуется применять при относительно низком расходе очищаемых стоков и возможности обеспечения большой рабочей высоты.

При проектировании **прямоугольных в плане** аэротенков-осветлителей следует задаться значением рабочей высоты H , м.

На основании принятой рабочей глубины принимается ширина осветлителя $B_c = (0,25 \dots 0,4) \cdot H$. Глубина дна аэротенка-осветлителя относительно нижней кромки наклонного козырька определяется как $h_w = H - B_c$. Ширина зеркала

защитной зоны принимается равной $B_s = 0,2 \cdot B_c$. Ширину зазора B_j между затопленной перегородкой и нижней кромкой наклонного козырька следует принимать равной 0,3...0,35 от ширины B_c . Глубина погружения вертикальной разделительной перегородки под уровень свободной поверхности $z_s = 0,05 \cdot B_c$ при значении угла между наклонным козырьком и вертикальной плоскостью $\beta = 40^\circ$. Ширина наклонной части, которая должна занимать участок дна, не находящийся в поле соударения с турбулентной затопленной струёй рассчитывается по формуле (4.9). Если вычисленное по формуле (4.9) значение оказывается отрицательным, то всё дно выполняется горизонтальным (тогда $B_d = 0$).

$$B_d = B_c - 0,175 \cdot h_w, \text{ м.} \quad (4.9)$$

Высота наклонной части дна

$$H_d = B_d \cdot \operatorname{tg} \alpha_d, \text{ м,} \quad (4.10)$$

где α_d – угол наклонной поверхности, устраиваемой в месте сопряжения боковых стен и дна аэротенка-осветлителя, по отношению к горизонтальной плоскости. Угол α_d , исходя из нормативных требований к углу наклона стенок иловых прямков вторичных отстойников [25, 161], принимается равным 55° .

Ширина затопленного эрлифта B_a рассчитывается по формуле (4.11)

$$B_a = \frac{\omega_a}{W - H \cdot \omega_a} \cdot \left(B_j H + (B_c - B_s) \cdot \frac{(H - h_w + z_s)}{2} + h_w \cdot B_c - \frac{B_d \cdot H_d}{2} \right), \text{ м.} \quad (4.11)$$

Общая ширина секции аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации равна

$$B = B_a + B_j + B_c, \text{ м.} \quad (4.12)$$

Длина секции аэротенка-осветлителя

$$L = \frac{\omega_a}{B_a}, \text{ м.} \quad (4.13)$$

Вычисляется площадь сечения осветлителя ω_c по формуле (3.9) и площадь зеркала защитной зоны ω_s по формуле (3.20).

По формуле (4.14) рассчитывается условный объём осветлителя.

$$W_{осв} = L \cdot \left[h_w \cdot B_c - \frac{h_w^2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2) - \frac{H_d \cdot B_d}{2} \right], \text{ м}^3. \quad (4.14)$$

При расчёте **круглых в плане** аэротенков-осветлителей следует рассчитать радиус затопленного эрлифта

$$r_a = \sqrt{\frac{\omega_a}{\pi}}, \text{ м}. \quad (4.15)$$

С учётом радиуса затопленного эрлифта r_a , назначается радиус корпуса аэротенка-осветлителя r .

Принимается отношение $B_c/B_j = 3 \dots 4$. Ширина зазора вычисляется по формуле (4.16)

$$B_j = \frac{r - r_a}{1 + B_c / B_j}, \text{ м}. \quad (4.16)$$

Ширина осветлителя равна

$$B_c = r - r_a - B_j, \text{ м}. \quad (4.17)$$

Ширина зеркала защитной зоны принимается равной $B_s = 0,2 \cdot B_c$. Глубина погружения низа вертикальной разделительной перегородки под уровень свободной поверхности $z_s = 0,05 \cdot B_c$ при $\beta = 40^\circ$.

Рабочую высоту аэротенка-осветлителя круглой формы в плане следует определять по формуле

$$H = \frac{W}{\pi \cdot r^2} - \frac{B_c - z_s}{3 \cdot r^2} \times \\ \times \left((r - B_s)^2 + (r - B_c)(r - B_s) + (r - B_c)^2 \right) - z_s \cdot (2 \cdot r \cdot B_s - B_s^2), \text{ м}. \quad (4.18)$$

Вычисляется площадь сечения осветлителя ω_c по формуле (3.10) и площадь зеркала защитной зоны ω_s по формуле (3.21). Определяется высота нижней кромки наклонного козырька относительно дна аэротенка-осветлителя: $h_w = H - B_c$.

Условный объём осветлителя при круглой в плане форме биореактора рекомендуется вычислять по формуле (4.19)

$$W_{осв} = \pi \cdot \frac{B_c}{\operatorname{tg} \alpha_2} \cdot \left(r \cdot B_c - \frac{B_c^2}{3} \right), \text{ м}^3. \quad (4.19)$$

Для аэротенков-осветлителей, как прямоугольной так и круглой в плане формы, вычисляется гидравлическая нагрузка на осветлитель q_c по формуле (3.8) и гидравлическая нагрузка на зеркало защитной зоны q_s по формуле (3.19).

Для определения минимальной допустимой интенсивности циркуляции необходимо задаться допустимым временем пребывания ила в осветлителе $\tau_{w, \text{доп.}}$. Минимальной допустимой интенсивностью циркуляции $I_{ц, \text{min}}$ считается такое её минимальное значение, при котором вычисленное по формуле (2.37) время пребывания τ_w не превысит принятого $\tau_{w, \text{доп.}}$, но не меньше $I_{ц, \text{н.з.}}$, рассчитанного по формуле (2.38).

По формуле (3.18) вычисляется максимальная интенсивность циркуляции $I_{ц, \text{max}}$, значение которой должно превышать значение минимальной допустимой интенсивности циркуляции $I_{ц, \text{min}}$. Если условие $I_{ц, \text{max}} > I_{ц, \text{min}}$ не выполняется, то необходимо изменить исходные данные с целью повышения $I_{ц, \text{max}}$ и/или уменьшения $I_{ц, \text{min}}$ и повторить расчёт.

Концентрация взвешенных веществ в осветлённой жидкости, значение которой необходимо для определения необходимости доочистки по взвешенным веществам после биологической очистки в аэротенке-осветлителе, вычисляется по формуле (3.22).

Алгоритмическая схема описанного в данном подразделе расчёта представлена на рисунке 4.4.

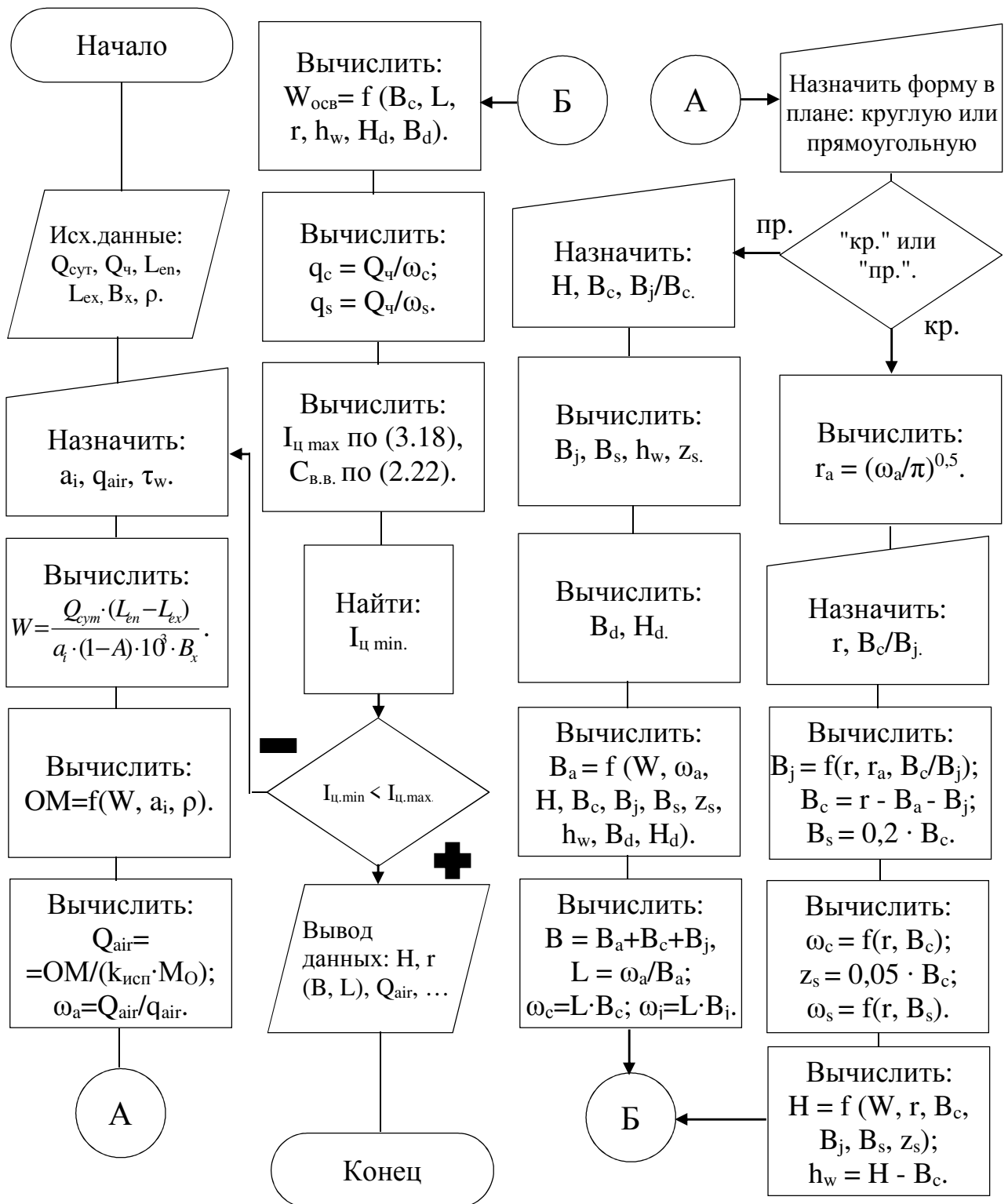


Рисунок 4.4 – Схема алгоритма проектирования аэротенков-осветителей с затопленной эрлифтной системой аэрации

Для повышения максимальной допустимой интенсивности циркуляции $I_{ц. max}$ рекомендуется:

- повысить рабочую высоту H ;

- уменьшить ширину осветлителя B_c прямоугольного или радиус r круглого в плане аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации;
- повысить соотношение B_c/B_j (или, соответственно, понизить B_j/B_c) в границах рекомендуемых значений;
- снизить интенсивность аэрации q_{air} ;
- уменьшить концентрацию активного ила a_i .

Для снижения минимальной допустимой интенсивности циркуляции $I_{ц, min}$ рекомендуется:

- повысить высоту H аэротенка-осветлителя;
- снизить соотношение B_c/B_j (или, соответственно, повысить B_j/B_c) в границах рекомендуемых значений;
- повысить интенсивность аэрации q_{air} ;
- увеличить принятое значение допустимого пребывания иловой смеси в осветлителе $\tau_w \text{ доп}$;
- уменьшить концентрацию активного ила a_i .

Для уменьшения концентрации взвешенных веществ в иловой воде, осветлённой во взвешенном слое аэротенка-осветлителя, рекомендуется снизить рабочую высоту H , увеличить радиус корпуса аэротенка-осветлителя r , уменьшить интенсивность аэрации q_{air} или понизить отношение B_c/B_j (соответственно, понизить B_j/B_c).

Исходя из полученных расчётных зависимостей, объём защитной зоны аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации составляет около 10%. Таким образом, в предлагаемом аэротенке-осветлителе часть общего объёма, которая принимает участие в биохимической обработке органических загрязнений и соединений азота, выше, чем в других существующих комбинированных биологических реакторах со взвешенным слоем.

4.3 Выводы по четвёртому разделу

1. Выполнен выбор критериев, определяющих осуществление динамического подобия в моделях аэротенков-осветлителей, выполненных с соблюдением

геометрического и кинематического подобий. Процессы поддержания и обновления взвешенного слоя осветлителя характеризуются критериями Рейнольдса и Фруда.

2. На основании теоретических расчётов чисел Рейнольдса и Фруда в области исследуемых значений гидродинамических параметров выдвинута гипотеза о соблюдении автомодельности по данным критериям для условий лабораторной модели и геометрически подобных ей производственных сооружений.

3. Осуществлены экспериментальные исследования критической гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны полупромышленной модели аэротенка-осветлителя, выполненной с соблюдением геометрического подобия по отношению к лабораторной модели. В результате анализа экспериментальных данных подтверждено отсутствие значимости масштаба сооружения при определении его допустимых гидродинамических параметров.

4. Разработаны практические рекомендации к расчёту аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации. В процессе расчёта, исходя из заданного количества сточной жидкости и эффекта очистки по БПК, по теоретическим и экспериментальным зависимостям определяются геометрические размеры, требуемое количество воздуха для аэрации, допустимые пределы интенсивности циркуляции и концентрация взвешенных веществ в осветлённой жидкости. Представленная методика расчёта применима при проектировании прямоугольных и круглых в плане аэротенков-осветлителей. Методика расчёта представлена в виде алгоритмической схемы.

РАЗДЕЛ 5

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ АЭРОТЕНКОВ-ОСВЕТИТЕЛЕЙ С ЗАТОПЛЕННОЙ ЭРЛИФТНОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ

5.1 Экономический эффект от внедрения аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации в УЗВ рыбной фермы

5.1.1 Расчёт параметров аэротенков-осветлителей для замкнутого водоснабжения рыбной фермы

С началом военных действий в Донбассе снизилась популяция некоторых видов рыб, обитающих в природных водоёмах, что повысило социально-экономическую потребность в развитии промышленного рыбоводства Донецкой народной республики [162]. При отсутствии источника, обладающего подходящей температурой и составом воды, на предприятиях по разведению рыб используются установки замкнутого водоснабжения (УЗВ). В УЗВ основными показателями загрязнения воды являются концентрации органических и минеральных форм азота. Обязательными ступенями в очистке замкнутого водоснабжения в рыбоводстве являются удаление токсичных аммиака, азота аммонийного и нитритов, а также менее токсичных нитратов при помощи биологической очистки [163].

Для очистки загрязнённой воды в системе замкнутого водоснабжения на рыбной ферме в ПГТ Пантелеймоновка (ДНР) предложен аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации [162, 164]. Расчёт параметров произведён в соответствии с алгоритмом, который описан в подразделе 4.2.

Исходные данные для расчёта:

- расход очищаемой жидкости $Q_{\text{ст}} = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- биохимическое потребление кислорода в исходной жидкости $L_{\text{ен}} = 200 \text{ мг/дм}^3$;
- требуемое БПК очищенной воды $L_{\text{ex}} = 15 \text{ мг/дм}^3$;
- нагрузка на активный ил $B_x = 0,2 \text{ г/(г·сут)}$;

- удельная скорость окисления – $\rho = 0,006 \text{ г/г}\cdot\text{ч}$.

Назначаемые параметры:

- количество аэротенков-осветлителей $n_{a-c} = 2$ шт., тогда расчётная часовая производительность одного аэротенка-осветлителя составит $Q_{\text{ч}} = Q_{\text{ст}}/n_{a-c} = 5/2 = 2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Тогда суточная производительность $Q_{\text{сут}} = 24 \cdot Q_{\text{ч}} = 24 \cdot 2,5 = 60 \text{ м}^3/\text{сут}$;
- концентрация активного ила $a_i = 3,0 \text{ г/дм}^3$;
- интенсивность аэрации $q_{\text{air}} = 10 \text{ м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$;
- коэффициент использования кислорода в биологическом реакторе с затопленной эрлифтной системой аэрации $k_{\text{исп}} = 0,15$ [165].

По формуле (4.5) вычисляется требуемый полезный объём:

$$W = \frac{60 \cdot (200 - 15)}{3 \cdot (1 - 0,3) \cdot 10^3 \cdot 0,2} = 26,4 \text{ м}^3.$$

Окислительная мощность биологического реактора по формуле (4.6)

$$OM = 0,006 \cdot 3 \cdot (1 - 0,3) \cdot 26,4 = 0,33 \text{ кг/ч}.$$

ОС = ОМ = 0,33 кг/ч, массовая доля кислорода в воздухе при нормальных условиях составляет 0,27 кг/м³, тогда требуемый расход воздуха по формуле (4.7)

$$Q_{\text{air1}} = \frac{0,33}{0,15 \cdot 0,27} = 8,2 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Суммарное количество воздуха для аэрации в $n_{a-c} = 2$ аэротенках-осветлителях составит $Q_{\text{air}} = Q_{\text{air1}} \cdot n_{a-c} = 8,2 \cdot 2 = 16,4 \text{ м}^3/\text{ч}$.

По расходу воздуха на один аэротенк-осветлитель и принятой интенсивности аэрации рассчитывается поперечная площадь затопленного эрлифта

$$\omega_a = \frac{8,2}{10} = 0,82 \text{ м}^2.$$

Принимаем круглую в плане форму аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Радиус затопленного эрлифта составит:

$$r_a = \sqrt{\frac{0,82}{3,14}} = 0,51 \text{ м}.$$

Принимаем $r_a = 0,5$ м, $r = 1,5$ м, $B_c/B_j = 3,0$.

Ширина зазора вычисляется по формуле (4.16)

$$B_j = \frac{1,5 - 0,5}{1 + 3} = 0,25 \text{ м.}$$

Соответственно, ширина осветителя равна:

$$B_c = 1,5 - 0,5 - 0,25 = 0,75 \text{ м.}$$

Ширина зеркала защитной зоны принимается равной $B_s = 0,2 \cdot 0,75 = 0,15$ м. Глубина погружения низа вертикальной разделительной перегородки под уровень свободной поверхности при $\beta = 40^\circ$ составит $z_s = 0,05 \cdot 0,75 = 0,037$ м.

Рабочая высота аэротенка-осветителя рассчитывается по формуле (4.18)

$$H = \frac{26,4}{3,14 \cdot 1,5^2} + \frac{0,75 - 0,037}{3 \cdot 1,5^2} \cdot [(1,5 - 0,15)^2 + (1,5 - 0,15)(1,5 - 0,75) + (1,5 - 0,75)^2] - 0,037 \cdot (2 \cdot 1,5 \cdot 0,15 - 0,15^2) = 4,08 \approx 4,1 \text{ м.}$$

Принимаем глубину погружения аэраторов $h_a = 3,0$ м.

Вычисляется площадь сечения осветителя ω_c по формуле (3.10),

$$\omega_c = \pi \cdot (r^2 - (r - B_c)^2) = 3,14 \cdot (1,5^2 - (1,5 - 0,75)^2) = 5,26 \text{ м}^2,$$

площадь зеркала защитной зоны ω_s по формуле (3.21)

$$\omega_s = \pi \cdot (r^2 - (r - B_s)^2) = 3,14 \cdot (1,5^2 - (1,5 - 0,15)^2) = 1,33 \text{ м}^2.$$

Высота нижней кромки наклонного козырька относительно дна аэротенка-осветителя: $h_w = H - B_c = 4,1 - 0,75 = 3,35$ м.

Гидравлическая нагрузка на осветитель q_c по формуле (3.8)

$$q_c = \frac{Q_q}{\omega_c} = \frac{2,5}{5,26} = 0,48 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Гидравлическая нагрузка на зеркало защитной зоны q_s по формуле (3.19)

$$q_s = \frac{Q_q}{\omega_s} = \frac{2,5}{1,33} = 1,88 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Для определения минимальной допустимой интенсивности циркуляции необходимо задаться допустимым временем пребывания ила в осветителе $\tau_{w, \text{доп.}}$. Пусть $\tau_{w, \text{доп.}} = 2$ часа. Тогда минимальной допустимой интенсивностью циркуляции $I_{ц, \text{min}}$, при котором вычисленное по формуле (2.37) время пребывания

τ_w не превысит принятого $\tau_{w, \text{доп.}}$, в соответствии с расчётами, произведёнными в программе Mathcad Application, составит $99 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Для предотвращения залегания ила рекомендуется поддерживать интенсивность циркуляции не меньше $I_{\text{ц.н.з.}}$, рассчитанного по формуле (2.38)

$$\begin{aligned} I_{\text{ц.н.з.}} &= 15900 \cdot v_{\text{ос}} \cdot H^{0,22} \cdot \sqrt{\frac{0,24 \cdot h_w}{B_j} + 0,41} = \\ &= 15900 \cdot 0,003 \cdot 4,1^{0,22} \cdot \sqrt{\frac{0,24 \cdot 3,35}{0,25} + 0,41} = 237 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \end{aligned}$$

По формуле (3.18) вычисляется максимальная интенсивность циркуляции $I_{\text{ц.макс}}$

$$I_{\text{ц.макс}} = \frac{31,5 \cdot (h_w / B_j)^{0,844}}{(q_c + 0,29)^{0,801}} = \frac{31,5 \cdot (3,35 / 0,25)^{0,844}}{(0,48 + 0,29)^{0,801}} = 351 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}).$$

Рассчитанное максимальное допустимое значение превышает значение минимальной допустимой интенсивности циркуляции $I_{\text{ц.мин.}}$. При эксплуатации аэротенка-осветлителя интенсивность циркуляции может варьироваться в пределах от 237 до $351 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Концентрация взвешенных веществ в осветлённой жидкости вычисляется по формуле (3.22)

$$C_{\text{в.в.}} = 2,27 \cdot a_i^{-0,379} \cdot q_s^{0,84} \cdot 1,0078^{I_{\text{ц}}} = 2,27 \cdot 3^{-0,379} \cdot 1,88^{0,84} \cdot 1,0078^{351} = 14,6 \text{ мг/дм}^3.$$

Размеры рассчитанных аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации представлены на рисунке 5.1. На рисунке 5.2 представлены фотоизображения рассчитанного аэротенка-осветлителя.

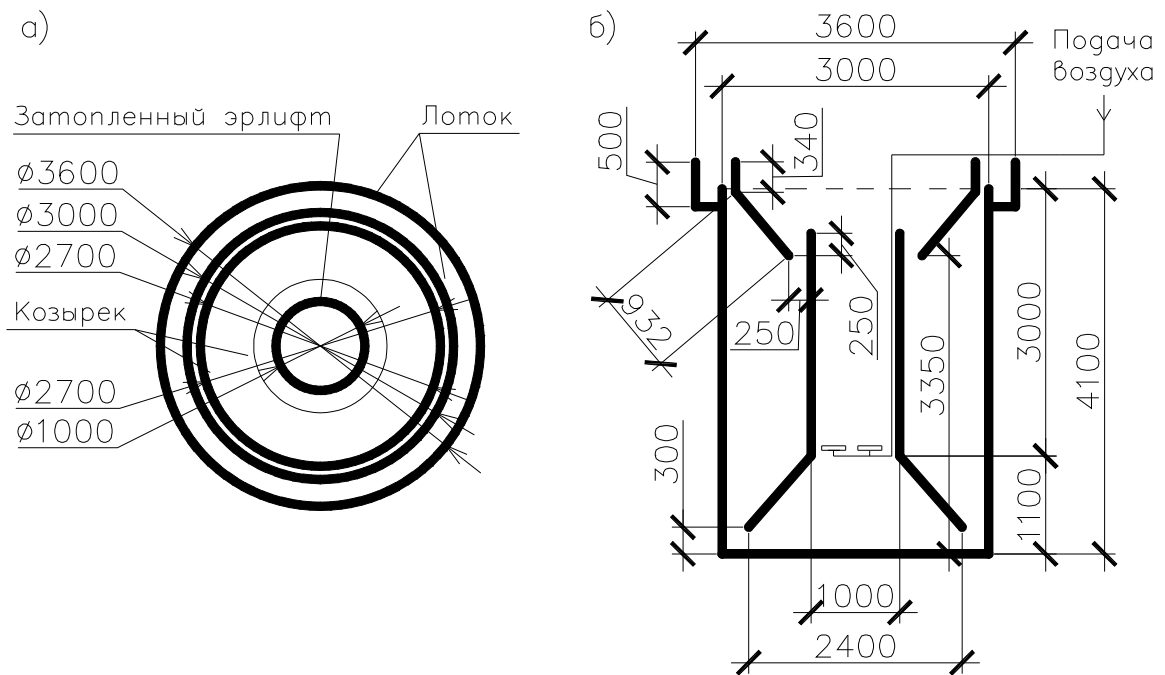


Рисунок 5.1 – Чертёж круглого в плане аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации:

а – план; б – разрез.

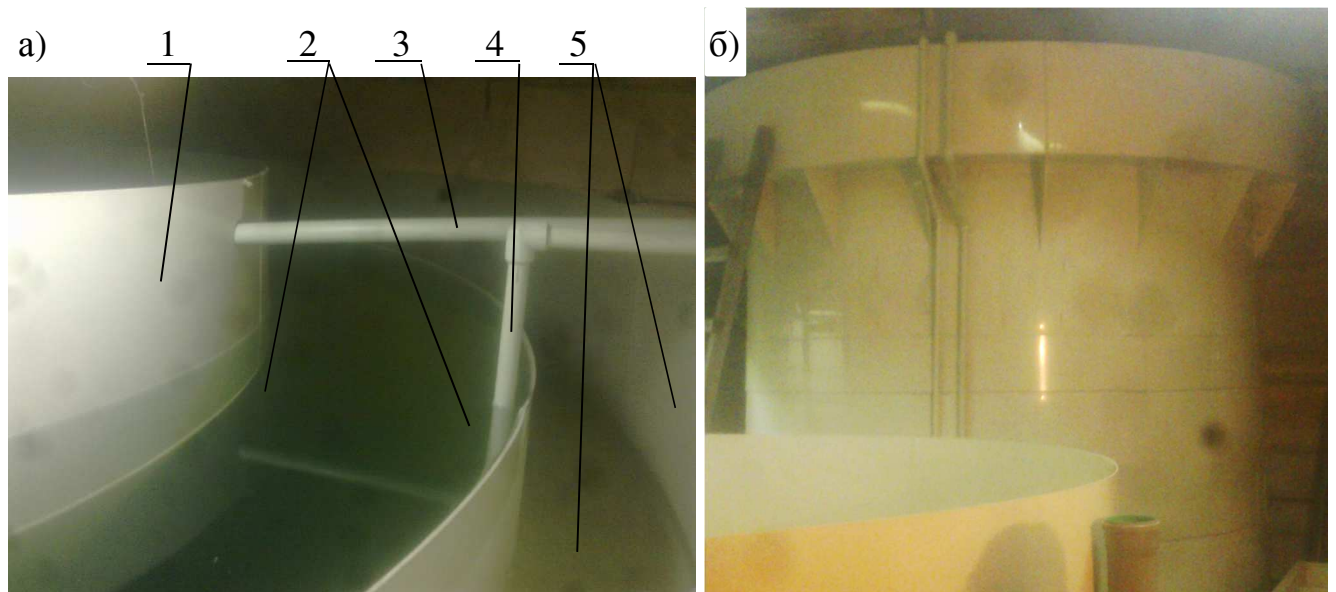


Рисунок 5.2 – Внешний вид круглого в плане аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации:

а – вид на верхнюю часть аэротенка-осветлителя; б – вид на боковую часть корпуса аэротенка-осветлителя:

1 – вертикальная разделительная перегородка; 2 – зеркало защитной зоны; 3 – трубопровод подачи воздуха; 4 – трубопровод откачки избыточного активного ила; 5 – лоток отвода очищенной жидкости.

Представленный на рисунках 5.1, 5.2 аэротенк-осветлитель сооружён на рыбной фабрике в ПГТ Пантелеймоновка для биологической очистки в УЗВ.

5.1.2 Расчёт экономического эффекта от внедрения аэротенков-осветлителей для замкнутого водоснабжения рыбной фермы

Для определения экономического эффекта от применения аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации произведено сравнение предлагаемого варианта, рассчитанного в подразделе 5.1, с базовым. В качестве базового варианта применены аэротенки с затопленной эрлифтной системой аэрации и вторичные отстойники. Сооружения базового и предлагаемого вариантов рассчитаны на основании одинаковых исходных данных, обладают одинаковыми системами аэрации, обеспечивают равное качество очистки жидкости по БПК и взвешенным веществам, но отличаются системами илоотделения.

На рисунке 5.3 представлены условные схемы сооружений по базовому и предлагаемому вариантам.

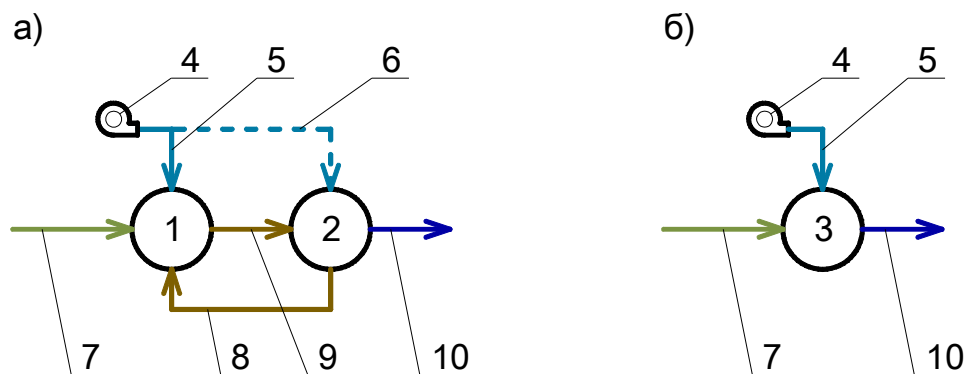


Рисунок 5.3 – Схемы вариантов сооружений биологической очистки:

а – базовый вариант; б – предлагаемый вариант:

1 – аэротенки с затопленной эрлифтной системой аэрации; 2 – вторичные отстойники; 3 – аэротенки-осветлители с затопленной эрлифтной системой аэрации; 4 – воздуходавное оборудование; 5 – подача сжатого воздуха для аэрации иловой смеси; 6 – подача сжатого воздуха в эрлифты для перекачивания

возвратного активного ила; 7 – исходная жидкость; 8 – возвратный активный ил; 9 – иловая смесь; 10 – очищенная вода.

Объём аэротенков базового варианта по формуле (4.5) составит:

$$W_a = \frac{120 \cdot (200 - 15)}{3 \cdot (1 - 0,3) \cdot 10^3 \cdot 0,2} = 52,9 \text{ м}^3.$$

Принимаются аэротенки диаметром $D_a = 3$ м в количестве $n_a = 2$ шт. Тогда рабочая высота одного аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации составит $H_p = 4 \cdot W_a / (\pi \cdot D_a^2) / n_a = 4 \cdot 52,9 / (3,14 \cdot 3^2) / 2 = 3,74$ м. Полная глубина одного аэротенка принимается $H_a = 4,0$ м.

Принимаем вертикальные вторичные отстойники диаметром $D_s = 2,4$ м. В соответствии с требованиями [25], принимаем количество отстойников $n_s = 2$ шт., а расчётную производительность одного $Q_s = Q_{ct} = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Расчётная гидравлическая нагрузка на зеркало вторичного отстойника q_{ssa} составит:

$$q_{ssa} = \frac{4 \cdot Q_s}{\pi \cdot D_s} = \frac{4 \cdot 5}{3,14 \cdot 2,4^2} = 1,11 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}). \quad (5.1)$$

Высота вторичных отстойников H_s определяется по формуле [25]:

$$H_s = \left(\frac{q_{ssa} \cdot (0,1 \cdot a_i \cdot I)^{0,5 - 0,01 \cdot C_{e.e.}}}{4,5 \cdot k_{ss}} \right)^{1,25} = \left(\frac{1,11 \cdot (0,1 \cdot 3 \cdot 100)^{0,5 - 0,01 \cdot 14,6}}{4,5 \cdot 0,35} \right)^{1,25} = 2,9 \text{ м}, \quad (5.2)$$

где k_{ss} – коэффициент использования объёма зоны отстаивания.

Для выбора воздухоудовного оборудования и расчёта энергетических потерь следует определить требуемую подачу сжатого воздуха. Расход воздуха на аэрацию при очистке $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ сточной жидкости в эрлифтных биологических реакторах, в соответствии с расчётами, произведёнными в подразделе 5.1, составляет $Q_{air} = 16,4 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Помимо насыщения иловой смеси кислородом, в базовом варианте воздух необходим для обеспечения работы эрлифтов, осуществляющих перекачивание возвратного активного ила. Эрлифты рассчитываются по зависимостям, позволяющим определить их оптимальный режим работы [166]. Оптимальный коэффициент производительности $c_{онт}$ подъёмной трубы эрлифта рассчитывается по формуле (5.3).

$$c_{онм} = -2,84 + 19,6 \cdot \alpha_{\text{э}} - 15,5 \cdot \alpha_{\text{э}}^2, \quad (5.3)$$

где $\alpha_{\text{э}}$ – относительное погружение смесителя эрлифта, м/м. Ввиду высоты аэротенка и вторичного отстойника $\alpha_{\text{э}} = 2,8/4,0 = 0,7$ м/м.

$$c_{онм} = -2,84 + 19,6 \cdot 0,7 - 15,5 \cdot 0,7^2 = 3,29.$$

Интегрированный коэффициент $K_{\text{опт}}$ подъемной трубы эрлифта для оптимального режима:

$$K_{онм} = 9,632 \cdot \alpha_{\text{э}}^{-0,723} - 7,935 = 9,632 \cdot 0,7^{-0,723} - 7,935 = 4,53. \quad (5.4)$$

Расход возвратного активного ила $Q_{\text{возвр}}$, подаваемого одним эрлифтом вычисляется по формуле (5.5) [26, 111].

$$Q_{\text{возвр}} = Q_{\text{ч}} \frac{a_i}{a_r - a_i} = 2,5 \frac{3,0}{6 - 3,0} = 2,5 \quad \text{м}^3/\text{ч} \quad (5.5)$$

где a_r – концентрация возвратного ила, г/дм³.

Диаметр $d_{\text{эрл}}$ подъемной трубы эрлифта [166]:

$$d_{\text{эрл}} = \left(\frac{Q_{\text{возвр}}}{3600 \cdot c_{онм}} \right)^{0,4} = \left(\frac{2,5}{3600 \cdot 3,29} \right)^{0,4} = 0,0339 \text{ м} \approx 40 \text{ мм}. \quad (5.6)$$

Оптимальный удельный расход сжатого воздуха $q_{\text{опт}}$ рассчитывается по формуле (5.7) [166]:

$$q_{онм} = \frac{K_{онм}}{c_{онм}} = \frac{4,53}{3,29} = 1,38. \quad (5.7)$$

Расход воздуха для работы системы биологической очистки, включающей аэротенки с затопленной эрлифтной системой аэрации и вторичные отстойники, с учётом обеспечения подачи эрлифтов возвратного активного ила равен:

$$Q_{\text{возд. баз}} = Q_{\text{air}} + n_{\text{э}} \cdot q_{онм} \cdot Q_{\text{возвр}} = 16,4 + 2 \cdot 1,38 \cdot 2,5 = 23,3 \quad \text{м}^3/\text{ч}, \quad (5.8)$$

где $n_{\text{э}}$ – количество эрлифтов для перекачивание возвратного ила, соответствующее числу аэротенков $n_{\text{а}}$, шт.

По базовому варианту для обеспечения подачи сжатого воздуха в количестве 23,3 м³/ч при напоре 3,0 м предусматриваются воздуходувки VARP Beta 66x350 в количестве 3 рабочих, 1 резервная. Для предлагаемого варианта при подаче 16,4 м³/ч воздуха под напором 3,0 м подбираются воздуходувки VARP

Beta 66x350 в количестве 2 рабочих и 1 резервная. Основные технические характеристики аэродинамических машин приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристики воздуходувок для сооружений биологической очистки при базовом и предлагаемом вариантах

Вариант проектирования	Марка воздуходувки	Подача, м ³ /ч	Напор, мБар	Потребляемая мощность, кВт	Количество, шт.	
					рабоч.	резерв.
Базовый	Beta 66x350	7,8	337	0,81	3	1
Предлагаемый	Beta 66x350	8,2	335	0,81	2	1

В соответствии с данными Республиканского предприятия "Региональная энергопоставляющая компания" [167], тарифы на электроэнергию для юридических лиц (на период с 1.05.2019 по 31.10.2019) составляют $T = 3467,00$ руб./(МВт·ч). Годовые затраты на электроэнергию вычисляются по формуле (5.9).

$$\mathcal{E} = 8,76 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot n_{\text{возд}} \cdot T, \text{ тыс. руб./год}, \quad (5.9)$$

где N – мощность воздуходувки, кВт;

$n_{\text{возд}}$ – количество рабочих воздуходувок, шт.

Для базового и предлагаемого варианта, соответственно:

$$\mathcal{E}_{\text{баз.}} = 8,76 \cdot 10^{-3} \cdot 0,81 \cdot 3 \cdot 3467 = 73,8 \text{ тыс. руб./год};$$

$$\mathcal{E}_{\text{предл.}} = 8,76 \cdot 10^{-3} \cdot 0,81 \cdot 2 \cdot 3467 = 49,2 \text{ тыс. руб./год}.$$

В таблице 5.2 сведены количество и стоимость основных конструктивных элементов для сооружения системы биологической очистки по базовому и предлагаемому варианту.

За счёт применения усовершенствованного илоотделения в системе биологической очистки затраты на электроэнергию снижены на 33,3%, а стоимость оборудования – на 22,9%.

Приведённые затраты рассчитываются по формуле (5.10)

$$II = 0,15 \cdot K + \mathcal{E}, \text{ тыс. руб./год}, \quad (5.10)$$

где K – капитальные затраты, принимаемые равными суммарной стоимости элементов по таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Сравнение капитальных затрат на оборудование сооружений биологической очистки при базовом и предлагаемом вариантах

Наименование конструктивных элементов	Исполнение, ед. изм.	Цена ед., тыс. руб.	Кол. единиц		Стоимость, тыс. руб.	
			Базовый	Предлаг.	Базов.	Предл.
Стенки и днище корпуса, сборные лотки, козырьки, затопленные перегородки	Лист ПВХ вспененный 10 мм 2050x3050 мм, шт.	6,82	16	13	109,1	88,7
Трубы подвода исходной жидкости	Труба ПП PN 10 DN 50x4,6, п.м	0,17	12,0	12,0	2,0	2,0
	Труба ПП PN10 DN 32x2,9, п.м	0,07	4,0	4,0	0,3	0,3
Вентили труб подвода стоков	Вентиль ПП Ø 32, шт.	0,52	2	2	1,0	1,0
Трубы отвода осветлённой жидкости	Труба ПВХ Ø 50, п.м	0,06	12,0	12,0	0,7	0,7
Эрлифт перекачки возвратного ила	Труба ПП PN10 DN 40x3,7, п.м	0,08	16,0	-	1,3	0
Трубы подачи ила в отстойники	Труба ПП PN10 DN 63x5,8, п.м	0,27	5,6	-	1,5	0
Вентили труб иловой смеси	Кран шаровой полипропиленовый Ø 50, шт.	0,62	2	-	1,2	0
Трубопроводы подвода воздуха	Труба ПНД ПЭ 100 SDR 9, DN 32, п.м	0,07	11,5	11,5	0,8	0,8
	то же, DN 20, п.м	0,03	13,7	10,2	0,4	0,3
	то же, DN 16, п.м	0,02	11,8	-	0,2	0
Вентили воздуховода	кран шаровой полнопроходной, газовый Ду 20 мм, шт.	0,23	6	5	1,4	1,2
	Вентиль Ду 15 мм, шт	0,19	2	-	0,4	0
Аэраторы	Аэратор трубчатый 500 мм, шт.	1,69	4	4	6,8	6,8
Воздуходувка вихревая	VARP Beta 66x350	45,4	4	3	181,6	136,2
Суммарная стоимость элементов, тыс. руб.					308,7	238,0

Приведённые затраты, соответственно для базового и предлагаемого варианта, составят:

$$\Pi_{\text{баз}} = 0,15 \cdot 308,7 + 73,8 = 112,9 \text{ тыс. руб./год};$$

$$\Pi_{\text{предл}} = 0,15 \cdot 238,0 + 49,2 = 85,5 \text{ тыс. руб./год}.$$

Годовой экономический эффект $\Delta\Pi$ от внедрения усовершенствованного илоразделения в системе биологической очистки производительностью 5 м³/ч составляет:

$$\Delta\Pi = \Pi_{\text{баз}} - \Pi_{\text{предл}} = 112,9 - 85,5 = 27,4 \text{ тыс. руб./год.} \quad (5.11)$$

5.2 Экономический эффект от внедрения аэротенков-осветлителей для очистки городских сточных вод г. Стерлитамак

Канализационная очистная станция (КОС) в г. Стерлитамак (РФ, Башкортостан) рассчитана на производительность 25000 м³/сут. На станции работает блок из четырёх секций по типовому проекту 902-3-20 «Блок ёмкостей для станций биологической очистки сточных вод пропускной способностью 10, 17 и 25 тыс. м³/сут.». Каждая секция включает в себя первичный отстойник 1, аэробный стабилизатор 2, аэротенк 3 и горизонтальный вторичный отстойник 4 (Рис. 5.4).

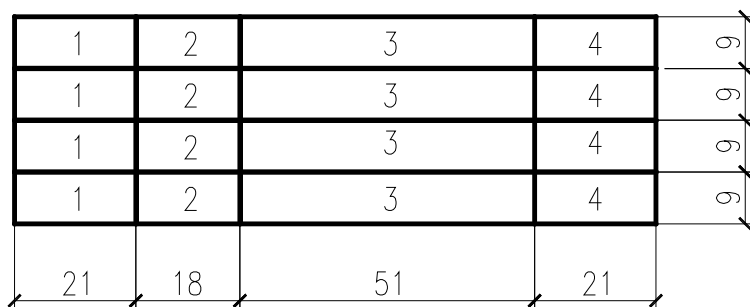


Рисунок 5.4 – План-схема блока ёмкостей КОС г. Стерлитамак:

1 – первичный отстойник глубиной 9 м; 2 – аэробный стабилизатор глубиной 4 м; 3 – аэротенк глубиной 4 м; вторичный отстойник глубиной 9 м.

В настоящее время, в связи со значительным увеличением численности населения города, приток сточных вод увеличен до 37500 м³/сут. Для очистки

требуемого количества сточных вод нами рекомендовано переоборудование существующих аэротенков и вторичных отстойников в аэротенки-осветлители с затопленной эрлифтной системой аэрации. На рисунке 5.5 представлены поперечные разрезы аэротенков-осветлителей.

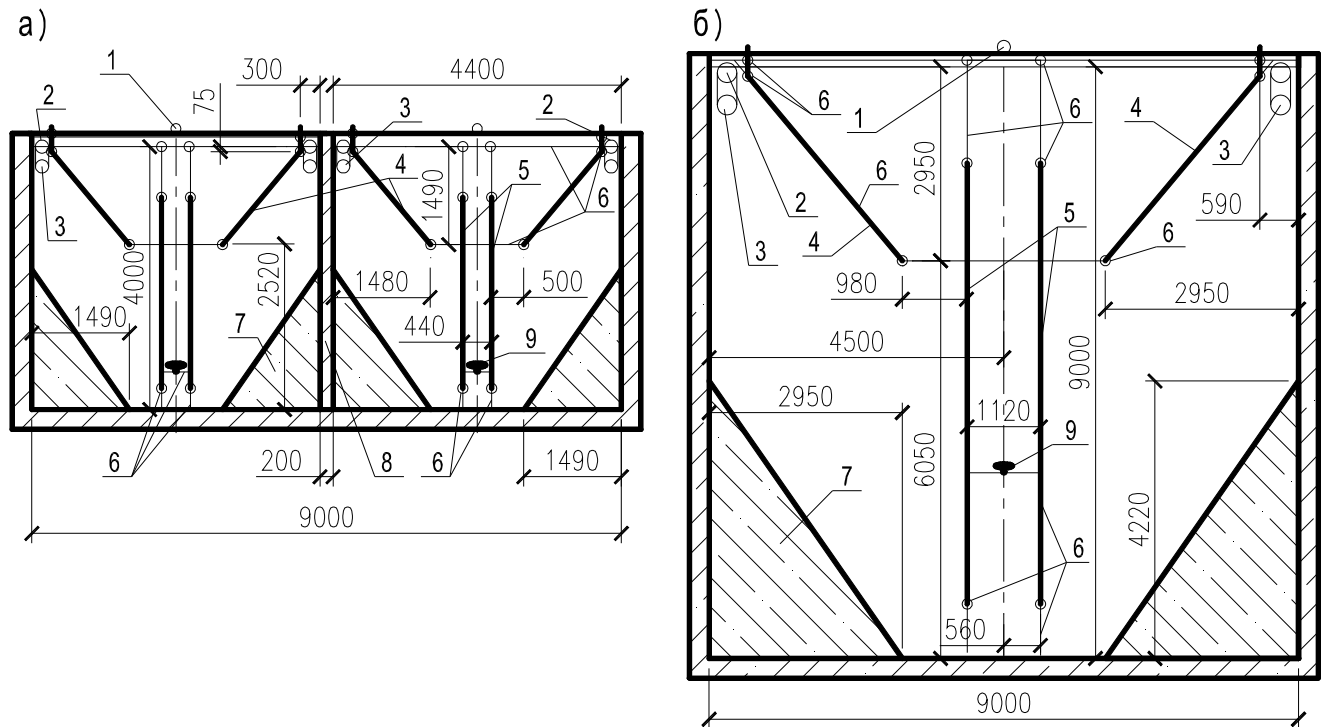


Рисунок 5.5 – Поперечные разрезы аэротенков-осветлителей:

а – на базе аэротенка; б – на базе вторичного отстойника:

1 – подводящие трубы; 2 – сборные лотки; 3 – отводящие трубы; 4 – наклонные козырьки; 5 – затопленные перегородки; 6 – металлические опоры; 7 – наклонные части днища; 8 – разделительная перегородка; 9 – аэраторы.

Подача исходной жидкости осуществляется равномерно, по всей длине каждой секции блока сооружений, посредством подводящих труб 1. Очищенная жидкость собирается сборными лотками 2, выполненными из пластмассовых труб, и отводится отводящими трубами 3. Наклонные козырьки 4 и затопленные перегородки 5 выполняются из брезента и крепятся при помощи металлических опор 7. Ввиду низкого значения соотношения высоты аэротенка к ширине его секции, каждая секция аэротенка делится вдоль разделительной стенкой 8 на две секции аэротенка-осветлителя. Для насыщения иловой смеси кислородом воздуха предусмотрены дисковые мелкопузырчатые аэраторы 9.

Общая расчётная суточная производительность аэротенков-осветлителей, выполненных на базе аэротенков и вторичных отстойников равна 37560 м³/сут, суммарный расход воздуха для аэрации – 5518 м³/ч. Основные параметры аэротенков-осветлителей на базе аэротенков и вторичных отстойников представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Расчётные параметры аэротенков-осветлителей после реконструкции КОС г. Стерлитамак

Наименование параметров аэротенков-осветлителей, ед. изм.		На базе аэротенков	На базе вторичных отстойников
Суточная производительность блока сооружений $Q_{\text{сут}}$, м ³ /сут		24720	12840
Количество секций n_{a-c} , шт.		8	4
БПК исходных стоков $L_{\text{еп}}$, мг/дм ³		185	
БПК очищенной жидкости L_{ex} , мг/дм ³		15	
Подача воздуха на блок сооружений Q_{air} , м ³ /ч		3632	1886
Принятое допустимое время пребывания ила в осветлителе $\tau_{w, \text{доп.}}$, ч		4	
Основные геометрические параметры, м	Длина секции L	51	21
	Полуширина затопленного эрлифта B_a	0,22	0,56
	Ширина зазора B_j	0,50	0,98
	Ширина осветлителя B_c	1,48	2,95
	Ширина защитной зоны B_s	0,30	0,59
	Глубина от низа козырька h_w	2,52	6,05
Полезный объём аэротенка-осветлителя W , м ³		4860	4910
Гидравлическая нагрузка на зеркало защитной зоны q_s , м ³ /(м ² ·ч)		4,26	5,39
Пределы допустимой интенсивности циркуляции $I_{ц, \text{min}} \dots I_{ц, \text{max}}$, м ³ /(м ² ·ч)		102...112	101...113
Концентрация взвешенных веществ в очищенной жидкости $C_{в.в.}$, мг/дм ³		15	

Ориентировочный расчёт стоимости капитальных затрат при переоборудовании существующей системы биологической очистки в аэротенки-осветлители с затопленной эрлифтной системой аэрации сведён в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Ориентировочный расчёт капитальных затрат при переоборудовании существующей системы биологической очистки в аэротенки-осветлители с затопленной эрлифтной системой аэрации

Наименование статьи капитальных затрат	Количество	Стоимость единицы, тыс. руб.	Стоимость, млн. руб.
Подводящие трубы ПВХ SN 4 DN 400 мм	68 п.м	1,62	0,11
То же, DN 200 мм	524 п.м	0,41	0,21
Сборные лотки и трубы ПВХ SDR 41, PN 6,3, DN 315 мм	385 п.м	1,39	0,54
То же, DN 225 мм	3200 п.м	0,71	2,27
Аэраторы дисковые 320мм AeroCube-80	1152 шт.	4,9	5,64
Труба стальная прямоугольная 60х40х2 мм	5200 п.м	0,15	0,78
То же, 60х40х3 мм	1800 п.м	0,20	0,36
Технологические перегородки из брезента	6200 м ²	0,38	1,24
Монтаж опор, труб, технологических перегородок и аэраторов	-	-	1,67
Демонтаж бетонных откосов вторичного отстойника	3600 м ³	1,00	3,60
Устройство разделительных стенок и наклонных частей днища	230 м ³	2,50	0,58
Сумма капитальных затрат по предлагаемому варианту К _{предл.}	-	-	17,0

Базовый вариант реконструкции КОС при производительности 37500 м³/сут предполагает достраивание двух секций аэротенков и вторичных отстойников. Стоимость возведения очистных сооружений вычисляется по формуле (5.12).

$$K_{\text{баз}} = \Delta Q_{\text{сут}} \cdot (V_a + V_s) \cdot 10^{-3}, \quad (5.12)$$

где $K_{\text{баз}}$ – значение капитальных затрат по базовому варианту, млн. руб.;

$\Delta Q_{\text{сут.}}$ – суточная производительность возводимых сооружений, $\text{м}^3/\text{сут.}$,
принимая $37500 - 25000 = 12500 \text{ м}^3/\text{сут.}$;

v_a – норматив цены строительства аэротенка при производительности $12500 \text{ м}^3/\text{сут.}$, принимаемый по [168], тыс. руб./($\text{м}^3/\text{сут.}$);

v_s – норматив цены строительства горизонтального отстойника, принимаемый по [168], тыс. руб./($\text{м}^3/\text{сут.}$).

Значение капитальных вложений по базовому варианту составит:

$$K_{\text{баз}} = 12500 \cdot (9,38 + 4,11) \cdot 10^{-3} = 169 \text{ млн. руб.}$$

Разница капитальных вложений в реконструкцию сооружений биологической очистки с целью повышения их производительности с 25000 до 37500 $\text{м}^3/\text{сут.}$ по базовому и предлагаемому вариантам составит

$$\Delta K = K_{\text{баз.}} - K_{\text{предл.}} = 169 - 17 = 152 \text{ млн. руб.} \quad (5.14)$$

Экономический эффект по эксплуатационным затратам не учтён, т.к. повышение энергетической эффективности воздухоудовного оборудования при реконструкции сооружений биологической очистки преимущественно связано с установкой более качественных аэраторов, что не относится к результатам данной диссертационной работы.

5.3 Выводы по пятому разделу

1. Аэротенки-осветлители с затопленной эрлифтной системой аэрации внедрены в системе замкнутого водоснабжения рыбной фабрики в ПГТ Пантелеймоновка (ДНР). Параметры аэротенков-осветлителей определены при помощи алгоритма, разработанного в разделе 4. Годовой экономический эффект при производительности очистной станции $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ составил 27,4 тыс. руб./год.

2. Определён экономический эффект от внедрения аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации при реконструкции КОС в г. Стерлитамак (Башкортостан, РФ). Экономический эффект по капитальным затратам при повышении производительности сооружений биологической очистки с 25000 до 37500 $\text{м}^3/\text{сут.}$ составил 152 млн. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Комбинирование аэротенка и илоотделителя в одном сооружении снижает стоимость конструктивных элементов и электроэнергии, затрачиваемой на перекачивание иловой смеси. Критический анализ существующих комбинированных биологических реакторов выявил, что наиболее перспективным способом илоотделения в них является осветление во взвешенном слое ила. Существующие аэротенки-осветлители обладают рядом недостатков, препятствующих их широкому распространению (заиливание в застойных зонах, большой объём зон, не участвующих в биологической очистке, высокие затраты электроэнергии на перекачивание возвратного активного ила), что требует их совершенствования.

2. Усовершенствован процесс илоотделения во взвешенном слое аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации. Аэротенк-осветлитель отличается высокой долей полезного объёма (около 90%) и отсутствием застойных зон, провоцирующих залегание ила. Возврат иловой смеси из осветлителя в аэротенк осуществляется без применения дополнительного насосного оборудования – посредством использования кинетической энергии потоков, образующихся в результате работы затопленной эрлифтной системы аэрации. Преимущества разработанного аэротенка-осветлителя достигаются за счёт наклонного козырька, который способствует образованию водоворотной зоны.

3. Выполнено теоретическое обоснование обновления взвешенного слоя ила за счёт циркуляции иловой смеси в водоворотной зоне. На базе теории затопленных турбулентных струй разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать гидродинамические параметры илоотделителя по расходу очищаемой жидкости, подаче затопленного эрлифта и геометрическим параметрам аэротенка-осветлителя. Скорости восходящего потока жидкости в осветлителе снижаются по мере восхождения потока и составляют 0,1...1 мм/с. Горизонтальные скорости, обеспечивающие возврат ила из осветлителя в аэротенк, достигают 0,4 мм/с. Полученные зависимости позволяют определять минимальную интенсивность циркуляции в аэротенке, которая, при

определённых значениях гидравлической нагрузки на осветлитель, обеспечивает необходимое значение расхода возвратного активного ила.

4. На основании экспериментальных исследований определены зависимости для вычисления максимально допустимой гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны по интенсивности циркуляции и соотношению геометрических параметров аэротенка-осветлителя. При рекомендуемой интенсивности циркуляции $120 \dots 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ максимально допустимая гидравлическая нагрузка на зеркало защитной зоны составляет $4 \dots 8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Допустимая гидравлическая нагрузка повышается с увеличением высоты осветлителя.

5. Разработаны практические рекомендации для расчёта аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации. Следует принимать угол наклона козырька относительно вертикальной плоскости $\beta = 40^\circ$, отношение рабочей высоты к ширине осветлителя $H/V_c = 3 \dots 4$, отношение ширины зазора между козырьком и затопленной перегородкой к ширине осветлителя $B_j/V_c = 0,25 \dots 0,35$, концентрацию активного ила $a_i = 3 \dots 6 \text{ г/дм}^3$. Рекомендации позволяют осуществлять проектирование круглых и прямоугольных в плане аэротенков-осветлителей. Прямоугольную в плане форму рекомендуется принимать при большой производительности и ограниченной глубине сооружений, круглую – при относительно низком расходе очищаемых стоков и возможности обеспечения большой рабочей высоты H . Предлагаемая методика расчёта представлена в виде алгоритмической схемы.

6. Рассчитан экономический эффект от внедрения аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации. При повышении производительности сооружений биологической очистки в г. Стерлитамак (Башкортостан, РФ) с 25000 до 37500 $\text{м}^3/\text{сут}$ экономический эффект по капитальным затратам составил 152 млн. руб. При внедрении на рыбной фабрике ПГТ Пантелеймоновка (ДНР) в системе замкнутого водоснабжения производительностью 5 $\text{м}^3/\text{ч}$ годовой экономический эффект составил 27,4 тыс. руб./год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закон об охране окружающей среды [Электронный ресурс] : № 38-ІНС от 30.04.2015. – Донецк, 2015. – 67 с. – Режим доступа : <https://dnrsovet.su/zakon-dnr-ob-ohrane-okr-sredy/> (дата обращения 7.01.2019).
2. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» (с изменениями на 29 июля 2018 года) [Электронный ресурс] : N 7-ФЗ, от 10.01.2002 - М.: Кремль, 2002. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/901808297> (дата обращения 6.01.2019).
3. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» [Электронный ресурс] : № 1264-ХІІ від 25.06.1991 – К.: Відомості Верховної Ради України, 1991, № 41, ст. 546. – Режим доступа : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12/stru> (дата обращения 7.01.2019).
4. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений городских округов: ИТС 1-2015 [Электронный ресурс] / Электронный фонд правовой и нормативной технической документации – 01.07.2016. Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/1200128670> (дата обращения 13.12.2018).
5. Биологическая очистка бытовых сточных вод с использованием комбинированной системы пневматической аэрации [Электронный ресурс] / С.Ю. Андреев, Б.М. Гришин, М.В. Бикунова и др. // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. - №5 (21). – С. 171-177. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=22498697> (дата обращения 7.05.2016).
6. Ширтанова Ю.В. Роль аэрационных систем в повышении эффективности биологической очистки сточных вод [Электронный ресурс] / Ю.В. Ширтанова // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2016. – № 22. – С. 163-168. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=25430636> (дата обращения 12.03.2017).
7. Серпокрылов Н.С. Исследование технологических параметров процесса очистки вод с аэраторами из туфа [Электронный ресурс] / Н.С. Серпокрылов, А.С. Смоляниченко, Г.Г. Петросян // Инженерный вестник Дона. – 2013. –

Т. 25, № 2 (25). - Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=19528209> (дата обращения 20.09.2017).

8. Экспериментальное исследование водоструйного аэратора [Электронный ресурс] / Н.С. Серпокров, А.А. Бондарчук, И.В. Новосельцева, Н.Н. Куля // Инженерный вестник Дона. – 2012. - № 2. – С. 646-649. - Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=17944497> (дата обращения 20.09.2017).

9. Chen Yingming. Solid Distribution in Clarifier Blanket: Numerical Modeling and Experimental Measurement [Электронный ресурс] / Chen Yingming, Zhang Li Qing // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 663. – P. 729-735 – Режим доступа : www.scientific.net/AMR.663.729 (дата обращения 20.10.2018).

10. Зятина В.И. Интенсификация процесса разделения концентрированных иловых смесей во взвешенном слое осадка : автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук.: спец. 05.23.04 (водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов) / Зятина Виталий Ильич ; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры – Макеевка, 2016. – 22 с.

11. Nelson M. J. Fluidized-Bed Bioreactor Applications for Biological Wastewater Treatment: A Review of Research and Developments [Электронный ресурс] / M. J. Nelson, G. N. J. Zhu // Engineering – 2017. – Vol. 3, P. 330 – 342. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.021> (дата обращения 23.09.2018).

12. Continuous fed-batch alternating aerobic and anoxic system for biodegradation of Decontaminating Solution 2 with high nitrogen content [Электронный ресурс] / M. H. Kim, J. J. DeFrank, J. H. Lee, H. Kim // Water-Energy Nexus – 2018. – Vol. 1, P. 47-55. - Режим доступа : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588912518300055?via%3Dihub> (дата обращения 24.09.2018).

13. Водоотведение: учебное пособие / Н.И. Куликов, В.В. Омельченко, Е.Н. Куликова, Л.Н. Приходько. – М.: ЛЕНАНД, 2018. – 408 с.

14. Gogina E. Simultaneous Denitrification and Nitrification in the Lab-scale Oxidation Ditch with Low C/N Ratio [Электронный ресурс] / E. Gogina, I. Gulshin // Procedia Engineering – 2015. – Vol. 117, P. 107-113. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.130> (дата обращения 23.09.2018).

15. Нездоймінов В.І. Одномулова нітрифікація - денітрифікація в біологічних реакторах із затопленою ерліфтною системою аерації : автореф. дис. на здоб. наук. ступеня док. техн. наук. : спец. 05.23.04 (водопостачання, каналізація) / Нездоймінов Віктор Іванович ; Мін-во освіти і науки України. ДонНАБА. – Макіївка, 2013. – 37 с. : іл., табл., граф.

16. Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод / Ю.В. Воронов, С.В. Яковлев – М.: МГСУ, Изд. Ассоциации строительных вузов. 2006. – 704 с.

17. Давлетяров Р.Р. Повышение надежности системы очистки сточных вод [Электронный ресурс] / Р.Р. Давлетяров, Д.В. Бобыкин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – № 2 (10). – С. 79-83. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=19412930> (дата обращения 12.03.2017).

18. Tedjani F. Anaerobic Treatment of a Food-Processing Effluent [Электронный ресурс] / Fatiha Tedjani, Ali Khouider, Hafida Ghoualem // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 33 – P. 215-219 – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1196> (дата обращения 18.12.2018).

19. Ebeling J.M. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems [Электронный ресурс] / J. M. Ebeling, M. B. Timmons, J. J. Bisogni // Aquaculture. – 2006. - Vol. 257 - P. 346-358. - Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.019> (дата обращения 18.12.2018).

20. Беясова Н.А. Микробиология [Электронный ресурс] : учебник / Н.А. Беясова. – Электрон. текстовые данные. – Минск: Вышэйшая школа, 2012. – 443 с. – Режим доступа : <http://www.iprbookshop.ru/20229.html> (дата обращения 22.06.2018).

21. Улучшение биологической очистки сточных вод на предприятиях нефтехимической промышленности [Электронный ресурс] / Р.В. Арьков, Е.В. Волошин, С.П. Василевская и др. // Наука и современность. – 2016. - № 1 (7). - С. 181-187. - Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=27247640> (дата обращения 12.03.2017).

22. Won S. G. Biological nitrogen removal with a real-time control strategy using moving slope changes of pH(mV)- and ORP-time profiles [Электронный ресурс] / S. G. Won, C. S. Ra // Water Research. – 2011. – Vol. 45 – P. 171-178. - Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.030> (дата обращения 3.06.2018).

23. Influence of operational parameters on nitrogen removal efficiency and microbial communities in a full-scale activated sludge process [Электронный ресурс] / Y. M. Kim, H. U. Cho, D. S. Lee and etc. // Water Research. – 2011. – Vol. 45 – P. 5785-5795. - Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.010> (дата обращения 3.06.2018).

24. Amand. L. Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process [Электронный ресурс] / L. Amand, B. Carlsson // Water Research. – 2012. – Vol. 46 – P. 2101-2110. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.01.023> (дата обращения 22.04.2019).

25. Каналізація. Зовнішні системи та споруди : ДБН В.2.5 – 75:2013. – На заміну СНиП 2.04.03-85 ; введ 2014-01-01. – Київ : М-во регіон. розвитку, буд-ва та житлово-комун. госп-ва України, 2013. – 210 с. (Основні положення проектування).

26. Stier E. Klärwärter Taschenbuch / Erwin Stier, Wanfred Fischer // Aufg. 14, überarb. Aufl. – München: Hirthammer, 2002. – 407 с.

27. Расчет и проектирование канализационных очистных сооружений [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.К. Стрелков, М.А. Гриднева, Т.Ю. Набок, Э.В. Дремина. – Электрон. текстовые данные. – Самарский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2016. – 200 с. – Режим доступа : <http://www.iprbookshop.ru/62893.html> (дата обращения 23.06.2018).

28. Mechanisms of N₂O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions [Электронный ресурс] / P. Wunderlin, J. Mohn, A. Joss and etc. // Water Research. – 2012. – Vol. 46. – P. 1027-1037. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.080> (дата обращения 22.04.2019).

29. Нездойминов В.И. Расчетные зависимости аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации [Электронный ресурс] / В.И. Нездойминов //

Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры – 2014. - №5 (109). – Режим доступа : http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnaba_2014_5_14 (дата обращения 22.09.2018).

30. Delwiche C. C. Denitrification / C. C. Delwiche, B. A. Brayn // Annual Review of Microbiology – 1976. – Vol. 30. P. 241-246.

31. Никитина О.Г. Современная концепция биологической очистки сточных вод: новый взгляд [Электронный ресурс] / О.Г. Никитина // Вода: химия и экология – 2009. – №11 – С. 9 - 20. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=13921965> (дата обращения 5.05.2016).

32. Трунов П.В. Особенности процесса очистки сточных вод в погружных мембранных биореакторах / П.В. Трунов // Коммунальное хозяйство городов - 2010. – № 93 – С. 133 - 137. – Режим доступа : <http://eprints.kname.edu.ua/31295/1/4.pdf> (дата обращения 15.05.2019).

33. Подзноева З.Л. Экомониторинг и аспекты биологической водоочистки [Электронный ресурс] / З.Л. Подзноева // Питання біоіндикації та екології. – 2011. – № 16-1 – С. 192-201. - Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=23877054> (дата обращения 22.01.2017).

34. Павлинова И.И. Совершенствование методов биотехнологии в строительстве и эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения [Электронный ресурс]: монография / И.И. Павлинова, Л.С. Алексеев, М.А. Неверова. – Электрон. текстовые дан. – М. : МГСУ, ЭБС АСВ, 2014. – 148 с. – Режим доступа : www.iprbookshop.ru/23741.html (дата обращения 22.06.2018).

35. Фролова А.О. Энергетические составляющие газожидкостного потока в аэротенке [Электронный ресурс] / А.О. Фролова // Строительство: наука и образование. – 2013. – Вып. 3. Ст. 5. - Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=20807135> (дата обращения 7.05.2016).

36. Нездойминов В.И. Гидродинамическая модель работы аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации [Электронный ресурс] / В.И. Нездойминов, В.С. Рожков // Коммунальное хозяйство городов. – 2010. –

№ 93. – С. 353-358. – Режим доступа : <http://eprints.kname.edu.ua/31311/1/15.pdf> (дата обращения 15.05.2019).

37. Lawrence J. Energy efficiency in municipal wastewater treatment plants [Электронный ресурс] / J. Lawrence, P.E. Pakenas // Technology assessment. New York state, Energy research and development authority – 2012 – 24 p. – Режим доступа : https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc625019/m2/1/high_res_d/119882.pdf (дата обращения 18.09.2017).

38. Юрченко В.А. Опыт повышения энергоэффективности работы очистных сооружений канализации. [Электронный ресурс] / В.А. Юрченко, А.В. Смирнов, М.А. Есин // Коммунальное хозяйство городов. – 2013 - №107 - С. 176-183. - Режим доступа : <http://eprints.kname.edu.ua/30484/> (дата обращения 26.09.2016).

39. Таварткиладзе И.М. Установка и технология очистки сточных вод «ІМТЕХ» / И.М. Таварткиладзе, О.М. Нечипор // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2008. – №.11. – С. 65-73.

40. Таварткіладзе І.М. Струминні аератори в установці «ІМТЕХ». [Электронный ресурс] / І.М. Таварткіладзе, І.В. Степанюк, О.М. Нечипор // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2012. – №.18. – С. 60-76. – Режим доступа : <http://www.irbis-nbuv.gov.ua> (дата обращения 26.09.2016).

41. Степанюк І.В. Аерація та циркуляція активного мулу в аеротенку-відстійнику. [Электронный ресурс] / І.В. Степанюк, І.М. Таварткіладзе // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2011. – №.16. – С. 71-79. - Режим доступа : http://www.nbuv.gov.ua/old_jrn/natural/PVVG/2011_16/16_71_79.pdf (дата обращения 26.09.2016).

42. De Jesus S.S. Hydrodynamics and mass transfer in bubble column, conventional airlift, stirred airlift and stirred tank bioreactors, using viscous fluid: A comparative study [Электронный ресурс] / S.S. de Jesus, J.M. Neto, R.M. Filho // Biochemical Engineering Journal – 2017. – Vol. 118, P. 70-81. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.11.019> (дата обращения 10.07.2018).

43. Серпокрылов Н.С. Снижение энергопотребления систем аэрации сточных вод [Электронный ресурс] / Н.С. Серпокрылов, А.С. Смоляниченко //

Вестник Томского гос. архитектурно-строит. ун-та. – 2010. – № 3. – С. 192-199. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15184568> (дата обращения 1.10.2017).

44. Математическое моделирование кинетики процессов массопередачи из всплывающих газовых пузырьков [Электронный ресурс] / С.Ю. Андреев, В.Г. Камбург, А.А. Петрунин и др. // Региональная архитектура и строительство. – 2013. - № 3. – С. 134-139. - Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=20466985> (дата обращения 22.01.2017).

45. Серпокрылов Н.С. Анализ эффективности керамических аэраторов при очистке сточных вод на базе туфов Армении [Электронный ресурс] / Н.С. Серпокрылов, А.С. Смоляниченко, Г.Г. Петросян // Интернет-журнал «Науковедение» – 2013. – № 5. – Режим доступа : <https://naukovedenie.ru/PDF/03trgsu513.pdf> (дата обращения 25.09.2017).

46. Реконструкция систем водоотведения [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.П. Саломеев [и др.]. – Электрон. текстовые данные. – М. : МГСУ, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016. – 233 с. – Режим доступа : <http://www.iprbookshop.ru/42911.html> (дата обращения 23.06.2018).

47. Кульков В.Н. Влияние гидродинамики на окислительную мощность аэротенка [Электронный ресурс] / В.Н. Кульков, Е.Ю. Солопанов // Вестник МГСУ – 2012. – №1. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=17928825> (дата обращения 6.05.2016).

48. А. с. 592759 СССР, МПК C02F 3/14, B01D 21/02. Аэротенк-отстойник : / Э.С. Разумовский, Р.Ш. Непаридзе (СССР) - № 2312189/29-26; Заявл. 9.01.76; опубл. 15.02.78, Бюл. № 6. - 2 с. : ил.

49. А. с. 268286 СССР, МПК C02F 3/14. Аэротенк-осветлитель для очистки сточных вод / М.М. Земляк, М.Е. Кигель, С.К. Колобанов (СССР) - № 1305707/23-26; Заявл. 20.11.69; Опубл. 2.04.70, Бюл. №13. – 2 с.: ил.

50. Нездойминов В.И. Теоретическое обоснование метода одноиловой нитри-денитрификации при очистке сточных вод [Электронный ресурс] / В.И. Нездойминов //Науковий вісник будівництва. - 2014. - № 1. - С. 101-105. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2014_1_26 (дата обращения 1.08.2017).

51. Пат. 4295 Україна, МПК C02F 1/00, C02F 3/00 Пристрій для очищення стічних вод активним мулом / В.І. Нездоймінов, Г.М. Береза, А.Ю. Разумов. - № 20040402868; заявл. 20.04.2004; опубл. 17.01.2005, Бюл. №1. – 2 с.: іл.

52. Experiments and simulations of gas–solid flow in an airlift loop reactor [Електронний ресурс] / Chaoyu Yan, Chunxi Lu, Yiping Fan and etc. // Particuology - 2011. – 9 (2). – Рр 130–138. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.10.006> (дата обращения 28.09.2018).

53. Moraveji M.K. CFD simulation of holdup and liquid circulation velocity in a membrane airlift reactor [Електронний ресурс] / M.K. Moraveji, B. Sajjadi, R. Davarnejad // Теоретические основы химической технологии – 2012. – Vol. 46, № 3. – Р. 311-318. Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=17726268> (дата обращения 11.06.2018).

54. Al-Mashhadani M.K.H. Airlift bioreactor for biological applications with microbubble mediated transport processes [Електронний ресурс] / M.K.H. Al-Mashhadani, S.J. Wilkinson, W.B. Zimmerman // Chemical Engineering Science - 2015 – Vol. 137. – Р. 243-253. Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.06.032> (дата обращения 10.07.2018).

55. Oxygen transfer in a pressurized airlift bioreactor [Електронний ресурс] / G. Campani, M.P.A. Ribeiro, A.C.L. Horta and etc. // Bioprocess and Biosystems Engineering - 2015. - Vol. 38, Issue 8, P. 1559-1567. Режим доступа : <https://link.springer.com/article/10.1007/s00449-015-1397-4> (дата обращения 11.06.2018).

56. Continuous cultivation of *Chlorella minutissima* 26a in a tube-cylinder internal-loop airlift photobioreactor to support 3G biorefineries [Електронний ресурс] / G.V. Tagliaferro, H.J.I. Filho, A.K. Chandel and etc. // Renewable Energy – 2018. – Vol. 130, P. 439-445. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.041> (дата обращения 10.07.2018).

57. Effectionnements aux procedes de cultures forgiques et de ermetations industrielles. Brevet d'rnvention, France / M. Lefrancois, C. Mariller, J. Mejane. - № 1102200. 1955.

58. Merchuk J.C. Bioreactors, air-lift reactors [Электронный ресурс] / J.C. Merchuk, M. Gluz - P. 320-394. Режим доступа : https://www.bioreactorsciences.com/uploads/1/8/5/9/18594674/bioreactors_air-lift_reactors_merchuk_gluz.pdf (дата обращения 10.06.2018).

59. Cozma P. Airlift reactors: Applications in wastewater treatment [Электронный ресурс] / P. Cozma, M. Gavrilescu // Environmental Engineering and Management Journal – 2012. - Vol. 11, № 8. – P. 1505-1515. Режим доступа : <https://www.researchgate.net/publication/287447561> (дата обращения 11.06.2018).

60. Ветошкин А.Г. Инженерная защита гидросферы от сбросов сточных вод [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Г. Ветошкин. – Электрон. текстовые данные. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 296 с. – Режим доступа : <http://www.iprbookshop.ru/51722.html> (дата обращения 21.06.2018).

61. Канализация. Учебник для вузов / С.В. Яковлев, А.Я. Карелин, А.И. Жуков, С.К. Колобанов. – Изд. 5-е, перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1975. – 632 с.

62. Петрова А.В. Мероприятия по увеличению эффективности работы аэротенка-отстойника [Электронный ресурс] / А.В. Петрова, В.И. Нездойминов // Актуальные проблемы развития городов: Электронный сборник статей по материалам открытой региональной заочной научно-практической конференции молодых учёных и студентов, г. Макеевка, 03 марта 2017 г. – 2017. – С. 570-573. – Режим доступа : http://donnasa.ru/publish_house/journals/studconf/2017/Sbornik_AR_RG_2017.pdf (дата обращения 17.05.2019).

63. Клеандров В.П. Интенсификация биологической очистки сточных вод путём применения аэротенков-осветлителей НИСИ с тонкослойным разделением водоиловой смеси : автореферат. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук.: спец. 05.23.04 (водоснабжение и канализация) / Клеандров Виктор Павлович ; Новосибирский ордена трудового красного знамени инженерно-технический институт им. В.В. Куйбышева – Новосибирск, 1985. – 16 с.

64. Пономарёв В.Г. Выбор сооружений для очистки сточных вод от взвешенных загрязнений [Электронный ресурс] / В.Г. Пономарёв // Наилучшие

доступные технологии водоснабжения и водоотведения – 2015. - №1. – С. 45-52. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=27224132> (дата обращения 29.03.2019).

65. Данилович Д.А. Выбор сооружений для очистки сточных вод от взвешенных загрязнений [Электронный ресурс] / Д.А. Данилович, С.В. Харькин // Пути достижения технологических показателей НДТ в объемах существующих сооружений биологической очистки городских сточных вод – 2017. - №1. – С. 39-53. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=29851193> (дата обращения 29.03.2019).

66. Колпакова В.П. Совершенствование технологии и техники очистки сточных вод с учетом производственных особенностей Восточного Казахстана : автореф. диссертации на соиск. уч. степени док. техн. наук.: спец. 05.23.04 (водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов) / Колпакова Валентина Павловна ; Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева – Алматы, 2010. – 42 с. : ил., табл., граф.

67. Харькина О.В. Проблемы эксплуатации сооружений очистки сточных вод и их решения: вспухание и пенообразование активного ила [Электронный ресурс] / О.В. Харькина, С.В. Харькин // Справочник эколога – 2015. - №2 (26). – Режим доступа : http://www.profiz.ru/eco/2_2015/stoch_ochistka/ (дата обращения 21.04.2016).

68. Юрченко В.А. Выявление факторов управления седиментационными свойствами активного ила [Электронный ресурс] / В.А. Юрченко, А.В. Астапова // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета – 2010. - № 48. – С. 94-98. - Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/v/vyyavlenie-faktorov-upravleniya-sedimentatsionnymi-svoystvami-aktivnogo-ila> (дата обращения 13.09.2017).

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

70. Чернышев В.Н. Технология работы илоотделителя в технологии глубокой минерализации осадка [Электронный ресурс] / В.Н. Чернышев,

В.И. Зятина // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – №5 (103). – С. 21. – Режим доступа : http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnaba_2013_5_6 (дата обращения 22.02.2016).

71. Технология очистки сточных вод гидролизных производств. [Электронный ресурс] / В.В. Коростовенко, В.А. Гронь, Н.М. Капличенко и др. // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 7 (78). – С. 105-109. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=19959925> (дата обращения 23.01.2017).

72. Ресурсосберегающие технологии очистки сточных вод: монография. [Электронный ресурс] / С.С. Душкин, А.Н. Коваленко, М.В. Дегтярь, Т.А. Шевченко; Харьк. нац. акад. гор. хоз-ва. – Х.: ХНАГХ, 2011 – 146 с. – Режим доступа : <http://eprints.kname.edu.ua/23382/1/Монография-2011-6МН.pdf> (дата обращения 17.09.2016).

73. Biodiversity and population dynamics of microorganisms in a full-scale membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [Электронный ресурс] / С.-Y. Wan, H. De Wever, L. Diels, and etc. // Water Research. – 2011. – Vol. 45. – P. 1129-1138. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.008> (дата обращения 4.06.2018).

74. Brannock M. Mixing characterisation of full-scale membrane bioreactors: CFD modelling with experimental validation. [Электронный ресурс] / M. Brannock, Y. Wang, G. Leslie // Water Research. – 2010. – Vol. 44. – P. 3181-3191. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.029> (дата обращения 4.06.2018).

75. Внедрение технологии удаления биогенных элементов в мембранном биореакторе в московском регионе [Электронный ресурс] / М.Н. Козлов, М.В. Кевбрина, М.В. Богомолов, С.А. Стрельцов и др. // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2016. – № 3. – С. 29-34. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=28163552> (дата обращения 12.03.2017).

76. Ковальчук В.А. Очистка стічних вод / В.А. Ковальчук – Рівне: ВАТ «Рівненська друкарня», - 2002. – 622 с.: іл.

77. А. с. 829563 СССР, МПК C02F 1/00, B01D 21/02, C02F 3/14. Аэротенк-отстойник : / Н.И. Куликов, Р.А. Гимадеев, С.А. Тихненко, В.Е. Окрушко,

В.Н. Чернышев, И.И. Смеюха, В.В. Вертий (СССР) - № 2771064/29-26; Заявл. 28.05.79; опубл. 15.05.81, Бюл. № 18. - 3 с. : ил.

78. А. с. 775052 СССР, МПК C02F 3/22. Аэротенк-осветлитель : / В.А. Бессуднов, В.П. Стыров, Б.Ф. Васильев, В.И. Кузнецова (СССР) - № 2762001/23-26; Заявл. 23.05.79; опубл. 30.10.80. Бюл. № 40 1980. – 4 с. : ил.

79. А. с. 120456 СССР, МПК C02F 3/14. Способ аэрации сточной жидкости и аэротенк для его осуществления : / И.С. Постников (СССР) - № 2418/576711/23; Заявл. 5.02.54; опубл. 1.01.59. Бюл. № 11 1959. – 3 с. : ил.

80. Дзюбо В.В. Модернизация эрлифтного узла рециркуляции активного ила / В.В. Дзюбо, Л.И. Алферова [Электронный ресурс] // Водоочистка. – 2014. – № 10. – С. 29-33. - Режим доступа : https://updoc.site/download/5acfc51f6ddae_pdf (дата обращения 12.11.2018).

81. А. с. 875768 СССР, МПК C02F 3/02. Аэротенк колонного типа : / М.М. Земляк, Н.Г. Баженов (СССР) - № 2938156/29-26; Заявл. 6.06.80; опубл. 15.07.82. Бюл. № 26 1982. – 3 с. : ил.

82. Рехтин А.Ф. Проектирование сооружений для очистки сточных вод [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.Ф. Рехтин, Е.Ю. Курочкин, Б.П. Лашкинский. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 314 с. – Режим доступа : <https://books.google.com.ua/books?id=Gi1uDwAAQBAJ&lpg=PP1&hl=ru&pg=PP1#v=onepage&q&f=false> (дата обращения 15.05.2019).

83. Karpinska A. M. CFD-aided modelling of activated sludge systems – A critical review [Электронный ресурс] / A. M. Karpinska, J. Bridgeman // Water Research – 2016. – Vol. 88. – P. 861-879. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.008> (дата обращения 23.09.2018).

85. Wastewater treatment modelling with smoothed particle hydrodynamics [Электронный ресурс] / Michael Meister, Wolfgang Rauch // Environmental Modelling & Software – 2016. – Vol 75. – P. 206-211. Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.10.010> (дата обращения 6.11.2018).

84. Integrating hydrodynamics and biokinetics in wastewater treatment modelling by using smoothed particle hydrodynamics [Электронный ресурс] / M. Meister,

D. Winkler, M. Rezavand, W. Rauch // Computers and Chemical Engineering – 2017. – Vol. 99. - P. 1-12. - Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.12.020> (дата обращения 23.09.2018).

86. Определение рациональных параметров центрифугирующего устройства для осветления воды / С.М. Эпоян, А.С. Карагяур, А.Л.Скорик, Н.Ю. Гаврилова // Вода, экология, общество. – 2010. – С. 127-130.

87. Experimental and numerical investigations of sedimentation of porous wastewater sludge flocs [Электронный ресурс] / M. Hribersek, B. Zajdela, A. Hribernik, M. Zadavec // Water Research. – 2011. – Vol. 45 – P. 1729-1735. - Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.11.019> (дата обращения 6.11.2018).

88. Караушев А.В. Речная гидравлика [Электронный ресурс] / А.В. Караушев – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1969. – 296 с. Режим доступа : <https://t-library.org.ua/showBook.php?id=667> (дата обращения 6.01.2018).

89. Моделирование аэрационных сооружений / Л.Н. Брагинский, М.А. Евилевич, В.И. Бегачев и др. – Л.: Химия, 1980. – 144 с., ил.

90. Фрог Б.Н. Водоподготовка: Учебное пособие для вузов / Б.Н. Фрог, А.П. Левченко - М.: Издательство МГУ, 1996. – 689 с.; 178 ил.

91. Математичний опис основних факторів, що впливають на формування зваженого шару осаду в муловідділювачі [Электронный ресурс] / В.І. Нездоймінов, В. І. Зятіна, В. С. Рожков, В. І. Лєсной // Сучасне промислове та цивільне будівництво. – 2016. – Т.12. № 2 – С. 51-58. - Режим доступа : <http://spgs.donnasa.ru/?p=324> (дата обращения 29.04.2017).

92. Евилевич А.З. Осадки сточных вод. Удаление, обработка, использование / А.З. Евилевич – Л.: 1965. – 324 с.

93. Activated sludge rheology: A critical review on data collection and modelling [Электронный ресурс] / N. Ratkovich, W.Horn, F.P. Helmus, and etc. // Water Research – 2012. – Vol. 47 - P. 463-482. Режим доступа : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.892.7595&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения 10.06.2018).

94. Кутателадзе С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1976. – 296 с., ил.
95. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик – М.: «Машиностроение», 1975. – 559 с., ил.
96. Справочник по гидравлическим расчётам / П.Г. Киселёв, А.Д. Альтшуль, Н.В. Данильченко и др. под ред. П.Г. Киселёва – изд. 5-е. – М.: «Энергия», 1975. – 312 с.
97. Сльоз Л.Г. Технічна механіка рідини і газу / Л.Г. Сльоз – Макіївка.: ДонНАБА, 2003. – 194 с.
98. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебник для вузов / Р.Р. Чугаев – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с., ил.
99. Зуйков А.Л. Гидравлика. Том 2. Напорные и открытые потоки. Гидравлика сооружений [Электронный ресурс] : учебник / А.Л. Зуйков, Л.В. Волгина. – Электрон. текстовые данные. – М. : Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2015. – 424 с. – Режим доступа : <http://www.iprbookshop.ru/40191.html> (дата обращения 23.06.2018).
100. Олійник О.Я. Динаміка спливання повітряних бульбашок у рідині. [Электронный ресурс] / О.Я. Олійник, Г.С. Маслун, С.В. Величко // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2011. – №.16. – С. 61-70. - Режим доступа : http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/pvvg/2011_16/16_60_70.pdf (дата обращения 26.09.2016).
101. Ghasemi H. Investigation of hydrodynamics and transition regime in an internal loop airlift reactor using CFD [Электронный ресурс] / H. Ghasemi, S. H. Hosseini // Brazilian Journal of Chemical Engineering – 2012. - Vol. 29, № 04. - P. 821 - 833. Режим доступа : <http://www.scielo.br/pdf/bjce/v29n4/v29n4a13> (дата обращения 10.06.2018).
102. Лучина А.Ю. Биологическая очистка сточных вод в аэротенках с затопленной пневматической системой аэрации [Электронный ресурс] / А.Ю. Лучина, Ф.В. Недопекин // Вестник Донецкого национального

университета. Технические науки – 2018. – № 3. – С. 68-75. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=37219938> (дата обращения 15.05.2019).

103. Земляная Н.В. Экспериментальные исследования потоков с циркуляционными зонами [Электронный ресурс] / Н.В. Земляная, В.А. Шаланин // Международный научно-исследовательский журнал – 2013. – № 10 (17). Ч. 2. – С. 39-43. – Режим доступа : http://iu4.ru/publ/2013_rj_vlasov.pdf#page=39 (дата обращения 2.11.2017).

104. Математическая модель процесса фильтрования во взвешенном слое контактной массы с учетом ограничения его размеров по горизонтали [Электронный ресурс] / Ю.Л. Сколубович, О.А. Бойко, С.М. Зеркаль и др. // Вестник МГСУ. – 2013. – №10. – С. 309-316. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=20467802> (дата обращения 19.02.2017).

105. Численные результаты моделирования работы фильтрующего взвешенного слоя [Электронный ресурс] / Ю.Л. Сколубович, О.А. Бойко, С.М. Зеркаль и др. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №1 (42). – С. 59-65. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=21157579> (дата обращения 19.02.2017).

106. Мешалкин А.В. Экологическое состояние гидросферы [Электронный ресурс]: учебное пособие для студентов-бакалавров / А.В. Мешалкин, Т.В. Дмитриева, И.Г. Шемель. — Электрон. текстовые данные. – Саратов: Ай Пи Ар Букс, 2015. – 276 с. – Режим доступа : <http://www.iprbookshop.ru/33872.html> (дата обращения 21.06.2018).

107. Чернышев В.Н. Исследование илоотделения во взвешенном слое осадка в условиях повышенных концентраций активного ила [Электронный ресурс] / В.Н. Чернышев, В.И. Зятин // Науковий вісник будівництва. – 2014. – № 1. – С. 95-100. – Режим доступа : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2014_1_25 (дата обращения 29.04.2017).

108. Кузнецов В.А. Основы гидрогазодинамики [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Кузнецов. – Электрон. текстовые данные. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,

ЭБС АСВ, 2012. – 108 с. – Режим доступа : <http://www.iprbookshop.ru/28374.html> (дата обращения 4.07.2018).

109. Комбинированные очистные сооружения для небольших городов и населенных пунктов Украины / А.Н. Евдокименко, В.И. Кашковский, Н.В. Писанко и др. // Вода: технология и экология. - 2010, №2. – С. 55-70.

110. Корзун Н.П. Биотехнологии очистки сточных вод городов и предприятий [Электронный ресурс] / Н.П. Корзун – Саратов: Вузовское образование, 2014 – 187 с. – Режим доступа : <http://www.iprbookshop.ru/20405.html> (дата обращения 22.01.2017).

111. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. Нормы проектирования. - М.: Строиздат, 1986.

112. Kim J. The influence of hydraulic loads on depth filtration. [Электронный ресурс] / J. Kim, D.F. Lawler // Water Research. – 2012. – Vol. 46 – P. 433-441. - Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.059> (дата обращения 4.06.2018).

113. Zhang Li Qing. Evaluation of flocs size inside the blanket clarifier [Электронный ресурс] / L. Q. Zhang, G. Zhang // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 518-523. – P. 3687-3690 – Режим доступа : www.scientific.net/AMR.518-523.3687 (дата обращения 22.05.2017).

114. Метод определения механической прочности флокул и гранул активного ила [Электронный ресурс] / Ю.А. Николаев, Г.А. Колбасов, Е.А. Козакова и др. // Вода: Химия и Экология. – 2009. - №2 – С. 22-27. - Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=13620322> (дата обращения 5.05.2016).

115. Пат. 132076 Україна, B01D 21/02 (2006.01), C02F 3/02 (2006.01), C02F 103/00 Аеротенк-освітлювач / В.І. Нездоймінов, Д.В. Заворотний, В.І. Зятіна, В.С. Рожков - № 201809073; заявл. 31.08.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. №3. – 4 с.: іл.

116. Заворотный Д.В. Обеспечение циркуляции иловой смеси в аэротенках-отстойниках со взвешенным слоем [Электронный ресурс] / Д.В. Заворотный, А.В. Жибоедов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и

архитектуры. – 2016. – №3 (119). – С. 186-189. - Режим доступа : http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnaba_2016_3_38 (дата обращения 19.12.2016).

117. Нездойминов В.И. Исследование допустимой подачи затопленной эрлифтной системы аэрации в аэротенке-осветлителе [Электронный ресурс] / В.И. Нездойминов, Д.В. Заворотный, В.С. Рожков // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – №3 (125). – С. 80-85. - Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=30317130> (дата обращения 4.12.2017).

118. Permissible parameters for the circulation rate of the sludge mixture in airlift reactor-clarifier with suspended layer [Электронный ресурс] / V. Nezdoinov, D. Zavorotnyi, V. Rozhkov, P. Deminov // MATEC Web of Conferences – 2018. – Vol. 245. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824511009> (дата обращения 5.12.2018).

119. Эжекция и инъекция реагентов в технологиях водоподготовки [Электронный ресурс] / О.П. Петросян, А.К. Горбунов, Д.В. Рябченков, А.О. Кулюкина // Международный научно-исследовательский журнал – 2017. - № 08 (62). Ч. 2. – С. 151-155. - Режим доступа : <https://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/08-2-62.pdf#page=151> (дата обращения 26.09.2017).

120. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович – М.: Физматгиз, 1960 – 715 с.

121. Михалев М.А. Гидравлический расчет потоков с водоворотом / М.А. Михалев – Л.: «Энергия», 1971 – 184 с.

122. Шкуланов Е.И. Исследование скоростной структуры потока на участке внезапного расширения в цилиндрическом трубопроводе [Электронный ресурс] / Е.И. Шкуланов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации – 2011. – № 2 (02). – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=17011258> (дата обращения 25.05.2018).

123. Нездойминов В.И. Процессы осветления иловой смеси во взвешенном слое в сооружениях с эрлифтной системой аэрации / В.И. Нездойминов, Д.В. Заворотный, В.С. Рожков // Технологии очистки воды «ТЕХНОВОД-2017»:

материалы X – юбилейной Межд. науч.-практ. конф. – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 268-272.

124. Нездойминов В.И. Аэротенк-отстойник с обновляющимся взвешенным слоем [Электронный ресурс] / В.И. Нездойминов, Д.В. Заворотный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2016. – №5 (121). – С. 15-19. - Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=30039829> (дата обращения 11.02.2019).

125. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. / Г.Н. Абрамович – изд. 2-е, доп. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1948 – 288 с.

126. Гиневский А.С. Метод расчета пристенных турбулентных струй при наличии продольного градиента давления [Электронный ресурс] / А.С. Гиневский, А. В. Колесников, И. Н. Подольный // Ученые записки ЦАГИ. – 1970. - №4. Т.1. – Режим доступа : <http://cyberleninka.ru/article/n/metod-rascheta-pristennyh-turbulentnyh-struy-pri-nalichii-prodolnogo-gradienta-davleniya> (дата обращения 3.11.2016).

127. Ginevsky A.S. Acoustic Control of Turbulent Jets [Электронный ресурс] / A.S. Ginevsky, Y.V. Vlasov, R.K. Karavosov // Сер. Engineering online library – 2004. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=19568708> (дата обращения 1.09.2018).

128. Методы и концепции визуализации вихревых течений в задачах вычислительной газовой динамики [Электронный ресурс] / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов, И.В. Тетерина, М.С. Яковчук // Вычислительные методы и программирование – 2016. – Т. 117 – С. 81-100. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=36773281> (дата обращения 6.11.2016).

129. Волков К.Н. Моделирование крупных вихрей в турбулентной струе, истекающей в затопленное пространство или спутный поток [Электронный ресурс] / К.Н. Волков // Прикладная механика и теоретическая физика – 2011. - №1 (305) – С. 60-70. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=15580544> (дата обращения 6.11.2016).

130. Волков К.Н. Турбулентные струи – статистические модели и моделирование крупных вихрей. / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов, В.А. Зазимко. – М.: Физматлит, 2014 – 360 с.

131. Бендерский Л.А. Исследование RANS/ILES-методом влияния спутного ветра на течение в горячей нерасчетной сверхзвуковой аэродромной струе при взаимодействии ее с газоотбойником [Электронный ресурс] / Л.А. Бендерский, Д.А. Любимов, А.О. Честных и др. // Теплофизика высоких температур. – 2018. - №2. – С. 261-269. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=34956813> (дата обращения 1.09.2018).

132. Benderskii L.A. Analysis of the Nozzle Exit Flow Parameter Effect on the Turbulence Characteristics and the Noise Level in Jets Issuing from Nozzles of different Types [Электронный ресурс] // L.A. Benderskii, D.A. Lyubimov // Fluid Dynamics. – 2015. - Т.50. №6. – С. 166-169. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=26928686> (дата обращения 1.09.2018).

133. Tupov V.B. Steady and Transient Mathematical Models of Steam Jets [Электронный ресурс] / V.B. Tupov, A.A. Taratorin // Procedia Engineering – 2017 – Vol. 176, P. 194-198. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.288> (дата обращения 25.09.2018).

134. Заворотный Д.В. Применение теории турбулентных струй для расчета процесса обновления взвешенного слоя ила в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации / Д.В. Заворотный, В.И. Нездойминов // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов : сборник докладов XI Международной науч. конф. аспирантов и студентов. – Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2017. – С. 14-16.

135. Богомолов А.И. Гидравлика / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.

136. Нездойминов В.И. Линии тока аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации [Электронный ресурс] / В.И. Нездойминов, Д.В. Заворотный, О.С. Годовиченко // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2018. – №5 (133). – С. 67-72. – Режим до-

ступа : [http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2018/vestnik_2018-5\(133\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2018/vestnik_2018-5(133).pdf) (дата обращения 11.02.2019).

137. Нездойминов В.И. Влияние внутренних циркуляционных потоков в аэротенке-осветлителе на образование подвижного фильтрующего взвешенного слоя / В.И. Нездойминов, Д.В. Заворотный // Технологии очистки воды «ТЕХНОВОД-2018»: материалы XI Межд. науч.-практич. конф. – Новочеркасск: Лик, 2018. – С. 207-212.

138. Эль М.А. Наладка и эксплуатация очистных сооружений городской канализации / М.А. Эль, Ю.Ф. Эль, И.Ф. Вебер. – М.: Стройиздат, 1977. – 232 с.

139. Таварткіладзе І.М. Визначення швидкості руху рідини біля дна аеротенка при впливі струмини / І.М. Таварткіладзе, А.М. Кравчук // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2003. – №.1. – С. 72-79.

140. Мырзахметов М.М. Очистка хозяйственно-бытовых сточных вод в осветлителях со взвешенным слоем осадка [Электронный ресурс] / М.М. Мырзахметов, В.П. Колпакова // Наука, новые технологии и инновации – 2009. – № 4 – С. 19-20. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=26489748> (дата обращения 6.06.2017).

141. Основы научных исследований: учебное пособие / Н.Н. Голоденко, Л.Г. Зайченко, Н.М. Зайченко и др. ; под ред. Н.М. Зайченко. – Донецк: «Цифровая типография», 2017 – 190 с.

142. Найманов А.Я. Основы научных исследований: учебное пособие / А.Я. Найманов, И.В. Сатин. – Макеевка, ДонНАСА, 2013 – 78 с.

143. Макаричев Ю.А. Методы планирования эксперимента и обработки данных: учеб. пособие [Электронный ресурс] / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с. - Режим доступа : http://em.samgtu.ru/sites/em.samgtu.ru/files/mpe_posobie_2016.pdf (дата обращения 1.03.2018).

144. Яворский В.А. Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных. Методические указания к лабораторным работам /

В.А. Яворский – М.: Московский физико-технический институт (государственный университет) – 2006. – 43 с.

145. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский // Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: «Наука», 1976. – 279 с.

146. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента / Ю.П. Адлер // М.: Металлургия, 1968. – 155 с.

147. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки / Б.Ф. Лямаев. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 256 с., ил.

148. Соколов Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – Изд. 2-е – М.: Энергия, 1970 – 288 с.

149. Кирсанов В.В. Повышение эффективности биоочистки сточных вод за счёт определения оптимальной концентрации кислорода, активного ила и температуры в аэротенке [Электронный ресурс] / В.В. Кирсанов // Вестник МАНЭБ – 2015. – Т. 2, № 2. – С. 39-40. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=26007843> (дата обращения 13.09.2017).

150. Онлайн-калькулятор Math - Semestr.RU [Электронный ресурс] / Режим доступа : <https://math.semestr.ru/regress/corel.php> (дата обращения 11.08.2018).

151. Методика выполнения измерений дозы ила по объему и расчету илового индекса : ФР 1.31.2008.04397: введ. 2007-11-12. – М.: ООО Акварос, 2008.

152. Лурье Ю.Ю. Химический анализ производственных сточных вод / Ю.Ю. Лурье, А.Н Рыбникова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: «Химия», 1974. – 336 с.

153. Таблица распределения Стьюдента [Электронный ресурс] / Статистический анализ. - 22 с. - Режим доступа : <http://old.exponenta.ru/educat/referat/xikonkurs/student5/tabst-st.pdf> (дата обращения 7.03.2019).

154. Малаханов В.В. Гидравлическое исследование нижнего бьефа воднотранспортного гидроузла на аэродинамической модели [Электронный ресурс] / В.В. Малаханов // Вестник МГСУ – 2014. – № 2. – С. 153-163. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=21225883> (дата обращения 25.05.2018).

155. Reynolds number and settling velocity influence for finite-release particle-laden gravity currents in a basin [Электронный ресурс] / E.P. Francisco, L.F.R. Espath, S. Laizet, J.H. Silvestrini // Computers and Geosciences – 2018. – Vol. 110. – P. 1-9. Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.09.010> (дата обращения 27.12.2018).

156. EL-Ghorab E. A. S. Reduction of scour around bridge piers using a modified method for vortex reduction [Электронный ресурс] / E.A.S. EL-Ghorab. – 2013. – Vol. 52. (3) – P. 467-478. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.04.001> (дата обращения 27.12.2018).

157. Impinging Air Jets on Flat Surfaces at Low Reynolds Numbers [Электронный ресурс] / Ş.-M. Simionescu, N.-O. Tănasea, D. Broboană, C. Bălan // Energy Procedia – 2017. – Vol. 112, P. 194-203. – Режим доступа : <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1083> (дата обращения 20.07.2018).

158. Заворотный Д.В. Экспериментальное определение параметров моделирования аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации / Д.В. Заворотный // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2018. - № 10 (53). – С. 104-109.

159. Кирсанов В.В. Определение средней нагрузки на активный ил в биотехнологиях для очистки производственных сточных вод, характеризующихся нестабильной концентрацией загрязнений [Электронный ресурс] / В.В. Кирсанов // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 11. – С. 216-218. – Режим доступа : <https://elibrary.ru/item.asp?id=23828622> (дата обращения 20.12.2018).

160. Колесников В.П. Современное развитие технологических процессов очистки сточных вод в комбинированных сооружениях / В.П. Колесников, Е.В. Вильсон, под ред. Академика ЖК РФ В.К. Гордеева-Гаврикова. – Ростов-на-Дону: «Издательство «Юг», 2005. – 212 с.

161. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. – Взамен СНиП 2.04.03-85 ; введен 2013-01-01. – М.: Мин-во регион. развития Рос. Федерации, 2012. – 96 с.

162. Перевести Донбасс на чёрную икру! Часть II [Электронный ресурс] / Деловой Донбасс – 17.07.2017. – Режим доступа: \www/ URL: http://delovoydonbass.ru/news/biznes/get_the_donbass_on_black_caviar_part_ii/ (дата обращения 20.08.2018).

163. Кононцев С.В. Использование макрофитов для очистки воды УЗВ от соединений азота [Электронный ресурс] / С.В. Кононцев, Л.А. Саблий, Ю.Р. Гроховская // Вопросы рыбного хозяйства Беларуси – 2015. – № 31. – С. 85-91. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25058917> (дата обращения 24.01.2019).

164. Нездойминов В.И. Биологическая очистка городских сточных вод с эрлифтными биореакторами-осветлителями / В.И. Нездойминов, В.С. Рожков, Д.В. Заворотный // Строитель Донбасса. – 2018. № – С. 17-21.

165. Нездойминов В.І. Одномулова нітрифікація – денітрифікація в біологічних реакторах із затопленою ерліфтною системою аерації: дис. ... д-ра техн. наук / В.І. Нездойминов. – Макіївка, 2013. - 340 с.

166. Игнатов А.В. Определение параметров оптимального режима работы эрлифта [Электронный ресурс] / А.В. Игнатов, А.П. Стегниенко, Т.Ю. Варавкина // Наукові праці ДонНТУ. Серія: обчислювальна техніка та автоматизація - 2013. - №1 (24). – С. 14-18. – Режим доступа: <http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/22565/1/игнатов.pdf> (дата обращения 1.11.2018).

167. Тарифы для юридических лиц на ноябрь 2018 года - апрель 2019 года [Электронный ресурс] / Республиканское предприятие "Региональная энергопоставляющая компания". – Режим доступа: <https://rprec.ru/pages/tarifsjur.php> (дата обращения 23.06.2019).

168. Нормативы цены строительства. НЦС 81-02-19-2017 [Электронный ресурс] / Прил. № 19 к приказу М-ва стр-ва и ЖКХ РФ от 1.01.2017 г. // СБОРНИК № 19. Здания и сооружения городской инфраструктуры – 2017. – 160 с. – Режим доступа: <http://84993909511.umi.ru/filemanager/download/464/> (дата обращения 14.02.2019).

Приложение А

Скорости нисходящего потока в зазоре модели аэротенка-осветлителя при различных величинах расхода воздуха

Таблица А.1 – Исходные данные для статистического анализа таблицы 3.1

Расход воздуха, дм ³ /мин	0,98	1,25	1,54	2,81	3,56	4,12	5,77	11,25
Наблюдаемые скорости движения частиц в нисходящем потоке, мм/с	35	90	75	90	84,38	105	72	120
	100	37,5	50	33,33	116,25	135	110	150
	36,43	63,75	71,25	60	66	66	80	108,8
	55,71	70,59	72,86	57,14	50	102	120	102
	22,94	94,62	114	165	98,18	78,8	127,5	234
	46,15	60	52,5	120	85	100	70,6	160
	53,08	85,38	60	130	99	98,6	72	195
	49,29	51,43	68,57	76,67	60	140	160	294
	105	53,33	41,54	75	165	145	135	82,5
	66,67	27,5	96,67	70	51,18	114	115	100
	53,08	66,67	90	75	85,71	90	54	85
	42,86	52,94	45	90	142,5	102,9	125	120
	54	74	43,64	110	85	78	83,3	250
	66	105	55	114	98,57	66	112,5	142,5
	30	60	75	75	93,75	90	132,9	192
	60	76,36	58,13	150	82,5	43,3	116,3	170
	63	36	72,86	90	125	87,3	85,7	132
	20	75	85,71	48	130	96	187,5	135
	49,09	70	78,75	93,75	155	117	45	250
	57	75	72,86	122,73	135	108	127,5	90
	48,33	57,69	85	80	82,5	117	105	120
	80	82,5	60	82,5	96	120	130	162
	60	57	49,29	32,73	140	130	202,5	60
	110	43,5	78,75	90	107,14	171,4	156	165
	63	28,7	64,29	46,15	111,43	65	112,5	138
	38,33	67,5	80	83,33	50	96	115,7	90
	36,43	70	69	55	112,5	130	215	150
	69	54	76	111	90	93	67,5	200
	30	81,82	50	94,29	110	102,9	87	188,6
	60	67,5	80	48	66	85	153,8	112,5

Приложение Б

Вычисление коэффициентов регрессии при определении значимости факторов, влияющих на максимальную допустимую гидравлическую нагрузку

Определим вектор оценок коэффициентов регрессии. Согласно методу наименьших квадратов, вектор S получается из выражения: $S = (X^T X)^{-1} \cdot X^T Y$. К матрице с переменными X_j и их произведениями добавляем единичный столбец:

Таблица Б.1 – Матрица X с единичным столбцом

Единичный столбец	X_1	X_2	X_3	X_4	$X_1 \cdot X_2$	$X_2 \cdot X_3$	$X_3 \cdot X_4$	$X_1 \cdot X_4$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_4$	$X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$	$X_1 \cdot X_3 \cdot X_4$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_4$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$	$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1
1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1
1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1
1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	1
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1
1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1
1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1

Таблица Б.2 – Матрица Y

0.22
0.62
0.08
0.28
0.19
0.7
0.09
0.21
0.75
1.53
0.2
0.41
0.6
1.51
0.22
0.4

Посредством транспонирования матрицы X получаем матрицу X^T (Табл. Б.3).

Таблица Б.3 – Матрица X^T

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1

Перемножаем матрицы X^T и X .

Таблица Б.4 – Произведение матриц $X^T \cdot X$

[illegible]

Перемножаем матрицы X^T и Y .

Таблица Б.5 – Произведение матриц $X^T \cdot Y$

8,01
-3,23
-3,31
4,23
0,17
0,85
-1,89
0,07
-0,15
-2,09
0,13
0,35
-0,29
-0,07
0,71
0,03

Находим обратную матрицу $(X^T \cdot X)^{-1}$

Таблица Б.6 – Обратная матрица $(X^T \cdot X)^{-1}$

[illegible]

Вектор оценок коэффициентов регрессии равен

$$Y(X) = (X^T X)^{-1} X^T Y . \quad (\text{Б.1})$$

Таблица Б.7 – Вектор оценок коэффициентов регрессии

0,500625
-0,20188
-0,20687
0,264375
0,010625
0,053125
-0,11812
0,004375
-0,00938
-0,13063
0,008125
0,021875
-0,01813
-0,00438
0,044375
0,001875

Уравнение регрессии (оценка уравнения регрессии)

$$\begin{aligned}
 Y = & 0.5006 - 0.2019 \cdot X_1 - 0.2069 \cdot X_2 + 0.2644 \cdot X_3 + 0.01063 \cdot X_4 + \\
 & + 0,0531 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,1181 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,0044 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,0094 \cdot X_1 \cdot X_4 - \\
 & - 0,1306 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0081 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0219 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 - 0,0181 \cdot X_1 \cdot X_3 \cdot X_4 - \\
 & - 0,0044 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,0444 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,0188 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4
 \end{aligned} \quad (\text{Б.2})$$

Приложение В

Определение зависимости гидравлической нагрузки на осветлитель от интенсивности циркуляции в программе TableCurve 3D

В качестве предполагаемых зависимостей гидравлической нагрузки на осветлитель от интенсивности циркуляции и относительной длины струи рассмотрены полиномиальные, рациональные и степенные зависимости. Значения коэффициентов детерминации r^2 , скорректированных коэффициентов детерминации $Adj\ r^2$, стандартных ошибок Std Error и критериев Фишера F-statistic для соответствующих уравнений:

№	r^2	$Adj\ r^2$	Std Error	F-statistic	FP	Eq. №	Equation
1	0.7926854	0.7813773	0.1912313	107.06043	4	1	$z=a+bx+cy$
2	0.8073246	0.7930523	0.1860244	76.818055	6	2	$z=a+bx+cy+dy^2$
3	0.8099838	0.7920578	0.1864389	57.546591	8	3	$z=a+bx+cy+dy^2+ey^3$
4	0.8112699	0.7894934	0.1875516	45.564866	10	4	$z=a+bx+cy+dy^2+ey^3+fy^4$
5	0.8112826	0.7853803	0.18934	37.257392	12	5	$z=a+bx+cy+dy^2+ey^3+fy^4+gy^5$
6	0.8071898	0.7929076	0.1860894	76.751548	6	16	$z=a+bx+cx^2+dy$
7	0.8248076	0.80828	0.1790189	63.558124	8	17	$z=a+bx+cx^2+dy+ey^2$
8	0.8276341	0.8077458	0.1792362	50.897093	10	18	$z=a+bx+cx^2+dy+ey^2+fy^3$
9	0.8285376	0.8050035	0.1804766	41.878911	12	19	$z=a+bx+cx^2+dy+ey^2+fy^3+gy^4$
10	0.828588	0.8011621	0.1822106	35.218406	14	20	$z=a+bx+cx^2+dy+ey^2+fy^3+gy^4+hy^5$
11	0.8111898	0.7933775	0.1858463	58.000381	8	31	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ey$
12	0.833031	0.8137653	0.1764079	52.884822	10	32	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ey+fy^2$
13	0.8349758	0.8123254	0.1770558	43.85089	12	33	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ey+fy^2+gy^3$
14	0.8369886	0.8109068	0.1776896	37.40879	14	34	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ey+fy^2+gy^3+hy^4$
15	0.837857	0.8080756	0.178979	32.296221	16	35	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ey+fy^2+gy^3+hy^4+iy^5$
16	0.8119026	0.7901991	0.1872369	45.753797	10	46	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fy$
17	0.8358607	0.8133317	0.1765805	44.134005	12	47	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fy+gy^2$
18	0.8368493	0.8107452	0.1777655	37.370639	14	48	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fy+gy^2+hy^3$
19	0.8379195	0.8081496	0.1789446	32.311074	16	49	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fy+gy^2+hy^3+iy^4$
20	0.838412	0.8047478	0.1804865	28.248921	18	50	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fy+gy^2+hy^3+iy^4+jy^5$
21	0.8132391	0.7876052	0.188356	37.738468	12	61	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gy$
22	0.8371013	0.8110375	0.1776282	37.439718	14	62	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gy+hy^2$
23	0.8379835	0.8082253	0.1789092	32.326309	16	63	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gy+hy^2+iy^3$
24	0.8395084	0.8060726	0.1798731	28.479101	18	64	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gy+hy^2+iy^3+jy^4$
25	0.8402117	0.8028144	0.1813385	25.239739	20	65	$z=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gy+hy^2+iy^3+jy^4+ky^5$
26	0.8767738	0.8625554	0.1515485	75.42065	11	301	$z=a+bx+cy+dx^2+ey^2+fx^2$
27	0.8917288	0.8691723	0.1477395	44.840793	23	310	$z=a+bx+cy+dx^2+ey^2+fx^2+gx^3+hy^3+ixy^2+jx^2y$
28	0.1790182	0.0663344	0.3949146	1.889799	13	1003	$z=(a+bx+cy)/(1+dx+ey+fy^2+gy^3)$
29	0.2812353	0.1983009	0.3660105	4.1475248	11	1004	$z=(a+bx+cy)/(1+dx+ex^2+fy)$
30	0.2811255	0.1661056	0.3731466	2.8491768	15	1008	$z=(a+bx+cy)/(1+dx+ex^2+fx^3+gy+hy^2)$
31	0.5028953	0.4455371	0.3043856	10.723478	11	1009	$z=(a+bx+cy+dy^2)/(1+ex+fy)$
32	0.368603	0.2675795	0.349707	4.2533238	15	1051	$z=(a+bx+cx^2+dy)/(1+ex+fy+gy^2+hy^3)$
33	0.1190263	-0.042785	0.4171906	0.8444233	17	1099	$z=(a+bx+cx^2+dx^3+ey)/(1+fx+gy+hy^2+iy^3)$
34	0.8243212	0.8147388	0.1760369	131.38182	29	2157	$z=POWX(a,b)*POWY(1,c)$
35	0.8136012	0.7997939	0.1829693	80.022104	30	2158	$z=a+POWX(b,c)*POWY(1,d)$
36	0.0002019	-0.035505	0.4162525	0.0115097	29	2159	$z=POWX(a,b)*POWY(1,b)$
37	0.7795157	0.7631835	0.1989966	64.816949	29	2161	$z=POWX(a,b)+POWY(c,d)$
38	0.778351	0.7574407	0.2013604	47.407098	30	2162	$z=a+POWX(b,c)+POWY(d,e)$
39	0.8034515	0.7888923	0.1878848	74.943029	17	2163	$z=a+by+POWX(c,d)$
40	0.7799822	0.7636846	0.1987859	64.993249	17	2164	$z=a+bx+POWY(c,d)$
41	0.819189	0.8021314	0.1818669	61.163597	19	2165	$z=a+by+cy^2+POWX(d,e)$
42	0.8003204	0.7814827	0.1911209	54.108296	19	2166	$z=a+bx+cx^2+POWY(d,e)$
43	0.7941646	0.7747462	0.1940445	52.086388	59	2167	$z=POWX(a,b)+POWY(c,d)+POWX(e,b)*POWY(1,d)$
44	0.8433458	0.8252703	0.1708721	57.06495	60	2168	$z=a+POWX(b,c)+POWY(d,e)+POWX(f,c)*POWY(1,e)$

Наибольшим значением критерия Фишера обладает зависимость $z = \text{POWX}(a,b) * \text{POWY}(1,c)$. Определение параметров данной зависимости в среде TableCurve 3D:

Rank 1 Eqn 2157 $z = \text{POWX}(a,b) * \text{POWY}(1,c)$

r^2 Coef Det	DF Adj r^2	Fit Std Err	F-value
0.8243212397	0.8147387618	0.1760368965	131.38181682

Parm	Value	Std Error	t-value	95.00% Confidence Limits		P> t
a	74.16312696	27.85507004	2.662464207	18.36271643	129.9635375	0.01011
b	1.052730079	0.094963087	11.08567667	0.862496156	1.242964002	0.00000
c	-1.24792737	0.090051131	-13.8579867	-1.42832146	-1.06753328	0.00000

X at Fn Zmin	Y at Fn Zmin	Fn Zmin
1.57	423	0.0629412647
X at Fn Zmax	Y at Fn Zmax	Fn Zmax
9.67	68	4.1757846841

Procedure	Minimization	Iterations
Lev-Marq	Least Squares	32
r^2 Coef Det	DF Adj r^2	Fit Std Err
0.8243212397	0.8147387618	0.1760368965
		r^2 Attainable
		0.9999797533

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Statistic	P>F
Regr	8.1427793	2	4.0713897	131.382	0.00000
Error	1.7353834	56	0.030988989		
Total	9.8781627	58			
Lack Fit	1.7351834	55	0.031548789	157.744	0.06317
Pure Err	0.0002	1	0.0002		

Description: C:\Program Files (x86)\TableCurve3Dv4.0\CLIPBRD.WK1

X Variable:				
Xmin:	1.57	Xmax:	9.67	Xrange: 8.1
Xmean:	6.2420338983	Xstd:	2.5487568164	

Y Variable:				
Ymin:	68	Ymax:	423	Yrange: 355
Ymean:	207.96610169	Ystd:	67.826595867	

Z Variable:				
Zmin:	0.08	Zmax:	1.72	Zrange: 1.64
Zmean:	0.7184745763	Zstd:	0.4126901382	

Date	Time	File Source
Sep 18, 2018	11:05:56 AM	E:\Документы\Дися\расчеты и отчеты\Таб

C:\Program Files (x86)\TableCurve3Dv4.0\CLIPBRD.WK1
 Rank 1 Eqn 2157 $z = \text{POWX}(a,b) * \text{POWY}(1,c)$
 $r^2 = 0.82432124$ DF Adj $r^2 = 0.81473876$ FitStdErr=0.1760369 Fstat=131.38182
 $a = 74.163127$ $b = 1.0527301$
 $c = -1.2479274$

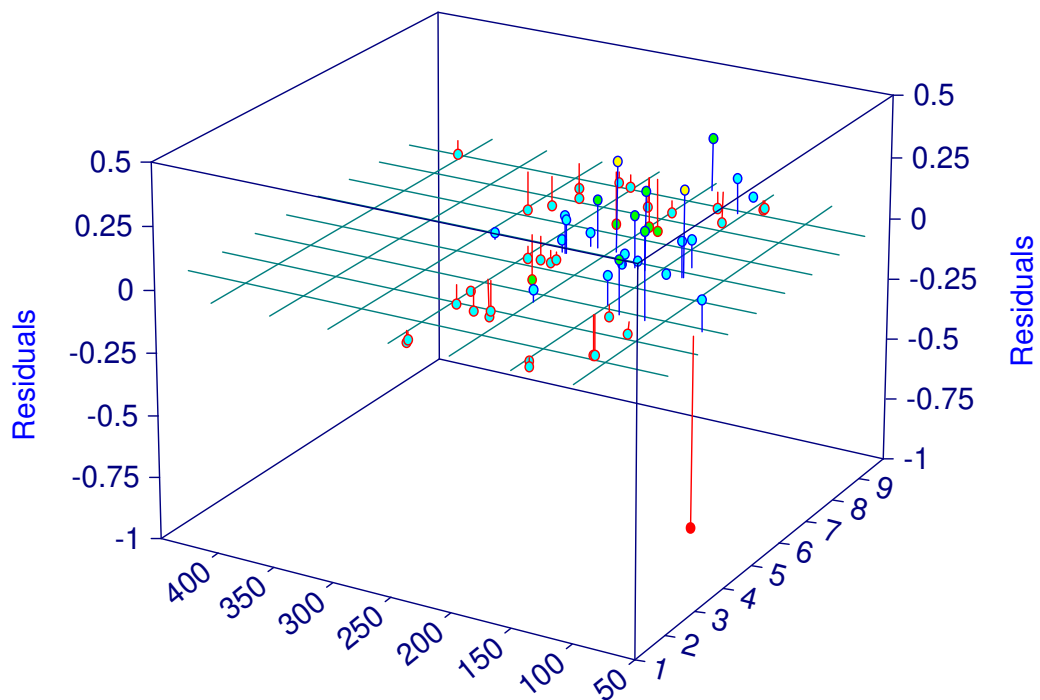


Рисунок В.1 – Значения невязок теоретических и опытных данных

Rank 1 Eqn 2157 $z = \text{POWX}(a,b) * \text{POWY}(1,c)$									
XYZ *	X Value	Y Value	Z Value	Z Predict	Residual	Residual %	95.00% Confidence		
Lim	95.00% Prediction Lim		Weights						
1	9.67	423	0.37	0.426672	-0.056672	-15.31674	0.3602128	0.4931311	
	0.0678199	0.785524	1						
2	9.67	313	0.52	0.6213239	-0.101324	-19.48536	0.5516049	0.6910428	
	0.2618538	0.9807939	1						
3	9.67	279	0.5	0.717199	-0.217199	-43.43981	0.6465907	0.7878074	
	0.3575554	1.0768427	1						
4	9.67	277	0.68	0.723667	-0.043667	-6.421618	0.6529855	0.7943485	
	0.364009	1.083325	1						
5	9.67	267	0.71	0.757646	-0.047646	-6.710698	0.6865256	0.8287663	
	0.3979015	1.1173904	1						
6	9.67	251	0.7	0.8183849	-0.118385	-16.91213	0.7461712	0.8905986	
	0.4584227	1.1783471	1						
7	9.67	250	0.62	0.8224721	-0.202472	-32.65679	0.7501671	0.8947771	
	0.4624915	1.1824526	1						
8	9.67	243	0.64	0.8521436	-0.212144	-33.14743	0.7790976	0.9251895	
	0.4920134	1.2122737	1						
9	9.67	195	1.34	1.1214483	0.2185517	16.309829	1.0332974	1.2095992	
	0.7579534	1.4849432	1						
10	9.67	190	1.09	1.1583962	-0.068396	-6.274884	1.0668271	1.2499654	
	0.7940572	1.5227352	1						
11	9.67	186	1.07	1.1895667	-0.119567	-11.17446	1.0948587	1.2842748	
	0.8244262	1.5547072	1						
12	9.67	159	1.46	1.4467464	0.0132536	0.9077828	1.3180646	1.5754281	
	1.0713573	1.8221355	1						

13	9.67 1.1618881	151 1.924149	1.51 1	1.5430186	-0.033019	-2.186661	1.3984419	1.6875953
14	9.67 1.1738836	150 1.9378491	1.53 1	1.5558663	-0.025866	-1.69061	1.4090574	1.7026752
15	8.87 0.156925	338 0.8739865	0.36 1	0.5154557	-0.155456	-43.18215	0.4507541	0.5801574
16	8.87 0.1998583	317 0.9169675	0.44 1	0.5584129	-0.118413	-26.91202	0.4935789	0.6232469
17	8.87 0.2575189	293 0.9746043	0.55 1	0.6160616	-0.066062	-12.0112	0.5512938	0.6808294
18	8.87 0.5689933	211 1.2870583	0.88 1	0.9280258	-0.048026	-5.457478	0.8605991	0.9954525
19	8.87 0.9949609	155 1.7324518	1.51 1	1.3637064	0.1462936	9.6883203	1.2559323	1.4714804
20	6.29 0.1224224	268 0.8366375	0.3 1	0.4795299	-0.17953	-59.84331	0.4232466	0.5358132
21	6.29 0.1385498	261 0.8527152	0.4 1	0.4956325	-0.095632	-23.90812	0.4395072	0.5517578
22	6.29 0.2637374	218 0.9772225	0.68 1	0.6204799	0.0595201	8.752953	0.566561	0.6743989
23	6.29 0.2857979	212 0.9991437	0.84 1	0.6424708	0.1975292	23.51538	0.5890144	0.6959272
24	6.29 0.3520825	196 1.0650567	1.07 1	0.7085696	0.3614304	33.778544	0.6563674	0.7607717
25	6.29 0.7896616	133 1.5094973	1.26 1	1.1495795	0.1104205	8.763534	1.0775872	1.2215717
26	5.8 0.0454238	288 0.7595068	0.43 1	0.4024653	0.0275347	6.4034171	0.3466025	0.4583281
27	5.8 0.1023961	259 0.8165262	0.41 1	0.4594612	-0.049461	-12.0637	0.4034481	0.5154742
28	5.8 0.1482737	240 0.8623068	0.46 1	0.5052902	-0.04529	-9.8457	0.4495871	0.5609934
29	5.8 0.1617477	235 0.8757357	0.49 1	0.5187417	-0.028742	-5.865654	0.4631835	0.5742999
30	5.8 0.1758851	230 0.8898194	0.59 1	0.5328523	0.0571477	9.6860517	0.4774667	0.5882379
31	5.8 0.1817364	228 0.8956469	0.69 1	0.5386916	0.1513084	21.928751	0.4833828	0.5940004
32	5.8 0.1847056	227 0.8986037	0.68 1	0.5416547	0.1383453	20.344901	0.4863859	0.5969234
33	5.8 0.3669501	180 1.080106	0.73 1	0.723528	0.006472	0.886571	0.6707088	0.7763472
34	5.8 0.3822957	177 1.0954315	0.79 1	0.7388636	0.0511364	6.4729599	0.6861125	0.7916147
35	5.8 0.4261859	169 1.1393421	0.99 1	0.782764	0.207236	20.932928	0.729944	0.8355841
36	5.8 0.4438556	166 1.1570583	0.83 1	0.800457	0.029543	3.5593991	0.7474803	0.8534337
37	5.8 0.4813947	160 1.1947827	1.15 1	0.8380887	0.3119113	27.12272	0.7844919	0.8916855
38	5.8 0.6066521	143 1.3217554	0.97 1	0.9642037	0.0057963	0.5975519	0.9051685	1.023239
39	5.8 0.7265448	130 1.4454255	1.23 1	1.0859851	0.1440149	11.708526	1.0164193	1.1555509
40	5.8 0.7473021	128 1.4671009	1.46 1	1.1072015	0.3527985	24.164283	1.0353015	1.1791014
41	4.14 -0.020359	250 0.6937971	0.19 1	0.3367192	-0.146719	-77.22063	0.2806242	0.3928142
42	4.14 -0.016991	248 0.6972139	0.22 1	0.3401113	-0.120111	-54.59605	0.2838593	0.3963633
43	4.14 0.2729595	151 0.9904608	0.75 1	0.6317102	0.1182898	15.771975	0.5658009	0.6976195

44	4.14 0.2834812	149 1.0011375	0.6 1	0.6423093	-0.042309	-7.051555	0.5759795	0.7086391
45	3.87 0.3166716	135 1.0367005	0.89 1	0.6766861	0.2133139	23.967859	0.6042124	0.7491597
46	3.87 0.4729706	114 1.1983169	1.18 1	0.8356438	0.3443562	29.182731	0.7509453	0.9203423
47	3.87 1.1796386	68 2.005153	1.72 1	1.5923958	0.1276042	7.41885	1.3778951	1.8068964
48	3.67 -0.080933	265 0.6325331	0.2 1	0.2757999	-0.0758	-37.89996	0.2219428	0.329657
49	3.67 -0.064695	253 0.6491339	0.28 1	0.2922194	-0.012219	-4.364088	0.2371748	0.3472641
50	3.67 -0.060359	250 0.6535633	0.21 1	0.296602	-0.086602	-41.23903	0.2412536	0.3519504
51	3.67 0.03397	200 0.7497134	0.44 1	0.3918417	0.0481583	10.945063	0.3308979	0.4527855
52	3.67 0.1971014	151 0.9157931	0.4 1	0.5564473	-0.156447	-39.11182	0.4873716	0.625523
53	3.67 0.2063418	149 0.9252254	0.41 1	0.5657836	-0.155784	-37.996	0.4962103	0.6353569
54	3.67 0.3644785	122 1.0877449	0.68 1	0.7261117	-0.046112	-6.781136	0.6459832	0.8062402
55	3.67 1.0503841	70 1.8543785	0.7 1	1.4523813	-0.752381	-107.483	1.2593949	1.6453677
56	1.57 -0.233696	250 0.4763531	0.08 1	0.1213284	-0.041328	-51.66052	0.0802857	0.1623711
57	1.57 -0.233104	249 0.4769777	0.09 1	0.1219368	-0.031937	-35.48532	0.0807536	0.16312
58	1.57 -0.128811	150 0.5878438	0.22 1	0.2295164	-0.009516	-4.325619	0.1659512	0.2930816
59	1.57 -0.128811	150 0.5878438	0.2 1	0.2295164	-0.029516	-14.75818	0.1659512	0.2930816

Rank 1 Eqn 2157 $z = \text{POWX}(a,b) * \text{POWY}(1,c)$

Precision	Avg Abs Error	Min Abs Error	Max Abs Error
18	2.035518e-17	1.44326e-17	2.522009e-17
17	1.902934e-16	1.44326e-16	2.278067e-16
16	3.991651e-16	5.720239e-17	6.934474e-16
15	8.896031e-15	5.090397e-15	1.174392e-14
14	2.762899e-13	1.905654e-13	3.430518e-13
13	3.214548e-13	1.347343e-14	6.178616e-13
12	1.385252e-11	1.010569e-11	1.682362e-11
11	6.967003e-11	2.653259e-11	1.187377e-10
10	1.366009e-09	1.039384e-09	1.677334e-09
9	4.510939e-09	2.450512e-09	6.734279e-09
8	1.302107e-07	8.365517e-08	1.791339e-07
7	1.839096e-06	1.417697e-06	2.235161e-06
6	1.416957e-05	1.150179e-05	1.645482e-05
5	9.501539e-05	4.55217e-05	0.0001502403
4	0.0001883468	1.291562e-05	0.0003595731
3	0.0143185079	0.0094350985	0.0180663454
2	0.3772891828	0.2477603426	0.4842200762

Приложение Г

Определение зависимости для расчёта концентрации взвешенных веществ в осветлённой жидкости в программной среде DataFit

DataFit version 9.0.59

Results from project "E:\Äîëóìáíòù\Äèñÿ\ñòàòüè è äîëëääú\Äñòðàòáíü\Ñâúò ìò àí qã lö.dft"

Equation ID: a*x1^b*x2^c*d^x3

Model Definition:

$Y = a \cdot x_1^b \cdot x_2^c \cdot d^{x_3}$

Number of observations = 10

Number of missing observations = 0

Solver type: Nonlinear

Nonlinear iteration limit = 250

Diverging nonlinear iteration limit = 10

Number of nonlinear iterations performed = 11

Residual tolerance = 0,0000000001

Sum of Residuals = 1,37516593179967

Average Residual = 0,137516593179967

Residual Sum of Squares (Absolute) = 180,090527772392

Residual Sum of Squares (Relative) = 180,090527772392

Standard Error of the Estimate = 5,47860273811356

Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,8816856991

Proportion of Variance Explained = 88,16856991%

Adjusted coefficient of multiple determination (R_a^2) = 0,8225285486

Durbin-Watson statistic = 1,83170475233609

Regression Variable Results

Variable	Value	Standard Error	t-ratio	Prob(t)
a	2,26890445439781	2,69618378162198	0,841524406	0,43231
b	- 0,379078004055438	0,540574619556353	-0,701250096	0,50942
c	0,840505818868011	0,234923984647128	3,577777808	0,01167
d	1,00778748353802	2,0178849510486E-03	499,4276225	0,0

68% Confidence Intervals

Variable	Value	68% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	2,26890445439781	2,92266321927823	-0,653758764880418	5,19156767367604
b	- 0,379078004055438	0,585982887599086	-0,965060891654524	0,206904883543648
c	0,840505818868011	0,254657599357487	0,585848219510524	1,0951634182255
d	1,00778748353802	2,18738728693669E-03	1,00560009625108	1,00997487082496

90% Confidence Intervals

Variable	Value	90% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	2,26890445439781	5,23922432444783	-2,97031987005002	7,50812877884565
b	- 0,379078004055438	1,0504446007219	-1,42952260477734	0,671366596666467
c	0,840505818868011	0,4565042869663	0,384001531901711	1,29701010583431
d	1,00778748353802	3,92115403687765E-03	1,00386632950114	1,0117086375749

95% Confidence Intervals

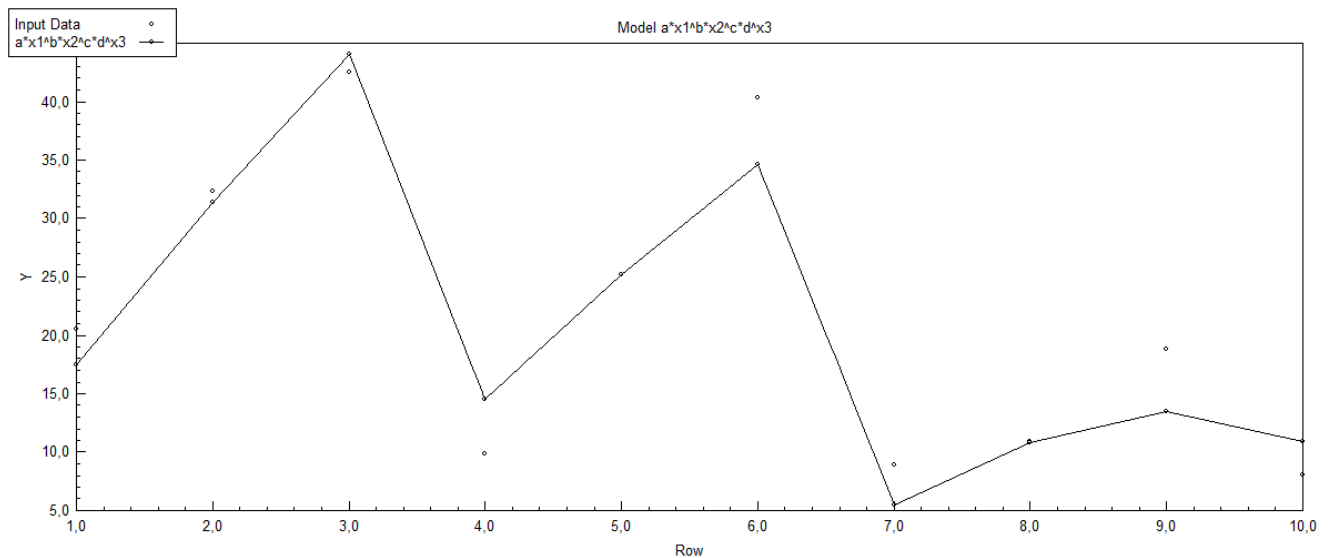
Variable	Value	95% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	2,26890445439781	6,59729209525083	-4,32838764085302	8,86619654964864
b	-	1,32273203659244	-1,70181004064788	0,943654032537002
c	0,379078004055438	0,574835498033058	0,265670320834953	1,41534131690107
d	0,840505818868011	4,93756268672083E-03	1,0028499208513	1,01272504622474

99% Confidence Intervals

Variable	Value	99% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	2,26890445439781	9,99583175198534	-7,72692729758753	12,2647362063831
b	-	2,00412634454322	-2,38320434859866	1,62504834048778
c	0,379078004055438	-	-	-
d	0,840505818868011	0,870957180680764	3,04513618127527E-02	1,71146299954877
d	1,00778748353802	7,48110666751759E-03	1,0003063768705	1,01526859020554

Variance Analysis

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio	Prob(F)
Regression	3	1342,04607222761	447,348690742536	14,90412726	0,00346
Error	6	180,090527772392	30,0150879620653		
Total	9	1522,1366			

Рисунок Г.1 – Графическое отображение функции $Y = a \cdot x_1^b \cdot x_2^c \cdot d^{x_3}$

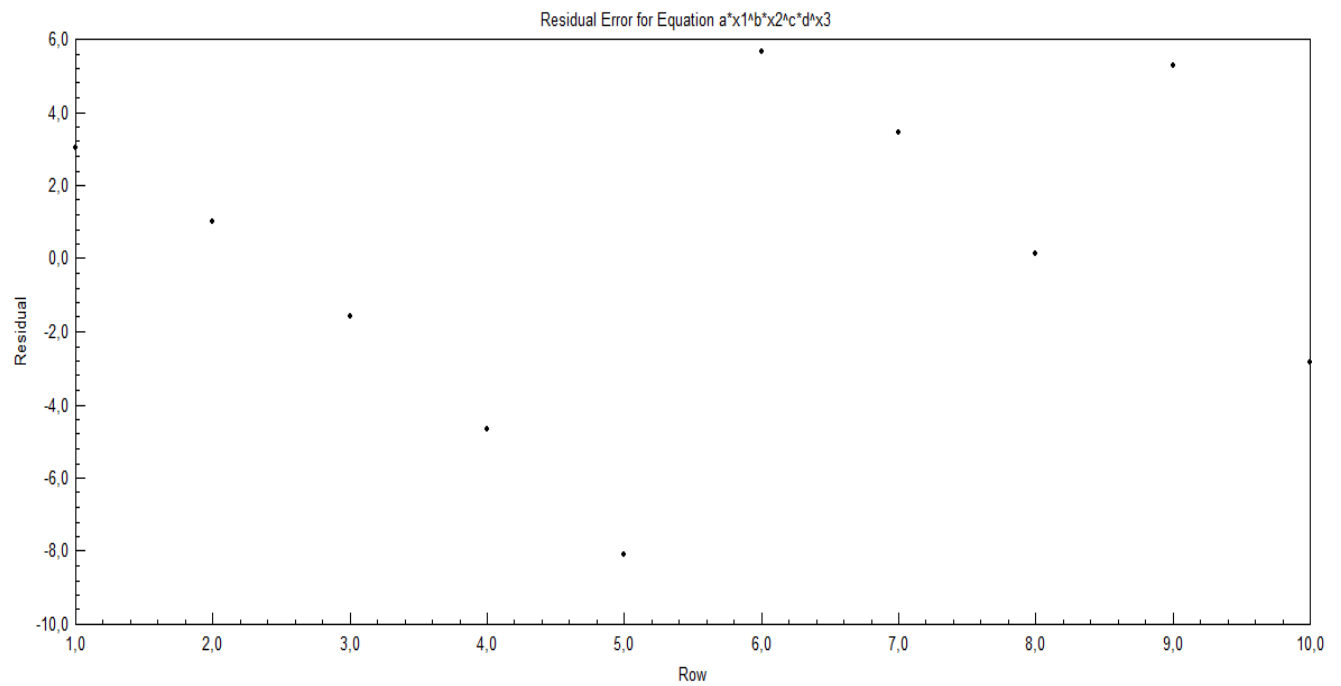


Рисунок Г.2 – Распределение остаточной ошибки статистической обработки функции $Y = a \cdot x_1^b \cdot x_2^c \cdot d^{x_3}$

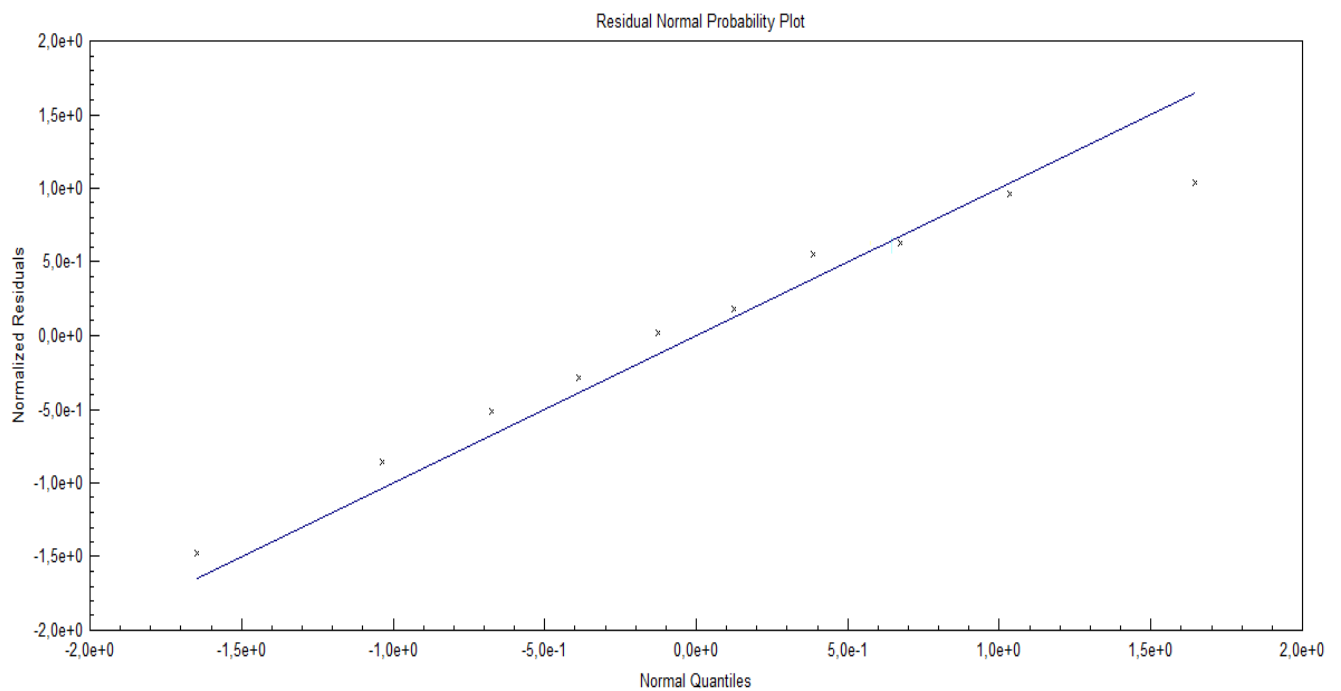


Рисунок Г.3 – Распределение регрессионных остатков функции $Y = a \cdot x_1^b \cdot x_2^c \cdot d^{x_3}$

Приложение Д

Справки о внедрении результатов работы

Генеральный директор

ЗАО «Гидроинжстрой»

И.О. Телейчук

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Заворотного
Дмитрия Викторовича

Настоящий акт составлен о том, что предложенные д.т.н., профессором Нездойминовым В.И. и ассистентом кафедры ВВ и ОВР ГОУ ВПО Донбасская национальная академия строительства и архитектуры Заворотным Д.В. рекомендации по расчёту и конструкции азротенков-осветлителей внедрены на предприятии в качестве проектных мероприятий для повышения эффективности сооружений по очистке сточных вод.

Генеральный директор
ЗАО «Гидроинжстрой»

И.О. Телейчук



Заведующий кафедрой «ВВ и ОВР»
ГОУ ВПО «ДОННАСА»

В.И. Нездойминов

Ассистент кафедры «ВВ и ОВР»
ГОУ ВПО «ДОННАСА»

Д.В. Заворотный



**Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики**
**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»**

286123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2,
тел.: +38 (062) 343-70-33, email: mailbox@donnasa.org, идент. код 02070795

от 11.02.19 № 4-04-8
на № _____ от _____

Диссертационный совет Д 01.005.01 при
Донбасской национальной академии
строительства и архитектуры

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Заворотного Дмитрия Викторовича на тему «Совершенствование илоотделения в аэротенках-
осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации», представленную на соискание
учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.04 –
водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов

Комиссия в составе: ректора ГОУ ВПО ДОННАСА Зайченко Н.М., декана факультета инженерных и экологических систем в строительстве, д.т.н., профессора Лукьянова А.В., начальника учебного отдела, к.э.н., доцента, Сухины А.А. свидетельствует, что при подготовке специалистов по направлению 08.03.01 «Строительство» по профилю «Водоснабжение и водоотведение» в ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» в дисциплине «Канализационные очистные сооружения» в разделе «Биологическая очистка городских сточных вод» используются теоретические и экспериментальные данные, полученные в кандидатской диссертационной работе Заворотного Д.В. «Совершенствование илоотделения в аэротенках-осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации».

Члены комиссии:

Ректор ГОУ ВПО ДОННАСА,
д.т.н., профессор

Декан факультета инженерных и
экологических систем в строительстве,
д.т.н., профессор

Начальник учебного отдела, к.э.н., доцент



Н.М. Зайченко

А.В. Лукьянов

А.А. Сухина



**Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики**
**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»**

286123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2,
тел.: +38 (062) 343-70-33, email: mailbox@donnasa.org, идент. код 02070795

от 11.02.19 № 4-04-8
на № _____ от _____

Диссертационный совет Д 01.005.01 при
Донбасской национальной академии
строительства и архитектуры

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Заворотного Дмитрия Викторовича на тему «Совершенствование илоотделения в аэротенках-осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации», представленную на соискание
учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.04 –
водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов

Комиссия в составе: ректора ГОУ ВПО ДОННАСА Зайченко Н.М., декана факультета инженерных и экологических систем в строительстве, д.т.н., профессора Лукьянова А.В., начальника учебного отдела, к.э.н., доцента, Сухины А.А. свидетельствует, что при подготовке магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» по программе «Современные методы очистки природных и сточных вод» в ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» в дисциплине «Малоотходные технологии систем водоснабжения и водоотведения» используются теоретические и экспериментальные данные, полученные в кандидатской диссертационной работе Заворотного Д.В. «Совершенствование илоотделения в аэротенках-осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации».

Члены комиссии:

Ректор ГОУ ВПО ДОННАСА,
д.т.н., профессор



Н.М. Зайченко

Декан факультета инженерных и
экологических систем в строительстве,
д.т.н., профессор

А.В. Лукьянов

Начальник учебного отдела, к.э.н., доцент

А.А. Сухина



**Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики**
**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»**

286123, ДНР, г. Макеевка, ул. Державина, 2,
тел.: +38 (062) 343-70-33, email: mailbox@donnasa.org, идент. код 02070795

от 6.03.19 № 4-3-108/19
на № _____ от _____

Диссертационный совет Д 01.005.01 при
Донбасской национальной академии
строительства и архитектуры

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Заворотного Дмитрия Викторовича на тему «Совершенствование илоотделения в аэротенках-осветлителях с затопленной эрлифтной системой аэрации», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.04 – водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов в научно-исследовательскую работу ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

В настоящее время в Донецкой Народной Республике требуют восстановления многие канализационные очистные станции. В то же время в Донбассе имеет место дефицит пресной воды, что делает особо актуальным охрану водных объектов от загрязнения сточными водами.

При осуществлении госбюджетной научно-исследовательской работы К-3-01-16 «Совершенствование процессов биологической очистки городских сточных вод» были использованы следующие положения диссертационной работы:

- разработка перспективных биореакторов для очистки сточных вод;
- обоснование использования самообновляющегося взвешенного слоя активного ила для вторичного илоразделения;
- проведение экспериментальных исследований на модельных биореакторах;
- определение конструктивных и гидродинамических параметров устройства для обеспечения обновления взвешенного слоя;
- разработка рекомендаций на проектирование сооружений биологической очистки.

Члены комиссии:

Проректор по научной работе
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
д.т.н. профессор

Начальник научно-исследовательской части ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
д.т.н., профессор

Научный руководитель, заведующий кафедрой «Водоснабжение, водоотведение и охрана водных ресурсов»,
д.т.н., профессор



В.Ф. Муцанов

В.Н. Завялов

В.И. Нездойминов