

В печать
27.08.19г.

Министерство образования и науки Донецкой Народной Республики
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

На правах рукописи



Заворотный Дмитрий Викторович

УДК 628.356

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

05.23.04 – водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных
ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Макеевка – 2019

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Нездойминов Виктор Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Щербаков Владимир Иванович,
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», профессор кафедры
«Гидравлика, водоснабжение и
водоотведение», РФ;

доктор технических наук, профессор
Недопекин Федор Викторович,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
университет», профессор кафедры
«Физика неравновесных процессов,
метрология и экология», г. Донецк, ДНР

Ведущая организация Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Донской государственный
технический университет»,
г. Ростов-на-Дону, РФ.

Защита состоится «7» ноября 2019 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.005.01 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, Донецкая область, г. Макеевка, ул. Державина, 2, учебный корпус №1, зал заседаний учёного совета. Тел. факс: +38(062) 3437033, e-mail: d01.005.01@donnasa.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, Донецкая область, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан « » сентября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 01.005.01

Удовиченко Злата Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 значимость работы:

- на основании теории турбулентных струй разработана математическая модель, позволяющая определить расход возвратного активного ила из зоны освещения 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 полупромышленном 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 в части: - методы очистки природных и сточных вод, технологические схемы и конструкции используемых сооружений, установок, аппаратов и механизмов; - 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: XV Международной конференции 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.); Многодиалоговой видеоконференции 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 Международной научной конференции 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 Международном строительном форуме «Строительство и архитектура 2017» (г. Макеевка, ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», 20-22 апреля 2017 г.); X Международной научно-практической конференция «ТЕХНОВОД–2017» (г. Астрахань, Музейно-выставочный комплекс «Цейхгауз», 5-6 октября 2017 г.); ЕЕСЕ 2018: Международной научной конференции «Энергетика, экология и строительство» (г. Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 19-24 ноября 2018 г.); XI Международной научно-практической конференции «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 при Министерстве образования и науки ДНР, 1 – в зарубежном издании, индексируемом международной наукометрической базой Scopus, 3 – публикаций по материалам научных конференций, 1 – публикация 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность совершенствования илоотделения в аэротенках-осветлителях, поставлена цель, указаны объект, предмет и область исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, выносимые на защиту положения и структура диссертации.

В первом разделе выполнен критический анализ существующих способов илоотделения, конструкций комбинированных биологических реакторов, способов повышения эффективности работы аэрационных систем. Теоретически обоснована рациональность совмещения аэротенков с илоотделителями в одном сооружении, осветления иловой смеси во взвешенном слое ила, применения затопленной эрлифтной системы аэрации, использования для обновления взвешенного слоя кинетической энергии циркуляционных потоков аэротенка.

Во втором разделе представлена усовершенствованная конструкция аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации (Рис. 1). В основу разработки аэротенка-осветлителя положена гипотеза о создании постоянно обновляющегося взвешенного слоя осветлителя за счёт нисходящего потока аэротенка.

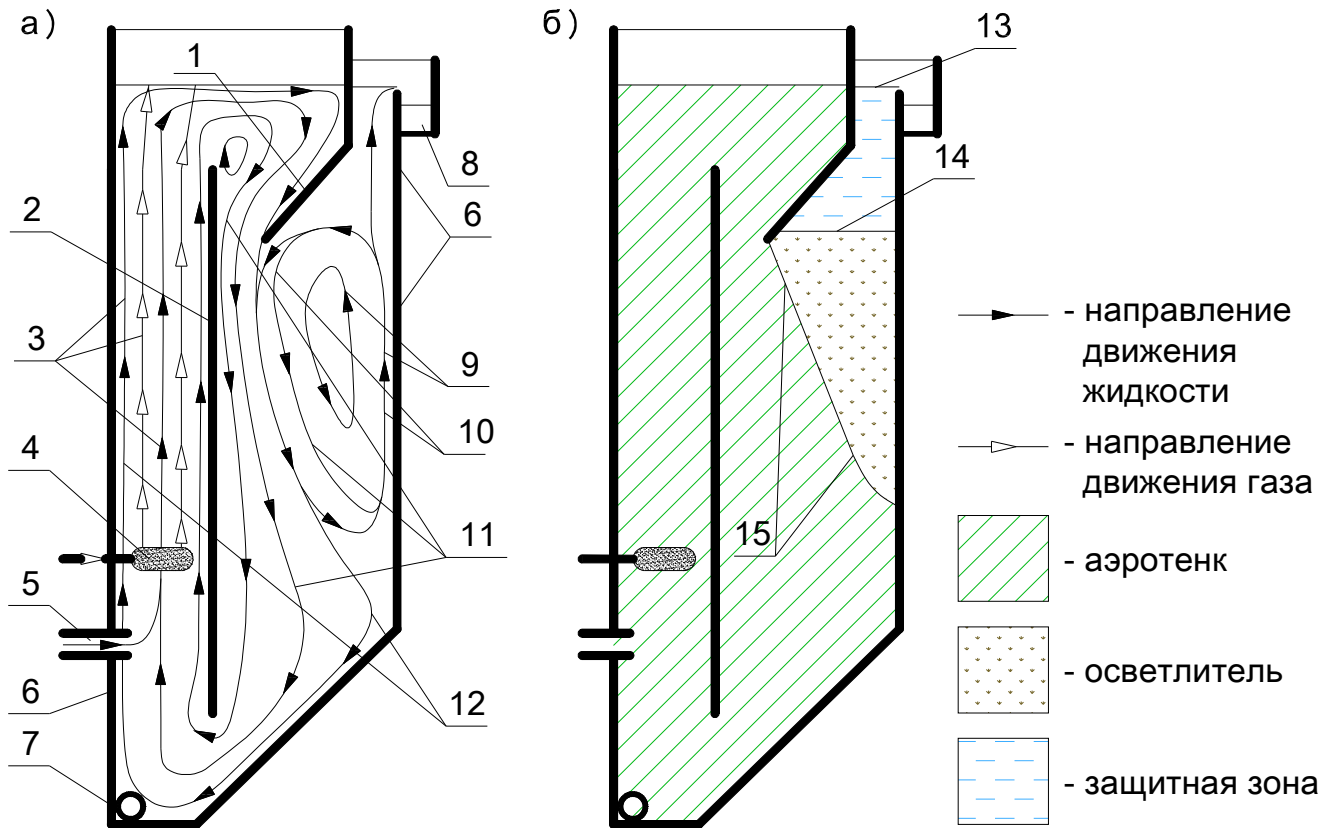


Рисунок 1 – Схемы аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации:

а) схематичные линии тока; б) условные зоны аэротенка-осветлителя:

1 – наклонный козырёк; 2 – затопленная перегородка; 3 – восходящий газожидкостный поток; 4 – аэратор; 5 – подвод сточной жидкости; 6 – наружная стенка аэротенка-осветлителя; 7 – отвод избыточного активного ила; 8 – отводящий лоток; 9 – восходящий поток водоворотной зоны; 10 – водоворотная зона; 11 – нисходящий поток; 12 – основной циркуляционный поток; 13 – зеркало защитной зоны; 14 – условная поверхность илоразделения; 15 – условная граница между осветлителем и аэротенком.

Аэротенк-осветлитель оснащён наклонным козырьком 1, который способствует образованию водоворотной зоны 10 с обновляющимся взвешенным слоем ила. Затопленный эрлифт состоит из аэратора 4 и затопленной перегородки 2. Под действием газлифтного эффекта в затопленном эрлифте возникает восходящий газожидкостный поток 3, который за пределами затопленного эрлифта преобразуется в нисходящий поток 11. В результате возникает основной

циркуляционный поток 12. Проходя через зазор между наклонным козырьком и стенкой затопленного эрлифта (далее по тексту «зазор»), нисходящий поток подвергается сжатию и эжектирует иловую смесь из верхних слоёв осветлителя. Часть нисходящего потока 11 возвращается в затопленный эрлифт через щель между затопленной перегородкой и дном аэротенка-осветлителя, другая часть – меняет направление движения и образует восходящий поток 9 вблизи наружной стенки 6. Таким образом основной циркуляционный поток 12 способствует образованию водоворотной зоны 10 под наклонным козырьком. В аэротенке-осветлителе образуются три условных зоны: аэротенк, осветлитель и защитная зона (Рис. 1 б).

Для теоретического описания скорости восходящего потока жидкости в осветлителе и расхода иловой смеси, возвращаемой из осветлителя в аэротенк, предложена математическая модель, базирующаяся на теории турбулентных струй. Нисходящий поток аэротенка ниже уровня зазора представляет собой затопленную струю, которая условно делится на три части: пристеночная часть струи, ядро постоянной скорости и пограничный слой (Рис. 2).

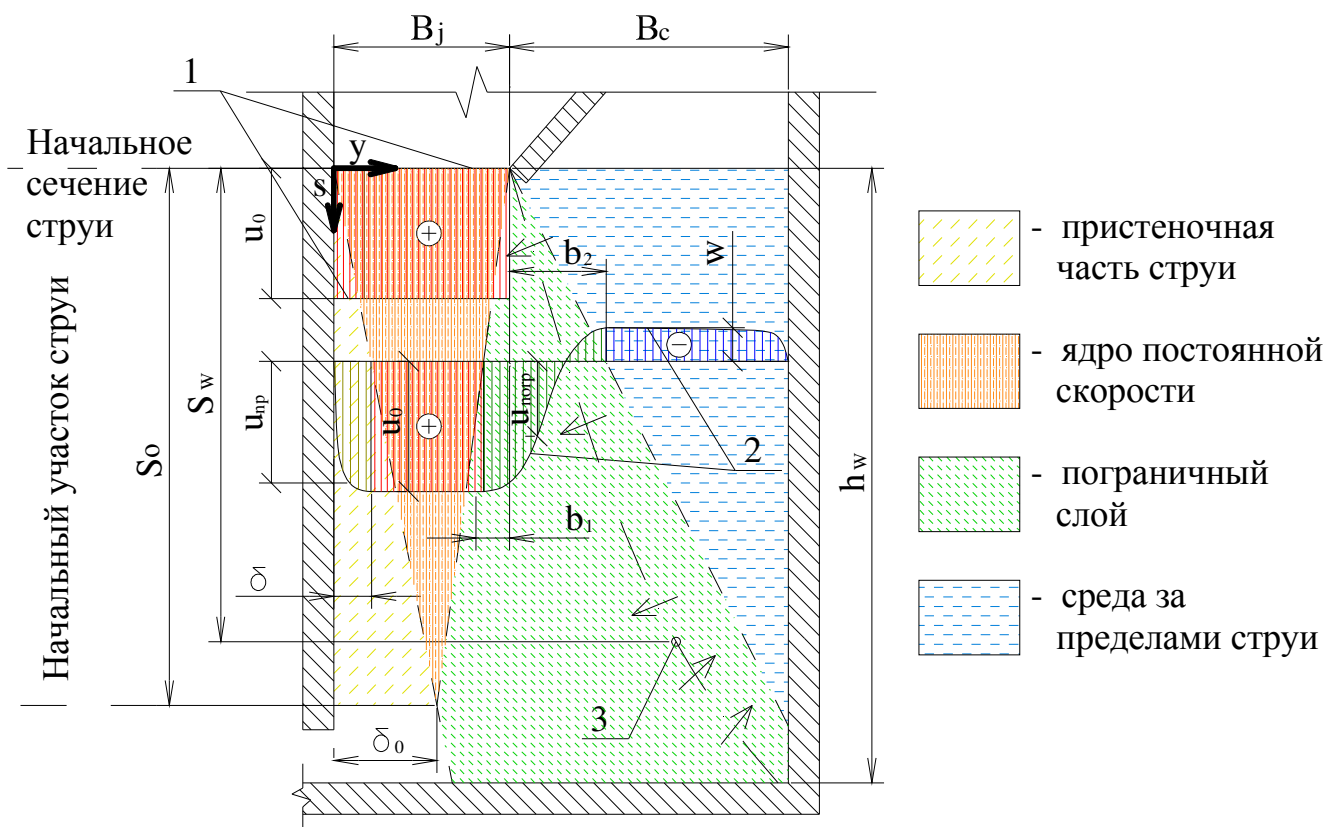


Рисунок 2 – Структура пристеночной затопленной турбулентной струи в аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации:

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

Ядро постоянной скорости существует в пределах начального участка с длиной S_0 , которая вычисляется посредством уравнения (1)

$$B_j = \frac{0,37 \cdot S_0^{0,8} \cdot \mu^{0,2}}{\rho_{см}^{0,2} \cdot u_0^{0,2}} + 0,125 \cdot S_0, \text{ м}, \quad (1)$$

где u_0 – скорость в ядре постоянной скорости, м/с;

B_j – ширина зазора, м;

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

μ – динамическая вязкость иловой смеси, Па·с.

Расходы иловой смеси в соответствующих частях струи определяются по формулам (2-4)

$$Q_\delta = \int_0^\delta C \cdot u_{np} \cdot dy, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (2)$$

$$Q_c = u_0 \cdot \int_\delta^{B_j - b_1} C \cdot dy, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (3)$$

$$Q_b = \int_{B_j - b_1}^{B_j + b_2} C \cdot u_{погр} \cdot dy, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4)$$

где y – горизонтальная координата относительно затопленной перегородки, м; Q_δ – расход в пристеночной части струи, м³/с; Q_c – расход в ядре постоянной скорости, м³/с; Q_b – расход в пограничном слое, м³/с; C – поперечная ширина потока, м; δ – ширина пристеночного слоя, м; b_1 – горизонтальное смещение внутренней границы пограничного слоя, м; b_2 – горизонтальное смещение внешней границы пограничного слоя, м; u_{np} – скорость течения в пристеночном слое, м/с; $u_{погр}$ – скорость течения в пограничном слое, м/с, вычисляемая по формуле (5)

$$u_{погр} = (u_0 + w) \cdot \left[1 - \left((y - B_j + b_1) / b \right)^{1,5} \right]^2 - w, \text{ м/с}, \quad (5)$$

где w – скорость встречного потока жидкости за пределами струи, обусловленная вращательным движением в водоворотной зоне (без учёта гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны), м/с.

В пределах начального участка струи

$$b_1 = 0,125 \cdot s, \text{ м}; \quad (6)$$

$$b_2 = 0,175 \cdot s, \text{ м}, \quad (7)$$

где s – вертикальная координата относительно начального сечения струи, м.

Результирующий расход в любом произвольно взятом горизонтальном сечении, без учёта расхода очищаемой жидкости $Q_{ст}$, равен подаче затопленного эрлифта

$$Q_a = Q_\delta + Q_c + Q_b - Q_w, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (8)$$

где Q_a – расход в зазоре, который равен подаче затопленного эрлифта, м³/с;

Q_w – расход жидкости в восходящем потоке за пределами струи, $\text{м}^3/\text{с}$.

После подстановки формул (2), (3), (4) в уравнение (8), учёта расхода очищаемой жидкости $Q_{\text{ст}}$ и математических преобразований выведены формулы (9), (10), (11) для расчёта основных гидродинамических параметров осветлителя.

При прямоугольной в плане форме аэротенка-осветлителя вертикальная скорость восходящего потока в осветлителе v рассчитывается по формуле (9), а при круглой – по формуле (10)

$$v_{(n)} = \frac{u_0 \cdot s \cdot (0,01 - 0,125 \cdot \delta_0 / S_0)}{B_c - 0,01 \cdot s} + \frac{Q_{\text{см}} \cdot (h_w - s)}{L \cdot (B_c - 0,175 \cdot s) \cdot h_w}, \text{ м/с}, \quad (9)$$

$$v_{(к)} = u_0 \cdot \frac{0,02 \cdot (r_a + B_j) + 0,0051 \cdot s - \frac{\delta_0}{S_0} \cdot \left(\frac{s \cdot \delta_0}{15 \cdot S_0} + 0,25 \cdot r_a \right)}{(2 \cdot r - B_c) \cdot B_c / s - 0,02 \cdot (r - B_c) - 0,0051 \cdot s} + \frac{Q_{\text{см}} \cdot (h_w - s)}{\pi \cdot (r^2 - (r - B_c + 0,175 \cdot s)^2) \cdot h_w}, \text{ м/с}, \quad (10)$$

где $v_{(n)}$, $v_{(к)}$ – скорость восходящего потока осветлителя при, соответственно, прямоугольной или круглой в плане форме аэротенка-осветлителя, м/с ;

δ_0 – ширина пристеночной части струи, м , при $s = S_0$;

$Q_{\text{ст}}$ – расход очищаемой жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$;

h_w – расстояние от дна до наклонного козырька, м ;

B_c – расстояние от нижней кромки козырька до стенки корпуса (ширина осветлителя), м ;

L – длина прямоугольного в плане аэротенка-осветлителя, м ;

r_a – радиус затопленного эрлифта, м ;

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

По формуле (11) вычисляется расход возвратного активного ила, который перетекает из осветлителя в нисходящий поток аэротенка

$$Q_R = Q_{v(S_w)} - Q_{\text{см}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (11)$$

где $Q_{v(S_w)}$ – расход восходящего потока в осветлителе на уровне условного центра водоворотной зоны, $\text{м}^3/\text{с}$. Расход Q_v восходящего потока в осветлителе при различных вертикальных координатах s вычисляется по формуле (12) или (13), в зависимости от конфигурации аэротенка-осветлителя

$$Q_{v(n)} = (B_c - 0,175 \cdot s) \cdot L \cdot v_{(n)}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (12)$$

$$Q_{v(к)} = \pi \cdot [r^2 - (r - B_c + 0,175 \cdot s)^2] \cdot v_{(к)}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (13)$$

где $Q_{v(n)}$, $Q_{v(к)}$ – расход восходящего потока в осветлителе при, соответственно, прямоугольной или круглой в плане форме аэротенка-осветлителя, $\text{м}^3/\text{с}$.

Обозначим скорость горизонтального течения жидкости через условную границу между осветлителем и аэротенком как скорость рециркуляции u_h .

Скорость рециркуляции u_h определяется по формуле (14) при прямоугольной или по формуле (15) – при круглой в плане форме аэротенка-осветлителя

$$u_{h,(n)} = \frac{dQ_{v(n)}}{L \cdot ds}, \text{ м/с}; \quad (14)$$

$$u_{h,(к)} = \frac{dQ_{v(к)}}{2 \cdot \pi \cdot (r - B_c + 0,175 \cdot s) \cdot ds}, \text{ м/с}, \quad (15)$$

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

Скорость v восходящего потока снижается по мере приближения к верхней части осветлителя (Рис. 3). Снижение скорости фильтрования оказывает положительный эффект на процесс осветления во взвешенном слое.

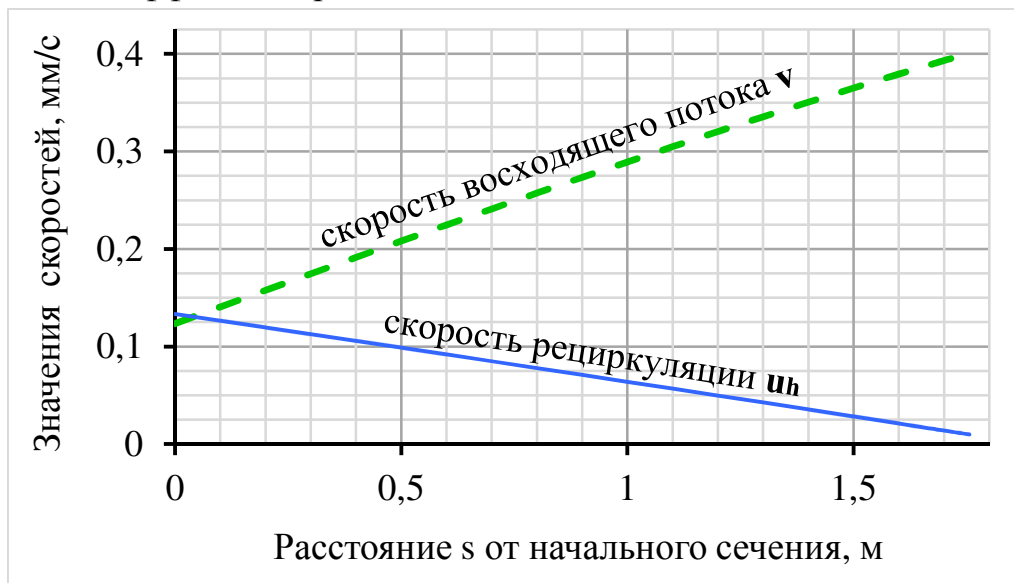


Рисунок 3 – Характерный график изменения скоростей в осветлителе в зависимости от расстояния s от начального сечения затопленной турбулентной струи

Расход возвратного активного ила из зоны осветления Q_R повышается при увеличении скорости в зазоре u_0 и снижении расхода очищаемой жидкости $Q_{ст}$. Время пребывания τ_w иловой смеси в осветлителе обратно пропорционально расходу возвратного активного ила Q_R .

Скорость восходящего потока в осветлителе v следует ограничивать с целью предотвращения размыва взвешенного слоя и выноса ила с очищенной жидкостью. Определение зависимостей для расчёта максимально допустимой скорости нисходящего потока в зазоре требует экспериментальных исследований.

В третьем разделе выполнены экспериментальные исследования, подтверждающие и дополняющие теоретические изыскания. Для проведения экспериментов была собрана лабораторная установка, которая представлена на рисунке 4. Корпус аэротенка-осветлителя представляет собой ёмкость из поликарбоната объёмом $6,5 \text{ дм}^3$. В лабораторной установке изменялись высота расположения и

угол наклона козырька 5. Система аэрации состоит из затопленной перегородки 4, аэратора 7 и микрокомпрессора 1. Нагрузка на зеркало защитной зоны обеспечивается подачей сточной жидкости по трубке 3 или рециркуляцией осветлённой жидкости циркуляционным насосом 10. Измерение расхода подаваемой жидкости осуществлялось объёмным методом, а воздуха – посредством газового счётчика 2. Прозрачность стенок позволяет измерять уровень поверхности илоразделения 8.

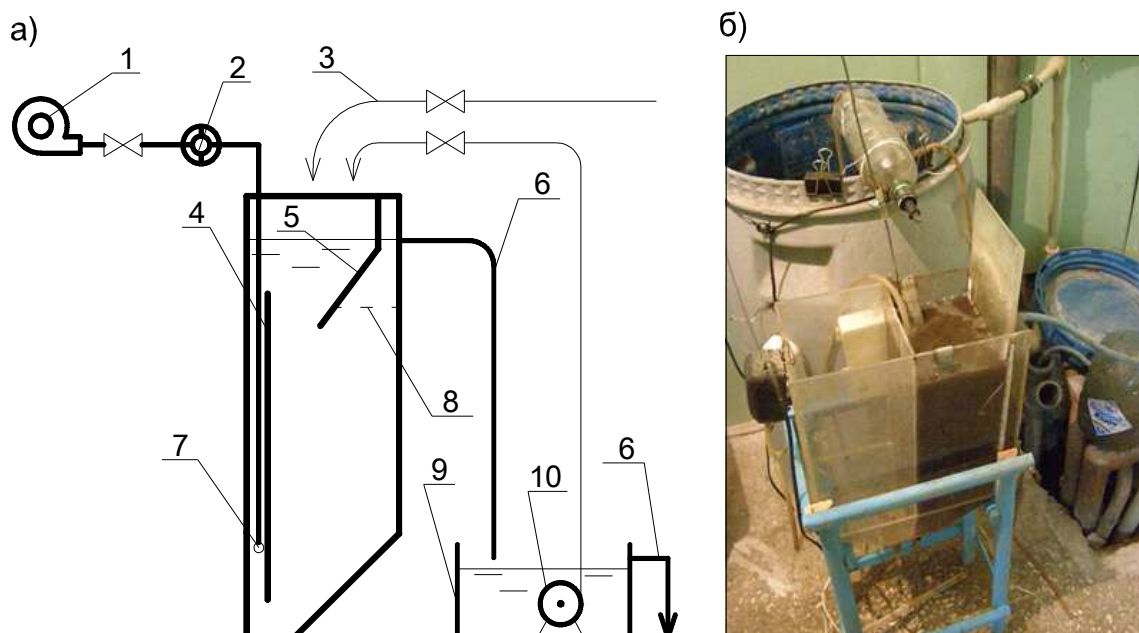


Рисунок 4 – Лабораторная установка: а) схема; б) фотоизображение:

1 – микрокомпрессор; 2 – газовый счётчик; 3 – подача сточной жидкости; 4 – затопленная перегородка; 5 – наклонный козырёк; 6 – трубки отвода осветлённой жидкости; 7 – аэратор; 8 – поверхность илоразделения; 9 – промежуточная ёмкость; 10 – циркуляционный насос.

Проведены эксперименты по определению максимальной гидравлической нагрузки на взвешенный слой. Так как расход и площадь сечения потока осветляемой жидкости изменяются по мере её движения в илоотделителе, гидравлическая нагрузка на осветлитель q_c выражалась для сечения шириной B_c , находящегося на уровне нижней кромки наклонного козырька (Рис. 2).

Критической гидравлической нагрузкой на осветлитель $q_{c\text{кр}}$ считалось наибольшее её значение, при котором не происходит поднятие уровня поверхности илоразделения, приводящее к выносу активного ила с очищенной жидкостью непосредственно из взвешенного слоя. На основании результатов многофакторного эксперимента, в программе TableCurve 3D получена зависимость (16) критической гидравлической нагрузки на осветлитель от интенсивности циркуляции $I_{ц}$ и отношения ширины зазора B_j к глубине h_w

$$q_{c\text{кр}} = 74,2 \cdot \frac{S^{1,053}}{I_{ц}^{1,248}}, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (16)$$

где S' – относительная длина затопленной струи, равная отношению глубины h_w , м, к ширине зазора B_j , м;

$I_{ц}$ – интенсивность циркуляции, равная отношению часовой подачи затопленного эрлифта к площади сечения зазора, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Коэффициент множественной детерминации формулы (16) составил $R_q^2 = 0,824$. График зависимости критической гидравлической нагрузки на осветлитель от интенсивности циркуляции и относительной длины затопленной струи представлен на рисунке 5.

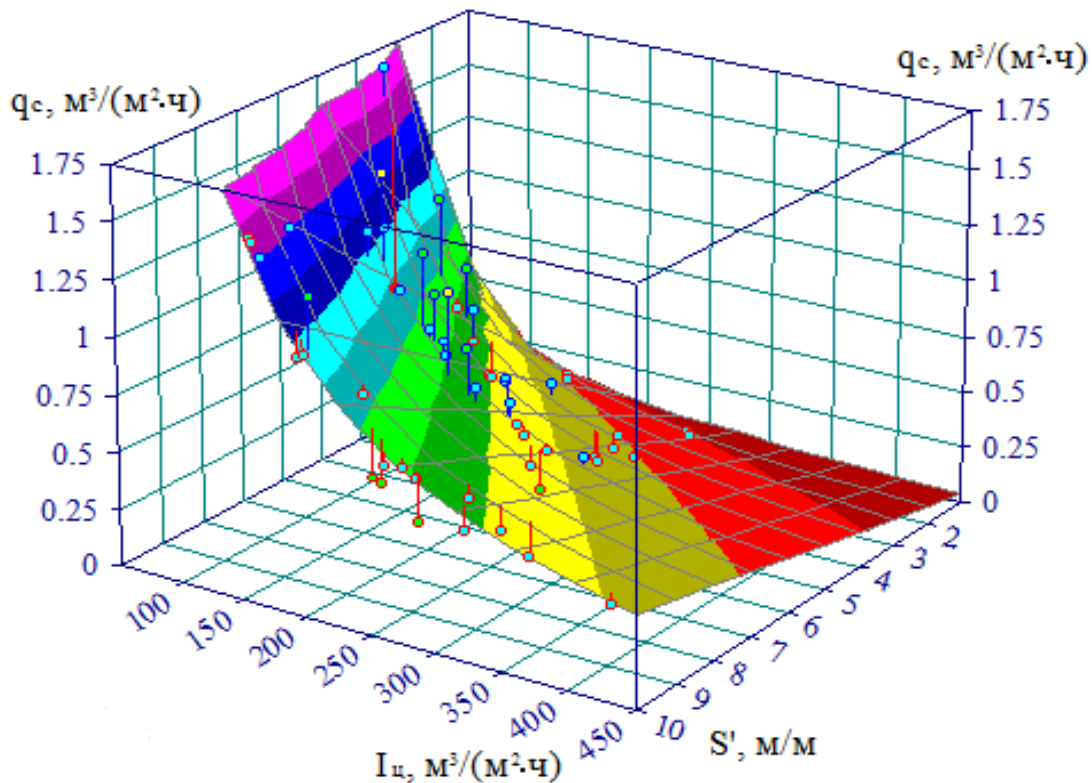


Рисунок 5 – График зависимости критической гидравлической нагрузки на осветлитель $q_{c\text{кр}}$ от интенсивности циркуляции $I_{ц}$ и относительной длины струи S'

Как видно из графика на рисунке 5, критическая гидравлическая нагрузка на осветлитель возрастает при снижении интенсивности циркуляции, повышении глубины осветлителя и уменьшении ширины зазора. Полуширина доверительного интервала равна произведению стандартного отклонения и критерия Стьюдента. Максимально допустимую гидравлическую нагрузку следует принимать по нижнему пределу доверительного интервала – по формуле (17)

$$q_{c\text{дон}} = q_{c\text{кр}} - t \cdot \sigma = 74,2 \cdot \frac{S'^{1,053}}{I_{ц}^{1,248}} - 0,29, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (17)$$

где t – критерий Стьюдента, который, при уровне значимости $\alpha = 0,1$, равен $t = 1,28$;

σ – стандартное отклонение результатов эксперимента, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Проведены эксперименты с целью получения зависимости концентрации взвешенных веществ в осветлённой жидкости от концентрации активного ила в аэротенке a_i , интенсивности циркуляции $I_{ц}$ и гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны q_s . Гидравлическая нагрузка на зеркало защитной зоны определяется по формуле (18)

$$q_s = \frac{Q_{ч}}{\omega_s} = q_c \cdot \frac{\omega_c}{\omega_s}, \quad \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (18)$$

где ω_s – площадь зеркала защитной зоны, м^2 ;

$Q_{ч}$ – часовой расход очищаемой жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$.

На основании результатов экспериментальных исследований в программе DataFit получена формула (19) для расчёта концентрации взвешенных веществ $C_{в.в.}$ в осветлённой жидкости при иловом индексе $I = 85 \dots 100 \text{ см}^3/\text{г}$ и концентрации активного ила $a_i = 2,7 \dots 7,0 \text{ г}/\text{дм}^3$. Коэффициент множественной детерминации для формулы (19) составил $R_c^2 = 0,88$.

$$C_{в.в.} = 2,27 \cdot a_i^{-0,379} \cdot q_s^{0,84} \cdot 1,0078^{I_{ц}}, \quad \text{мг}/\text{дм}^3. \quad (19)$$

Из уравнения (19) видно, что концентрация взвешенных веществ в осветлённой жидкости на выходе из аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации возрастает с увеличением гидравлической нагрузки на взвешенный слой и интенсивности циркуляции.

Перенос параметров лабораторной модели на натуральный объект следует производить с соблюдением подобия. Влияние изменения критериев подобия в геометрически и кинематически подобных аэротенках-осветлителях определялось путём полупромышленных испытаний, представленных в разделе 4.

В четвёртом разделе представлены результаты исследований полупромышленной экспериментальной модели (Рис. 6) и приведены рекомендации к расчёту аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации.

Процессы поддержания и обновления взвешенного слоя осветлителя характеризуются критериями Рейнольдса (Re) и Фруда (Fr). Для сжатого сечения основного циркуляционного потока лабораторной модели $Re = 2500 \dots 7000$, $Fr = 1,7 \cdot 10^{-3} \dots 9,8 \cdot 10^{-3}$. Автомодельность по критерию Фруда выполняется при $Fr < 0,05 \dots 0,1$, а по критерию Рейнольдса – в квадратичной зоне сопротивления турбулентного режима движения. Предположено, что в лабораторной модели имеет место автомодельность по критериям Рейнольдса и Фруда. Тогда автомодельность характерна и для производственных аэротенков-осветлителей, поскольку при соблюдении геометрического и кинематического подобий в них имеют место ещё большие значения чисел Рейнольдса и ещё меньшие – Фруда. Для проверки гипотезы о том, что при обеспечении геометрического и кинематического подобий осуществляется и динамическое подобие, проведены экспериментальные исследования критической гидравлической нагрузки на

зеркало защитной зоны в полупромышленной модели азротенка-осветлителя. Полупромышленная модель выполнена геометрически подобной по отношению к лабораторной модели.

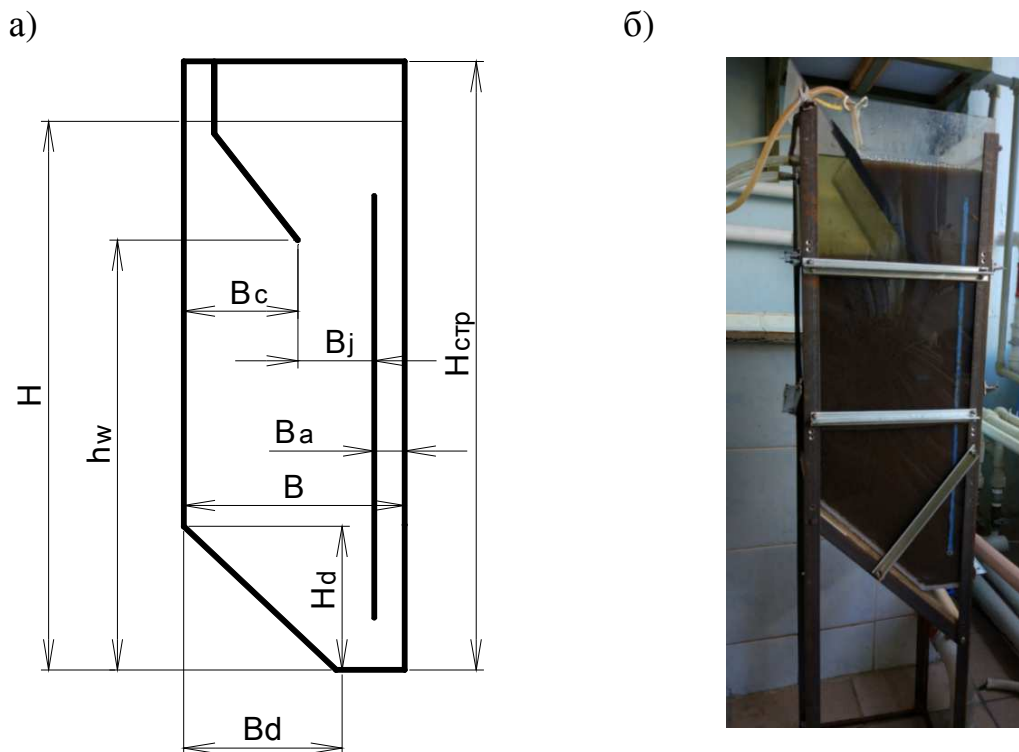


Рисунок 6 – Полупромышленная экспериментальная модель: а) обозначения геометрических параметров; б) фотоизображение.

Наименование обозначенных на рисунке 6 размеров и их значения для экспериментальных моделей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Размеры экспериментальных моделей

Наименование геометрического параметра	Значение соответствующего размера, мм	
	Лабораторная модель	Полупромышленная модель
Рабочая глубина H	370	740
Высота наклонной части дна H_d	96	191
Глубина от низа козырька h_w	290	580
Ширина наклонной части дна B_d	100	198
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

На рисунке 7 представлены значения критической гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны в зависимости от интенсивности циркуляции,

полученные при испытаниях лабораторной и полупромышленной экспериментальных моделей. Графики теоретической зависимости и границ доверительного интервала построены по результатам исследований, представленных в разделе 3.

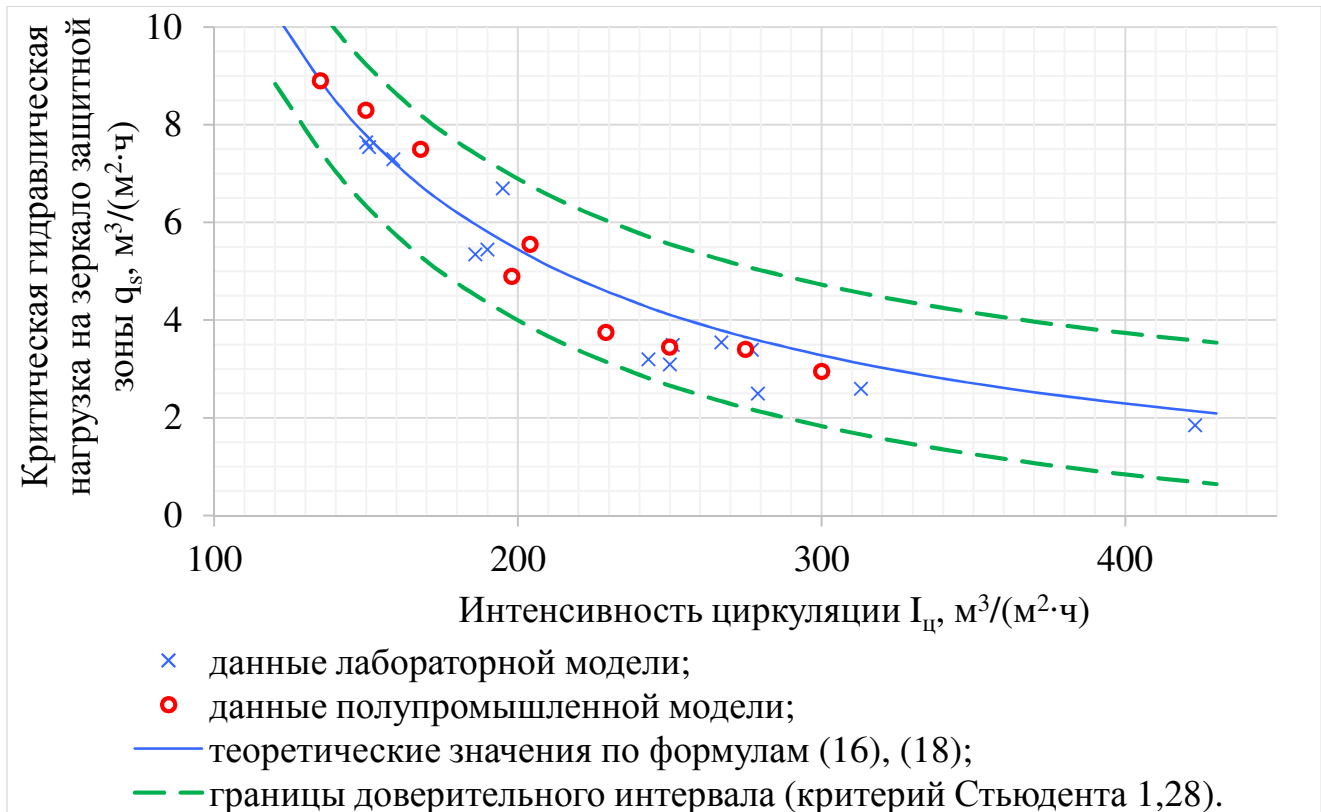


Рисунок 7 – Зависимость критической гидравлической нагрузки от интенсивности циркуляции в геометрически подобных экспериментальных моделях аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации

Все точки, отложенные на основании испытаний полупромышленной модели аэротенка-осветлителя, попадают в доверительный интервал, рассчитанный при уровне значимости $\alpha = 0,1$. В результате анализа экспериментальных данных подтверждено отсутствие значимости масштаба сооружения при определении максимально допустимой гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, приведенных во втором и третьем разделах диссертационной работы, разработан алгоритм расчёта аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации (Рис. 8).

В процессе расчёта задаются расход сточной жидкости ($Q_{\text{ч}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$), полное биологическое потребление кислорода в исходной сточной жидкости ($L_{\text{ен}}$, $\text{мг}/\text{дм}^3$) и требуемое БПК_{полн} в очищенной жидкости ($L_{\text{ех}}$, $\text{мг}/\text{дм}^3$). Принимаются значения удельной скорости окисления (ρ , $\text{мг}/(\text{г}\cdot\text{ч})$) и концентрации (a_i , $\text{г}/\text{дм}^3$) активного ила в аэротенке, интенсивности аэрации в затопленном эрлифте (q_{air} , $\text{м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$), коэффициента использования кислорода ($k_{\text{исп}}$) и допустимого времени пребывания ила в осветлителе (τ_w , ч).

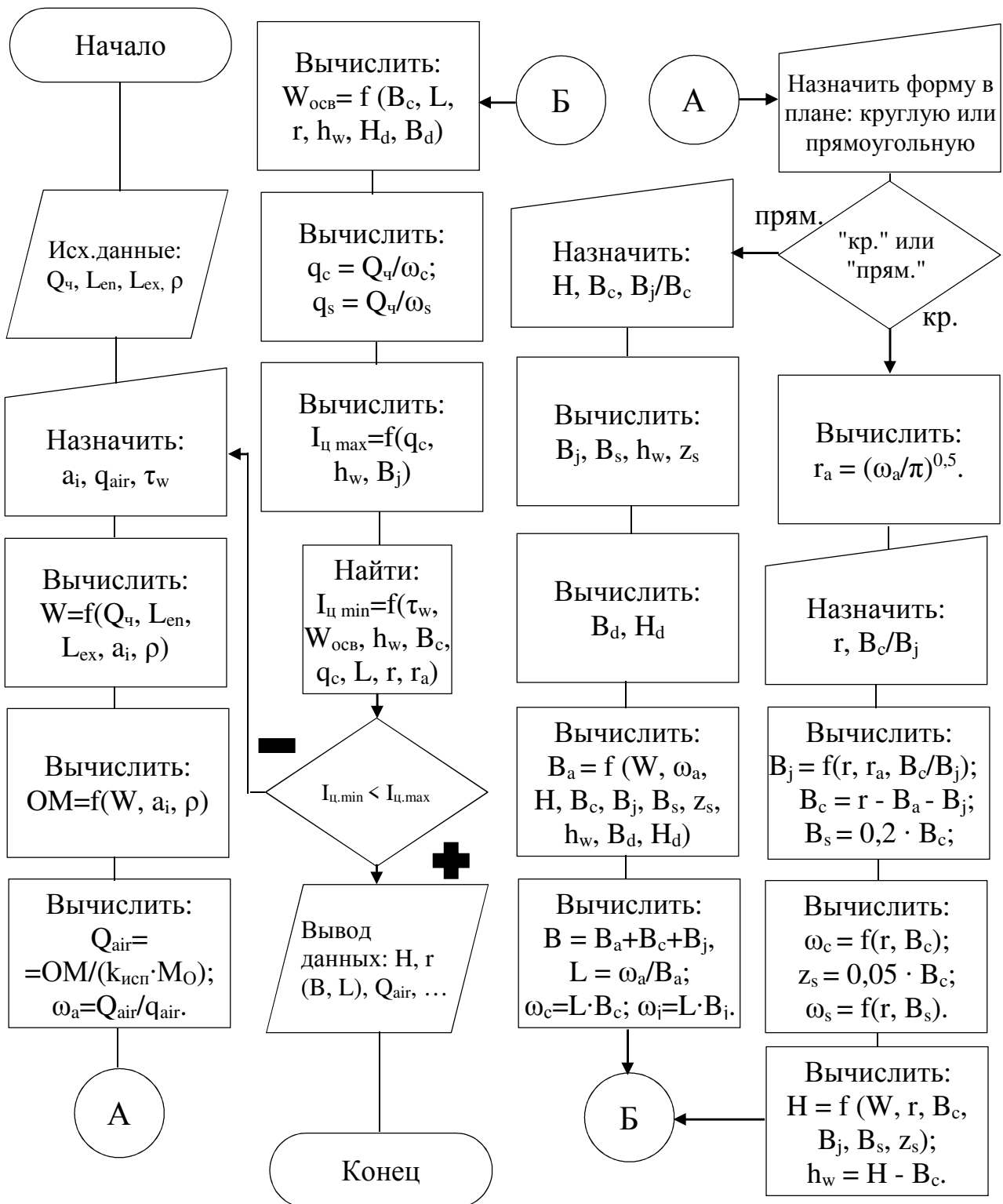


Рисунок 8 – Схема алгоритма проектирования аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации

Для достижения большей гидравлической нагрузки рекомендуется принимать концентрацию активного ила $a_i = 3 \dots 6$ г/дм³, а интенсивность циркуляции $I_{ц} = 120 \dots 200$ м³/(м²·ч). Рекомендуемая интенсивность аэрации в затопленном эрлифте составляет $q_{air} = 10 \dots 20$ м³/(м²·ч). Конструктивно назначается круглая либо прямоугольная в плане форма аэротенка-осветлителя.

Рекомендуется принимать отношение рабочей высоты к ширине осветлителя $H/V_c = 3 \dots 4$, отношение ширины зазора к ширине осветлителя $V_j/V_c = 0,25 \dots 0,35$. Вычисляются окислительная мощность (ОМ, кг/ч) геометрические размеры аэротенка-осветлителя ($W, W_{осв}, м^3, \omega_a, \omega_c, \omega_s, м^2, H, V_c, V_j, V_s, h_w, z_s, м$ и т.д.), требуемое количество воздуха для аэрации ($Q_{air}, м^3/ч$), значение гидравлической нагрузки на зеркало защитной зоны ($q_s, м^3/(м^2 \cdot ч)$).

Уточняются допустимые пределы интенсивности циркуляции, обеспечивающие достаточное обновление ила в осветлителе ($I_{ц, min}, м^3/(м^2 \cdot ч)$) и предотвращающие размыв взвешенного слоя ($I_{ц, max}, м^3/(м^2 \cdot ч)$). При необходимости осуществляется изменение принятых ранее величин и соответствующий перерасчёт параметров аэротенка-осветлителя.

В пятом разделе рассчитаны аэротенки-осветлители для очистки стоков в системе замкнутого водоснабжения рыбной фабрики в ПГТ Пантелеймоновка производительностью $5 м^3/ч$ (Рис. 9). Сооружения очистки включают 2 аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации с диаметром $D = 3 м$ и высотой $H = 4,1 м$. Годовой экономический эффект от внедрения разработанных аэротенков-осветлителей составил 27,4 тыс. руб./год.

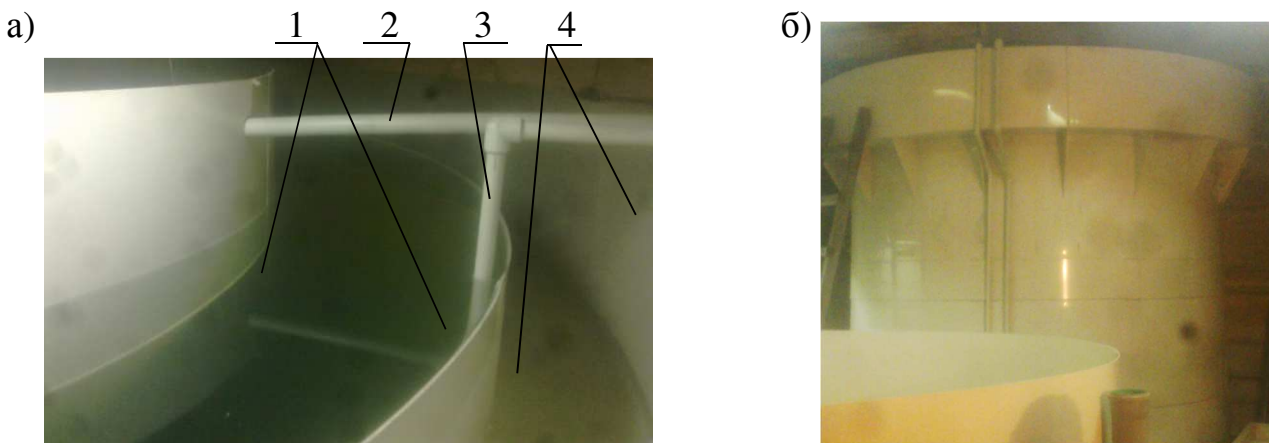


Рисунок 9 – Аэротенк-осветлитель с затопленной эрлифтной системой аэрации, сооружённый на рыбной фабрике:

а) вид на верхнюю часть; б) вид сбоку:

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

Определён экономический эффект от внедрения разработанных аэротенков-осветлителей при реконструкции КОС в г. Стерлитамак (РФ, Башкортостан) при повышении производительности сооружений биологической очистки с 25000 до 37500 $м^3/сут$. Базовый вариант предполагал строительство дополнительных аэротенков и сблокированных с ними вторичных отстойников по типовому проекту 902-3-20 «Блок ёмкостей для станций биологической очистки сточных вод пропускной способностью 10, 17 и 25 тыс. $м^3/сут$.», предлагаемый вариант –

переоборудование существующих аэротенков и вторичных отстойников в аэротенки-осветлители с затопленной эрлифтной системой аэрации. Экономический эффект по капитальным затратам 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. На базе теории затопленных турбулентных струй разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать гидродинамические параметры илоотделителя по расходу очищаемой жидкости, скорости потока в зазоре 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. Расход возвращаемой иловой смеси определяет время пребывания активного ила в осветлителе.

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...200 м³/(м²·ч) максимально допустимая гидравлическая нагрузка на зеркало защитной зоны составляет 4...8 м³/(м²·ч).

5. Разработаны практические рекомендации для расчёта аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации, представленные в виде алгоритмической схемы. 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 к ширине осветлителя $B_j/V_c = 0,25 \dots 0,35$.

6. Рассчитан экономический эффект по капитальным затратам от внедрения аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации в г. Стерлитамак (Башкортостан, РФ), который составил 152 млн. руб. Годовой экономический эффект от внедрения разработанных аэротенков-осветлителей на рыбной фабрике в ПГТ Пантелеймоновка (ДНР) для очистки $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ стоков составил 27,4 тыс. руб./год.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки ДНР:

1. **Заворотный Д.В.** Обеспечение циркуляции иловой смеси в аэротенках-отстойниках со взвешенным слоем / Д.В. Заворотный, А.В. Жибоедов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. – 2016. – №3 (119). – С. 186-189. *(Проанализировано использование циркуляционных токов для обновления взвешенного слоя).*

2. Нездойминов В.И. Аэротенк-отстойник с обновляющимся взвешенным слоем / В.И. Нездойминов, **Д.В. Заворотный** // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность. – 2016. – № 5 (121). – С. 16-20. *(Описан принцип и преимущества илоотделения в разработанном аэротенке-осветлителе).*

3. Нездойминов В.И. Исследование допустимой подачи затопленной эрлифтной системы аэрации в аэротенке-осветлителе / В.И. Нездойминов, **Д.В. Заворотный**, В.С. Рожков // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. – 2017. – №3 (125). – С. 80-85. *(Приведены результаты экспериментов по определению критической гидравлической нагрузки).*

4. **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.

5. Нездойминов В.И. Линии тока аэротенка-осветлителя с затопленной эрлифтной системой аэрации / В.И. Нездойминов, **Д.В. Заворотный**, О.С. Годовиченко

// Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность. – 2018. – №5 (133). – С. 67-72. *(Исследовано положение границы водоворотной зоны).*

- публикации в зарубежных научных изданиях, индексируемых международной наукометрической базой Scopus:

6. Nezdoiminov V. Permissible parameters for the circulation rate of the sludge mixture in airlift reactor-clarifier with suspended layer / V. Nezdoiminov, D. Zavorotnyi, V. Rozhkov, P. Deminov // MATEC Web of Conferences, 2018. - №245. *(Приведены результаты исследования пределов допустимой интенсивности циркуляции).*

- публикации по материалам научных конференций:

7. **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. *(Обосновано применение теории турбулентных струй для математического описания).*

8. 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. *(Представлены результаты исследования концентрации взвешенных веществ в осветлённой жидкости).*

9. 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. *(Проанализированы основные гидродинамические параметры взвешенного слоя).*

- публикации в других научных изданиях:

10. Нездойминов В.И. Биологическая очистка городских сточных вод с эрлифтными биореакторами-осветлителями / В.И. Нездойминов, В.С. Рожков, **Д.В. Заворотный** // Строитель Донбасса. – 2018. № 4 (5) – С. 17-21. *(Описан эрлифтный биореактор-осветлитель, являющийся основным элементом представленной концепции очистки сточных вод).*

- патенты:

11. Пат. 132076 Украина, B01D 21/02, C02F 3/02, C02F 103/00 Аэротенк-осветлитель / В.И. Нездойминов, **Д.В. Заворотный**, В.И. Зятина., В.С. Рожков – № 201809073; заявл. 31.08.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. №3. – 4 с.: ил.