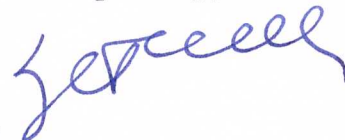


На правах рукописи



ЗЯТИНА ВИТАЛИЙ ИЛЬИЧ

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ
КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ИЛОВЫХ СМЕСЕЙ
ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ**

05.23.04 – водоснабжение, канализация, строительные системы охраны
водных ресурсов

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Научный руководитель:

Нездойминов Виктор Иванович,

доктор технических наук, профессор

Идентичность всех экземпляров диссертации заверяю:
Ученый секретарь диссертационного совета
Д 01.005.01



Удовиченко З. В.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	5
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ОБРАБОТКИ И ОТДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ИЛОВЫХ СМЕСЕЙ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД	12
1.1 Характеристика современных методов обработки осадков городских сточных вод	12
1.2 Особенности процесса стабилизации активного ила	20
1.3 Характеристика минерализованного активного ила.	25
1.4 Отделение избыточного активного ила в системах обработки осадков	32
1.4.1 Метод гравитационного илоотделения	32
1.4.2 Метод мембранного илоотделения	35
1.4.3 Метод флотационного илоотделения	39
1.4.4 Осветление со взвешенным слоем осадка для илоотделения концентрированных иловых смесей	42
1.5 Постановка задач исследований	47
1.6 Выводы по первому разделу	50
РАЗДЕЛ 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЛООТДЕЛЕНИЯ В СООРУЖЕНИЯХ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ	51
2.1 Особенности процессов отделения активного ила во взвешенном слое	51
2.2 Сущность формирования взвешенного слоя осадка в илоотделителе с восходяще-нисходящим распределением потоков	58
2.3 Полуэмпирическая математическая модель формирования взвешенного слоя	62
2.4 Моделирование лабораторного илоотделителя	67

2.5 Восходяще-нисходящее распределение потока в илоотделителе	70
2.6 Выводы по второму разделу	74
РАЗДЕЛ 3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЛООТДЕЛЕНИЯ ПОСЛЕ АЭРОБНОЙ ОБРАБОТКИ	75
3.1 Описание лабораторных установок, методы исследования	75
3.2 Результаты лабораторных исследований илоотделения во взвешенном слое осадка	79
3.2.1 Исследование распределения иловой смеси по высоте илоотделителя	79
3.2.2 Определение циркуляции иловой смеси	82
3.2.3 Изучение изменения высоты взвешенного слоя с применением планирования экспериментальных исследований	85
3.2.4 Исследования влияния гидравлической нагрузки на высоту взвешенного слоя при различной концентрации ила в исходной смеси	88
3.3 Обработка результатов экспериментов, получение расчетных зависимостей	92
3.4 Лабораторные исследования работы илоотделителя на концентрированной иловой смеси с применением планирования эксперимента	101
3.5 Основные выводы по третьему разделу	111
РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЛООТДЕЛЕНИЯ ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ	112
4.1 Исследования на илоотделителе со взвешенным слоем	112
4.2 Расчет степени рециркуляции иловой воды	120
4.3 Выводы по четвертому разделу	125
РАЗДЕЛ 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ИЛОВОЙ СМЕСИ ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ	126
5.1 Рекомендации на проектирование установок илоотделения со	126

взвешенным слоем

5.2 Экономическая эффективность внедрения отделения активного
ила во взвешенном слое на канализационных очистных сооружениях г.

Макеевки Донецкой области

5.3 Выводы по пятому разделу 135

ВЫВОДЫ 136

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 138

Приложение А

Приложение Б

Приложение В

Приложение Г

Приложение Д

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Илоотделение широко используется на канализационных очистных сооружениях в виде вторичных отстойников в технологии биологической очистки либо илоуплотнителей в сооружениях по обработке осадков. Обычно во вторичные отстойники поступает иловая смесь (смесь активного ила и иловой воды) с концентрацией $1,5...3,0 \text{ г/дм}^3$, а в уплотнитель по обезвоживанию осадков с концентрацией $5...6 \text{ г/дм}^3$.

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению концентрации иловых смесей в технологических процессах как биологической очистки, так и обработки осадков. В системах биологической очистки с гранулированным активным илом рабочей концентрацией $6...8 \text{ г/дм}^3$, а при обработке осадков с глубокой аэробной минерализацией до 8 г/дм^3 и выше. При высоких концентрациях в илоотделителе появляются проблемы, связанные с выносом иловой смеси. Илоотделение отстаиванием имеет свои недостатки, которые состоят в том, что при повышении концентрации происходит увеличение времени отстаивания, и активный ил остается без достаточного количества кислорода, что ухудшает его свойства. В этом случае применяются различные способы илоотделения, одним из них считается замена отстаивания на илоотделение во взвешенном слое осадка.

Особые проблемы возникают при илоотделении в технологии глубокой минерализации, когда необходимо из иловой смеси вывести наиболее минерализованные частицы ила вместе с иловой водой.

Таким образом, разработка технических решений, направленных на увеличение эффективности разделения концентрированных иловых смесей, актуальна и направлена на улучшение экологического состояния окружающей среды.

Степень разработанности темы. Недостатком существующих способов разделения иловых смесей является сложность работы с концентрированным активным илом. Разделение иловых смесей во взвешенном слое осадка требует дополнительного исследования и интенсификации процессов. Работа основана

на результатах теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных ученых в области разделения смесей во взвешенном слое и обработки осадков сточных вод (Минц Д.М., Кургаев Е.Ф., Сколубович Ю.Л., Воронов Ю.В., Дрозд Г.Я., Исмаилов Э.К.) с использованием взвешенного слоя в процессах илоотделения (Яковлев С.В., Клячко В.А., Шуберт С.А., Колпакова В.П., Дёмина М.В., Первов Г.Г., Zhang L., Chen Y.).

Связь работы с научными программами, планами, темами. Основные исследования теоретического и практического характера выполнялись в соответствии с государственной программой «Реформирование и развитие жилищно-коммунального хозяйства на 2004-2020 гг.» (Постановление Кабинета Министров Украины №1869 IV от 24.06.2004 г.).

Исследования выполнялись в рамках госбюджетных научно-исследовательских тем Министерства образования и науки Украины и непосредственно связаны с планами госбюджетной тематики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, выполнялись по заказу Министерства образования и науки Украины (государственные регистрационные номера 0111U001806, 0109U003037).

Предложенный метод интенсификации процесса разделения иловых смесей прошел апробацию на станциях биологической очистки г. Макеевки, г. Донецк, а так же на активном иле г. Зудербург, Германия.

Цель работы. Интенсификация процесса разделения концентрированных иловых смесей путем совершенствования гидродинамических параметров илоотделителя со взвешенным слоем за счет восходяще-нисходящего распределения потоков для увеличения производительности сооружения.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

— проанализировать современные представления о способах разделения концентрированных иловых смесей, изучить основные их недостатки и определить основные пути повышения эффективности отделения активного ила;

- теоретически обосновать целесообразность применения метода илоотделения во взвешенном слое активного ила с учетом его седиментационных свойств;
- выполнить экспериментальные исследования на модели илоотделителя со взвешенным слоем осадка для подтверждения установленных теоретических зависимостей, провести исследования предлагаемых мер по интенсификации процессов илоотделения;
- в промышленных условиях исследовать метод илоотделения со взвешенным слоем активного ила и определить изменения гидравлической нагрузки при разбавлении осветленной иловой водой;
- разработать инженерные методы расчета конструктивных и технологических параметров илоотделителя во взвешенном слое минерализованного ила;
- разработать промышленную конструкцию илоотделителя со взвешенным слоем осадка для разделения концентрированных иловых смесей;
- оценить экономическую эффективность использования системы илоотделения со взвешенным слоем активного ила.

Объект исследования – процессы, явления и закономерности, определяющие эффективность разделения активного ила во взвешенном слое.

Предмет исследования – сооружения разделения концентрированных иловых смесей во взвешенном слое.

Научная новизна полученных результатов:

- выполнено теоретическое и экспериментальное обоснование влияния основных параметров илоотделения во взвешенном слое активного ила на процесс разделения иловых смесей, предложена методика для инженерных расчетов параметров илоотделителя;
- на основании теоретических и экспериментальных данных уточнена математическая модель работы взвешенного слоя при разделении концентрированных иловых смесей;
- впервые изучены и экспериментально подтверждены закономерности, связывающие степень разбавления обрабатываемой иловой

смеси осветленной иловой водой с параметрами работы илоотделителя в условиях повышенных концентраций ила;

— на основании обобщения теоретических и экспериментальных данных предложены принципы создания новой конструкции илоотделителя со взвешенным слоем осадка, которые обеспечивают высокую эффективность и стабильность работы сооружения по аэробной минерализации осадков, что нашло отражение в патенте Украины на полезную модель № 101528 от 25.09.15 г. «Способ илоотделения для минерализованного активного ила».

Теоретическая и практическая значимость:

— теоретически обосновано применение отделения активного ила во взвешенном слое;

— усовершенствована методика расчета сооружения по разделению концентрированных иловых смесей, позволяющая рассчитать гидравлическую нагрузку на водное зеркало илоотделителя, высоту взвешенного слоя в зависимости от исходной концентрации иловой смеси и разбавления осветленной иловой водой;

— разработаны рекомендации по проектированию сооружений илоотделения минерализованного ила;

— предложена новая конструкция илоотделителя с восходяще-нисходящим распределением потока, работающая при повышенных концентрациях активного ила;

— предложенные рекомендации по расчету илоотделителей использованы при определении оптимальных гидравлических нагрузок для повышения эффективности сооружений илоотделения модульных станций очистки сточных вод и внедрены в расчетные схемы ООО «Энергостальпроект» г. Донецк и ООО «Титан-Д» г. Донецк, а также внедрена конструкция илоотделителя на канализационных очистных сооружениях г. Макеевка;

— результаты исследований внедрены в учебный процесс ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» в курсах дисциплин «Канализационные очистные сооружения» и «Новые технологии процессов обработки сточных вод» для подготовки бакалавров и

магистров по направлению «Строительство», профиль «Водоснабжение и водоотведение».

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы автором был применен системный подход к изучению процессов формирования и существования взвешенного слоя. При помощи комплексного теоретического анализа работ ведущих специалистов и обобщения полученных выводов определялись основные направления исследования процесса илоотделения концентрированных иловых смесей во взвешенном слое осадка.

В ходе выполнения расчетно-аналитических и экспериментальных исследований взвешенного слоя были применены численные методы обработки данных и установлены определенные упрощения, позволяющие провести адаптацию к условиям разделения иловых смесей, которые не влияют на полученный результат исследований. Экспериментальные исследования выполнены в соответствии с определенными методиками с применением аттестованных измерительных приборов и специального оборудования.

Адекватность полученных экспериментальных данных подтверждена достаточной достоверностью зависимостей, полученных при математическом моделировании по отношению к результатам лабораторных исследований, что соответствует физическому смыслу процессов, проходящих во взвешенном слое активного ила, и итогам промышленных экспериментов.

Личный вклад соискателя. Основные научные результаты и положения теоретических и экспериментальных исследований процессов илоотделения во взвешенном слое активного ила разработаны и сформулированы автором лично. Определены перспективные направления исследований процессов илоотделения во взвешенном слое активного ила. Обоснован способ применения осветлителей со взвешенным слоем осадка для концентрированного минерализованного ила. Разработаны инженерные рекомендации на проектирование и эксплуатацию промышленных илоотделителей со взвешенным слоем осадка, проведена их апробация с использованием закономерностей, полученных в лабораторных условиях.

Отдельные составляющие исследований опубликованы лично и в соавторстве, перечень работ приведен в списке публикаций.

Основные положения, выносимые на защиту:

- усовершенствованная математическая модель расчета параметров взвешенного слоя активного ила и пути интенсификации процесса разделения иловых смесей во взвешенном слое осадка;
- результаты экспериментальных исследований влияния основных гидродинамических параметров на процесс разделения концентрированных иловых смесей;
- промышленная конструкция осветлителя со взвешенным слоем активного ила и результаты опытного апробирования;
- методика расчета технологических и конструктивных параметров илоотделителя с восходяще-нисходящим распределением потока.

Степень достоверности и апробация результатов диссертационной работы. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается использованием основополагающих положений теории взвешенного слоя, современных методов математического моделирования и обработки результатов исследований. Достоверность обеспечивается также широкой публикацией работ по данной теме и обсуждением их на конференциях различного уровня. Основные результаты работы и главные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XI, XII международные научные конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка, ДонНАСА, 2011–2013 гг.); 12-я научно-техническая конференция «Промислова гідравліка і пневматика» (г. Донецк, ДонНТУ, 2011 г.); национальный экологический форум «Екологія промислового регіону» (г. Донецк, «ЭкспоДонбасс», 2012 г.); III международная конференция «Научно-техническое и организационно-экономическое содействие реформам в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве» (г. Макеевка, ДонНАСА, 2012 г.); 69^я научно-техническая конференция Харьковского национального

технического университета строительства и архитектуры (г. Харьков, ХНУСА, 2014 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертационных исследований опубликованы в 9 печатных работах общим объемом 4,43 п.л., лично автора 2,74 п.л., в том числе 7 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утвержденной МОН Украины (1 – в издании, индексируемом в базе данных РИНЦ); 1 – в издании, входящем в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, индексируется в международной наукометрической базе ScienceDirect (Нидерланды). По результатам исследований получен 1 патент Украины на полезную модель № 101528 от 25.09.15 г.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованной литературы и приложений. Общий объем работы – 178 страниц, в том числе 124 страницы основного текста; содержит 6 полных страниц с рисунками и таблицами; 17 страниц списка использованных источников; 26 страниц приложений.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ОБРАБОТКИ И ОТДЕЛЕНИЯ
КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ИЛОВЫХ СМЕСЕЙ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД1.1 Характеристика современных методов обработки осадков
городских сточных вод

За последние годы специалисты в области биологической очистки городских сточных вод достаточно большое внимание уделяют вопросам мониторинга и совершенствования различных методов по обработке и утилизации осадков.

Известно, что на большинстве станций биологической очистки Украины и Российской Федерации утилизация, переработка или захоронение осадков сточных вод является одной из наиболее важных задач в коммунальном хозяйстве [1...4, 15].

Аналогичные проблемы возникают во многих Европейских странах в связи с ужесточением нормативных требований по утилизации осадков. В Украине обезвоживание осадков повсеместно осуществляется на иловых площадках, которые на сегодняшний день в большинстве перегружены и исчерпали свои проектные мощности [6, 8, 9, 11]. Иловые площадки являются постоянным источником загрязнения окружающей среды. К основным загрязнениям относятся сероводород, аммиак, метан и микробные загрязнения, включая патогенную микрофлору [5, 7].

По оценкам различных экспертов [15], ежегодно на коммунальных очистных сооружениях бытовых сточных вод образуется более 200 млн. тонн осадка. Только в России ежегодно образуется более 90 млн. м³ осадков при естественной влажности, что в пересчете на сухое вещество составляет 4,5 млн. тонн [13]. На иловых площадках Украины ежегодный прирост осадка составляет около 40 млн. м³ [14]. По отчетным данным стран региона Балтийского моря [15...17] ежегодно образуются осадки, тыс. тонн: Германии -

2000, Польши – 520, Швеции – 250, Люксембурга – 15.

На сегодняшний день на территории Украины ситуация с обработкой и утилизацией осадков городских сточных вод остается напряженной. Предприятиями водоотведения в целом по стране было принято 1976,8 млн. м³ сточных вод, что превышает показатели прошлых лет [11, 18]. Из общего количества сточных вод прошло полный цикл биологической очистки – 1777,73 млн. м³.

Основное количество отходов, образующихся при очистке городских сточных вод с использованием биологических методов, представляет собой осадки органического происхождения, в которые включают сырой осадок первичных отстойников, избыточный ил аэротенков либо избыточную биоплёнку биофильтров, а также осадок контактных резервуаров.

Объем образующихся в процессе очистки сточных вод осадков в зависимости от концентрации загрязнений в исходной воде и расхода сточных вод составляет 0,5...2 % [19, 20], а по некоторым данным до 11% от объема сточной воды [21]. При средней нагрузке на иловые площадки 4 м³ осадков на 1 м² в год, ежегодному отчуждению подлежит территория площадью в 10 млн. м² [22].

В Украине ежегодно образуется до 90 млн. м³ осадков городских сточных вод с влажностью 98%. Общее количество накопленных осадков только в Донецкой области оценивается в 100 млн. тонн с естественной влажностью. Данные осадки занимают площадь порядка 2500 га плодородной почвы [10, 38]. Постепенное накопление осадков приводит к отчуждению значительных земельных площадей в пользу очистных сооружений.

Данные осадки не стабильны и содержат большое количество органических и бактериальных включений, которые быстро загнивают и выделяют неприятные запахи, являются источником загрязнения гидросферы и атмосферы [23].

Традиционно, перед выпуском осадка на иловые площадки, рекомендуется проводить их стабилизацию и обезвоживание, что позволяет

резко сократить размеры иловых площадок. На рис. 1.1 представлены наиболее распространенные методы обработки и обезвоживания осадков [23].

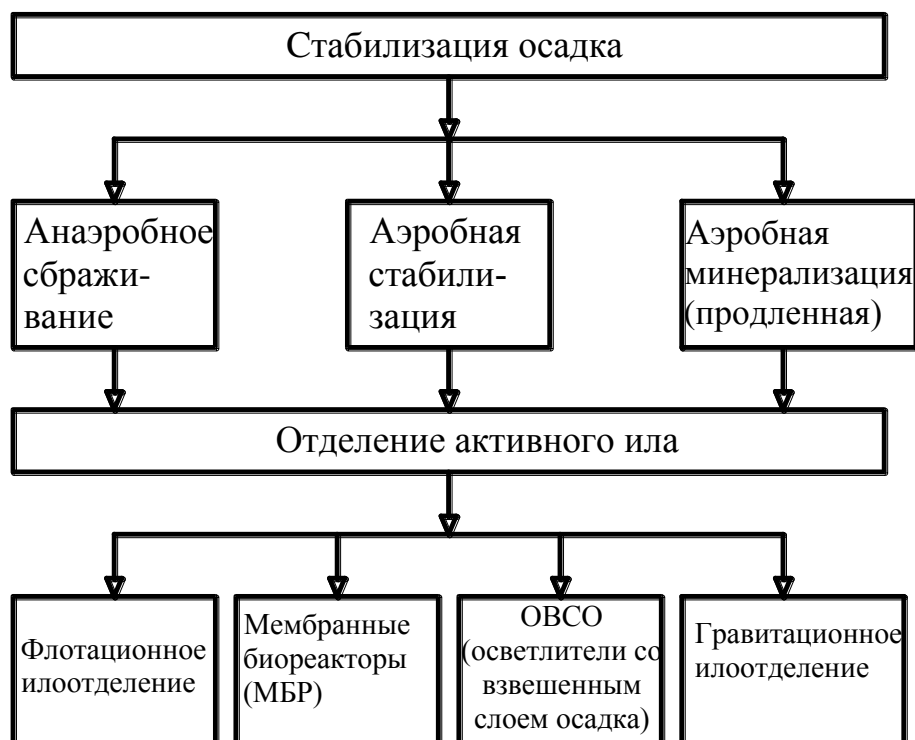


Рис. 1.1. Методы обработки и обезвоживания осадков городских сточных вод

Наибольшее распространение на территории Украины и России получили методы обработки в аэробных стабилизаторах с последующим обезвоживанием в цехе механического обезвоживания. К тому же, одним из обязательных пунктов [22] на канализационных очистных сооружениях по-прежнему остается обязательное устройство резервных иловых площадок на 20% годового количества осадка.

В России и Украине определенную популярность приобрели методы аэробной минерализации, а методы анаэробного сбраживания, в силу своей дороговизны и сложности процесса эксплуатации, не получили такого широкого распространения как в Европейских странах [109, 110].

В табл. 1.1 представлен оказываемый эффект методов стабилизации, обезвоживания и обеззараживания осадков городских сточных вод станций биологической очистки Украины.

Таблица 1.1 Оценка применимости методов стабилизации, обезвоживания и обеззараживания осадков городских сточных вод [55].

Метод обработки	Применимость		
	обезвоживание	стабилизация	обеззараживание
Гравитационное уплотнение	+	-	-
Флотационная обработка	+	-	-
Анаэробное сбраживание:			
- мезофильное	-	+	-
- термофильное	-	+	+
Аэробная стабилизация	-	+	+
Компостирование	-	+	+
Вакуум-фильтрация	+	-	-
Сушка на иловых площадках	+	-	-
Сжигание	+	+	+
Термическая сушка	+	+	+

Примечание

«+» - положительный эффект;

«-» - не имеет эффекта.

Из табл. 1.1 видно, что наиболее эффективными методами обработки осадков являются сжигание или термическая сушка, но основными недостатками данных методов является высокая сложность технологических процессов и высокая себестоимость обрабатываемых осадков.

Из общего разнообразия сочетаний различных методов обработки осадков можно выделить некоторые, наиболее часто встречающиеся в современной практике. В табл. 1.2 отражена рекомендуемая область применения данных методов с выделением основных положительных и отрицательных факторов.

Таблица 1.2 Преимущества и недостатки наиболее распространенных методов обработки осадков сточных вод [56]

№ п.п.	Методы обработки осадков	Преимущества	Недостатки	Область применения тыс. м ³ /сут.
1	2	3	4	5
1	Аэробная стабилизация избыточного активного ила + уплотнение + дегельминтизация + иловые площадки	а)наименьшие капитальные затраты; б)умеренные эксплуатационные расходы; в)простота эксплуатации	а) требуются большие земельные площади под иловые площадки; б) ограниченный распад органических веществ; в)зависимость эксплуатации иловых площадок от погодных условий	На станциях очистки с расходом до 50
2	Уплотнение + анаэробная стабилизация + иловые площадки	а)умеренные капитальные затраты; б) низкая стоимость эксплуатации при использовании газа; в) наибольшая степень разложения органических веществ; г) высокая степень обеззараживания	а) большие площади земельных участков; б) зависимость условий эксплуатации от погодных условий; в) требуется контроль за процессом, если присутствуют сточные воды промышленности (ионы тяжелых металлов, СПАВ)	На станциях очистки сточных вод с расходом >50
3	Стабилизация (аэробная или анаэробная) + центрифугирование	а) осадок может удаляться с очистных сооружений независимо от погодных условий; б) необходимость малых земельных участков (иловые площадки на резерв в количестве 20% от количества осадка)	а) необходимость использования флокулянтов; б) высокая стоимость эксплуатации; в)значительные капитальные затраты; г) необходимость компостирования обезвоженного после стабилизации осадка	На станциях очистки сточных вод с расходом до 100

1	2	3	4	5
4	Стабилизация осадка + фильтр-прессование	а) осадок может удаляться с очистных сооружений независимо от эксплуатации и погодных условий; б) высокая степень обезвоживания осадка	а) значительные капитальные затраты; б) необходимость химического кондиционирования осадка; в) высокая стоимость обработки осадка	На станциях очистки сточных вод производительностью до 150
5	Анаэробное сбраживание + тепловая обработка + фильтр-прессование	а) минимальное количество осадка низкой влажности (50–55%); б) низкие затраты на тепловую обработку; в) полное обеззараживание	а) очень высокие капитальные и эксплуатационные затраты; б) проблема запаха; в) высокая стоимость обработки осадка	На станциях очистки сточных вод производительностью до 50
6	Аэробная минерализация + илоотделение во взвешенном слое + рез. иловые площадки	а) небольшие капитальные затраты; б) низкие эксплуатационные расходы; в) минимальное количество сбрасываемого активного ила; г) осадок может обрабатываться вне зависимости от погодных условий	а) сложность процесса илоотделения от смеси; б) требуется постоянный контроль и мониторинг процесса обработки; в) низкая пропускная способность, и как следствие, большие объемы сооружения; г) медленный процесс минерализации осадка	На станциях очистки сточных вод производительностью до 150

Согласно табл. 1.2 можно сделать вывод, что наиболее применяемыми методами обработки осадков на данный момент являются различные модификации анаэробного сбраживания и аэробной стабилизации. Перспективным методом обработки осадков можно считать аэробную минерализацию с последующим илоотделением во взвешенном слое осадка. Илоотделение производится именно во взвешенном слое осадка, поскольку обеспечивает практически полный возврат активного биоценоза на

дальнейшую минерализацию и обеспечивает удаление наиболее минерализованных частиц ила.

Следует отметить, что каждая технология обработки осадков требует эффективных методов разделения иловых смесей, поскольку это позволяет снижать количество осадка на выходе из сооружения, тем самым уменьшая его габаритные размеры. К наиболее распространенным методам илоотделения можно отнести гравитационное отстаивание, флотацию, фильтрацию через пористые материалы и отделение во взвешенном слое осадка.

После процессов обработки осадка принимаются необходимые меры по его утилизации. Осадок городских сточных вод по своему составу характеризуется высоким уровнем содержания биогенных элементов – азота, фосфора и калия, и является ценным органоминеральным удобрением. Этот способ утилизации является наиболее желательным, поскольку наименее затратный и возвращает в природу необходимые для растений питательные вещества [10, 54, 55].

Согласно представлений Туровского И.С., осадки сточных вод содержат ценные удобрительные вещества, в состав которых входят азот, фосфор, калий и некоторые другие элементы и поэтому могут использоваться в качестве удобрений. Следовательно, для подробной характеристики осадков сточных вод особенно важно знать элементарный состав по азоту, фосфору и калию, чтобы оценить их удобрительную ценность [23].

Содержание основных питательных элементов в термически высушенном осадке в зависимости от типа высушиваемого осадка приведено в таблице 1.3 [16, 17, 28].

Элементарный состав сухого вещества осадков городских сточных вод колеблется в достаточно широких пределах. Сухое вещество сырых осадков содержит, в %: 35,4...87,8 углерода, 4,5...8,7 водорода, 0,2...2,7 серы, 1,8...8 азота, 7,6...35,4 кислорода. В составе сухого вещества активного ила содержится, в %: 44,0...75,8 углерода, 5...8,2 водорода, 0,9...2,7 серы, 3,3...9,8 азота, 12,5...43,2 кислорода [16, 17, 46].

Как показывает практика, термически высушенные осадки содержат в мг/кг сухого вещества: бора до 15, кобальта – 2...114, марганца – 60...715, меди – 75...3200, молибдена – 0,5...11, цинка – 40...5000 [28, 67...70].

Таблица 1.3.

Содержание основных питательных макроэлементов в термически высушенных осадках, % в сухом веществе [16, 17, 28]

Питательный элемент	Осадок первичных отстойников	Активный ил	Смесь осадка первичных отстойников и активного ила	Сброженный осадок
азот	1,6...4,0	2,4...6,5	2,0...5,0	1,7...6,0
фосфор	0,6...5,2	2,3...8,0	1,0...6,0	0,9...6,6
калий	0,2...0,6	0,3...0,4	0,2...0,5	0,2...0,5

Из таблицы 1.3 видно, что наиболее ценным органическим удобрением особенно богатым азотом и фосфором является активный ил. Данные таблицы показывают, что содержание удобрительных веществ в осадках колеблется в достаточно широких пределах, что объясняется различием состава очищаемых городских сточных вод. Кроме того, осадки городских сточных вод могут содержать в своём составе и некоторые микроэлементы.

Однако даже в высокоразвитых европейских странах использование таких осадков в качестве удобрений ориентировочно составляет только около 30% общего их количества [15]. Сдерживает применение этого способа утилизации присутствие в осадках различных токсичных органических и минеральных загрязнений и, в особенности, тяжелых металлов. Присутствие в осадках городских сточных вод тяжелых металлов связано не только со сбросом в городскую канализационную сеть производственных стоков, но и с рассеянными источниками загрязнения, особенно в промышленных и густонаселенных регионах [44].

Следовательно, утилизация с применением в сельском хозяйстве для промышленно развитых регионов, либо регионов с развитой инфраструктурой, невозможна к реализации. Таким образом, осадки после стабилизации и обезвоживания утилизируются либо на полигоне ТБО, либо складировются на иловых площадках.

Различают следующие основные виды осадков: сырой, включающий взвешенные вещества, которые задерживаются в первичных отстойниках; активный ил, задерживаемый во вторичных отстойниках после биологической очистки и подразделяемый на циркулирующий, участвующий в биологической очистке, и избыточный, удаляемый из системы; анаэробно-сброженный в осветлителях-перегнивателях, двухъярусных отстойниках или метантенках; активный ил, аэробно-стабилизированный в сооружениях типа аэротенков или смесь его с осадком из первичных отстойников; сгущенный или уплотненный активный ил, осадок из первичных отстойников или их смесь в сгустителях или уплотнителях; подсушенный на иловых площадках; обезвоженный на механических аппаратах, например, на вакуум-фильтрах, центрифугах и термически высушенный в различных сушилках [45].

Поскольку в диссертационной работе наиболее широко рассматриваются процессы разделения иловых смесей после аэробной минерализации, то далее основное внимание уделяется обработке именно этого осадка.

1.2 Особенности процесса стабилизации активного ила

Стабилизация осадка занимает ключевую позицию при распаде биологически разлагаемой части органического вещества [104, 105, 142], так как предотвращает загнивание осадков при длительном хранении на открытом воздухе (сушка на иловых площадках, использование в качестве сельскохозяйственных удобрений и т.п.), этим самым улучшая санитарное состояние очистных сооружений в целом.

Стабилизацию органической части осадка бытовых сточных вод осуществляют несколькими способами, чаще всего используются анаэробная, либо аэробная ее разновидности.

Аэробная стабилизация осадков используется для разрушения органической его части в присутствии кислорода воздуха. Поскольку данный способ не требует больших капиталовложений и проще в эксплуатации, то он используется на большинстве очистных сооружений Украины [40].

Аэробную стабилизацию осуществляют, в основном, гетеротрофные и автотрофные микроорганизмы, а также денитрифицирующие бактерии [27, 41, 42, 76].

Нитрифицирующие бактерии не нуждаются в органическом субстрате, как в энергетическом, так и конструктивном метаболизмах. В конструктивный обмен данные бактерии привлекают свободную углекислоту взамен органических веществ [31, 32]. Процесс нитрификации условно можно разделить на два этапа. Хемоавтотрофные нитрификаторы могут быть подразделены на бактерий, осуществляющих первую фазу этого процесса, а именно окисление аммония до азотистой кислоты ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$), и бактерий второй фазы нитрификации, переводящих азотистую кислоту в азотную ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$). И те и другие микроорганизмы являются грамотрицательными. Их относят к семейству Nitrobacteriaceae [33, 71...75, 117].

Денитрифицирующие бактерии перерабатывают различные виды субстрата, которые являются источником углерода. Могут быть использованы как неорганические источники, так и органические. Субстрат для денитрификации это органические вещества в самой сточной воде и в активном иле, так называемые внутренние источники. Источником жизнеобеспечения процессов денитрификации в аэробных стабилизаторах может служить поступающий на стабилизацию избыточный активный ил. Таким образом, возможно совместное протекание нитри-денитрификации [83...85, 95].

В противоположность аэробным процессам, существует другой путь распада крупных молекул органических веществ на более мелкие частицы —

анаэробное разложение. Оно совершается лишь в отсутствии кислорода воздуха.

Метод получил большое распространение в Европе из-за возможности получения альтернативных источников энергии. В Украине метод анаэробной обработки осадков, на данный момент, на низком уровне развития из-за высокой стоимости и сложности технологических процессов.

Анаэробная стабилизация состоит из трех основных стадий: гидролиз нерастворенных сложных органических соединений, образование кислот (кислотогенная стадия), ацетогенез и образование метана (метаногенная стадия). Продуктом метаболизма каждой стадии являются субстратом для последующей стадии [37]. Микробиологический процесс стабилизации осадка осуществляется без доступа кислорода воздуха, органическая часть осадков частично трансформируется в газообразный метан (CH_4) и диоксид углерода (CO_2).

Процесс протекает хорошо только тогда, когда аэробные бактерии из-за недостатка кислорода тормозят свою активность, либо погибают, и могут размножаться анаэробные бактерии [34]. При этом, наряду с минеральной частью в качестве конечных продуктов, образуются различные газы, такие как метан, углекислый газ, аммиак и сероводород. В конечном счете, частицы образующиеся вследствие анаэробного разложения высокомолекулярных органических соединений, вновь используются для синтеза новых белков, жиров и углеводов [35, 36, 38, 90...92].

Основными технологическими параметрами, критически влияющими на эффективность процесса анаэробного сбраживания осадков, являются их химический состав, температура и продолжительность сбраживания, нагрузка по органическим веществам, концентрация загружаемого осадка, а также режим загрузки и перемешивания содержимого камеры сбраживания [24].

Как правило, сбраживанию подвергается смесь сырого осадка и избыточного активного ила [37]. Отдельно избыточный активный ил плохо поддается брожению, так как основным компонентом активного ила является

белок. По некоторым данным [39] для повышения эффективности сбраживания активного ила искусственно добавляют биологические отходы.

Пункты приема биологических отходов нередко обустраивают неподалеку от станций очистки сточных вод. К положительным качествам анаэробного метода обработки осадка следует отнести образование газообразного метана и гибель патогенных микроорганизмов (термофильный режим). Недостатками анаэробного метода сбраживания являются высокие требования к эксплуатации сооружения, огромные капитальные и эксплуатационные затраты и сложность обработки сброженного осадка, который имеет низкую теплоотдачу и неприятный запах [61]. Еще одним серьезным недостатком данного типа обработки является повышенная взрывоопасность таких сооружений из-за присутствия большого количества горючего газа.

Аэробно стабилизированный осадок обезвоживается легче, чем после анаэробного сбраживания. Этот недостаток анаэробного метода возникает из-за слишком измельченного состава, крупность частиц стабилизированного ила менее 1 мм в 85% осадка, а так же химическом составе самого осадка [48].

Еще одним методом обработки активного ила является продленная аэробная минерализация. Для описания процесса длительного аэрирования в основном применяются те же кинетические зависимости, что и для аэротенков.

Как известно, большая часть органического вещества клетки биологически окисляема [108]. Углеводы окисляются и могут быть источником углерода для некоторых бактерий, следовательно, полисахариды оболочки клетки могут быть окислены полностью. Но в реальных условиях работы сооружений по аэробной стабилизации окисление не достигает своего возможного предела. Практически степень минерализации ила может составлять до 50% органического вещества.

При аэробной стабилизации микроорганизмы первоначально окисляют доступные растворенные в воде органические загрязнения, а затем происходит самоокисление бактериальных клеток ила. Вследствие этого из бактериальных

клеток выделяются органические компоненты распада, которые впоследствии являются доступным эндогенным субстратом для других бактерий [106, 107].

Распаду в аэробном минерализаторе подвергается только биоразлагаемая часть беззольной части активного ила, остаток является условно инертным и биологическому распаду не поддается.

Такое разделение беззольного вещества является достаточно условным, так как нет четкой методики, которая позволяет разделить его на такие части. Уменьшение скоростей процессов обусловлено также и накоплением в стабилизируемом осадке растворенных продуктов метаболизма, в частности, нитратов, а также мелкодисперсных, глубоко минерализованных иловых частиц, тормозящих массообменные процессы [106]. Дальнейший процесс распада, при снижении значений рН ниже 6, не происходит.

Таким образом, к завершению минерализации в осадке накапливаются высокомолекулярные трудно окисляемые органические вещества и нитраты. Обращает на себя внимание и тот факт, что в ходе аэробной стабилизации биоценоз активного ила изменяется не только в количественном, но и в качественном отношении. На смену микроорганизмам, потребляющим относительно высокие концентрации легко биоразлагаемой органики, приходят другие микроорганизмы. Потребление ими высокомолекулярных органических веществ идет с достаточно низкими скоростями [53].

Преимущественный рост той или иной популяции микроорганизмов будут определять концентрации аммонийного азота, нитритов и нитратов. Несомненно, важная роль при глубокой минерализации отводится денитрифицирующим микроорганизмам, которые при восстановлении нитратов и нитритов используют органическое вещество активного ила [46].

Даже при одинаковом наборе сооружений по обработке осадка и типе обрабатываемых сточных вод, свойства активного ила могут меняться в значительных пределах. Если отличаются еще и сами методы обработки осадка, данный разрыв может увеличиваться, поэтому избыточный активный ил после аэробной минерализации требует более детального рассмотрения.

1.3 Характеристика минерализованного активного ила.

Активный ил содержит очень много белка, азота и фосфора и без достаточного количества кислорода воздуха стремительное развитие анаэробных форм микроорганизмов приводят к моментальному его загниванию. Поэтому его утилизация в более теплых и технологически развитых странах предполагает сбраживание в метантенках с последующим обезвоживанием и уплотнением осадка [4, 16, 17, 80].

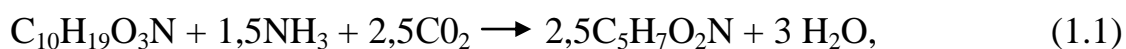
Клетки гетеротрофных бактерий активного ила при контакте с загрязняющими веществами сточных вод выделяют вязкий коллоидный раствор, внеклеточный биополимер – полисахаридный гель. Объем выделяемого геля распределяется вокруг клеток и хлопьев активного ила, защищая их от неблагоприятного воздействия компонентов сточных вод. Он также участвует в процессе формирования и агрегации (слипания) хлопьев между собой, и играет основную роль в обеспечении сорбции загрязняющих веществ и их транспорта внутрь микробных клеток. Именно наличие геля обуславливает агрегацию микроорганизмов и образование хлопьевидных скоплений [25, 26].

Биополимерный гель активного ила имеет высокомолекулярную массу (более 10000 а.е.м.) [26]. По своему химическому составу он чаще всего представлен аминокислотами и полисахаридами, включающими глюкозу, галактозу, аминосахара. В состав данного геля кроме гликопротеинов входят также экзоферменты клеток ила, полипептиды, клетчатка и др. К полисахарид продуцирующим бактериям активного ила относятся роды *Zoogloea*, *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Acinetobacter*, *Micrococcus*, *Paracoccus*. Секреция в окружающую среду биополимерного геля осуществляется после предварительного внутреннего синтеза полимеров. Участие полимеров в хлопьеобразовании было показано на бактериях *Zoogloearamigera* [27]. Биофлокуляция у бактерий связана с внутриклеточным накоплением поли- β -гидроксимасляной кислоты [64...66].

В диссертационной работе рассматривался в основном активный ил после аэробной минерализации, поэтому более детальные свойства отнесены уже к активному илу после именно данной категории. Ил после аэробной минерализации имеет обедненный видовой состав, вследствие изменения связей и цепей питания. Отсутствие легкоокисляемых органических веществ в достаточном количестве в сточных водах приводит к развитию специфических форм бактерий и подавлению развития «обычно» присутствующих микроорганизмов.

Активный ил представляет собой хлопьевидную суспензию, при $\text{pH} = 4 \dots 9$, имеющую отрицательный заряд. В пересчете на сухое вещество активный ил содержит 70...90% органических и 10...30% неорганических веществ. Субстрат, которого в активном иле может быть до 40%, представляет собой отмершую часть микроорганизмов активного ила и различных твердых остатков и включений. Это и является активным центром, куда прикрепляются организмы активного ила [18...23, 43].

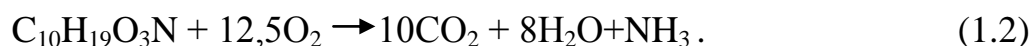
Первоначально при поступлении органического вещества сырого осадка на обработку, он перерабатывается микроорганизмами активного ила и за счет процессов анаболизма происходит синтез нового клеточного вещества активного ила. Этот процесс можно выразить следующим стехиометрическим уравнением [127, 128]



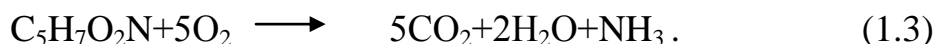
где $\text{C}_{10}\text{H}_{19}\text{O}_3\text{N}$ - гипотетическая формула органических примесей городских вод;

$\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ - гипотетическая формула активного ила.

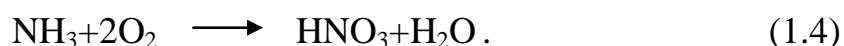
Параллельно за счет аэробного дыхания органическое вещество сырого осадка окисляется до углекислого газа и воды с выделением аммонийного азота



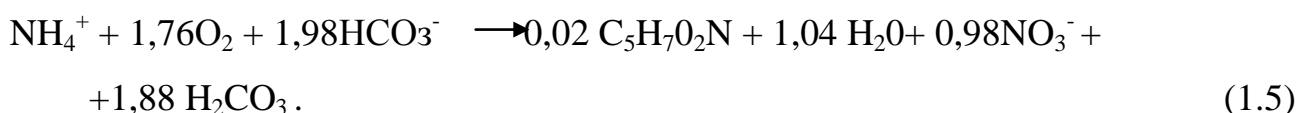
В дальнейшем, за счет самоокисления, активный ил также распадается с образованием тех же веществ



Последние два стехиометрических уравнения как раз и описывают процессы аммонификации, происходящие при длительном аэрировании осадков. Наличие в аэрируемой среде растворенного кислорода и аммонийного азота создает условия для протекания процессов нитрификации, конечным итогом которых является образование нитратов. Процесс можно представить в виде следующего уравнения

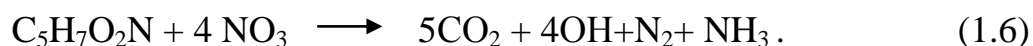


Однако, если учесть процессы синтеза клеточного вещества нитрифицирующими микроорганизмами, то уравнение приобретает более сложный характер



Таким образом, анализируя приведенную выше информацию о процессах, можно сделать вывод о том, что минерализация осадков сопровождается уменьшением содержания сухого вещества осадка, повышением его зольности, снижением щелочности иловой воды, понижением ее pH, накоплением нитратов.

Накопленные нитраты претерпевают следующие изменения при протекании процесса денитрификации [127]



В условиях существования, созданных в городских очистных сооружениях, так же как и в природных, формируется активный ил с его способностью к флокуляции, которая является одной из важнейших характеристик состояния биоценоза. При процессах очистки масса активного ила представлена хлопьями с плотностью в среднем $1,025...1,37 \text{ г/см}^3$ и высокой удельной поверхностью – около 1200 м^2 на 1 м^3 ила [24, 96]. Основная часть бактериальных клеток расположена внутри и на поверхности хлопьев активного ила, но иногда, в незначительном количестве, есть и в свободном состоянии. Активный ил имеет разные свойства, которые зависят от условий эксплуатации, например, при аэробной минерализации характеризуется повышенной зольностью 30...60, а иногда и 70 %, более мелким размером частиц, относительно активного ила, подаваемого на обработку [44]. Данное утверждение основывается на сопоставлении размеров частиц илов, размеры не обработанного ила приведены выше и основная масса частиц содержится с размером порядка 200...300 мкм [24, 96, 119, 132], а размеры минерализованного ила, либо ила после аэробной минерализации обработки, в первом приближении, можно определить аналитически.

Согласно имеющихся условий, для определения размеров частиц ила можно воспользоваться формулой Стокса [97].

Основным уравнением скорости осаждения (гидравлической крупности u м/с) взвешенных частиц в воде является формула Стокса

$$u = \frac{d^2 \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot g}{18 \cdot \mu}, \quad (1.7)$$

где d – диаметр шарообразных частиц, м;

$\rho_2; \rho_1$ - соответственно плотность частиц ила и воды, кг/м^3 ;

μ – динамическая вязкость жидкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Для проведения максимально корректного подсчета ориентировочного размера хлопка активного ила были приняты некоторые допущения. Частицы

активного ила условно имеют форму шара, а их размер выражается «эквивалентным диаметром», он равен диаметру шарообразной частицы, имеющей одинаковую с данной частицей гидравлическую крупность и осаждение частиц ила протекает в монодисперсной среде. Так же частицы при осаждении не меняют свою форму и размеры.

Воспользовавшись формулой (1.7) и преобразовать в ней динамическую вязкость в кинематическую, получим уточненную формулу для определения ориентировочного диаметра частиц активного ила.

$$d = \sqrt{\frac{18\mu u}{(\rho_2 - \rho_1)g}} = \sqrt{\frac{18\nu\rho_2 u}{(\rho_2 - \rho_1)g}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 1,01 \cdot 10^{-6} \cdot 1040 \cdot 4,9 \cdot 10^{-5}}{(1040 - 1000) \cdot 9,8}} = 5,1 \cdot 10^{-5} \text{ (м)}. \quad (1.8)$$

Поисковые исследования показали, что время осаждения мелкодисперсных частиц ила в лабораторном цилиндре высотой $H=400$ мм не превышает $t=2,3$ ч, соответственно $u=4,9 \cdot 10^{-5}$ м/с, тогда $d=5,1 \cdot 10^{-5}$ м.

Расчетные значения размера стабилизированного активного ила значительно меньше размера избыточного активного ила сооружений биологической очистки сточных вод [93, 94].

Одним из важных свойств активного ила является его способность к хлопьеобразованию и хорошая способность к осаждению. Из-за хлопьеобразования ил образует при осаждении коагуляционные структуры [25] с определенными прочностными свойствами, которые препятствуют его уплотнению. В результате процессов отстаивания ил загнивает, ухудшая качество процесса илоотделения [77].

Одним из основных факторов анализа состояния активного ила является иловый индекс. Хорошо оседающий активный ил имеет индекс от 60 ... 90 до 120...150 см³/г. Иловый индекс зависит от ряда факторов: от характера и качества сточных вод, до наличия достаточного количества питания для хорошего развития активного ила. Перегрузка или недогрузка активного ила органическими веществами в сточной жидкости приводит к резкому

увеличению илового индекса («вспухший ил») (при этом иловый индекс J имеет величину более $150 \text{ см}^3/\text{г}$)– (Рис. 1.2.).

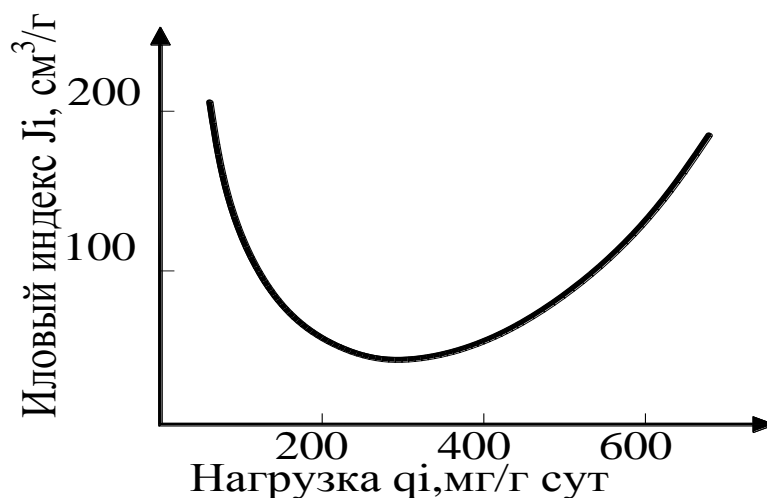


Рис. 1.2. Зависимость илового индекса от нагрузки на активный ил по органическим веществам

При «вспухании» ил становится мелким, иловая вода мутной, а вода после отстаивания имеет высокое содержание мелкодисперсного активного ила. Размеры хлопьев активного ила увеличиваются, но плотность их при этом существенно снижается.

Активный ил может содержать соединения кремния, алюминия, железа, окиси кальция, магния, калия, натрия, цинка, хрома, никеля и др. Ориентировочное процентное содержание различных соединений представлены в табл.1.4 [28, 29, 82].

Таблица 1.4. Химический состав минеральной части осадков

Тип осадка	Содержание, %					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O
Активный ил	17,6...33,8	7,3...26	7,2...18,7	8,9...16,7	1,4...11	0,8...3,9
	Na ₂ O	SO ₃	ZnO	CuO	NiO	Cr ₂ O ₃
	1,9...8,3	1,5...6,8	0,2...0,3	0,1...0,2	0,2...3,4	0...2,4

Данный перечень включений активного ила не окончателен и может варьироваться в зависимости от района образования осадка, условий обработки и т.д.

Как уже было сказано, применение активного ила в сельском хозяйстве довольно предпочтительно, но этот способ все чаще ставится под сомнение контролирующими государственными органами, а новые требования по хранению осадков более жесткие и приводят к росту затрат на их захоронение [30]. В настоящее время наблюдается тенденция в пользу технологий термической минерализации (главным образом сжигания) осадков. Но данный способ целесообразен лишь в случае использования выделившегося тепла на технологические либо бытовые нужды, конечным продуктом процесса является относительно безопасная зола.

Установлены основные отличия активного ила после сооружений биологической очистки и активного ила после стабилизации в сооружениях аэробной минерализации. Основное отличие минерализованного ила – это повышенные значения зольности (иногда свыше 60 %), меньший размер хлопка ила и достаточно высокие концентрации активного ила, которые достигают 8...12 г/дм³. Минерализованные частицы ила имеют небольшой размер и плотную гидратную оболочку, которая препятствует уплотнению частиц. Таким образом, хлопок ила не образуется, а зольность осадка со временем возрастает [46, 47, 53].

Также на процесс флокуляции хлопка активного ила, существенно влияет концентрация дисперсной фазы. С точки зрения кинетики агрегации частиц высокие концентрации уменьшают скорость седиментации за счет возникновения эффекта стесненного осаждения. Особенно активное замедление наблюдается на стадии уплотнения осадка [57...60].

При биологической очистке на илоотделитель поступает иловая смесь с низкой концентрацией 1,5...3,0 г/дм³, при обработке осадка 4...5 г/дм³, а при глубокой минерализации с высокой 8...12 г/дм³.

Считается, что причиной снижения подвижности частиц являются межчастичные контакты в среде осаждения. В свою очередь, низкие

концентрации смеси приводят к формированию и укрупнению новых флокул из первичных частиц. Дальнейшее увеличение концентрации может приводить к формированию так называемой пространственной сетки, обладающей определенной прочностью. Прочность такой сетки становится отличной от нуля при некоторой критической концентрации a_0 и резко возрастает с увеличением концентрации [60]. Данное структурообразование ведет к изменению гидравлической крупности частиц.

При работе с сооружениями аэробной минерализации обработки установлена возможность повышения рабочих концентраций обрабатываемого активного ила вплоть до 12 г/дм^3 , но данная возможность может быть реализована только при наличии эффективного метода илоотделения, правильный выбор которого напрямую влияет на процесс продленной минерализации [46, 110].

Рассмотрим наиболее эффективные методы разделения концентрированных иловых смесей для выбора оптимального метода.

1.4. Отделение избыточного активного ила в системах обработки осадков

1.4.1 Метод гравитационного илоотделения

На сегодняшний день одним из самых распространенных и применяемых методов отделения активного ила от иловой воды является гравитационное отстаивание. Метод исправно работает на многих очистных сооружениях, отстаивание по отношению к аэробно стабилизированному активному илу [3, 62, 63] с высокими концентрациями, приводит к уменьшению скорости седиментации и увеличению площади отстаивания, а также увеличению рабочей глубины сооружения.

Данная проблема ведет к значительному увеличению капитальных затрат на строительство очистных сооружений, и приводит к практической невозможности применения для очистных сооружений высокой производительности при переоборудовании существующих мощностей [111].

Гравитационное отстаивание основано на разности плотности жидкости и присутствующего в смеси активного ила, а так же дополнительных включений.

Для очистных станций небольшой производительности обычно применяют вертикальные, а для больших и средних станций - горизонтальные и радиальные отстойники [97]. Максимальную скорость протекания жидкости, для горизонтальных и радиальных отстойников принимают 5 мм/с, а для вертикальных – 0,5 мм/с [98].

Гравитационные отстойники рассчитываются по гидравлической нагрузке на поверхность отстойника q м³/м²ч, которая зависит от типа сооружений биологической очистки, в паре с которыми они устанавливаются, с учетом концентрации активного ила в аэротенке, его илового индекса и концентрации ила в осветленной воде.

Существует несколько наиболее часто встречающихся конструкций сооружений для отстаивания сточных вод, но наибольшее применение получили радиальные отстойники и различные его модификации, на очистных сооружениях производительностью свыше 20 тыс. м³ в сутки [112].

Радиальный отстойник представляет собой круглый в плане железобетонный резервуар (Рис. 1.3) [49...51, 99, 100].

Сточная вода подается в центр отстойника снизу вверх и движется радиально от центра к периферии. Особенностью гидравлического режима работы радиального отстойника является то, что скорость движения воды изменяется от максимального его значения в центре отстойника до минимального у периферии.

Выпадающий в осадок активный ил с помощью илососов, укрепленных на подвижной ферме, удаляется из нижней части вторичного отстойника. Осадок удаляется по трубопроводу с помощью плунжерных и центробежных насосов, установленных в расположенной рядом насосной станции.

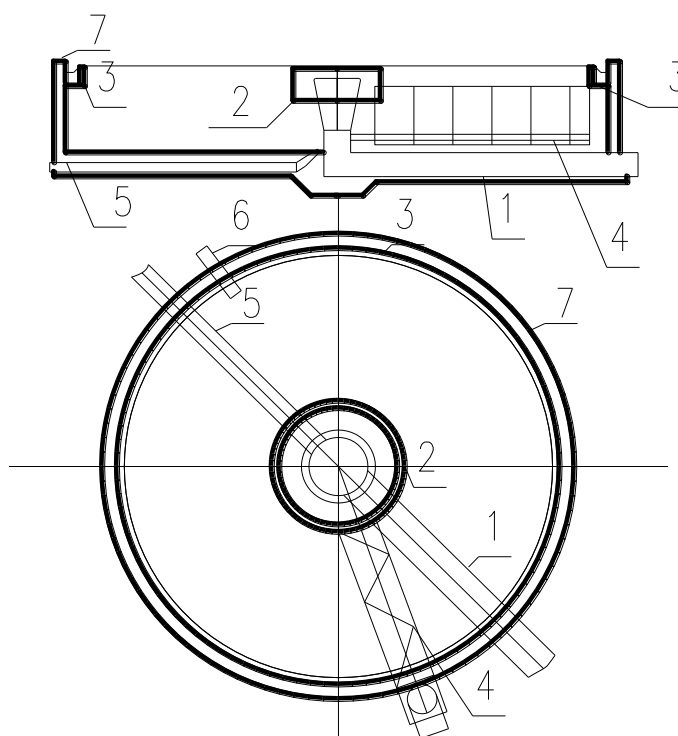


Рис. 1.3. Вторичный радиальный отстойник из сборного железобетона:

1 — подводящий трубопровод; 2 — металлический направляющий цилиндр; 3 — сборный желоб; 4 — илососные установки; 5 — трубопровод возвратного активного ила; 6 — трубопровод опорожнения; 7 — корпус вторичного отстойника.

Осветленная вода поступает в круговой сборный лоток через зубчатый водослив, концентрация взвешенных веществ на выходе из сооружения составляет $5...15 \text{ мг/дм}^3$. Водосливы сборных лотков выполняют зубчатыми в целях обеспечения более надежного выравнивания скорости движения воды на выходе из отстойника. Нагрузка на 1 м водослива не должна превышать $10 \text{ дм}^3/\text{с}$ [98].

Эффективность удаления отстойниками взвешенных веществ достигает 60% [22]. Критическим при работе сооружения является момент контроля образования застойных зон и равномерного распределения активного ила по площади сооружения. Застойные зоны неизбежно приводят к повышенному выносу и вспуханию активного ила, иногда вплоть до полной дестабилизации работы сооружения.

В качестве преимуществ применения гравитационного илоотделения на базе радиальных отстойников можно отметить: высокую эффективность илоотделения; низкие эксплуатационные расходы (высокая прочность и износостойкость конструкции); стабильную работу в зависимости температуры наружного воздуха и возможность применения на сооружениях большой производительности.

К основным недостаткам применения гравитационного илоотделения на базе радиальных отстойников относятся: нестабильная работа при залповых поступлениях активного ила; сравнительно невысокая предельно допустимая концентрация активного ила в обрабатываемых сточных водах (до $4...5 \text{ г/дм}^3$); нагрузка на водосливный фронт зубчатого водослива не должна превышать $10 \text{ дм}^3/(\text{с}\cdot\text{м})$; наличие механической поворотной фермы со сборными илососасми, при выходе которой из строя работа сооружения останавливается, и большая ресурсоемкость при строительстве.

Отсюда следует, что илоотделение в поле действия гравитационных сил хорошо и исправно применяется для обработки активного ила, но имеет ряд недостатков, например, малые рабочие концентрации активного ила, длительное время обработки и большие площади сооружений, не позволяющих использовать метод при обработке аэробно минерализованного активного ила.

1.4.2. Метод мембранного илоотделения

Для поддержания высокой окислительной мощности сооружений по очистке сточных вод требуется поддерживать постоянную высокую концентрацию активного ила в биореакторе. Одним из перспективных методов отделения активного ила в условиях повышенных его концентраций является мембранное разделение иловой смеси.

Мембранные биореакторы (МБР) имеют основное отличие от блока аэротенк-вторичный отстойник в том, что для разделения иловой смеси используется мембранный модуль.

Существует два основных типа мембранных биореакторов [101]:

- мембраны расположены вне сооружения: мембраны отделены от технологических емкостей и требуют установки дополнительных промежуточных перекачивающих насосов;
- мембраны расположены внутри: погруженные в очищаемую воду мембраны являются неотъемлемой частью биологического реактора.

На рис. 1.4. представлена традиционная схема очистки сточных вод с помощью мембранного биореактора, согласно которой можно отметить, что мембранные технологии могут значительно интенсифицировать процесс биологической очистки сточных вод и существенно снизить нагрузку на сооружения обработки осадков.

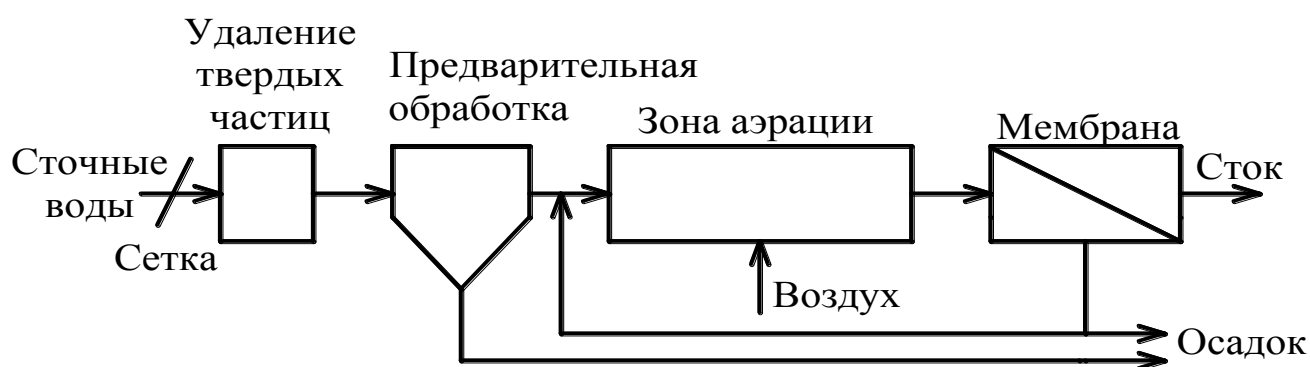


Рис. 1.4. Схема очистки с помощью мембранного биореактора.

Мембранные биореакторы зачастую применяют для обработки и повторного использования как бытовых, так и промышленных сточных вод.

В основу действия биореактора положено объединение традиционной биологической очистки и технологии разделения суспензий на ультрафильтрационных полимерных мембранах, что позволяет значительно интенсифицировать процесс [102].

Обрабатываемые сточные воды поступают в аэротенк. Находящаяся в аэротенке иловая смесь постоянно проходит через мембранный модуль. Ультрафильтрационные мембраны позволяют повысить концентрацию активного ила в аэротенке и способствуют глубокой очистке обрабатываемых сточных вод. Поверхность мембраны представляет собой ультрафильтрационное полотно с размером пор $0,03 \dots 0,1$ мкм, что позволяет

практически полностью отделить активный ил от сточной воды и снизить концентрацию взвешенных веществ в очищенной воде до 1 мг/л и менее [103, 129].

Микроорганизмы активного ила практически не выносятся из системы мембранного биореактора, поэтому он работает в условиях высокой концентрации биомассы с большим возрастом. Кроме того, постоянная циркуляция по касательной мембран, на повышенной скорости, приводит к механическому воздействию стенок мембран на оболочки бактерий.

Именно поэтому основная потребляемая бактериями энергия используется не для размножения (как это происходит в классических биотехнологиях), а расходуется для поддержания жизнедеятельности, что приводит к снижению прироста избыточной активной биомассы [86].

Мембранные технологии позволяют повысить концентрацию активного ила в биореакторе до 10...20 г/дм³. Высокие дозы ила позволяют сократить время пребывания сточных вод в сооружении. Как следствие, площадь, занимаемая мембранными биореакторами, в 2...4 раза меньше площади, занимаемой традиционными сооружениями биологической очистки, снижая, соответственно, выделение избыточного активного ила на последующую обработку [88].

В результате эффективного отделения частиц ила на мембранах, его концентрация в блоке мембранного биореактора и в аэротенке повышается, что способствует протеканию более глубокой биологической очистки. Позволяет снизить объем аэротенка в 2–3 раза [129].

Расчет мембранных биореакторов, помимо основных параметров биологической очистки, содержит определение требуемой площади мембран, которая варьируется не только от фирмы производителя, но и от скорости подаваемого осадка на разделение. Скорость, в свою очередь, довольно сильно зависит от температуры обрабатываемой жидкости [131].

Преимущества технологии мембранных биореакторов:

- возможность производства без включения в технологическую схему дополнительных блоков, глубокую очистку сточных вод от загрязняющих

веществ до показателей, удовлетворяющих требованиям по сбросу очищенных стоков в природные водоемы всех категорий;

- повышение качества очистки сточных вод, которые отвечают качеству дочищенных, что значительно снижает нагрузку на окружающую среду;
- повышает устойчивость работы биореактора к залповым сбросам и сбросам биорезистивных веществ, характерных для промышленных объектов локального водоотведения;
- регулировка производительности без изменения технологического процесса;
- снижение на 20...40% массогабаритных характеристик емкостных сооружений, т.к. необходимое количество активного ила находится в меньшем объеме при более высокой концентрации;
- малое количество избыточного активного ила, что значительно влияет на стоимость его механического обезвоживания и утилизацию;
- сокращение на 30...70% площади, занимаемой оборудованием (благодаря отсутствию вторичных отстойников, блоков доочистки, иловых площадок);
- исключен вынос активного ила из системы в резервуар с очищенной водой [130].

Основные недостатки технологии мембранных биореакторов: высокие эксплуатационные затраты на сами мембраны, их периодическую очистку (зачастую требуется применение специальных реагентов) и замену; достаточно высокая сложность эксплуатации, что затрудняет их применение в условиях современного канализационного хозяйства; низкая пропускная способность; при увеличении содержания активного ила трудно обеспечить требуемые условия аэрации в зоне биологической очистки; высокая зависимость пропускной способности мембран к температурным колебаниям.

Мембранные технологии отделения активного ила справляются со своей задачей весьма убедительно, достаточно эффективно справляются с повышенными концентрациями активного ила, но слишком высокая себестоимость, повышенные требования к обслуживанию мембран и сложность технологических процессов ставит под сомнение целесообразность их применения.

1.4.3 Метод флотационного илоотделения

Физико-химические методы илоотделения имеют довольно широкое распространение в силу высокой стабильности процесса очистки. Основным применяемым методом данного илоотделения по праву можно считать напорную флотацию, с применением или без применения реагентов.

Флотационные установки, применяемые для обработки иловых смесей, обычно состоят из напорного резервуара, флотатора и насосного оборудования, обеспечивающего создание давления в напорном резервуаре, при котором в жидкости растворяется необходимое количество воздуха [113].

Избыточный активный ил, предварительно насыщенный воздухом под давлением, подается в пространство между зонами флотации и отстаивания равномерно по сечению флотатора. Продолжительность пребывания активного ила во флотационной зоне составляет 0,2...0,33 часа. Насыщенный пузырьками воздуха активный ил всплывает и удаляется в желоб подвижным скребком. Нижняя часть флотатора (зона осаждения) используется для выделения крупных частиц, имеющих плотность больше плотности воды. Продолжительность пребывания ила в этой зоне до 1 часа. Осевшая часть избыточного ила удаляется под гидростатическим давлением. При удельном расходе воздуха 10...15 $\text{дм}^3/\text{кг}$ сухого вещества активного ила концентрация уплотненного активного ила достигает 30...50 $\text{кг}/\text{м}^3$ при содержании взвешенных веществ в осветленной жидкости 200...300 $\text{мг}/\text{см}^3$. Флотационные установки имеют достаточно гибкую настройку под различный состав осадков, позволяют увеличить нагрузку на сооружения, что позволяет справиться с пиковыми поступлениями осадков [140].

При сбросе давления до нормального атмосферного происходит хаотичное формирование насыщенных пузырьков воздуха с размерами 50...100 мкм. Данный эффект в сочетании с размерами хлопьев активного ила позволяет получить качественное илоотделение [113].

Продолжительность флотации принимается по экспериментальным данным, а при их отсутствии может быть принята на основании концентрации

загрязняющих веществ в подаваемой сточной жидкости до 3 г/дм^3 , время должно быть не менее 0,3 час, от $3 \dots 7 \text{ г/дм}^3$ - не менее 0,5 час.

Влажность и количество флотационного ила зависит от концентрации и типа удаляемых примесей, а так же времени удерживания сфлотированного ила на поверхности сооружения. При непрерывном съеме ила расчетная влажность составляет 96...98%, при периодическом снятии с помощью скребков или транспортеров вращающихся скребков – 94...95%, при снятии шнеками и скребковыми тележками – 92...93% [37].

Эффективность применения метода флотации для отделения активного ила, сформированного в различных условиях, может быть разная, как может возрастать число не флотируемых частиц, не способных формировать комплекс частица-пузырек. Чаще всего возникает сложность в отделении мелкодисперсного активного ила. Для уплотнения активного ила обычно применяется напорная флотация, иногда с частичной рециркуляцией.

Схема установки напорной флотации с частичной рециркуляцией рабочей жидкости представлена на рис. 1.5.

Преимущества физико-химического метода илоотделения напорной флотации заключаются в том, что достигается высокий эффект илоотделения 90...95%, концентрация взвешенных веществ в иловой воде не превышает $80 \dots 200 \text{ мг/дм}^3$; достаточно хорошее уплотнение отделенного осадка (концентрация сфлотированных веществ $5 \dots 10 \text{ г/дм}^3$); высокая производительность установок возможность применения дополнительных реагентов для повышения эффективности очистки; сравнительно небольшие размеры сооружений (порядка 10 м в диаметре); высокая устойчивость к изменению входных параметров осадка (концентрации и количества).

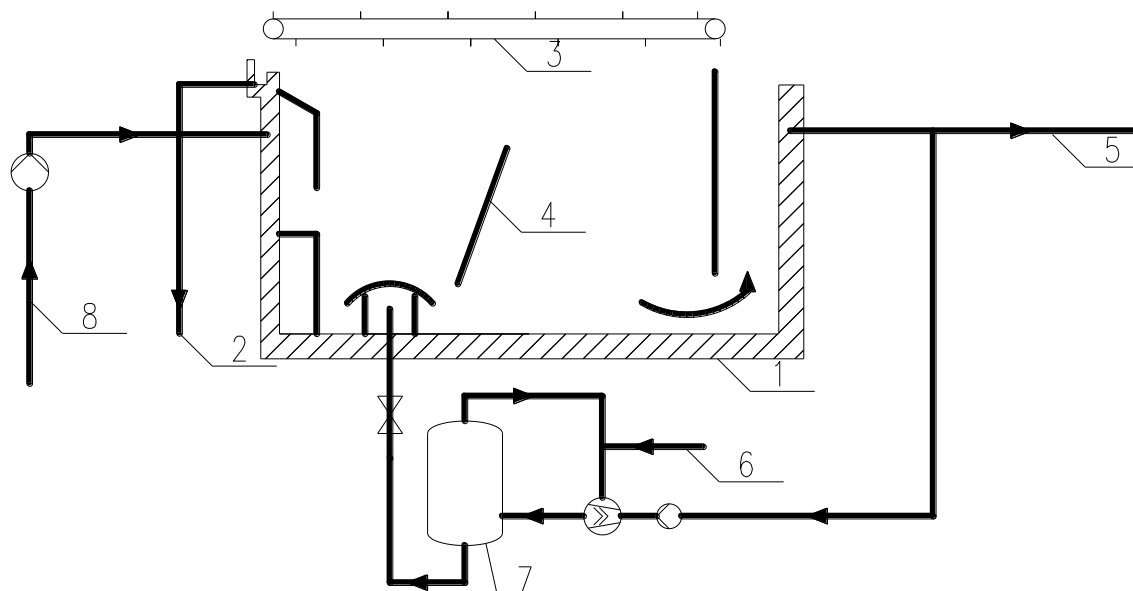


Рис. 1.5. Схема установки напорной флотации:

1 – корпус флотационной установки; 2 – отвод флотошлама; 3 – вращающиеся скребки; 4 – наклонные перегородки; 5 – отвод осветленной жидкости; 6 – подача воздуха; 7 – напорный сатуратор; 8 – подача исходной смеси на обработку.

К самым важным недостаткам метода напорной флотации относятся: сложный процесс насыщения кислородом обрабатываемой смеси, качество которого напрямую влияет на процессы отделения; флотационный шлам при низкой влажности теряет свою текучесть, поэтому требуется вести постоянный контроль уровня влажности осадка; повышенные энергозатраты на процесс отделения; возможность захвата с осветленной водой осевшего и сфлотированного активного ила.

Еще одним недостатком флотационного метода является то, что флотации не подвергаются мелкодисперсные минерализованные частицы, что в технологии глубокой минерализации может быть использовано как преимущество.

Из этого следует, что флотационные процессы могут быть использованы для отделения активного ила, если активный ил получен при определенной нагрузке, соответствующей полной биологической очистке сточных вод, когда

для очистки используется активный ил с ярко выраженной хлопьевидной структурой.

Высокая себестоимость флотационного оборудования требует особого отношения при выборе флотационного илоотделения в качестве рабочего метода.

1.4.4 Осветление со взвешенным слоем осадка для илоотделения концентрированных иловых смесей

Осветлители со взвешенным слоем осадка (ОВСО) используются в основном в процессах осветления воды водопроводных очистных сооружений, но есть попытки применить сооружения данного характера для обработки осадков сточных вод [79].

Для илоотделения после полной биологической очистки вместо отстойников иногда применяют осветлители со взвешенным осадком. Этот метод осветления применим только при лишении частицы взвеси агрегативной устойчивости. Частицы активного ила должны хорошо отделяться друг от друга для создания равномерных каналов и линий тока между ними, тогда скорость восходящего потока снижается и вынос мелкодисперсной части активного ила падает [24, 87].

Отличительная особенность осветления иловых смесей заключается в том, что иловые смеси, подаваемые на осветление, имеют высокие массовые концентрации, соизмеримые с концентрациями во взвешенном слое [58].

Конструкция осветлителя со взвешенным осадком схематически показана на рис. 1.6.

Вода из смесителя подается в нижнюю часть осветлителя. В большинстве современных конструкций осветлителей нижнюю часть устраивают постепенно расширяющейся кверху (т.е. конической или призматической). Благодаря этому, скорость восходящего потока в пределах нижней части осветлителя постепенно уменьшается. Увлекаемые потоком подаваемой смеси частицы

взвеси поднимаются восходящим потоком воды до тех пор, пока их скорость осаждения не станет равной восходящей скорости потока.

Именно в этот момент происходит формирование взвешенного слоя как такового. После получения установившегося взвешенного слоя и приобретения им необходимой конструктивными и гидродинамическими условиями высоты, размещаются, так называемые, входные окна осадка, через которые активный ил отводится в отстойную часть сооружения, откуда он отбирается на дальнейшую обработку [12, 59, 116].

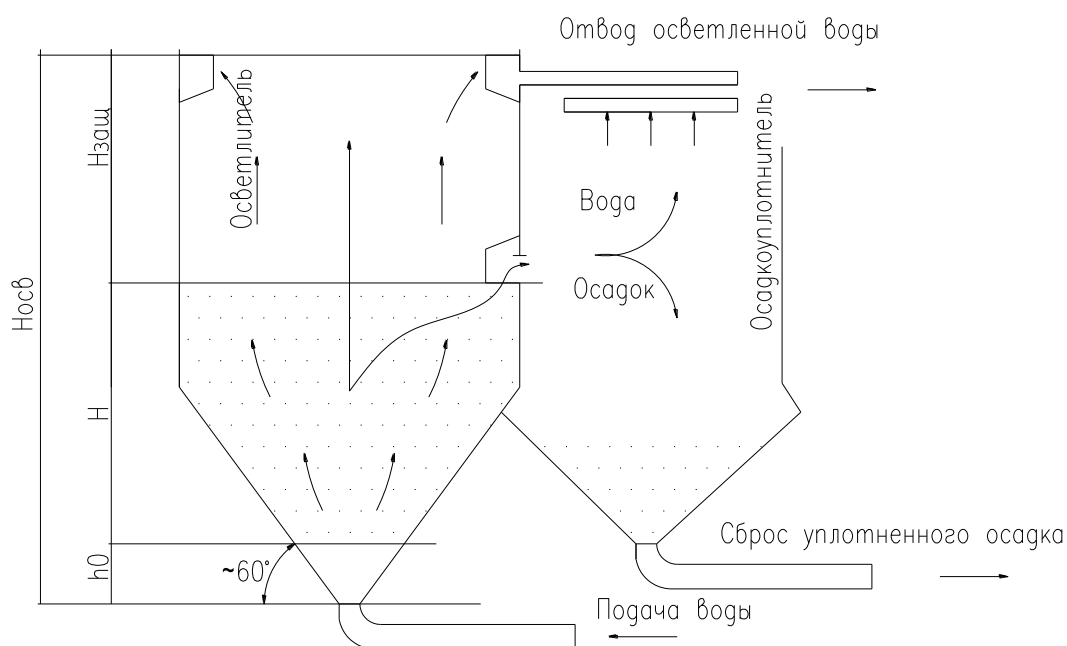


Рис.1.6. Осветлитель с взвешенным слоем осадка:

$H_{осв}$ – общая высота осветлителя; h_0 – высота зоны распределения потока; H – высота взвешенного слоя; $H_{заш}$ – высота защитного слоя.

Над взвешенным слоем, для улучшения качества осветленной воды на выходе из сооружения, постоянно поддерживается защитный слой надиловой воды, высота которого ориентировочно рекомендуется 0,5...0,8 м. Высота самого же взвешенного слоя активного ила 1,0...2,5 м [60, 89, 118].

Одной из основных проблем осветлителей со взвешенным слоем активного ила является наличие этих самых осадкоприемных окон в верхней части сооружения для отвода активного ила. Широко известно, что активный

ил имеет низкую способность к оседанию, которая во многом зависит от качества очистки сточных вод и от текущего состояния сооружений по биологической очистке. Обычно все эти факторы объединяются характеристикой способности активного ила к осаждению, либо же иловому индексу активного ила. Таким образом, при изменении свойств ила, осветлители со взвешенным слоем не успевают принять весь объем осадка в осадкоуплотнитель, приводя к снижению производительности сооружения в целом. Примерно такой же эффект оказывает повышение концентрации активного ила на входе в сооружение отделения. Данный факт практически неизбежен при полном направлении активного ила во взвешенный слой. В этом случае от точки ввода ила до осадкоприемных окон происходит постоянное накопление осадка, а взвешенный слой начинает формироваться лишь над данными окнами. При высоких концентрациях активного ила также перестает справляться отстойная часть илоотделителей со взвешенным слоем осадка, поэтому граничные концентрации эффективной работы сооружения осаждения составляют 5...6 г/дм³ [24].

Расчет осветлителей во взвешенном слое удовлетворительно описывается существующими уравнениями, для сооружений водоподготовки

$$\frac{H_v}{H_0} = \frac{a_v}{a_0} = mv + 1, \quad (1.3.1)$$

где v – скорость восходящего потока, мм/с

m – коэффициент расширения взвешенного слоя, пористость слоя;

a_v - концентрация взвешенных веществ во взвешенном слое, г/дм³;

a_0 - концентрация взвешенных веществ в статическом состоянии взвешенного слоя, г/дм³;

H_0 - высота слоя осадка в статических условиях, м;

H_v - высота слоя осадка при скорости восходящего потока v (м/с), м;

J - иловый индекс активного ила, см³/г

$$v = \left(\frac{1000}{a_0} - 1 \right) \frac{1}{m}, \text{ м/с}; \quad (1.3.2)$$

$$a_0 = \frac{1000}{J}, \text{ г/дм}^3. \quad (1.3.3)$$

Рекомендуемый диапазон работы осветлителей со взвешенным слоем осадка для работы с концентрацией примесей в поступающей воде 2...6 г/дм³. Гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя колеблется в зависимости от качества подаваемой смеси и составляет 0,3...4,5 м³/м²ч [59].

Скорость восходящего потока во взвешенном слое может достигать 1,2...1,4 мм/с. Чем выше скорость восходящего потока, тем больший вынос частиц активного ила можно получить на выходе из сооружения. Качество иловой воды после осветления довольно высокое, содержание взвешенных веществ колеблется на уровне 0,1...0,5 г/дм³ [58].

Преимуществами осветления во взвешенном слое осадка являются: приемлемые габаритные размеры сооружения; высокая эффективность илоотделения; возможность регулировки производительности системы; невысокие капитальные затраты на строительство.

Как недостатки метода можно отметить плохую работу с залповыми нагрузками и резкими скачками подачи смеси активного ила; опасность возникновения застойных зон и разрушения взвешенного слоя, вследствие выделения газообразных продуктов жизнедеятельности микроорганизмов активного ила; ограниченный диапазон действия по возможным концентрациям и нагрузке на водное зеркало илоотделителя.

Гидравлическую нагрузку на илоотделители, для окситенков или аэротенков-отстойников, работающих в режиме осветлителей со взвешенным осадком, которая зависит от произведения концентрации активного ила на иловый индекс aJ , следует принимать по табл.1.5 [22].

Этот параметр определяется иловым индексом и концентрацией ила из следующего выражения

$$aJ = a_i \cdot J_i / 1000, \quad (1.3.4)$$

где J_i – иловый индекс, см³/г;

a_i – концентрация ила, г/дм³.

Таблица 1.5 Изменение гидравлической нагрузки на водное зеркало

aJ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
q_{ms} $m^3/(m^2 \cdot ч)$	5,6	3,3	1,8	1,2	0,8	0,7

Существующие конструкции не справляются с поставленными задачами по нескольким причинам: повышенные концентрации избыточного активного ила попросту расширяют взвешенный слой осадка выше осадкоприемных окон и эффективность отделения падает, так же при концентрациях, превышающих $5...6 \text{ г/дм}^3$, отстойная часть осветлителей не уплотняет данный осадок [24, 81, 106]. Это приводит к сокращению высоты защитного слоя и выносу взвешенных частиц с осветленной водой. При концентрации активного ила выше 8 г/дм^3 есть риск возникновения проблем, связанных со значительным снижением гидравлической нагрузки на водное зеркало и невозможностью создания взвешенного слоя.

В этом случае следует обратить внимание на вид зависимости (Рис. 1.7), $q=f(aJ)$. График свидетельствует о том, что при малых концентрациях ила гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя выше, чем при высоких концентрациях [24].

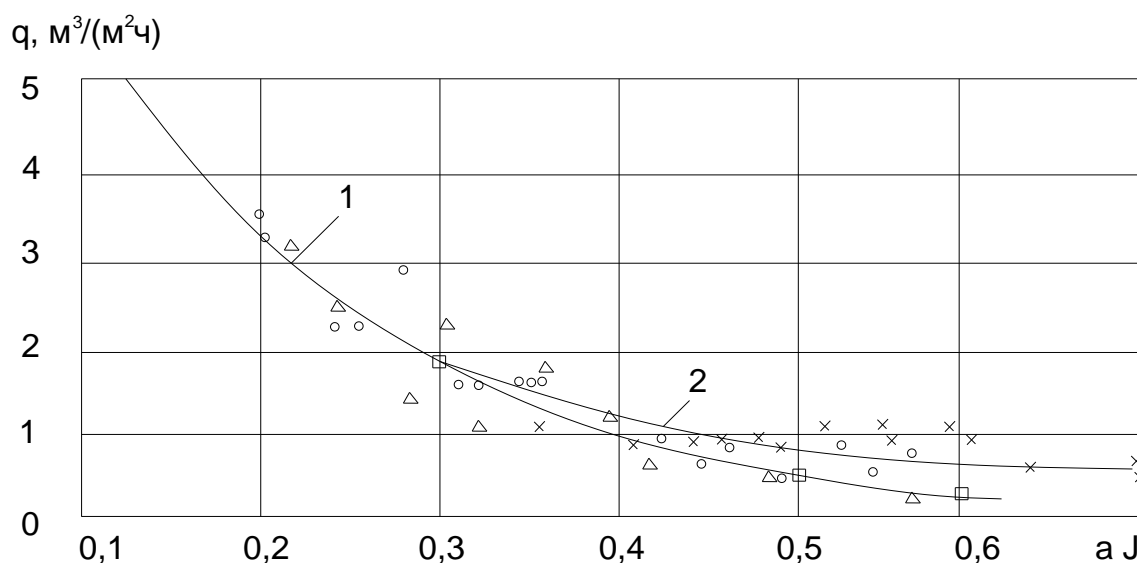


Рис. 1.7 Зависимость гидравлической нагрузки от параметра aJ:

- 1 – данные лабораторных исследований;
- 2 – данные исследований на полупромышленном окситенке.

Например, при значении параметра $aJ=0,2$ концентрация активного ила составляет порядка 3 г/дм^3 , а иловый индекс 70 мл/г , тогда гидравлическая нагрузка составляет $3,5 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$. При значении параметра $aJ=0,5$ концентрация активного ила составляет порядка 7 г/дм^3 , а иловый индекс 70 мл/г , тогда гидравлическая нагрузка составляет $0,5 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$. Поэтому, если использовать менее концентрированные иловые смеси, то производительность растет значительно выше, чем при высоких концентрациях активного ила, в этом есть резерв увеличения пропускной способности.

В целом, анализируя литературные источники, можно отметить, что классическая конструкция осветлителя со взвешенным слоем осадка не пригодна для разделения смесей высокой концентрации, так как от места ввода разделяемой смеси до осадкоприемных окон образуются зоны с максимальным массовым содержанием частиц. При этом, частицы начинают транспортироваться с жидкой фазой и в этой зоне взвешенный слой не образуется. Предварительные теоретические исследования показали ряд проблем, связанных с низкими гидравлическими нагрузками на илоотделитель, а в случаях повышенных концентраций – полную невозможность разделения.

Таким образом, рассмотренные проблемы обуславливают необходимость разработки новой конструкции илоотделителя со взвешенным слоем, обеспечивающей эффективную работу с повышенными концентрациями.

1.5 Постановка задач исследований

Процессы, протекающие в толще взвешенного слоя минерализованного активного ила, являются не до конца рассмотренными и изученными. Особенно те его аспекты, которые зависят от биологических процессов жизнедеятельности микроорганизмов.

В технологии глубокой минерализации осадка, предложенной Нездойминовым В.И. и Чернышевым В.Н. [46, 53, 106], применен принцип постоянной циркуляции обрабатываемого избыточного активного ила и одновременное отделение уже минерализованного активного ила. Работа

илоотделителя в комплексе с сооружением по минерализации, аналогична работе системы аэротенк - вторичный отстойник, причем вносимый осадок в минерализатор следует рассматривать как органический субстрат для активного ила минерализатора. Поэтому конструкция илоотделителя должна обеспечивать условное, фракционное илоразделение, совместно с возвратом основной массы активного ила обратно в минерализатор. Согласно теории процесса минерализации мелкодисперсный ил слабо задерживается во взвешенном слое и вымывается восходящим потоком жидкости.

Данный метод минерализации имеет ряд недостатков, например, отсутствие условий для формирования и развития в аэробном стабилизаторе биоценоза, способного окислять высокомолекулярные органические вещества, накопление в осадке продуктов биологических процессов, протекающих при аэробной стабилизации.

Сохранение постоянного биоценоза целесообразно осуществлять организацией рециркуляции этой культуры. Поскольку аэробная стабилизация приводит к распаду более простых по составу органических веществ осадка, то беззольная часть стабилизированного осадка в основном состоит из высокомолекулярных органических веществ. Высокомолекулярные органические вещества, как правило, подвергаются биологическому разрушению медленнее простых органических соединений, этот процесс могут вести группы микроорганизмов, характеризующиеся малой удельной скоростью окисления и малой удельной скоростью роста.

В аэробном стабилизаторе для микроорганизмов, содержащихся в поступающем осадке, питание ограничено, этот осадок можно считать органическим субстратом для микроорганизмов, содержащихся в стабилизаторе.

Производительность системы преимущественно определяется производительностью станции обработки осадка, ключевым влияющим фактором является гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя.

Концентрация взвешенных веществ, например, при аэробной минерализации активного ила может возрасти до 13 г/дм^3 , тогда как устойчивая

работа илоотделителя обеспечивается при концентрации ила порядка 5...6 г/дм³. При более высоких концентрациях в илоотделителе обнаруживается рост высоты взвешенного слоя и уменьшение высоты защитного слоя вплоть до его выноса, что приводит к необходимости увеличения высоты сооружения и удорожанию капитального строительства сооружения. Соответственно сокращается высота защитного слоя, наблюдается повышенный вынос с иловой водой взвешенного слоя.

Однако, на сегодняшний день отсутствуют теоретические основы и методы расчета формирования взвешенного слоя в илоотделителе для высокоминерализованного активного ила.

К основным факторам, влияющим на формирование взвешенного слоя осадка, относятся: высота взвешенного слоя, скорость стесненного осаждения флоккул ила; пористость во взвешенном слое осадка, иловый индекс активного ила, температурные колебания и др.

Установлено, что данный метод имеет высокую эффективность при использовании его в составе технологии глубокой минерализации активного ила. Согласно теории процесса минерализации мелкодисперсный ил не задерживается во взвешенном слое, а вымывается восходящим потоком жидкости и отводится с иловой водой.

Было сделано предположение о возможности увеличения гидравлической нагрузки на илоотделитель при повышенных значениях параметра aJ , а при стабильном иловом индексе при повышенных концентрациях активного ила за счет применения нисходяще-восходящего потокораспределения в сооружении илоотделения, а также, при необходимости, снижения концентрации активного ила на входе в осветлитель путем разбавления иловой водой.

Задачей данной работы является определение основных параметров, регулирующих процесс работы илоотделителя со взвешенным слоем, уточнение расчетных методик для них.

1.6 Выводы по первому разделу

1. Проанализированы методы обработки избыточного активного ила при очистке городских сточных вод. Установлено, что илоотделение широко используется в схемах как биологической очистки активным илом, так и в схемах обработки осадков. В технологии биологической очистки илоотделение выполняет задачи отделения жидкости от иловой смеси, а в технологии обработки осадков обеспечивает уплотнение и подготовку осадков к обезвоживанию.

2. Установлены наиболее распространенные методы для илоотделения: это методы отстаивания, флотации, фильтрования через пористые перегородки и отделения во взвешенном слое осадка. Выбор метода илоотделения зависит от концентрации иловой смеси, свойств ила и задач, решаемых илоотделением.

3. При использовании технологии глубокой минерализации осадка илоотделение выполняет задачу возврата иловой смеси в сооружения минерализации и выделения из нее мелкодисперсных частиц с высокой степенью минерализации. Илоотделение во взвешенном слое лучше всего справляется с данными задачами.

4. Илоотделение при обработке осадков связано с высокими концентрациями активного ила и продолжительным временем разделения. При биологической очистке на илоотделитель поступает иловая смесь с концентрацией $1,5 \dots 3,0 \text{ г/дм}^3$, при обработке осадка $4 \dots 5 \text{ г/дм}^3$, а при глубокой минерализации $8 \dots 12 \text{ г/дм}^3$.

5. Установлена возможность повышения интенсивности работы илоотделителя, а именно, увеличения гидравлической нагрузки на водное зеркало за счет разбавления исходной иловой смеси.

6. Илоотделение во взвешенном слое в технологии глубокой минерализации при работе с высокими концентрациями активного ила мало изучено и требует дополнительных теоретических и экспериментальных изысканий. Есть необходимость усовершенствования основных расчетных зависимостей к условиям высоких концентраций активного ила.

РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЛООТДЕЛЕНИЯ В
СООРУЖЕНИЯХ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ

2.1 Особенности процессов отделения активного ила во взвешенном слое

Теоретическое обоснование осветления воды во взвешенном слое осадка получило свое развитие в 30-х годах прошлого века под руководством проф. С.Х. Азерьера. Впоследствии на базе теоретических исследований Е. И. Тетеркиным разработаны первые отечественные конструкции осветлителей коридорного типа с вертикальным осадкоуплотнителем [120]. Значительный вклад в дальнейшее развитие теории осветления воды во взвешенном слое внесли работы Кургаева Е.Ф., Минца Д.М., Сколубовича Ю.Л., Николадзе Г.И., Исмаилов Э.К., Воронова Ю.В. и др. [59, 60, 141, 146].

Принцип работы осветлителя основан на формировании и поддержании взвешенного слоя осадка за счет скоростного напора восходящего тока воды. По мере накопления осадка излишек его через осадкоприемные окна отводится в уплотнитель. Основными недостатками сооружений осветления воды во взвешенном слое осадка считается плохая преемственность к залповым нагрузкам и резким скачкам подачи воды, ограниченный диапазон действия по возможным концентрациям и нагрузке на водное зеркало илоотделителя.

Работы таких ученых, как Яковлев С.В., Клячко В.А., Шуберт С.А., Колпакова В.П., Дёмина М.В., Первов Г.Г., Zhang L., Chen Y. [143, 144], направлены на совершенствование процессов разделения иловых смесей. Но полноценные и информативные исследования осветлителей со взвешенным слоем для илоотделения активного ила после сооружений биологической очистки, особенно с повышенными концентрациями, на сегодняшний день отсутствуют. Необходимо, руководствуясь теоретическим обоснованием процесса осветления, уточнить расчетную модель илоотделителя и подтвердить ее экспериментальными исследованиями.

В современных условиях большинство сооружений биологической очистки, включая аэробную минерализацию, интенсифицируют свою работу увеличением рабочих концентраций, что требует пересмотреть подходы к илоотделению. Осветление во взвешенном слое осадка позволяет отделить минерализованные частицы от основной массы ила. Предварительные поисковые исследования показали ряд проблем, связанных с низкими гидравлическими нагрузками на илоотделитель, и полную невозможность разделения в случаях повышенных концентраций ила.

Поиски решений по увеличению производительности илоотделителя в условиях повышенных концентраций поступающего ила вызывают необходимость обратиться к детальному рассмотрению процессов, протекающих при формировании взвешенного слоя. Физическая сущность формирования взвешенного слоя заключается в изменении гидродинамических условий при протекании жидкости между флокулами ила [3,4]. Из-за взаимной близости флокул, свободное обтекание, имеющее место при свободном осаждении, переходит в особый род движения через своеобразную пористую среду.

К основным факторам, определяющим формирование взвешенного слоя, относятся [8]: качество смеси, подаваемой на осветление (наличие взвешенных веществ, химический состав, температура и др.), скорость восходящего потока жидкости, а также химический состав и структура осадка во взвешенном слое (размер хлопьев, пористость, объемный вес и др.) [9]. Важную роль в формировании взвешенного слоя играют скорость восходящего потока, качество подаваемой жидкости, иловый индекс и пористость взвешенного слоя.

При малых скоростях потока жидкости, сквозь слой соприкасающихся друг с другом частиц ила, слой остается неподвижным, так как жидкость проходит по поровым каналам и пустотам, т.е. просачивается через слой. При этом, часть скоростного напора расходуется на преодоление трения в каналах взвешенного слоя о поверхность хлопья ила и о стенки аппарата. Обычно трение потока о стенки аппарата мало и им можно пренебречь. Потери напора при фильтрации жидкости через неподвижный слой осадка растут

пропорционально скорости движения потока жидкости, что соответствует участку 1–2 кривой (прямая при ламинарном и криволинейная при турбулентном режимах), изображенной на рис. 2.1.

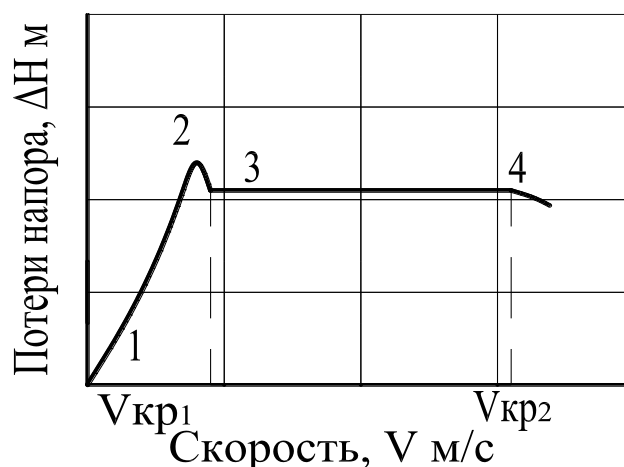


Рис. 2.1 График формирования взвешенного слоя

С увеличением скорости фильтрования расстояния между хлопками активного ила постепенно увеличиваются. Ил приходит в движение и перемешивается с жидкостью, образуя взвешенный слой.

При этом поток передает некоторое количество движения (в виде кинетической энергии) хлопкам ила, перемещение которых друг относительно друга обуславливается уменьшением силы трения, а, следовательно, и потерь напора (участок кривой 2 - 3 на рис.2.1). В момент перехода к псевдооживлению и в связи с преодолением сил сцепления активного ила на графике появляется пик. Скорость, при которой образуется взвешенный слой, называется критической ($V_{кр1}$). Во взвешенном слое масса мелких твердых частиц в результате непрерывного перемешивания в восходящем потоке жидкости переходит в подвижное состояние. Средняя величина вектора вертикальной скорости перемещения каждой частицы близка к нулю, поэтому взвешенный слой не имеет выраженного, направленного движения и его верхняя поверхность стремится принять горизонтальное положение.

При дальнейшем возрастании скорости жидкости градиент скорости каждой частицы ила и силы вязкости, вызываемой этим градиентом, увеличиваются, что приводит к увеличению сечения поровых каналов и,

следовательно, к уменьшению скорости. Поэтому частицы активного ила, находящиеся под действием сил тяжести, сопротивления и выталкивания, перемещаются вследствие флуктуации скоростей [7].

В процессе псевдооживления гидродинамическое давление не меняется (участок 3–4). Это объясняется тем, что по мере возрастания скорости, увеличивается пористость слоя и уменьшается коэффициент гидравлического сопротивления. Дальнейшее увеличение скорости более ($V_{кр2}$) рис.2.1, приводит к преодолению сил тяжести активного ила размыву и разрушению слоя.

Слой активного ила в восходящем потоке воды может находиться в двух качественно различных устойчивых состояниях: неподвижном и псевдооживленном. При восходящей скорости воды меньше нижней или критической скорости, фракции материала неподвижны, и его пористость стабильна. При превышении нижней критической скорости сила гидродинамического воздействия потока уравнивает вес слоя и хлопья ила начинают раздвигаться, пористость увеличивается, происходит расширение слоя. Такое состояние динамического равновесия сохраняется до достижения верхнего значения скорости восходящего потока или же гидравлической крупности частиц и называется псевдооживлением.

Если брать во внимание природу и свойства хлопья активного ила, а именно, малый фактический размер частиц и плотность хлопья ила, приближенной к плотности жидкости, то целесообразным становится предположение того, что участки кривой (Рис. 2.1) 1-2 как и 2-3 практически отсутствуют, т.е. достигаются при сравнительно низких значениях скорости восходящего потока.

Дальнейшее увеличение скорости приводит к размыву взвешенного слоя, повышенному уносу и разрушению слоя. Каждому значению восходящей скорости потока или гидравлической нагрузке, от критического минимума (начало псевдооживления) до критического максимума (начало разрушения слоя), соответствует вполне определенная пористость и высота псевдооживленного слоя [6].

Таким образом, восходящая скорость является одним из основных параметров, характеризующих работу осветлителя и определяющих гидравлическую нагрузку, а следовательно, производительность сооружения.

Рисунок 2.2 отражает различные возможные состояния взвешенного слоя. Слева - направо показан процесс формирования взвешенного слоя илоотделителя, в котором при увеличении скорости восходящего потока слой начинает постепенное расширение.

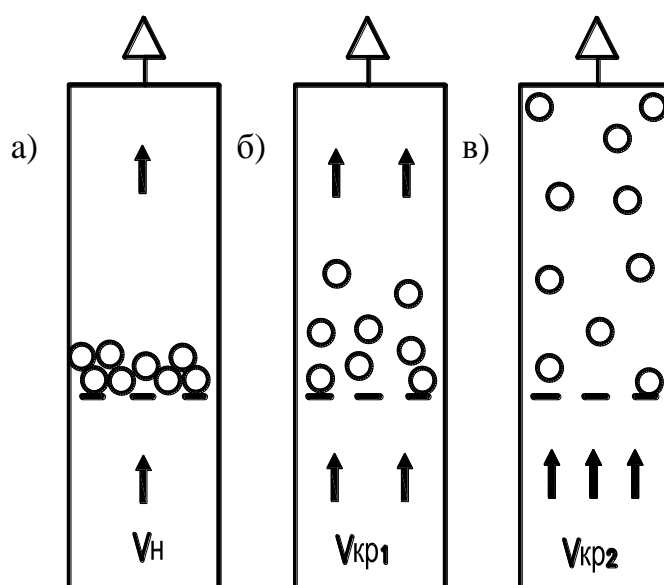


Рис. 2.2 Этапы формирования взвешенного слоя

При скорости растягивания слоя V_n , м/с наблюдается начальный этап формирования слоя (а) или растягивание слоя. Сформированный взвешенный слой (б) образуется при достижении скорости преодоления сил сцепления между частицами $V_{кр1}$, м/с. Вынос взвешенного слоя за пределы сооружения (в) происходит при скорости уноса частиц за пределы взвешенного слоя $V_{кр2}$, м/с, за счет разрыва связей в слое и повышенного каналобразования.

Взвешенный слой существует, если скорость стесненного осаждения принимается равной скорости восходящего потока. Д.М. Минцем были установлены общие закономерности данного процесса [57,58]. Благодаря взаимной близости хлопков активного ила свободное обтекание, которое имеет место при свободном осаждении, переходит в движения через так называемую

пористую среду, формирующуюся осаждающимся илом, взвешенным в восходящем потоке [44].

При достижении скорости уноса частиц, разрушается взвешенный слой.

При протекании процесса фильтрации воды через слой осадка на неподвижную шарообразную твердую флоккулу активного ила диаметром d , м с одной стороны действует сила тяжести F_T , с другой сила, уравновешенная силой сопротивления стесненному осаждению $F_{тр}$ и выталкивающей силой F_a (силой Архимеда), что представлено на рис. 2.3.

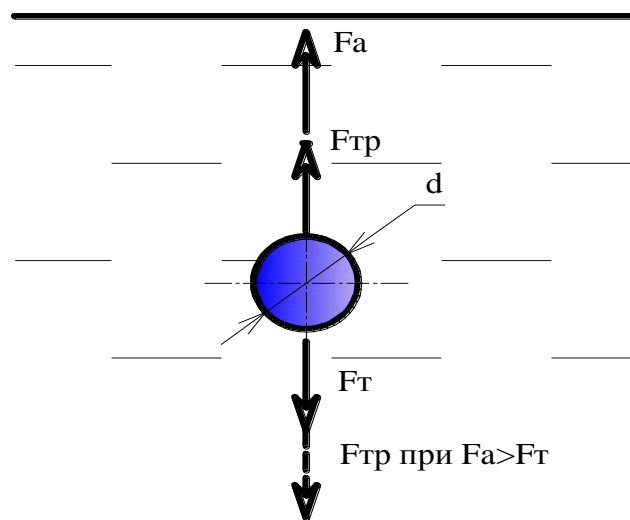


Рис. 2.3 Схема действия основных сил при свободном движении частицы:

F_T - сила тяжести, Н;

$F_{тр}$ - сила сопротивления стесненному осаждению, Н;

F_a - сила Архимеда (выталкивающая сила), Н.

d - диаметр флоккулы активного ила, м.

Основное условие существования взвешенного слоя:

$$F_T = F_A + F_{тр}. \quad (2.1)$$

Из рис. 2.3 видна возможность приложения силы сопротивления стесненному осаждению либо силы трения $F_{тр}$ вниз, в таком случае наблюдается процесс отстаивания.

Активный ил – сложная биологическая система, где даже во взвешенном слое отделителя протекают биологические процессы жизнедеятельности аэробных гетеротрофных и автотрофных микроорганизмов, включая денитрифицирующие. Продолжительное пребывание активного ила во взвешенном слое, где наблюдается дефицит кислорода, приводит к его вспуханию и образованию плотных сгустков. Внутри них накапливаются газообразные продукты, которые вызывают всплытие сгустков осадка на поверхность, нарушая структуру взвешенного слоя и ухудшая эффективность осветления, увеличивая вынос его с осветленной водой. Большое содержание нитратов в иловой смеси вызывает возможность протекания процессов денитрификации.

Для исключения подобного отрицательного явления газообразования необходимо постоянное обновление и перемешивание взвешенного слоя активного ила и поддержание минимально необходимого кислородного режима.

Предложена модель илоотделителя с разделением на восходяще-нисходящие потоки.

Основной принцип работы сооружения – постоянное движение иловой смеси с вектором скорости в двух направлениях. Первый вектор скорости имеет восходящее направление, характеризует общую производительность системы, а второй – нисходящее.

Принципиальная схема движения восходяще-нисходящих потоков в илоотделителе со взвешенным слоем приведена на рис. 2.4.

Если через взвешенный слой ила пропускать иловую смесь, то увеличивается скорость восходящего потока и объем, занимаемый слоем, возрастает.

Взвешенный слой активного ила, в общем его понимании, можно сравнить с резиновой нитью, которая сжата благодаря силам гравитации, но может быть растянута в большей или меньшей степени под воздействием, скоростного напора. Растяжение или рост взвешенного слоя увеличивается с повышением скорости потока воды.

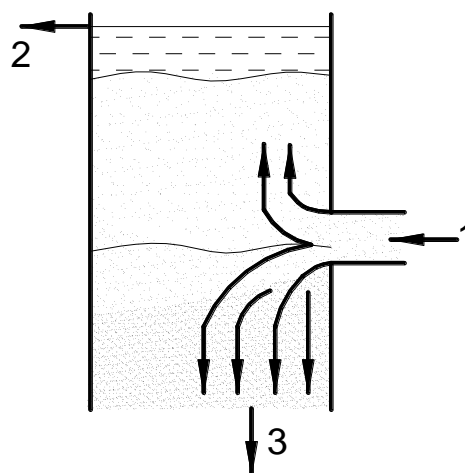


Рис. 2.4. Принципиальная модель илоотделителя со взвешенным слоем осадка с восходяще - нисходящим распределением потоков:

- 1— подача иловой смеси на обработку;
- 2— отвод осветленной иловой воды;
- 3— отвод циркуляционной иловой смеси.

Качество очистки в осветлителе связано с устойчивым состоянием слоя взвешенного осадка, который, в неблагоприятных условиях, легко взмучивается и размывается. Работа систем отведения воды не должна вызывать значительную турбулизацию потока и образование крупных вихрей, которые могут оказать негативное действие на взвешенный слой.

2.2 Сущность формирования взвешенного слоя осадка в илоотделителе с восходяще-нисходящим распределением потоков

Процессы, проходящие в осветлителе со взвешенным слоем осадка для отделения активного ила от жидкости, строго подчиняются законам стесненного осаждения.

В нижней части взвешенного слоя на начальном этапе происходит фильтрование смеси снизу вверх в условно неподвижном слое частиц активного ила, когда подъемная сила воды становится равной силе тяжести частиц, составляющих основную контактную массу слоя, то весь слой

переходит во взвешенное состояние. При постоянстве исходных параметров, слой прекращает расширяться по высоте на определенной стадии.

При отделении активного ила дополнительно влияют такие факторы, как образование и укрупнение хлопков активного ила, протекание биологических процессов (в основном процессов денитрификации) и т.д.

Активный ил имеет развитую поверхность и очень хорошо взаимодействует с другими частицами ила, а так же разнообразными примесями присутствующими в иловой смеси. При сравнительной ламинаризации потока во взвешенном слое межклеточные силы только усиливаются, не испытывая разрушительных воздействий быстро текущих турбулентных потоков. Поэтому в слое взвешенного активного ила с увеличением времени пребывания образуются более устойчивые хлопья ила, создающие дополнительные сопротивления восходящим потокам осветляемой смеси. При увеличении концентраций данный эффект лишь усиливается. Следовательно, свободная для протекания смеси полезная площадь осветлителя стремится к уменьшению, а это, в свою очередь, приводит к увеличению потерь напора в слое. Затем, преодолевая данное сопротивление, обрабатываемая смесь движется по траектории наименьшего сопротивления, вследствие чего вымывает и расширяет во взвешенном слое своеобразные каналы. Данные каналы имеют не прямолинейную структуру, что приводит к увеличению перемешивания активного ила по всей высоте взвешенного слоя.

Данное явление усиливается тем, что гидравлическая крупность увеличивается, и ил, под действием сил тяжести, стремится в нижние слои взвешенного слоя (Рис.2.5).

Конструкция илоотделителя условно разделена по высоте на три основных зоны, к которым применимы различные гидродинамические зависимости и режимы движения.

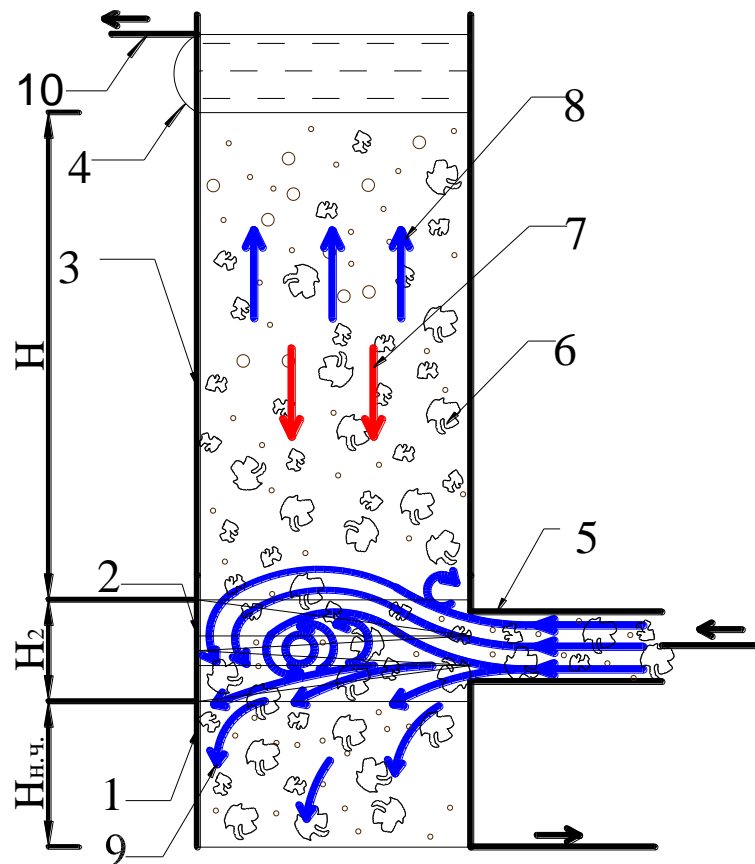


Рис. 2.5 Принцип движения смеси в осветлителе со взвешенным слоем осадка:

- 1 - нижняя часть илоотделителя, зона осаждения и отвода иловой смеси, $H_{н.ч.}$, м;
- 2 - зона ввода и распределения потоков в илоотделителе и начало формирования взвешенного слоя, H_2 , м;
- 3 - зона взвешенного слоя, H , м;
- 4 - защитный слой надфиловой воды;
- 5 - подача иловой смеси на илоотделение, $V_{вх}$, м/с;
- 6 - хлопья обрабатываемого активного ила;
- 7 - нисходящий поток взвешенного слоя;
- 8 - восходящий поток взвешенного слоя V , м/с;
- 9 - циркуляция обрабатываемой иловой смеси, $V_{нисх}$, м/с;
- 10 - отвод осветленной иловой воды.

Из рисунка 2.5 видно, что движение в самом взвешенном слое имеет как восходящие (8), так и нисходящие потоки (7). Преобладающее направление

движения – нисходящее, в противном случае взвешенный слой невозможно стабилизировать.

Увеличение размеров хлопков ила приводит к высокой вероятности соударения частиц и к дроблению хлопков ила. Они измельчаются и более мелкие, под действием линий тока восходящего потока, выносятся из сооружения.

Более крупные хлопья ила накапливаются в нижней части взвешенного слоя, а затем циркуляционные потоки ввода смеси в илоотделитель увлекают их за собой и выносят из сооружения.

Для упрощения определения расчетных параметров работы илоотделителя было выполнено зонирование сооружения относительно его высоты.

В средней зоне 2, из условно маленького отверстия поток иловой смеси поступает в илоотделитель. Далее происходит распределение подаваемой смеси и успокоение потока жидкости. Повышенные скорости входа иловой смеси улучшают процессы массообмена взвешенного слоя. В средней части основной поток обрабатываемой смеси распределяется между верхней и нижней частью илоотделителя. Часть хлопков активного ила при попадании в верхнюю зону, при резком снижении скорости восходящего потока, за счет увеличения площади сечения, укрупняются. Затем, под действием возросших сил тяжести и создаваемых вихревых движений, увлекаются в зону осаждения и отвода иловой смеси. Нижняя зона 3 отводит избыточное количество активного ила под действием сил гравитации.

Над взвешенным слоем илоотделителя находится защитный слой осветленной воды для исключения выноса активного ила.

Рассмотрим возможные варианты движения смеси в илоотделителе, в зависимости от соотношения скоростей восходящих V_1 и нисходящих V_2 потоков, соответственно:

а) $V_1 > V_2$

В этом случае поток рабочей жидкости устремится в верхнюю часть сооружения осветлителя, что приведет к увеличению концентрации активного

ила в верхней части и к постепенному расширению слоя выше предельно допустимой высоты.

$$\text{б) } V_1 \leq V_2$$

Такой режим работы считается оптимальным. При этом условии распределение восходящего потока регулируется концентрацией и высотой взвешенного слоя. Данный режим работы позволяет производить точную настройку параметров осветлителя и регулировать изменение концентрации ила на входе в сооружение.

2.3 Полуэмпирическая математическая модель формирования взвешенного слоя

Основной целью описания процессов формирования взвешенного слоя было получение математической зависимости расчета гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя при определенной высоте взвешенного слоя.

В качестве базового метода для расчета параметров зоны взвешенного слоя использованы исследования Д.М. Минца и С.А. Шуберта [57, 58, 145]. Падение гидродинамического давления (ΔP , Па) во взвешенном слое, равное массе хлопков ила в жидкости этого слоя с единичной площадью основания, называется основным уравнением гетерофазной системы

$$\Delta P = (\rho_2 - \rho_1)g(1 - m)H, \quad (2.2)$$

где ρ_1 и ρ_2 – соответственно плотность жидкости и плотность частиц ила, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

m – мнимая пористость слоя (коэффициент расширения слоя или пористость слоя), определяемая как отношение объема пустот во взвешенном слое к общему его объему;

H – высота взвешенного слоя, м.

В уравнении (2.3.1) неизвестными остаются мнимая пористость слоя m и высота взвешенного слоя H , м. Пористость взвешенного слоя достаточно сложно определяется экспериментально. Однако она является одним из основных параметров, характеризующих состояние взвешенного слоя. Потери давления при движении жидкости через взвешенный слой также можно рассчитать, применив известную формулу Дарси-Вейсбаха

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{d_k} \rho_1 \frac{V^2}{2}, \quad (2.3)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления;

L – длина каналов взвешенного слоя, м;

d_k – эквивалентный диаметр каналов, м;

V – скорость движения воды в каналах взвешенного слоя, м/с.

В связи с тем, что диаметр, так называемых, каналов взвешенного слоя соизмерим с диаметром частиц ила, то возможность перехода от эквивалентного диаметра каналов к эквивалентному диаметру флокул ила определяется зависимостью

$$d_k = \frac{4 \cdot m}{f}, \quad (2.4)$$

где f – удельная поверхность частиц активного ила (для общего случая форма частиц ила принята шарообразной), $\text{м}^2/\text{м}^3$;

$$f = \frac{6(1-m)}{d \cdot \Phi}, \quad (2.5)$$

где Φ – фактор формы частиц активного ила, для упрощения расчетов принимается равным 1 [60];

d – эквивалентный диаметр частиц ила, имеющих отличную от шара форму, но равный ему объем, м.

Скорость восходящего потока принимается равной скорости движения в каналах взвешенного слоя, которую определить достаточно проблематично. Поэтому в условиях работы с активным илом, как с высокоразвитой хлопьевидной структурой с низкой плотностью и с высокими значениями условной пористости, расчет ведется по средней скорости, которая равна отношению объемного расхода жидкости к площади поперечного сечения илоотделителя, свободного от частиц ила. Коэффициент гидравлического сопротивления определяется согласно

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34, \quad (2.6)$$

где Re – число Рейнольдса.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (2.7)$$

ν – кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$, равная $\nu = \frac{\nu_m}{\rho_2}$,

где ν_m – молярная динамическая вязкость среды, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Молярную вязкость гетерофазной системы можно определить по формуле

$$\nu_m = \mu \cdot \left(1 + 2C_v \left(\frac{1+C_v}{1-C_v} \right)^2 \right), \quad (2.8)$$

где μ – динамическая вязкость жидкого компонента гетерофазной системы, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

C_v – объемная концентрация активного ила во взвешенном слое, %.

$$C_v = \frac{a}{\rho_2} \cdot 100, \quad (2.9)$$

где a – концентрация активного ила во взвешенном слое, $\text{г}/\text{дм}^3$.

Исходя из концепции работы взвешенного слоя (Рис. 2.1), следует, что потери гидродинамического давления в фазе сформировавшегося взвешенного слоя остаются постоянными. Это объясняется изменением условий обтекания частиц ила, а именно, при возрастании скорости восходящего потока происходит одновременное увеличение объёма взвешенного слоя и расстояния между хлопками ила.

Движение через пористую среду можно представить как движение по каналам, которые имеют извилистую структуру. Длина их очень сложно определяема, поэтому для упрощения расчетов приравняем $L = H$.

Разделив уравнение (2.3) на уравнение (2.2), а также выполнив соответствующие подстановки и преобразования, можем найти мнимую пористость взвешенного слоя

$$1 = \left(\frac{199,5 \cdot v_m \cdot (1-m)}{d \cdot V \cdot \rho_1} + 2,34 \right) \cdot \left(\frac{0,75 \cdot \rho_1 \cdot V^2}{d \cdot m \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1)} \right), \quad (2.10)$$

На основании проведенных в работе аналитических исследований получено уравнение определения высоты взвешенного слоя при различных значениях пористости слоя m , согласно ур-ю (2.2), т.е. высота взвешенного слоя при разных значениях скорости восходящего потока связана уравнением (2.11). Данное утверждение справедливо при работе взвешенного слоя в зоне 3-4 (Рис. 2.1), где изменения гидродинамического давления остаются постоянными. Предельная расчетная высота взвешенного слоя H_2 выражается из пропорции в зависимости от исходных параметров экспериментального слоя

$$(1 - m_1)H_1 = (1 - m_2)H_2, \quad (2.11)$$

где H_1 и H_2 – высота начального и расчетного взвешенного слоя соответственно, м;

m_1 и m_2 – пористость начального и расчетного слоя соответственно.

Начальные показатели мнимой пористости и высоты взвешенного слоя могут быть определены только на основании экспериментальных данных определения начальной высоты взвешенного слоя H_1 , м. Для чего через слой активного ила пропускается исходная иловая смесь с определенной скоростью восходящего потока, так как эти данные не остаются постоянными и могут меняться в зависимости от свойств ила и условий работы сооружения. Максимальная величина скорости восходящего потока равна скорости свободного осаждения частиц.

Протекание биологических процессов в активном иле может привести к разрушению структуры и сплошности взвешенного слоя, что также может ограничивать рекомендуемую высоту взвешенного слоя. Минимальная скорость восходящего потока – это скорость, при которой сила гидродинамического воздействия потока на частицы меньше силы тяжести частицы. Данная скорость имеет слишком низкие значения и не применяется в работе. Рекомендуемая высота взвешенного слоя составляет 1...2 м.

Для определения граничных условий формирования взвешенного слоя, а именно, определения минимальной и максимальной скорости восходящего потока иловой смеси, можно воспользоваться условиями динамического равновесия хлопка ила, которое возможно только при уравнивании действующих на него сил (ур-е 2.1)

Преобразовав уравнение (2.1), подставив в выражение определяющие силы, действующие на частицы, максимальная скорость восходящего потока может быть выражена при помощи уравнения (2.12).

$$V = \sqrt{\frac{d \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1)}{2 \cdot \rho_1 \cdot \xi}}, \text{ м/с} \quad (2.12)$$

где ξ – коэффициент сопротивления среды;

$$\xi = \frac{4 \cdot Ar}{3 \cdot Re^2}, \quad (2.13)$$

где Ar – критерий Архимеда;

Re – число Рейнольдса.

$$Ar = \frac{d^3 \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot \rho_1}{\mu^2}. \quad (2.14)$$

Данная скорость свободного осаждения частицы активного ила или гидравлическая крупность u , мм/с, является максимально допустимой скоростью восходящего потока. Считается корректной именно для конкретной смеси, подаваемой в илоотделитель, т.е. смеси с одинаковыми входными параметрами, такими как концентрация взвешенных веществ, начальная пористость слоя и т.д.

Превышение данной скорости в восходящем потоке жидкости будет приводить к расширению слоя взвешенного осадка выше критического уровня, и, соответственно, к его размыву и уносу за пределы сооружения.

Таким образом, согласно приведенных зависимостей, можно выделить факторы, имеющие наибольшее влияние на высоту взвешенного слоя, концентрация активного ила, иловый индекс и скорость восходящего потока.

2.4 Моделирование лабораторного илоотделителя

Основной задачей моделирования экспериментальных исследований в лабораторных условиях является определение критериев, позволяющих осуществить пересчет полученных результатов на реальные сооружения обработки осадков. Гидродинамическая модель движения иловой смеси во взвешенном слое осадка имеет ряд переменных величин, необходимых для определения основных параметров работы сооружения илоотделения.

На основании предварительных исследований были определены основополагающие факторы процессов илоотделения. Основные математические закономерности процесса отделения активного ила представлены зависимостями (2.2...2.11).

Анализ данных зависимостей позволяет получить общий вид функции определения параметров взвешенного слоя в зависимости от основных

гидродинамических условий работы сооружения илоотделения $H = f(a; V; g; d; v; \rho; J)$.

Задача определения значений основополагающих критериев решается в несколько этапов. Вначале осуществляется поиск области оптимума параметров, влияющих на процесс отделения активного ила. Затем для описания выбранного диапазона, используется методика изменения значений лишь одного из факторов при прочих постоянных факторах [124].

Далее определяется либо устанавливается связь между влияющими на процесс факторами.

Для определения основных критериев моделирования процесса применим теорию размерности (π -теорема). Основные размерности величин приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 Степени размерностей величин

№	Величины	L	M	T
1	H	$\lambda_1 = 1$	$\phi_1 = 0$	$\tau_1 = 0$
2	V	$\lambda_2 = 1$	$\phi_2 = 0$	$\tau_2 = -1$
3	a	$\lambda_3 = -3$	$\phi_3 = 1$	$\tau_3 = 0$
4	g	$\lambda_4 = 1$	$\phi_4 = 0$	$\tau_4 = -2$
5	v	$\lambda_5 = 2$	$\phi_5 = 0$	$\tau_5 = -1$
6	ρ	$\lambda_6 = -3$	$\phi_6 = 1$	$\tau_6 = 0$
7	J	$\lambda_7 = 3$	$\phi_7 = -1$	$\tau_7 = 0$

Размерности приведены в виде степеней размерности [123]:

λ – степень размерности длины, $[L]^\lambda$;

ϕ – степень размерности массы, $[M]^\phi$;

τ – степень размерности времени, $[T]^\tau$.

Искомые критерии подобия являются безразмерными величинами, степени единиц измерения в критерии подобия z_{1-6} должны соответствовать условию

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 z_1 + \lambda_2 z_2 + \lambda_3 z_3 + \lambda_4 z_4 + \lambda_5 z_5 + \lambda_6 z_6 + \lambda_7 z_7 &= 0 \\ \psi_1 z_1 + \psi_2 z_2 + \psi_3 z_3 + \psi_4 z_4 + \psi_5 z_5 + \psi_6 z_6 + \psi_7 z_7 &= 0 \\ \tau_1 z_1 + \tau_2 z_2 + \tau_3 z_3 + \tau_4 z_4 + \tau_5 z_5 + \tau_6 z_6 + \tau_7 z_7 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.15)$$

Ранг матрицы, на основании значений таблицы 2.1, равен 3. Подставляя значения λ , φ , τ из таблицы 2.1 в систему 2.15 получаем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} z_1 + z_2 - 3z_3 + z_4 + 2z_5 - 3z_6 + 3z_7 &= 0 \\ z_3 + z_6 - z_7 &= 0 \Rightarrow z_3 = z_7 - z_6 \\ -z_2 - 2z_4 - z_5 &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.16)$$

Линейно независимые решения данной системы 2.15 и будут соответствовать безразмерным критериям подобия.

Решение 1

$$z_7 = 1; z_6 = 1; z_4 = 0; z_1 = 0; z_2 = 0; z_3 = 0; z_5 = 0;$$

$$\Pi_1 = J \cdot a. \quad (2.17)$$

Решение 2

$$z_4 = 0; z_6 = 0; z_7 = 0; z_3 = 0; z_1 = 1; z_2 = 1; z_5 = -1;$$

$$\left. \begin{aligned} z_1 + z_2 + 2z_5 &= 0 \\ -z_2 - 2z_4 - z_5 & \end{aligned} \right\};$$

$$z_1 + z_2 = -2z_5$$

$$\Pi_2 = \frac{H \times V}{v}. \quad (2.18)$$

Решение 3

$$z_6 = 0; z_7 = 0; z_3 = 0; z_1 = -2; z_4 = -1; z_2 = 1; z_5 = 1;$$

$$\left. \begin{aligned} z_1 + z_2 + z_4 + 2z_5 &= 0 \\ -z_2 - 2z_4 - z_5 &= 0 \end{aligned} \right\};$$

$$\Pi_3 = \frac{V \times v}{g \times H^2}. \quad (2.19)$$

Решение 4

$$z_5 = 0; z_3 = 0; z_6 = 0; z_7 = 0; z_4 = 1; z_2 = 2; z_1 = 1;$$

$$\left. \begin{aligned} z_1 + z_2 + z_4 + 2z_5 &= 0 \\ -z_2 - 2z_4 - z_5 &= 0 \end{aligned} \right\};$$

$$\left. \begin{aligned} z_1 + z_2 + z_4 &= 0 \\ -z_2 - 2z_4 &= 0 \end{aligned} \right\};$$

$$P_4 = \frac{H \times g}{V^2}.$$

(2.20)

При разработке конструкции и состава лабораторной установки освещения во взвешенном слое осадка следует использовать комплекс гидродинамического подобия Π_1 и Π_2 , то есть соблюдение параметров илового индекса, концентрации активного ила и числа Рейнольдса. В этом случае зависимость, полученная на лабораторной установке, будет применима для подобных натуральных сооружений. При этом масштабный гидродинамический коэффициент будет равен: $\alpha_V = \sqrt{\alpha_l} = 1$.

2.5 Восходяще-нисходящее распределение потока в илоотделителе

Динамика потоков смеси обрабатываемого осадка в жидкой среде, при входе в сооружение по илоотделению во взвешенном слое осадка, представляет огромный интерес к пониманию процессов, протекающих на границе раздела верхней и нижней части илоотделителя. Процесс распределения данного илоотделителя не изучен должным образом. Поэтому возникает ряд закономерных вопросов: потокораспределение в зоне подачи смеси активного ила на обработку, перемешивание нижней части взвешенного слоя илоотделителя и массоперенос из верхней части сооружения в нижнюю [138].

Используя уравнения Навье–Стокса для плоской задачи была разработана модель движения иловой смеси осадка активного ила, подаваемого на илоотделение (Рис.2.6).

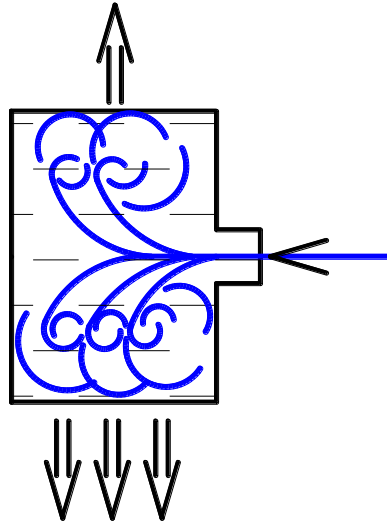


Рис. 2.6. Схема предположительного влияния линий тока смеси в илоотделителе

Нисходящий поток жидкости увлекает за собой нижнюю часть взвешенного слоя, тем самым способствует постоянному обновлению хлопков ила, формирующих взвешенный слой.

Данная задача требует более детального экспериментального исследования.

Уравнение Навье–Стокса для вертикальной и горизонтальной составляющих размерных скоростей [114]

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \bar{v} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right), \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \bar{v} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right). \quad (2.22)$$

Здесь и далее размерные величины обозначены чертой сверху (только те, которые используются и в безразмерном виде).

Имеем два уравнения с тремя неизвестными \bar{u} , \bar{v} , \bar{P} . Чтобы замкнуть систему, к уравнениям Навье–Стокса присоединяют уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0. \quad (2.23)$$

Начальные условия не имеют существенного значения, поскольку определяется стационарное решение. Компьютерная программа реализует итерационный процесс метода Гаусса–Зейделя. Уравнение решается методом

Анализ результатов расчёта, представленных на графике рис 2.7, показывает, что на входе потока в колонну осветлителя возникает интенсивное вихревое движение жидкости, способствующее активному её перемешиванию, что в значительной степени способствует обновлению взвешенного слоя, исключая появление застойных и неподвижных зон.

Определен режим движения смеси на входе в сооружение, характеризуемый числом Рейнольдса $Re = 5232$, режим движения турбулентный. В самом взвешенном слое, в нижней его части ламинарный режим движения смеси $Re = 1046$, число Рейнольдса кверху взвешенного слоя снижается до 20...40.

Разработанная компьютерная программа позволяет подобрать параметры и режимы работы осветлителя на стадии проектирования. А именно, установить граничные показатели восходящей и нисходящей скорости потока обрабатываемой смеси.

Основная часть расчета представлена в приложении А.

Скорость подачи смеси в зону формирования взвешенного слоя была подсчитана при помощи математического моделирования процесса и решена методом последовательных приближений в среде Delphi с определенными входными параметрами.

На основании расчетных и графических данных можно сделать вывод, что в зоне входа обрабатываемой смеси в сооружение илоотделения происходит очень активное перемешивание, распространяющееся как на нисходящую, так и на восходящую части. Это способствует не только равномерному распределению потока по площади осветлителя, но и массообменным процессам, протекающим во взвешенном слое. Необходимые скорости входа смеси в илоотделитель определяют площадь входного отверстия либо канала, и могут служить критерием соотношения площади входа и рабочей площади илоотделителя.

2.6 Выводы по второму разделу

1. Рассмотрен механизм и установлены основные факторы, влияющие на формирование и работу взвешенного слоя. Для илоотделения целесообразно использовать нисходяще-восходящее распределение потоков, позволяющее поддерживать постоянную концентрацию ила и высоту взвешенного слоя;

2. Уточнена полуэмпирическая модель разделения иловой смеси во взвешенном слое. Установлены факторы, определяющие высоту взвешенного слоя, - это концентрация активного ила, иловый индекс и скорость восходящего потока;

3. Определены основные критерии подобия процесса отделения активного ила во взвешенном слое, осуществлено планирование лабораторных исследований для определения вида математических зависимостей, описывающих процесс работы взвешенного слоя.

4. Разработана компьютерная модель распределения потоков смеси, подаваемой на обработку иловой смеси, определяющая характер движения жидкости в корпусе илоотделителя.

РАЗДЕЛ 3

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЛООТДЕЛЕНИЯ
ПОСЛЕ АЭРОБНОЙ ОБРАБОТКИ

3.1 Описание лабораторных установок, методы исследования

С целью определения основных параметров илоотделителя был проведен комплекс лабораторных экспериментальных исследований процесса отделения ила после биологической обработки.

Для подтверждения достоверности полученных теоретических зависимостей функционирования взвешенного слоя с восходяще-нисходящим разделением потоков на основе основополагающих критериев была смоделирована лабораторная установка [134, 135]. Схема лабораторной установки приведена на рис. 3.1, а фотоизображение на рис. 3.2.

Экспериментальная установка осветлителя со взвешенным слоем представляет собой колонну из органического стекла высотой 2,7 м квадратного сечения 1 площадью 0,01, систему подводящих, отводящих трубопроводов с насосным оборудованием 7 и 8, емкость 2 для сбора осветленной иловой воды и емкость смешения осветленной иловой воды с циркуляционным илом 3. Емкость 3 выполненная из органического стекла, представляет собой цилиндр с диаметром 0,05 м, высотой 0,7 м, имеющая нижнюю часть в виде конфузора.

Из сборной емкости 2 насосом 8 в сборную емкость 3 поступает осветленная иловая вода из верхней части колонны и циркуляционной иловой смеси из нижней части колонны 1 посредством насоса 7. В колонну 1, в зону интенсивного перемешивания III, под гидростатическим напором по трубопроводу 9 подается иловая смесь. С помощью циркуляционного насоса 7 и запорно-регулирующего вентиля 5 осуществляется регулировка нисходящей скорости в зоне IV. Гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя или скорость восходящего потока регулируется изменением подачи насоса 8

при установленной, постоянной подаче насоса 7. Таким образом, в сооружении илоотделения формируются два условных контура движения: восходящий и нисходящий циркуляционные потоки.

С течением некоторого времени, при установившемся режиме в зоне II илоотделителя, происходит формирование взвешенного слоя, разделение иловых смесей и образование защитного слоя осветленной иловой воды (зона I).

Осветленная иловая вода по трубопроводу 4 в самотечном режиме поступает в сборную емкость осветленной воды 2.

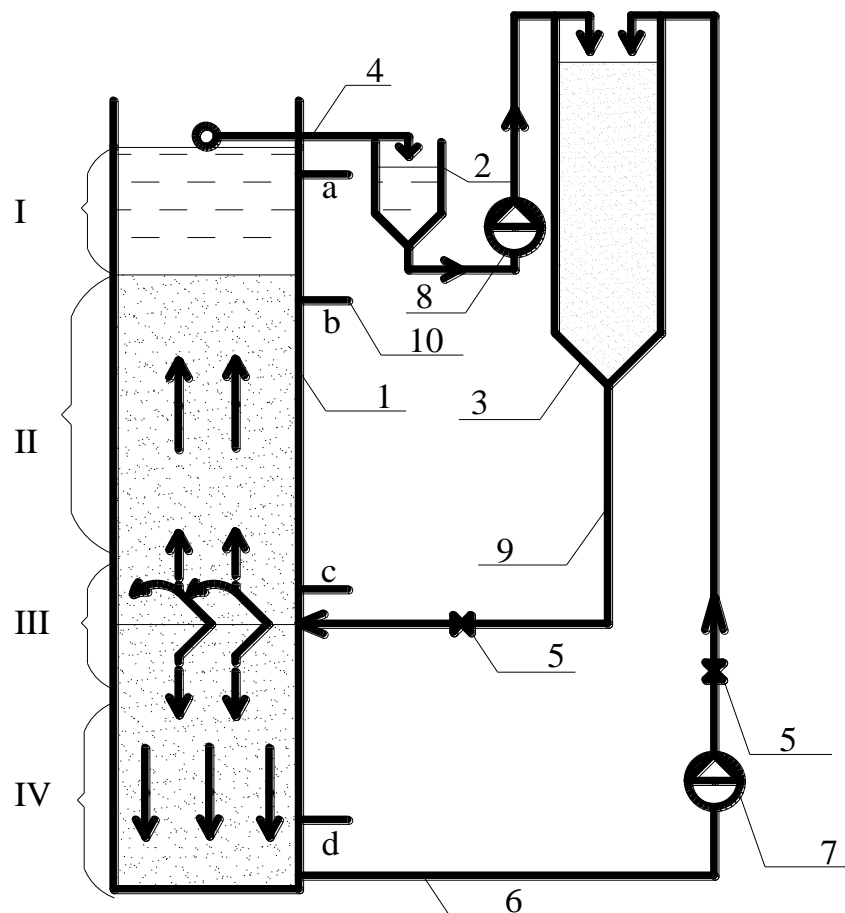


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки осветлителя со взвешенным слоем осадка с восходяще-нисходящим распределением потока:

- 1 — илоотделитель со взвешенным слоем осадка;
- 2 — емкость сбора осветленной иловой воды;
- 3 — емкость смешения осветленной иловой воды и циркуляционного осадка;
- 4 — отвод осветленной иловой воды;

- 5 – запорно-регулирующая арматура;
- 6 – линия возврата иловой смеси;
- 7 – насос отвода иловой смеси на циркуляцию;
- 8 – насос подачи осветленной воды на циркуляцию;
- 9 – подача иловой смеси в илоотделитель;
- 10 – пробоотборники в точках а, b, с, d;
- I – защитная зона осветленной воды;
- II – зона взвешенного слоя;
- III – зона интенсивного перемешивания;
- IV – зона циркуляции ила.



Рис. 3.2. Фотоизображение лабораторной установки

Лабораторная конструкция илоотделителя такова, что позволяет максимально быстро и эффективно производить корректировку высоты взвешенного слоя в зависимости от исходных параметров сооружения.

Высота взвешенного слоя поддерживалась в пределах 1,0...2,0 м, что связано с протеканием биологических процессов во взвешенном слое при увеличении времени обработки ила. Высота защитного слоя рекомендована литературными источниками и составляет 0,5 м [24].

Диапазон принятых нагрузок на площадь водного зеркала илоотделителя принят из условия формирования и поддержания взвешенного и защитного слоев и рекомендаций [22, 24]. Лабораторная установка эксплуатировалась с гидравлической нагрузкой на водное зеркало илоотделителя в пределах 0,1...4,5 м³/м² ч. Во взвешенном слое ил находится в состоянии непрерывного хаотичного движения. При разных скоростях восходящего потока поддерживается одна и та же высота взвешенного слоя за счет изменения нисходящей циркуляции. Сооружение находится в состоянии динамического равновесия.

Непрерывная работа установки позволяет с течением времени (1,5...3 часа) сформировать взвешенный слой осадка. Расход циркуляционного ила и иловой воды измерялся объемным методом.

При постоянной гидравлической нагрузке удавалось поддерживать постоянные концентрации в исходной иловой смеси. Концентрации и зольности ила в точках отбора проб определялась по стандартным методикам [121]. Диапазон концентраций иловой смеси на входе в колонну варьировался в пределах 3...8 г/дм³. Шаг изменения концентраций на входе в сооружение на протяжении опытов не имел постоянного значения в силу постепенного изменения скорости входа смеси.

Для повышения достоверности экспериментов использовался реальный активный ил Макеевских очистных сооружений, отобранный из действующего аэробного минерализатора. Иловая смесь в процессе проведения экспериментов имела иловый индекс на уровне $J_i = 60...70$ см³/г. Использовался стандартный способ определения илового индекса отстаиванием в течение 30 минут и определением занимаемого илом объема [122].

Места установки пробоотборников на рис. 3.1 обозначены буквами **a** – **d**, где точка **a** – соответствует осветленной иловой воде, **b** – верхней части

взвешенного слоя, c – нижней части взвешенного слоя и d –циркуляционной иловой смеси.

При проведении эксперимента изучалось влияние гидравлической нагрузки на высоту взвешенного слоя и степень его расширения в установившемся режиме работы, а также распределение ила по высоте илоотделителя.

3.2 Результаты лабораторных исследований илоотделения во взвешенном слое осадка

3.2.1 Исследование распределения иловой смеси по высоте илоотделителя

Концентрация иловой смеси во взвешенном слое зависит от концентрации смеси на входе в илоотделитель. Конкретных данных в известной литературе не обнаружено, поэтому проводились экспериментальные исследования по изучению влияния концентрации на входе и во взвешенном слое илоотделителя. В ходе экспериментальных исследований определено изменение концентраций иловой смеси по высоте илоотделителя при разной гидравлической нагрузке, для определения средней концентрации ила во взвешенном слое.

Первоначально лабораторная установка заполнялась илом с концентрацией $4,9 \text{ г/дм}^3$ и зольностью 22,4%. Высота взвешенного слоя поддерживалась на постоянном уровне $H=1,1 \text{ м}$. Отношение гидравлической нагрузки циркуляционного или нисходящего потока иловой смеси к восходящему составляло $P = \frac{q_{\text{ц}}}{q} = 3,0$.

В точках отбора проб отбирались пробы иловой смеси при различных условиях, в которых определялось значение концентрации. Данные распределения ила по высоте илоотделителя приведены в таблице 3.1.

По данным таблицы 3.1, для наглядности построен график (Рис. 3.3) изменения концентраций иловой смеси по высоте илоотделителя.

Таблица 3.1 Изменение концентрации иловой смеси по высоте илоотделителя

Гидравлическая нагрузка, q , $\text{м}^3/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$	Точки отбора проб							
	a		b		c		d	
	Концентрация г/дм^3	Средняя концентрация г/дм^3	Концентрация г/дм^3	Средняя концентрация г/дм^3	Концентрация г/дм^3	Средняя концентрация г/дм^3	Концентрация г/дм^3	Средняя концентрация г/дм^3
0,50	0,026	0,035	3,92	3,87	5,82	5,76	6,22	6,12
	0,039		3,81		5,70		6,01	
	0,034		3,85		5,75		6,09	
0,58	0,110	0,120	4,10	4,03	5,40	5,24	6,33	6,10
	0,140		4,0		5,00		6,11	
	0,110		3,96		5,24		5,92	
0,87	0,013	0,160	4,67	4,58	4,91	5,00	6,24	6,05
	0,017		4,40		5,10		6,00	
	0,017		4,50		4,98		5,97	
1,31	0,135	0,139	4,88	4,68	4,99	4,90	5,65	5,58
	0,147		4,56		4,81		5,70	
	0,129		4,46		4,92		5,39	
2,62	0,180	0,192	4,89	4,75	4,90	4,79	5,45	5,39
	0,200		4,70		4,82		5,30	
	0,192		4,65		4,60		5,33	
3,81	0,200	0,212	5,09	4,98	4,80	4,64	5,30	5,18
	0,219		5,00		4,60		5,01	
	0,215		4,91		4,52		5,12	

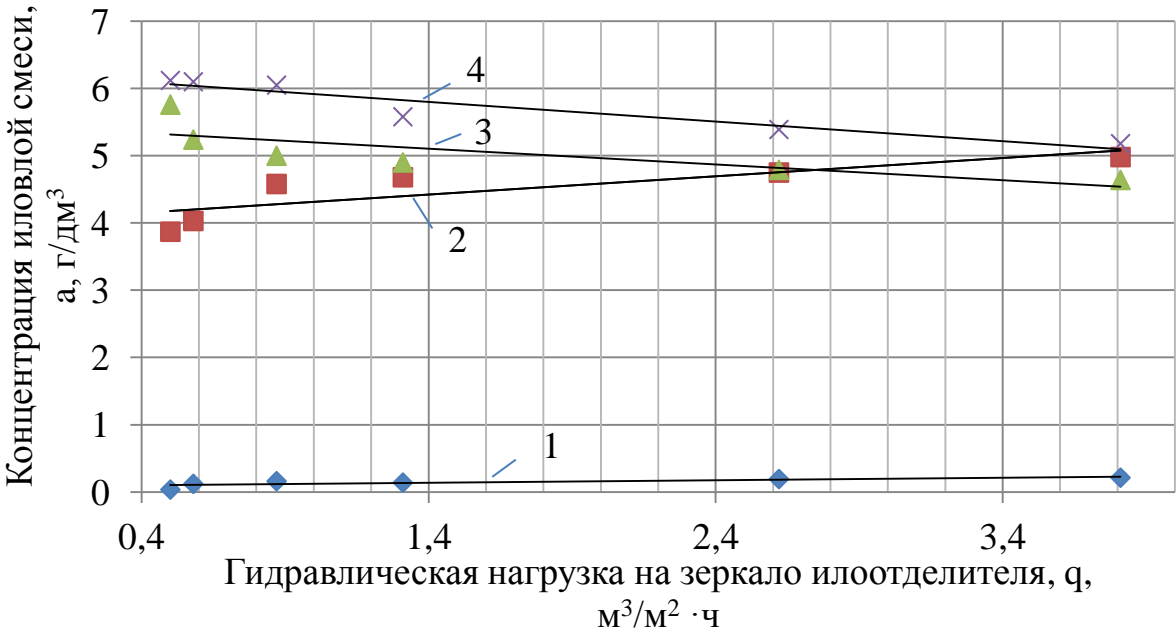


Рис. 3.3 Изменение концентрации иловой смеси по высоте илоотделителя в зависимости от гидравлической нагрузки:

1 – концентрация ила в точке отбора проб а, г/дм^3 ;

- 2 – то же в точке **b**, г/дм³;
- 3 – то же в точке **c**, г/дм³;
- 4 – то же в точке **d**, г/дм³.

Лабораторные исследования показали, что концентрация иловой смеси по высоте илоотделителя распределяется неравномерно. В точке **a** зоны I в осветленной воде в зависимости от гидравлической нагрузки концентрация ила изменялась в пределах 0,035...0,212 г/дм³, а зольность 42...56%. В точке **b** – концентрация иловой смеси в пределах 3,87...4,98 г/дм³ и зольности 27...31%, в точке **c** – 4,64...5,76 г/дм³ с зольностью 26...29%, в точке **d** концентрация 5,18...6,12 г/дм³, и зольность 24...27%. Изменение гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя производилось изменением подачи насоса 8 при установленной, постоянной подаче насоса 7.

Полученные данные (Рис. 3.3) свидетельствуют о том, что концентрация иловой смеси, в зависимости от места отбора проб по высоте взвешенного слоя отличается не значительно (не более 10%), но в верхней части взвешенного слоя концентрация иловой смеси меньше, чем в нижней.

Для подтверждения достоверности полученных табличных данных был проведен расчет массового баланса иловой смеси с учетом каждой зоны установки илоотделения (Табл. 3.2), который представлен в приложении Б. Рассмотрев приведенные расчетные данные, установлено, что распределение концентраций иловой смеси по высоте лабораторной установки показывает достаточную сходимость. Баланс масс подсчитывался при каждом эксперименте в сравнении с исходной массой ила. Фактические отклонения масс иловой смеси в сооружении, в зависимости от опыта, не превышали 14,26%.

Установлено, что в верхней части взвешенного слоя накапливаются частицы с большей зольностью (до 31%), что может объясняться меньшими размерами частиц ила с высокой зольностью. Разница концентраций иловой смеси также зависит от скорости восходящего потока.

Таблица 3.2 Определения массы иловой смеси при различных гидравлических нагрузках на водное зеркало илоотделителя

Гидравлическая нагрузка, $\text{м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	Общая масса ила в илоотделителе, кг	Процент отклонения, %
В исходной иловой смеси	0,118629	0
0,50	0,104781	11,67
0,58	0,10566	10,93
0,87	0,107446	9,43
1,31	0,101711	14,26
2,62	0,105341	11,20
3,81	0,105836	10,78

Концентрации в исходной иловой смеси и средняя концентрация во взвешенном слое, а именно полусумма концентраций в точках b и c, отличаются незначительно (в пределах $0,3 \text{ г/дм}^3$), то при расчете высоты взвешенного слоя илоотделителя (формула 2.9) в качестве расчетной можно принимать концентрацию поступающей иловой смеси.

3.2.2 Определение циркуляции иловой смеси

Для проведения процесса разделения иловых смесей ключевое значение имеет распределение исходного потока рабочей жидкости на восходящую и нисходящую части. Данное распределение позволяет регулировать гидравлическую нагрузку на поверхность илоотделителя и способствует интенсивному обновлению нижней части взвешенного слоя.

В системе с восходяще-нисходящим разделением потоков в илоотделитель направляется не только расход иловой смеси на осветление, а еще и циркуляционный расход. В этом случае скорости входа исходной иловой смеси возрастают. Повышенные скорости на входе в зону формирования взвешенного слоя постоянно увлекают за собой хлопья ила и способствуют равномерному распределению его по всей площади илоотделителя.

Величина нисходящей циркуляции иловой смеси напрямую зависит от концентраций ила на входе в сооружение и в осветленной иловой воде, тогда разделение потоков можно представить в следующем виде (Рис. 3.4).

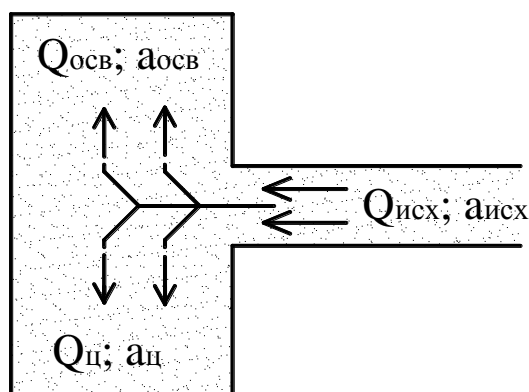


Рис. 3.4 Схема распределения массового расхода иловой смеси

Для отображения сути процесса разделения иловой смеси в илоотделителе с восходяще-нисходящим распределением потоков запишем массовый баланс сооружения, который соблюдается согласно закону сохранения масс (3.1).

Уравнение материального баланса илоотделителя записывается в виде:

$$Q_{исх} \cdot a_{исх} = Q_{ц} \cdot a_{ц} + Q_{осв} \cdot a_{осв} \quad (3.1)$$

или

$$(Q_{осв} + Q_{ц}) \cdot a_{исх} = Q_{ц} \cdot a_{ц} + Q_{осв} \cdot a_{осв} \quad (3.2)$$

где $Q_{исх}$ – расход исходной иловой смеси, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$Q_{ц}$ – расход циркуляционной иловой смеси, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$Q_{осв}$ – расход осветленной иловой воды, $\text{м}^3/\text{ч}$;

$a_{исх}$ – концентрация ила в исходной иловой смеси, $\text{г}/\text{дм}^3$;

$a_{ц}$ – концентрация ила в циркуляционной иловой смеси, $\text{г}/\text{дм}^3$;

$a_{осв}$ – концентрация ила в осветленной иловой воде, $\text{г}/\text{дм}^3$.

Отношение гидравлической нагрузки циркуляционного или нисходящего потока к исходной иловой смеси (степень нисходящей циркуляции, P) при одинаковой площади сооружения определено экспериментально. Для этого высота взвешенного слоя илоотделителя поддерживалась постоянной и составляла 1,1 м, а гидравлическая нагрузка на площадь водного зеркала постепенно увеличивалась. Производились замеры восходящих и нисходящих расходов смеси, после чего вычислялось значение P . Результаты определения отношения гидравлической нагрузки циркуляционного потока к исходной

иловой смеси при различной исходной концентрации ила приведены в таблице 3.3.

Установлено, что при постоянной высоте взвешенного слоя и изменении гидравлической нагрузки на поверхность илоотделителя необходимо увеличивать гидравлическую нагрузку циркуляционного потока. Если увеличивать гидравлическую нагрузку на водное зеркало илоотделителя, параллельно не поднимая нагрузку циркуляционного потока, взвешенный слой начинает расширяться. Данное расширение происходит за счет увеличения пористости слоя для компенсации возросшего гидродинамического давления.

Таблица 3.3 Отношение гидравлической нагрузки нисходящего (циркуляционного) потока к восходящему при различной исходной концентрации иловой смеси для высоты взвешенного слоя 1,1 м.

Исходная концентрация, а, г/дм ³	Гидравлическая нагрузка, создаваемая восходящим потоком, q, м ³ /м ² ·ч	Гидравлическая нагрузка, создаваемая нисходящим потоком, q _ц , м ³ /м ² ·ч	$P = \frac{q_{ц}}{q}$
1	2	3	4
2,30	2,09	4,18	2,00
3,00	2,84	6,39	2,25
4,64	3,81	10,82	2,83
4,79	2,62	7,60	2,90
4,90	1,31	3,93	3,00
5,00	0,87	2,60	3,00
5,24	0,58	1,86	3,20
5,76	0,50	1,80	3,60
6,00	1,76	6,50	3,70
7,20	1,04	4,30	4,10

Степень нисходящей циркуляции рабочей жидкости можно увеличивать до становления, как минимального расхода осветленной иловой воды, так и наименьшей высоты взвешенного слоя. Выполнение данного увеличения приводит к повышенным затратам электроэнергии на перекачивание циркуляционного расхода, а иногда, к использованию более производительного насосного оборудования, что удорожает себестоимость отделения ила.

Исходя из таблицы 3.3 рекомендуемая степень нисходящей циркуляции, для обеспечения смыва подверженного залеганию ила и обеспечению равномерного распределения в нижней части взвешенного слоя составляет порядка 2...4,1 и зависит от исходной концентрации иловой смеси. Экспериментально установлено отношение нисходящей скорости илоотделителя к восходящей при концентрации ила 4 г/дм³ ориентировочно составляет 2,6:1 (P=2,6), при 6 г/дм³ – 3,7:1 (P=3,7) и 7,2 г/дм³ – 4,1:1 (P=4,1). Максимальной высоты взвешенного слоя позволяет достичь равномерное (1:1) распределение исходной иловой смеси между верхней и нижней частью илоотделителя. Это происходит за счет поступления во взвешенный слой большого количества обрабатываемой иловой смеси, что в условиях работы с высокими концентрациями ила недопустимо.

3.2.3 Изучение изменения высоты взвешенного слоя с применением планирования экспериментальных исследований

Поставлена задача оценить зависимость гидравлической нагрузки относительно высоты взвешенного слоя в зависимости от основных факторов, которая решается при помощи планирования экспериментальных исследований. С целью получения корректных результатов экспериментальных исследований, получения большей информации об объекте исследования и значимости влияющих на него факторов в диссертационной работе составлен план проведения исследований по определению вида зависимости, описывающей работу илоотделителя со взвешенным слоем.

На основании анализа литературных исследований выделен ряд входных факторов, влияющих на процесс разделения иловых смесей во взвешенном слое. Данные факторы приведены в табл. 3.4 [124]. Параметры объекта, а именно параметры лабораторной установки приведены в разделе 3.1.1 данной диссертационной работы.

Функцией отклика $Y_H(x_1, \dots, x_n)$ была принята высота взвешенного слоя в илоотделителе, м. Высота принимается потому, как она является конечным показателем состояния взвешенного слоя.

Таблица 3.4 Факторы влияющие на илоотделение во взвешенном слое осадка

Фактор
1. Гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя q , $\text{м}^3/\text{м}^2\text{ч}$
2. Концентрация ила в исходной смеси a , $\text{г}/\text{дм}^3$
3. Степень нисходящей циркуляции иловой смеси P
4. Диаметр частиц ила в смеси d , мкм
5. Иловый индекс I , $\text{мл}/\text{г}$

Для упрощения вида регрессионной зависимости было проведено ранжирование и отсеивание малозначащих факторов. Будем предполагать, что эффекты взаимодействия факторов в исследуемом объекте маловероятны и пренебрежимо малы [124].

Поскольку иловая смесь сильно зависит от многих условий (состав сточных вод, тип сооружений обработки и т.д.), то диаметр частиц ила в смеси и иловый индекс можно охарактеризовать как сложно варьируемые. Они в свою очередь задаются постоянными численными значениями, определяющими возможные области изменения рассматриваемого параметра.

С целью упрощения обработки экспериментальных данных осуществляем переход от действительного значения факторов к кодированному [123], значения заносим в таблицу 3.5

$$x_i = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta x_j} \quad (3.3)$$

где x_i – кодированное значение фактора;

x_j – действительное значение фактора;

x_{j0} – основной уровень фактора;

Δx_j – интервал варьирования фактора.

Для экспериментального исследования принимается полный факторный эксперимент 2^n с одинаковым числом параллельных опытов при условии малой значимости сочетаний уровней факторов. Количество экспериментов $N_{\text{экс}}$ определяется исходя из количества варьируемых параметров n по известной зависимости:

$$N_{\text{экс}} = 2^n = 8 \text{ экспериментов.}$$

Таблица 3.5 Основные параметры варьирования величин для определения вида зависимости

Величина	Нулевой (основной) уровень	Интервал варьирования	Код	Верхний уровень (+1)	Нижний уровень (-1)
$q, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	1,95	1,45	x_1	3,4	0,5
$a, \text{ г/дм}^3$	5,1	2,1	x_2	7,2	3,0
P	3,175	0,925	x_3	4,1	2,25

Матрица эксперимента в соответствии с основными алгоритмами планирования научных исследований [124] приведена в таблице 3.6

Таблица 3.6 Матрица эксперимента по определению вида зависимости

№ опытов (i)	Значение факторов (кодированные)			
	x_0	x_1	x_2	x_3
1	+	+	+	+
2	+	+	+	—
3	+	+	—	—
4	+	—	—	—
5	+	—	—	+
6	+	—	+	+
7	+	+	—	+
8	+	—	+	—

Полученная матрица используется для выполнения экспериментальных исследований процесса илоотделения в лабораторной установке илоотделителя с восходяще-нисходящим распределением потока.

Полученное после обработки в специализированных программах уравнение необходимо записать в реальных физических величинах, для чего производится обратный переход от стандартизированного (кодированного) вида к действительному, получив, таким образом, окончательный вид уравнения. Адекватность предлагаемой гипотезы подтверждается сравнением данных, рассчитанных аналитически, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований.

3.2.4 Исследования влияния гидравлической нагрузки на высоту взвешенного слоя при различной концентрации ила в исходной смеси

Как установлено ранее, высота взвешенного слоя зависит от концентрации исходной смеси, гидравлической нагрузки на водное зеркало (скорости восходящего потока) и илового индекса. Поскольку в лабораторных условиях иловый индекс варьировался в незначительных пределах (в пределах $60 \dots 70 \text{ см}^3/\text{г}$), его влияние на процесс осветления в лабораторных условиях не рассматривалось.

В соответствии с поставленными задачами исследований проведены лабораторные эксперименты процесса разделения иловой смеси во взвешенном слое в зависимости от гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя и при различных концентрациях ила, поступающего в сооружение. План экспериментальных исследований (табл. 3.6) на проведение лабораторных экспериментов процесса илоотделения во взвешенном слое осадка. Поскольку высота взвешенного определяется размерами сооружения по илоотделению и задается конструктивно, то ее удобнее отражать в качестве функции отклика.

При проведении экспериментальных исследований производительность центробежного насоса 8 (Рис. 3.1) постепенно возрастает, что приводило к увеличению гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя.

Высота взвешенного слоя фиксировалась после прекращения расширения взвешенного слоя, т.е. становления динамического равновесия сооружения. Была проведена серия опытов для различных концентраций поступающей иловой смеси, при этом степень нисходящей циркуляции поддерживалась в пределах $P = 2,5 \dots 4,1$.

В процессе лабораторных исследований был проверен широкий диапазон концентраций ила в исходной смеси – $3 \dots 8$ г/дм³. Гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя изменялась от 0,6 до 3,4 м³/м²ч.

Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 3.7.

На протяжении лабораторных исследований фиксировалась высота взвешенного слоя в зависимости от гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя для различных значений концентрации иловой смеси в сооружении. Результаты выполненных лабораторных исследований приведены на рис. 3.5.

Таблица 3.7 Изменение высоты взвешенного слоя при изменении гидравлической нагрузки и концентрации ила в смеси

Концентрация иловой смеси, а, г/дм ³									
3		4,9		5,5		6		7,2	
P=2,25		P=3,30		P=3,40		P=3,70		P=4,10	
q, м ³ /м ² ч	H, м	q, м ³ /м ² ч	H, м	q, м ³ /м ² ч	H, м	q, м ³ /м ² ч	H, м	q, м ³ /м ² ч	H, м
1,00	0,63	0,60	0,65	0,78	0,87	0,50	0,83	0,60	0,97
1,20	0,77	0,90	0,70	0,79	0,91	0,70	0,86	0,65	1,03
1,40	0,88	1,00	0,80	0,90	0,93	0,90	1,00	0,7	1,13
1,50	0,90	1,20	0,93	1,00	0,95	1,00	1,15	0,85	1,20
1,70	1,10	1,50	1,20	1,15	1,10	1,25	1,25	1,00	1,35
2,00	1,21	1,70	1,25	1,30	1,28	1,50	1,47	1,10	1,38
2,20	1,28	1,90	1,35	1,44	1,39	1,90	1,74	1,13	1,42
2,50	1,38	2,00	1,46	1,50	1,40	2,10	1,95	1,22	1,55
3,00	1,60	2,35	1,60	1,70	1,45	-	-	1,50	1,78
3,10	1,80	2,61	1,83	1,80	1,54	-	-	1,49	1,94
3,40	1,95	2,70	1,92	2,32	1,89	-	-	-	-

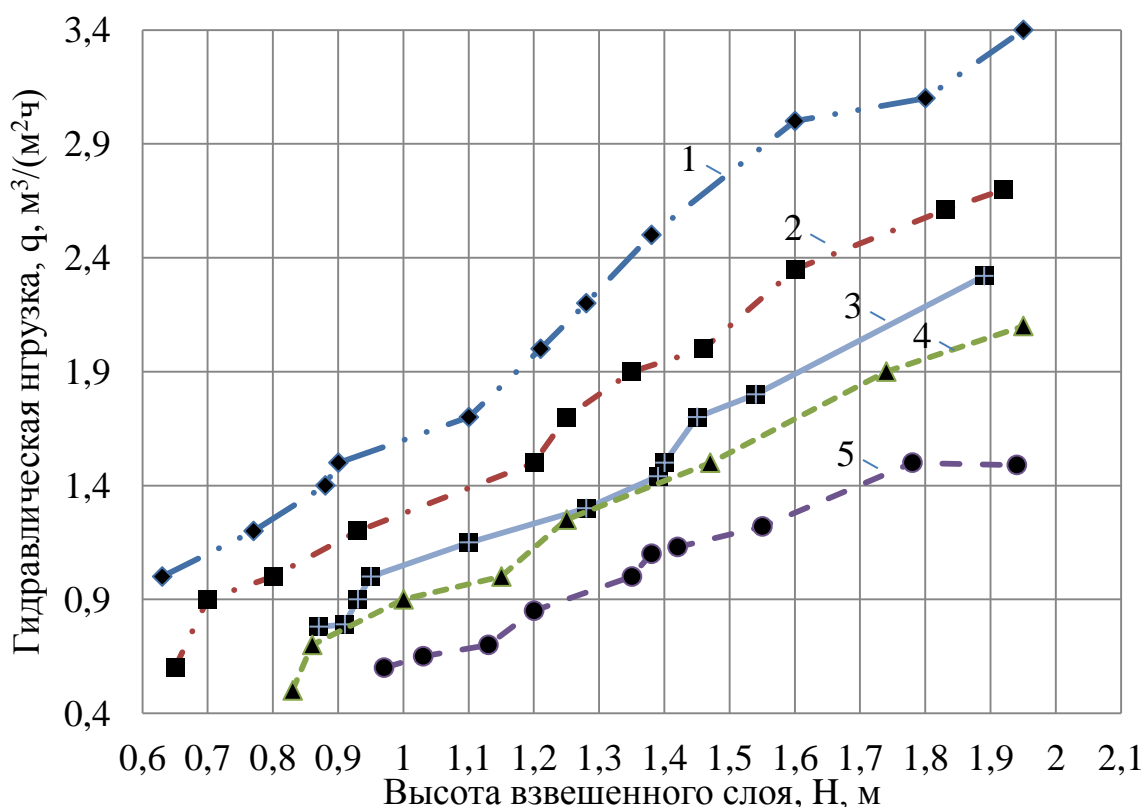


Рис. 3.5 Зависимость экспериментально полученной гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя, в зависимости от высоты взвешенного слоя, при различных концентрациях ила в смеси:

- 1 – концентрация иловой смеси 3 г/дм^3 ;
- 2 – то же $4,9 \text{ г/дм}^3$;
- 3 – то же $5,5 \text{ г/дм}^3$;
- 4 – то же $6,0 \text{ г/дм}^3$;
- 5 – то же $7,2 \text{ г/дм}^3$.

В результате лабораторных экспериментов установлена степень влияния концентрации обрабатываемого ила в поступающей иловой смеси на высоту взвешенного слоя.

Установлено, что с увеличением концентрации обрабатываемого ила в поступающей смеси, при одной и той же высоте взвешенного слоя, гидравлическая нагрузка снижается.

Анализ графических зависимостей показывает, что разделение ила во взвешенном слое осадка позволяет работать с повышенными концентрациями иловой смеси в системе, вплоть до 8 г/дм^3 . Однако с увеличением концентрации

ила в смеси будет снижаться пропускная способность сооружения. Поддержание работоспособности системы достигалось снижением гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя. В противном случае, это может привести к увеличению высоты взвешенного слоя ила, до его выноса с осветленной водой.

Из рисунка 3.5 следует, что с увеличением гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя высота взвешенного слоя пропорционально увеличивается. Так же основным фактором, влияющим на высоту взвешенного слоя, является концентрация ила в обрабатываемой смеси: чем выше концентрация, тем больше может расширяться взвешенный слой при увеличении гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя.

Обработка результатов экспериментов, приведенных в табл. 3.7 с помощью статистического пакета DataFit (прил. В) позволяет получить аналитический вид линейной регрессионной зависимости 3.4:

$$Y_H = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d \quad (3.4)$$

Выполнив переход от кодированного значения факторов к действительному получим уравнение 3.5.

$$H = 0,617 \cdot q - 2,351 \cdot a + 0,485 \cdot P - 1,101 \quad (3.5)$$

Получена величина среднего квадратичного отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ((H)_i - \langle H \rangle)^2} \quad (3.6)$$

Величина среднего квадратичного отклонения абсолютная и относительная равна 0,338. Квадрат множественного коэффициента корреляции равен 0,95. Полученное регрессионное уравнение можно считать весьма высоко связанным с лабораторными данными и предлагаемая гипотеза может считаться правомерной.

3.3 Обработка результатов экспериментов, получение расчетных зависимостей

Согласно уточненной полуэмпирической модели, представленной во втором разделе данной диссертационной работы, выполнен расчет параметров взвешенного слоя. В данном расчете использованы формулы 2.2... 2.11 и результаты лабораторных исследований; получена высота взвешенного слоя для конкретных условий эксплуатации илоотделителя.

Результаты расчета параметров взвешенного слоя можно представить в виде таблицы 3.8

Основным условием проведения расчета высоты взвешенного слоя является равновесие сил, действующих на частицу ила во взвешенном слое (2.11). Целью данного расчета было определение рекомендуемых значений высоты взвешенного слоя относительно гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя. Расчет проведен для различных концентраций ила в исследуемой смеси.

Таблица 3.8 Расчетное изменение высоты взвешенного слоя в зависимости от гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя

Концентрация ила, а, г/дм ³									
P=2,25		P=3,30		P=3,40		P=3,70		P=4,10	
3,0		4,9		5,5		6,0		7,2	
H,м	q, м ³ /м ² час	H,м	q, м ³ /м ² час	H,м	q, м ³ /м ² час	H,м	q, м ³ /м ² час	H,м	q, м ³ /м ² час
0,8	1,22	0,8	0,93	0,8	0,73	0,8	0,59	0,8	0,42
1,0	1,63	1,0	1,28	1,0	1,01	1,0	0,85	1,0	0,63
1,2	2,05	1,2	1,62	1,2	1,30	1,2	1,11	1,2	0,85
1,4	2,46	1,4	1,97	1,4	1,59	1,4	1,37	1,4	1,06
1,6	2,87	1,6	2,31	1,6	1,88	1,6	1,64	1,6	1,27
1,8	3,29	1,8	2,65	1,8	2,17	1,8	1,90	1,8	1,49
2,0	3,70	2,0	3,00	2,0	2,46	2,0	2,16	2,0	1,70

Для наглядности полученных расчетных данных построен совместный график расчетных и определенных лабораторными исследованиями изменений высоты взвешенного слоя и гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя, в зависимости от различных концентраций иловой смеси, который приведен на рисунке 3.6.

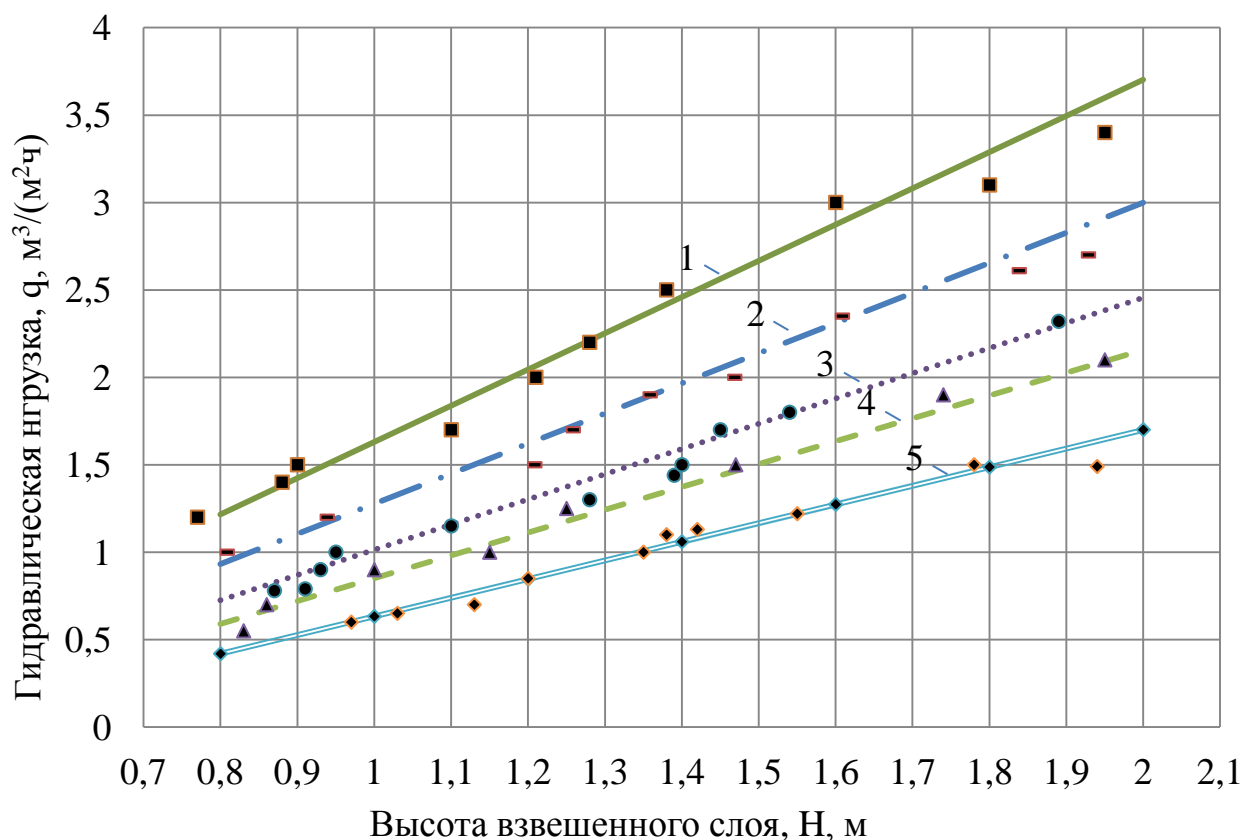


Рис. 3.6. Зависимость расчетной гидравлической нагрузки от высоты взвешенного слоя при разных концентрациях ила в поступающей воде:

- 1 — концентрация иловой смеси 3 г/дм^3 ;
- 2 — то же $4,9 \text{ г/дм}^3$;
- 3 — то же $5,5 \text{ г/дм}^3$;
- 4 — то же $6,0 \text{ г/дм}^3$;
- 5 — то же $7,2 \text{ г/дм}^3$.

Рассмотрев рис. 3.6., можно сделать вывод, что процесс илоотделения во взвешенном слое осадка, смоделированный в лабораторных условиях с достаточной степенью точности описывается полученными расчетными

зависимостями. Степень отклонения результатов полученных экспериментально, не превышает 7% от расчетных значений.

Для получения наиболее достоверных результатов для различных иловых смесей, необходимо проводить предварительные лабораторные исследования с целью определения начальных параметров расширения взвешенного слоя, а именно, начальной высоты слоя разделяемой смеси.

В результате расчета установлено, что при увеличении исходной концентрации ила гидравлическая нагрузка падает более интенсивно, чем при низких концентрациях иловой смеси. Поэтому, для поддержания определенной гидравлической нагрузки при увеличении исходной концентрации иловой смеси, требуется увеличивать высоту взвешенного слоя.

Отмечено, что с увеличением концентрации иловой смеси на входе во взвешенный слой, при одинаковых гидравлических нагрузках, высота взвешенного слоя так же увеличивается. Данный факт объясняется стремлением взвешенного слоя к уравниванию потерь давления при движении жидкости через взвешенный слой, слой стремиться к равновесию путем изменения расстояний между частицами ила, увеличению размеров так называемых «поровых каналов», либо же пористости взвешенного слоя m .

Предлагаемая математическая модель подтверждена экспериментально полученными данными, что позволяет рекомендовать данную модель к использованию. Получен доверительный интервал для расчетной полуэмпирической математической модели определения скорости восходящего потока (формулы 2.10, 2.11) с коэффициентом достоверности 0,95.

Доверительный интервал расчетной полуэмпирической модели определения скорости восходящего потока определялся отдельно для каждого из значений концентрации ила в соответствии с рекомендованной методикой [123]. Результаты расчетов приведены в таблице 3.9. Построение доверительного интервала выполнялось в следующей последовательности:

1. Для каждой из шести серий опытов находилось значение средней скорости, либо гидравлической нагрузки по формуле

$$q_{cc} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{cci} , \quad (3.6)$$

где n – количество опытов с одинаковой концентрацией иловой смеси, поступающей в илоотделитель.

2. Для каждого опыта определялась величина среднеквадратичного отклонения среднего статистического q_{cc}^{ϕ} от вычисленного теоретически значения средней гидравлической нагрузки q_{cc} (ф - ла 2.10) для данной концентрации, по формуле

$$S_0 = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (q_{cc}^{\phi} - q_{cc})^2}{(m-1)}} , \quad (3.7)$$

где m – количество опытов с различными значением концентрации.

Определение доверительного интервала выполнялось отдельно для каждой концентрации иловой смеси.

3. Доверительная вероятность принималась $\beta = 0,05$, в зависимости от уровня значимости $\alpha = 0,95$, на основании которой определялось значение коэффициента t – критерия Стьюдента [124].

4. Доверительный интервал строился отдельно для каждой из теоретических зависимостей $q_{cc} = f(a_{ucx})$ по формуле

$$q_{cc} = q_{cc}^{\phi} \mp t_{\infty, m-1} \cdot S_0 . \quad (3.8)$$

Таблица 3.9 Статистическая обработка экспериментальных данных

$a, \text{г/дм}^3$	$\bar{q}_{cc}^\phi, \text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$	$q_{cc}, \text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$	$(\bar{q}_{cc}^\phi - q_{cc})^2$	S_0	$t_{\alpha, m-1}$	$q_{cc} + t_{\alpha, m-1} \cdot S_0$	$q_{cc} - t_{\alpha, m-1} \cdot S_0$
1	2	3	4	5	6	7	8
3	0,86	0,89	1,44791E-07	1,88533E-05	2,13	1,04	0,74
	2,09	2,14	8,45618E-07			2,29	1,99
	2,84	2,92	1,56882E-06			3,07	2,77
4,9	0,65	0,67	1,09257E-07	1,47559E-05	2,13	0,78	0,55
	1,12	1,15	3,2406E-07			1,27	1,03
	2,09	2,15	1,13438E-06			2,27	2,04
5,5	0,85	0,83	1,9087E-07	1,49351E-05	2,13	0,97	0,74
	1,45	1,40	5,4880E-07			1,57	1,33
	1,82	1,76	8,6633E-07			1,94	1,70
6,0	0,63	0,61	1,1135E-07	1,47372E-05	2,13	0,75	0,52
	0,90	0,87	2,2564E-07			1,02	0,78
	1,60	1,55	7,1242E-07			1,72	1,48
	2,16	2,09	1,2961E-06			2,27	2,04
7,2	0,63	0,61	1,3412E-07	9,86634E-06	2,13	0,71	0,56
	0,73	0,70	1,7646E-07			0,81	0,65
	1,08	1,04	3,9029E-07			1,16	1,00

Результаты расчета критерия Стьюдента и доверительного интервала для определенной концентраций иловой смеси представлены на рис. 3.7...3.11.

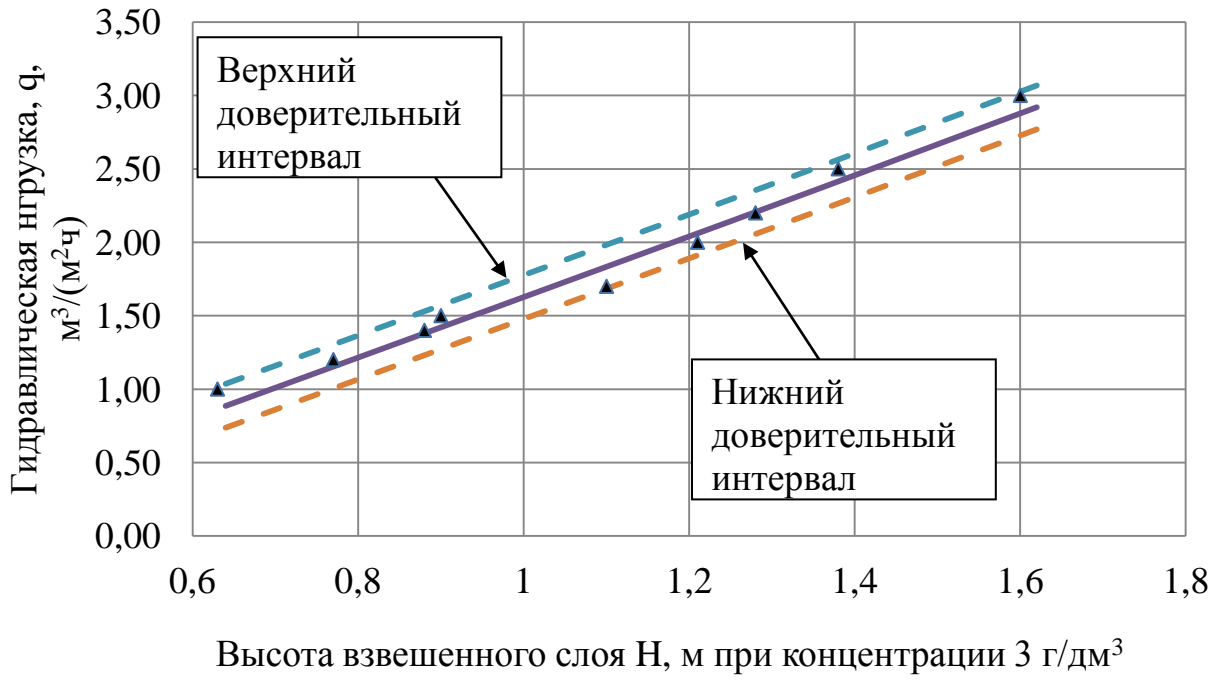


Рис. 3.7. Определение доверительного интервала расчетной гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя в зависимости от высоты взвешенного слоя ($P=2,25$).

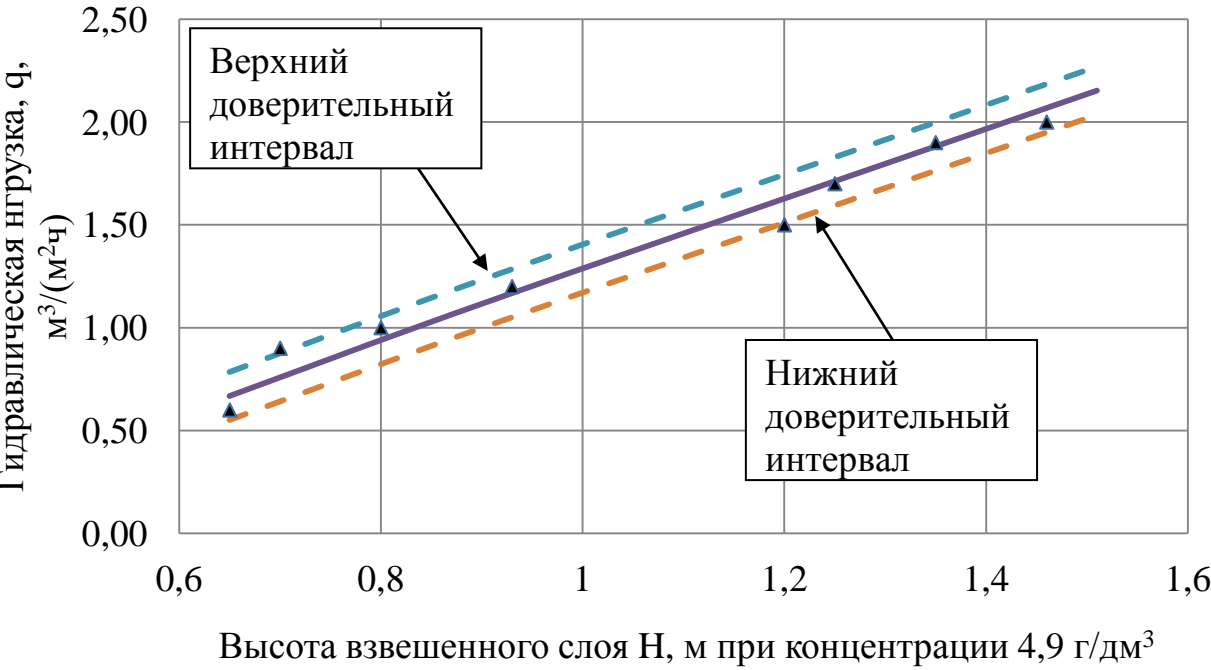


Рис. 3.8. Определение доверительного интервала расчетной гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя в зависимости от высоты взвешенного слоя ($P=3,30$).

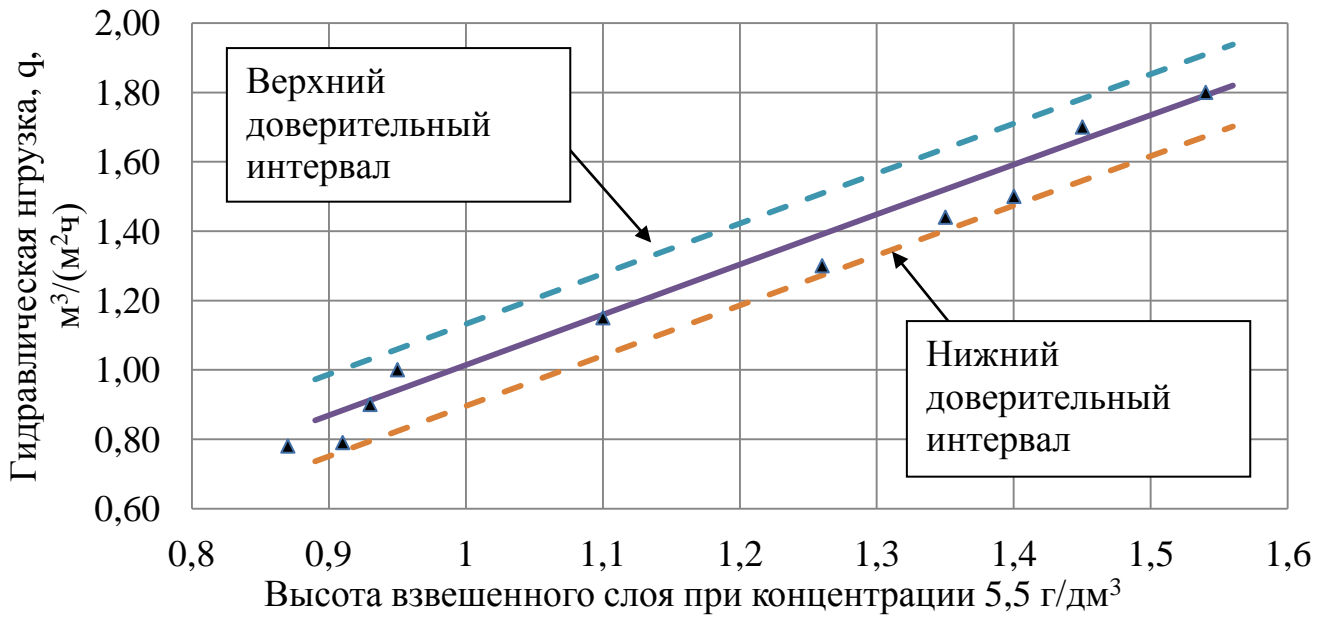


Рис. 3.9. Определение доверительного интервала расчетной гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя в зависимости от высоты взвешенного слоя ($P=3,40$).

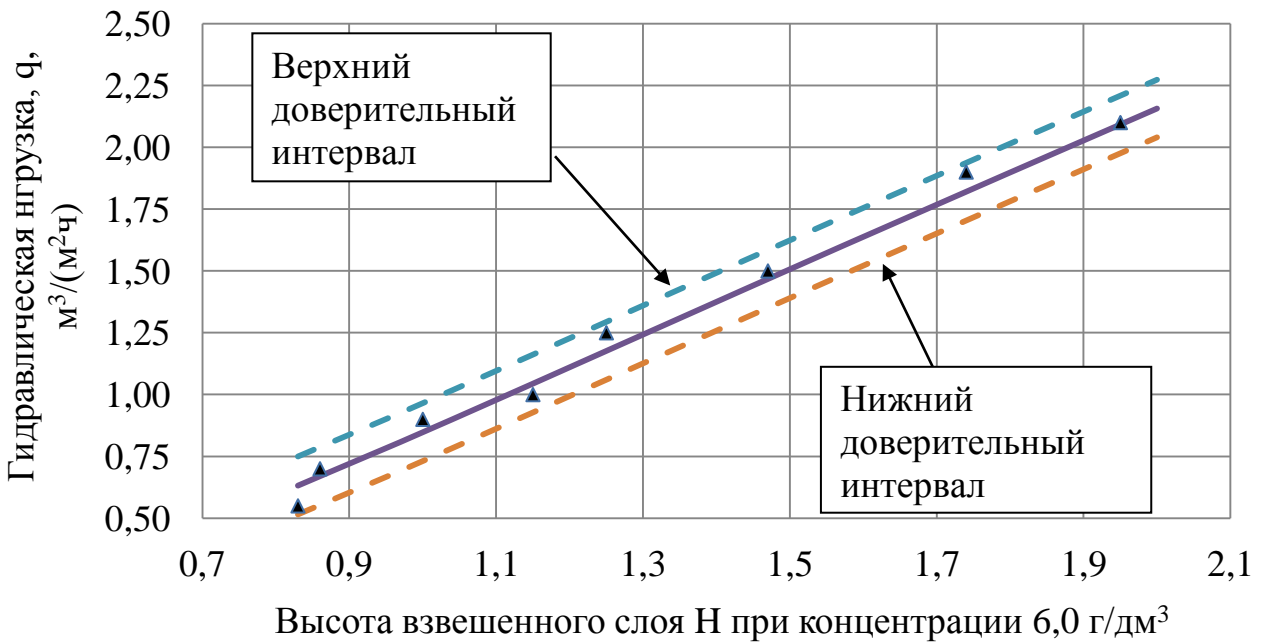


Рис. 3.10. Определение доверительного интервала расчетной гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя в зависимости от высоты взвешенного слоя ($P=3,70$).

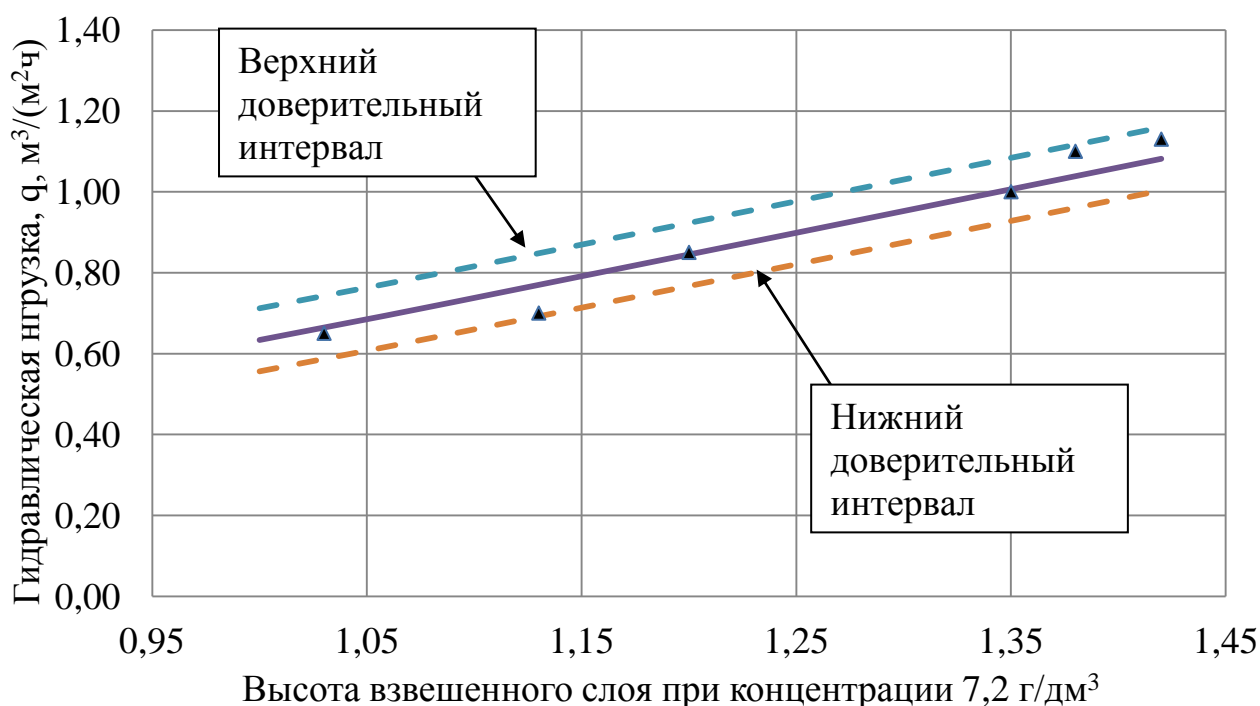


Рис. 3.11. Определение доверительного интервала расчетной гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя в зависимости от высоты взвешенного слоя ($P=4,10$).

Таким образом, результаты проведения лабораторных исследований и их анализ позволяют поставить задачи для промышленных и полупромышленных исследований процесса разделения иловой смеси во взвешенном слое осадка.

Как было отмечено выше, высота взвешенного слоя задается конструктивными особенностями места размещения сооружения илоотделения во взвешенном слое осадка. От высоты взвешенного слоя зависит гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя. В свою очередь, гидравлическая нагрузка в предложенной конструкции лабораторной установки, может регулироваться скоростью входа иловой смеси в илоотделитель и степенью нисходящей циркуляции.

Для повышения пропускной способности сооружения, если есть запас высоты отделителя, при снижении нисходящей скорости будет возрастать скорость восходящего потока, увеличивая тем самым высоту взвешенного слоя.

Необходимо проведение дальнейших промышленных испытаний для подтверждения полученных лабораторных данных в условиях действующих очистных сооружений.

Снижение концентрации во взвешенном слое при циркуляции иловой смеси достигается за счет повышения скорости входа воды в зону III илоотделителя, что обеспечивает интенсивный массообмен во взвешенном слое и в сооружении в целом. В свою очередь, скорость входа в зону III напрямую зависит от скорости входа обрабатываемой смеси в сооружение отделения ила.

Экспериментально определен вид зависимости необходимой скорости входа обрабатываемой смеси в сооружение от высоты взвешенного слоя и концентрации ила в смеси (Рис. 3.12).

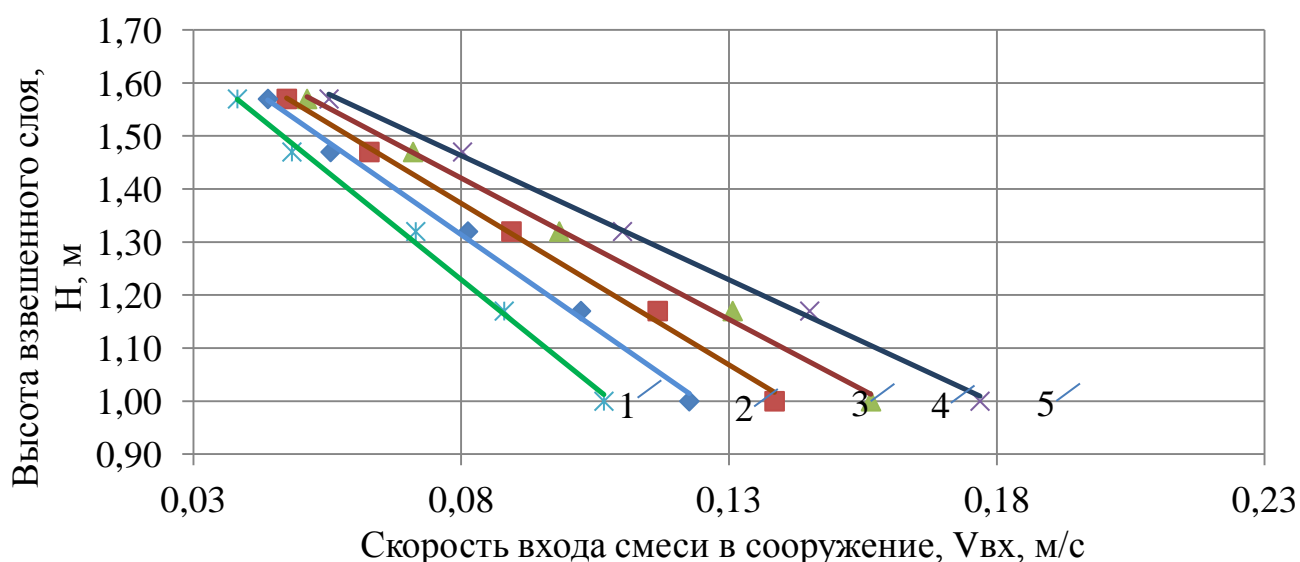


Рис. 3.12. Зависимость необходимой скорости входа исходной смеси в илоотделитель от высоты взвешенного слоя и концентрации ила в смеси:

- 1 – концентрация ила в поступающей смеси 2 г/дм³;
- 2 – то же 3 г/дм³;
- 3 – то же 5 г/дм³;
- 4 – то же 7 г/дм³;
- 5 – то же 9 г/дм³.

Согласно графической зависимости (Рис. 3.12.), можно сделать вывод, что, с увеличением скорости входа смеси в сооружение илоотделения, допустимая высота взвешенного слоя снижается. Также, увеличение

концентрации ила в смеси, подаваемой на освещение, предполагает собой определенное снижение скоростей на входе в сооружение илоотделения со взвешенным слоем осадка.

Поддерживать скорость на входе в сооружения илоотделения необходимо для обеспечения равномерного распределения осадка по площади зоны освещения и протекания процессов обмена нового активного ила на уже присутствующий в сооружении определенное время.

3.4 Лабораторные исследования работы илоотделителя на концентрированной иловой смеси с применением планирования эксперимента

Дополнительные лабораторные исследования проводились с избыточным активным илом, образующимся на станции биологической очистки хозяйственно – бытовых сточных вод г. Зудербург, входящего в район г. Ильцен в земле Нижняя Саксония (Германия). Городские очистные сооружения г. Зудербург имеют не стандартную, для стран Восточной Европы, схему обработки сточных вод. Население города Зудербург составляет 4686 человек.

Особенность состава сточных вод города Зудербург заключается в том, что он расположен в сельскохозяйственно развитом регионе, поэтому нередко в сточные воды попадают стоки с повышенным содержанием солей.

Сточные воды по самотечной канализационной сети поступают в приемную камеру, откуда направляются в сооружения механической очистки.

Затем сточная жидкость направляется на сооружения биологической очистки в виде циркуляционно-окислительных каналов (ЦОК), работающих по принципу симультанного удаления азота и органических загрязнений [96]. Этот метод отличается тем, что процесс осуществляется в одном сооружении без отдельного выделения аэробных и анаэробных зон, а также рециркуляционных потоков иловой смеси. Сооружение ЦОК работает по принципу переменной аэрации для эффективного совмещения нитри – денитрификации в объеме одного сооружения.

Завершающим этапом очистки является отделение активного ила от жидкости в радиальном вторичном отстойнике, после чего он направляется на анаэробную стабилизацию для получения биогаза с последующим уплотнением и утилизацией.

Параметры установки приведены на рис. 3.13, исходный активный ил характеризуется высоким содержанием фосфора, аккумулированного в клетках бактерий и повышенным иловым индексом до 120 мл/г. Исходная концентрация ила по сухому веществу $4,0 - 6,5 \text{ г/дм}^3$, pH $6,5 - 7,5$, зольность в пределах $20,5 - 25,0 \%$, ХПК иловой воды $25 - 50 \text{ мг/дм}^3$. Содержание форм минерального азота в иловой воде $\text{N-NH}_4 = 0,1 - 2 \text{ мг/дм}^3$, $\text{N-NO}_2 = 0,1 - 0,4 \text{ мг/дм}^3$, $\text{N-NO}_3 = 3 - 30 \text{ мг/дм}^3$, $\text{P} - \text{PO}_4 = 0,3 - 1,8 \text{ мг/дм}^3$. Температура подаваемой иловой смеси находилась в пределах $15 - 21^\circ\text{C}$.

В процессе проведения эксперимента концентрация ила по беззольному веществу в минерализаторе изменялась в пределах $4,0 \dots 11,5 \text{ г/дм}^3$.

Процесс биологического окисления (минерализации) биомассы активного ила заключается в использовании беззольной части осадка в качестве питательной среды.

При глубокой аэробной минерализации получают преимущественное развитие гетеротрофные аэробные микроорганизмы и денитрификаторы [46].

Для изучения процессов глубокой минерализации и разделения ила, была создана экспериментальная лабораторная установка, работающая в непрерывном режиме в течение двух месяцев, с мая по июнь 2013г.

Установка состоит из корпуса минерализатора (1) объемом 22 дм^3 . Схема и фотоизображение установки приведены на рис. 3.13, 3.14, в которой установлена затопленная эрлифтная система аэрации (2), обеспечивающая восходяще – нисходящие циркуляционные токи. Эрлифтная система образует замкнутую циркуляцию потока: восходящий внутри корпуса эрлифта и нисходящий за водоподъемной трубой. Относительное заглубление затопленного эрлифта L/h (Рис. 3.13) было принято равным 0,3 [52].

Для отделения иловой смеси от иловой воды применяется система работы осветлителя со взвешенным слоем осадка (7). Иловая смесь отводится по

трубопроводу (4), через самотечную линию (6) осветленная иловая вода отводится из сооружения, после чего отделенная биомасса возвращается обратно в аэробный минерализатор.

В зоне интенсивной аэрации концентрация растворенного кислорода поддерживалась на уровне $4...4,5 \text{ мг/дм}^3$, а в придонной части $0,5...1,0 \text{ мг/дм}^3$. Над затопленным эрлифтом образовывалась и поддерживалась зона интенсивной аэрации. Контроль за концентрацией растворенного кислорода в воде осуществлялся при помощи датчиков растворенного кислорода (10, 11).

Для исключения залегания ила в донной части осуществлялось перемешивание с помощью мешалки (3).

Основные контролируемые параметры: гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя, иловый индекс, концентрация ила подаваемой и отводимой смеси, а также его зольность [137].

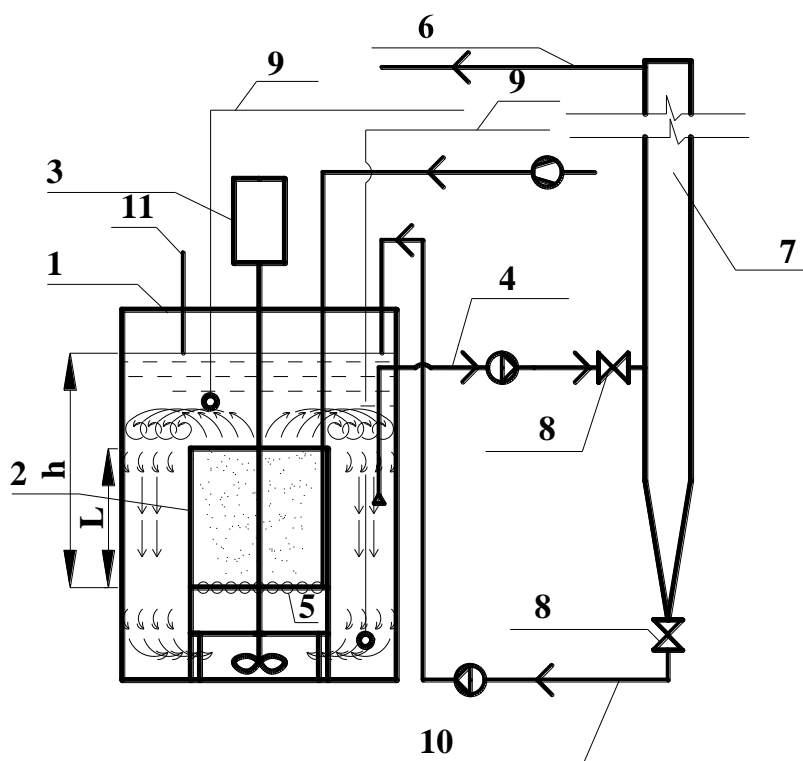


Рис. 3.13. Схема экспериментальной установки глубокой минерализации ила:

- 1 – минерализатор;
- 2 – затопленная эрлифтная система аэрации;
- 3 - мешалка;
- 4 – подача ила на илоотделение;

- 5 - подача воздуха;
- 6 – отвод иловой воды;
- 7 – осветлитель со взвешенным слоем ила;
- 8 – вентиль регулировочный;
- 9 – датчики растворенного кислорода, pH и солесодержания;
- 10 – трубопровод отвода ила на минерализацию воды;
- 11 – подача активного ила на обработку.



3.14 Фото экспериментальной установки глубокой минерализации ила

Выполнение процессов минерализации достигается с помощью удержания в сооружении определенных форм микроорганизмов и бактерий, как правило, имеющих довольно высокий «возраст» [16, 24, 30], способных продолжать аэробную минерализацию с пониженной скоростью распада органической части ила. В соответствии с этими исследованиями была принята продолжительность аэробной минерализации 11 суток. Ежедневно в минерализатор загружалось по 2 дм³ исходного ила, отобранного из производственного вторичного отстойника. После отделения 2 дм³ иловой воды в сооружении осветлителя во взвешенном слое осадка отделенный осадок

возвращался в минерализатор. При этом фиксировались показатели загружаемого осадка и иловой смеси в аэробном минерализаторе.

Контролируемые параметры: концентрация растворенного кислорода различных зон, солесодержание, интенсивность перемешивания в минерализаторе, ХПК, формы минерального азота в воде $N-NH_4^+$, $N-NO_2^-$, $N-NO_3^-$, и органического $N_{орг}$, содержание фосфора, иловый индекс, рабочая температура, pH, структурные изменения хлопка ила с течением времени, рабочие параметры илоотделителя во взвешенном слое, концентрация ила подаваемой и отводимой смеси, а также его зольность.

В течение всего эксперимента фиксировался баланс распада органической части осадка, а также трансформация соединений азота. В результате получена удельная скорость распада органической части осадка в минерализаторе в зависимости от концентрации ила по беззольному веществу.

В начальный период эксплуатации суточный распад органической части иловой смеси составлял 6700 мг/сут, а к концу эксперимента составлял 7500 мг/сут.

Удельная скорость распада определялась согласно уравнению баланса аэробного минерализатора (3.9), так же приведена на рис. 3.15.

$$\rho = \frac{\Delta M}{(Cs \times W_{min} \times t)}, \quad (3.9)$$

где ρ — удельная скорость распада органической части иловой смеси, мг/г_{без} ч;

ΔM — масса разрушаемого осадка, мг;

Cs — концентрация ила по беззольному веществу, г_{без}/л;

W_{min} — рабочий объем минерализатора, дм³;

t — время обработки, час.

Активная реакция среды pH практически оставалась неизменной в течение всего эксперимента и составляла 6,0 – 7,3. Временное увеличение концентрации растворенного кислорода в придонной зоне до 2,5 мг/дм³ способствовало ингибированию процессу денитрификации и, как следствие, росту концентрации нитратов. При этом эффект разрушения органической части осадка снижался до 25%.

Отмечено, что зольность минерализованного осадка к концу эксперимента возросла с 20% до 29%, при средней зольности исходного осадка 22% (Рис. 3.16).

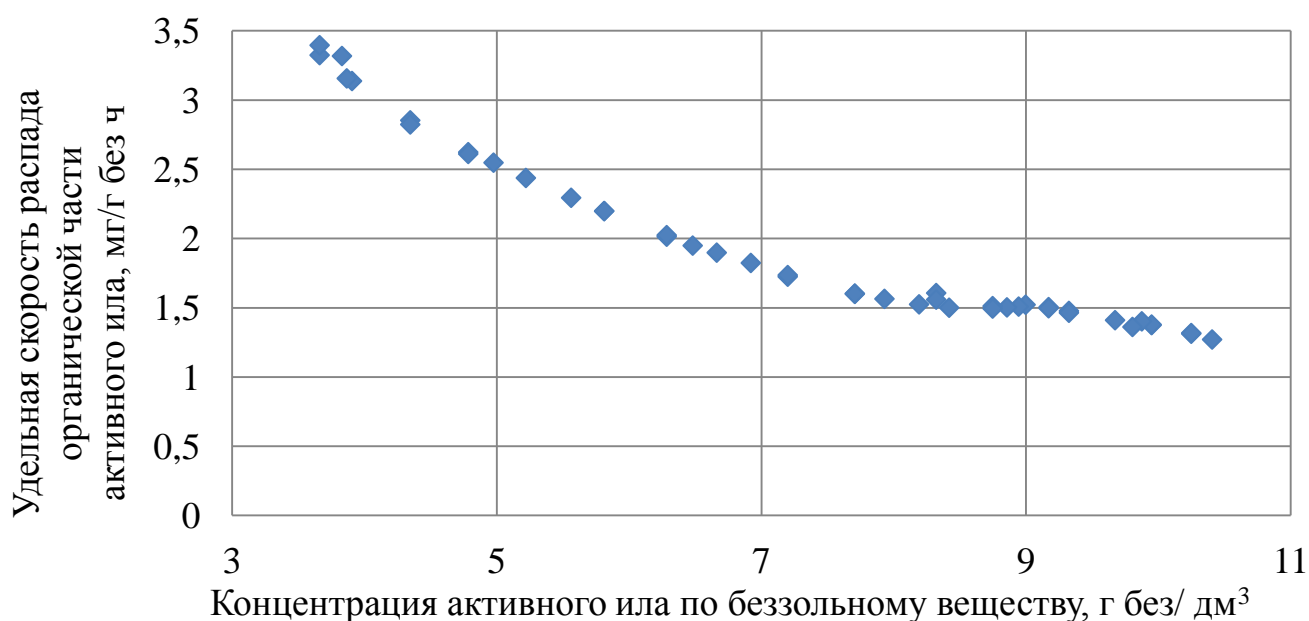


Рис. 3.15 Зависимость удельной скорости распада органической части иловой смеси от концентрации ила

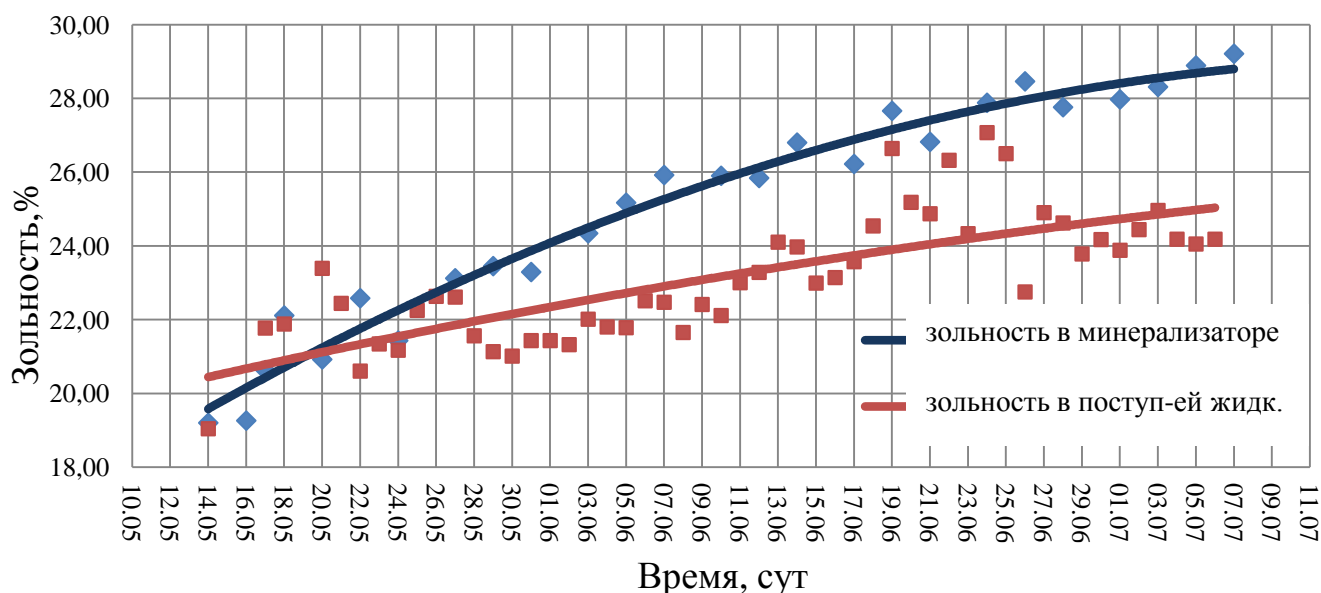


Рис. 3.16 Изменение зольности в минерализаторе и исходной иловой смеси

Установлено, что параллельно процессам глубокой аэробной минерализации протекают процессы нитри-денитрификации. Средняя удельная

скорость удаления общего азота составила $0.15 \text{ мг/г}_{\text{без ч.}}$. На удаление 1 мг азота расходуется 8 – 11 мг органической части ила.

Среднее значение зольности ила в осветленной иловой воде после илоотделения во взвешенном слое составляло порядка 35%, что значительно превышает среднюю зольность иловой смеси в аэробном минерализаторе. За счет илоотделения во взвешенном слое осадка с иловой водой удаляется мелкодисперсный ил с высокой зольностью.

Установлено, что удельная скорость распада с увеличением концентрации иловой смеси в аэробном минерализаторе уменьшается с 3,5 до $1,4 \text{ мг/г}_{\text{без ч.}}$.

Эффект разрушения беззольной части осадка в сооружении глубокой аэробной минерализации осадка составляет 65%.

Для определения вида зависимости гидравлической нагрузки относительно произведения концентрации активного ила на иловый индекс по отношению к основным факторам составлен план проведения исследований. На основании анализа литературных исследований выделен ряд входных факторов, влияющих на процесс разделения иловых смесей во взвешенном слое. Данные факторы приведены в табл. 3.4 [124]. Параметры объекта, а именно параметры лабораторной установки приведены в данном разделе диссертационной работы.

Функцией отклика $Y_q(x_1, \dots, x_n)$ была принята высота взвешенного слоя в илоотделителе, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$. Высота принимается потому, как она является конечным показателем состояния взвешенного слоя.

Таблица 3.10 Факторы влияющие на илоотделение во взвешенном слое осадка

Фактор
1. Концентрация ила в исходной смеси a , г/дм^3
2. Иловый индекс I , мл/г
3. Высота взвешенного слоя H , м
4. Диаметр частиц ила в смеси d , мкм
5. Степень нисходящей циркуляции иловой смеси P

Для упрощения вида регрессионной зависимости было проведено ранжирование и отсеивание малозначащих факторов. Будем предполагать, что эффекты взаимодействия факторов в исследуемом объекте маловероятны и пренебрежимо малы [124].

Поскольку иловая смесь сильно зависит от многих условий (состав сточных вод, тип сооружений обработки и т.д.), то диаметр частиц ила в смеси и иловый индекс можно охарактеризовать как сложно варьируемые. Они в свою очередь задаются постоянными численными значениями, определяющими возможные области изменения рассматриваемого параметра.

С целью упрощения обработки экспериментальных данных осуществляем переход от действительного значения факторов к кодированному [123], значения заносим в таблицу 3.5

$$x_i = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta x_j} \quad (3.10)$$

где x_i – кодированное значение фактора;

x_j – действительное значение фактора;

x_{j0} – основной уровень фактора;

Δx_j – интервал варьирования фактора.

Для экспериментального исследования принимается однофакторный эксперимент 2^n с одинаковым числом параллельных опытов при условии малой значимости сочетаний уровней факторов. Количество экспериментов $N_{\text{экс}}$ определяется исходя из количества варьируемых параметров n по известной зависимости:

$$N_{\text{экс}} = 2^n = 4 \text{ эксперимента.}$$

Таблица 3.11 Основные параметры варьирования величин для определения вида зависимости

Величина	Нулевой (основной) уровень	Интервал варьирования	Код	Верхний уровень (+1)	Нижний уровень (- 1)
aJ	0,71	0,25	x_2	0,46	0,95

Матрица эксперимента в соответствие с основными алгоритмами планирования научных исследований [124] приведена в таблице 3.12

Таблица 3.12 Матрица эксперимента по определению вида зависимости

№ опытов (i)	Значение факторов (кодированные)	
	x_0	x_1
1	+	+
2	+	+
3	+	–
4	+	–

Полученная матрица используется для выполнения экспериментальных исследований процесса илоотделения в лабораторной установке илоотделителя с восходяще-нисходящим распределением потока.

$$Y = a \cdot \exp^{b \cdot X} \quad (3.11)$$

Полученное уравнение необходимо записать в реальных физических величинах, для чего производится обратный переход от стандартизированного (кодированного) вида к действительному, получив, таким образом, окончательный вид уравнения.

С помощью компьютерной программы “DataFit 9.0”, была определена зависимость гидравлической нагрузки от параметра произведения концентрации на иловый индекс. Расчет приведен в приложении В.

Выполнив раскодирование факторов получим

$$q = 2,158 \cdot \exp^{-2,252 \cdot aJ} \quad (3.12)$$

Получены значения дисперсии $\sigma^2 = 0,000086 \dots 0,000713$.

Получены значения средних квадратичных отклонений экспериментальных исследований $\sigma = 0,009287 \dots 0,026710$. Определены верхняя и нижняя доверительные границы для уровня значимости $\alpha = 0,95$, расчет которых приведен в приложении В.

Таким образом, происходит аккумуляция иловой смеси в сооружениях обработки осадков. Вследствие чего концентрация ила в системе может достигать достаточно высоких значений, также в процессе обработки изменяется и значение илового индекса данного ила.

Получена графическая зависимость изменения гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя при постепенном увеличении концентрации иловой смеси и его илового индекса (Рис. 3.17).

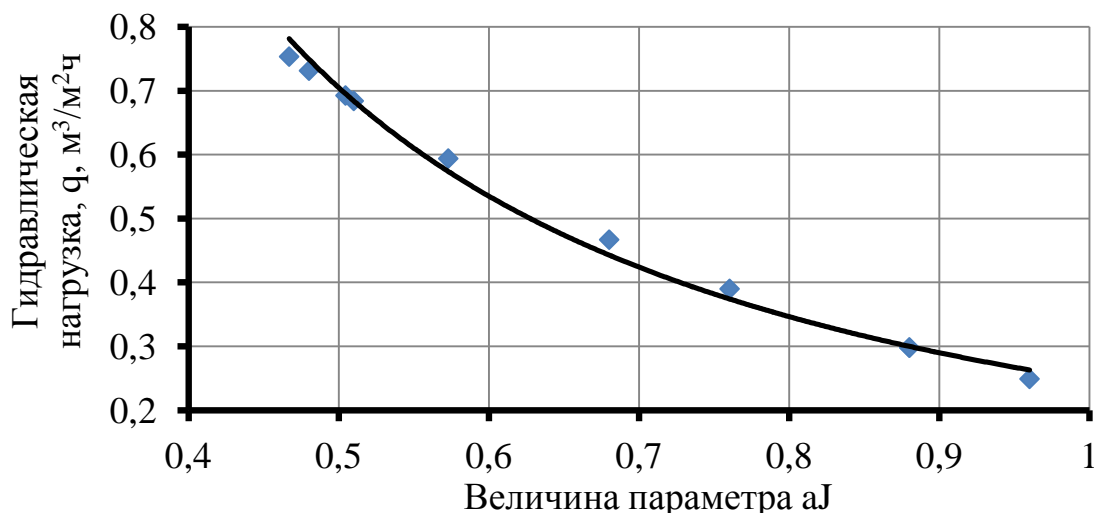


Рис. 3.17 Экспериментальная зависимость гидравлической нагрузки на илоотделитель со взвешенным слоем осадка.

На рис. 3.17 представлен график, отражающий изменение гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя при работе с концентрированным илом, имеющим повышенный иловый индекс. В результате можно отметить, что гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя для ила с более высоким иловым индексом ниже на 5...8%.

Данные проведенных экспериментальных исследований позволяют расширить применение илоотделения во взвешенном слое до значения произведения aJ до 0,95, что больше известных ранее зависимостей. Показывают постепенное снижение оптимальной и рекомендуемой гидравлической нагрузки при взаимном влиянии концентрации и илового индекса. Таким образом, при изменении илового индекса в сторону увеличения и неизменной концентрации, гидравлическая нагрузка на водное зеркало снижается.

3.5 Основные выводы по третьему разделу

1. Разработана и изготовлена конструкция лабораторной установки для исследования процесса разделения иловых смесей во взвешенном слое осадка.
2. Изучено распределение концентраций иловых смесей по высоте илоотделителя. Установлено, что концентрация иловой смеси зависит от гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя. Зольность частиц в отделенной иловой воде значительно выше, чем в общей иловой смеси, подаваемой в осветлитель, что свидетельствует о выделении из смеси минерализованной части ила.
3. Экспериментально установлено, что значение требуемой нисходящей циркуляции иловой смеси при концентрации 4 г/дм^3 составляет 2,6:1 ($P=2,6$), при 6 г/дм^3 – 3,7:1 ($P=3,7$) и $7,2 \text{ г/дм}^3$ – 4,1:1 ($P=4,1$), необходимой для подбора нисходящей скорости.
4. Экспериментально получены зависимости гидравлической нагрузки на зеркало осветлителя от высоты взвешенного слоя и концентрации ила в сооружении, описывающие процесс илоотделения концентрированных иловых смесей во взвешенном слое осадка. Установлено, что при высоте взвешенного слоя в пределах 1,0...2,0 м, гидравлическая нагрузка на зеркало илоотделителя изменяется в диапазоне $0,3 \dots 3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.
5. Установлена зависимость необходимой скорости на входе в илоотделитель от высоты взвешенного слоя и концентрации ила для определения площади подающего канала, составляющая 0,04...0,18 м/с.
6. Определены доверительные интервалы лабораторных и расчетных данных зависимости высоты взвешенного слоя от гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя, которые имеют уровень значимости 0,95.

РАЗДЕЛ 4.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЛООТДЕЛЕНИЯ ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В ходе теоретических и лабораторных исследований для разделения иловых смесей во взвешенном слое осадка были выделены основные гидродинамические параметры. Основным параметром характеризующим работу взвешенного слоя, это изменение гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя в зависимости необходимой от высоты взвешенного слоя. Однако, при использовании метода илоотделения во взвешенном слое, необходимо учесть тот факт, что свойства ила меняются не только от состава сточных вод, но и от конструктивных особенностей сооружения.

Поэтому в производственных условиях необходимо учитывать седиментационные свойства активного ила: иловый индекс, концентрацию, зольность, способность к хлопьеобразованию и т.д.

4.1 Исследования на илоотделителе со взвешенным слоем

Промышленные исследования проводились на Макеевских очистных сооружениях с использованием минерализованного ила. Минерализации подвергается избыточный активный ил вторичных отстойников. Время минерализации ила составляло 10...12 суток.

Для разделения иловых смесей минерализатора была разработана конструкция илоотделителя с частичной циркуляцией иловой смеси на дальнейшую обработку. Способ илоотделения для минерализованного активного ила разработан и защищен патентом Украины на полезную модель [139].

Перед проведением производственных испытаний илоотделения в технологии глубокой минерализации илоотделитель был заполнен доочищенной сточной жидкостью и проверен на работоспособность системы аэрации и эрлифтов, а также герметичность трубопроводов.

Промышленная установка позволяла проверить возможность работы илоотделителя со взвешенным слоем осадка в проточном режиме.

Рабочая схема экспериментальной установки илоотделения во взвешенном слое приведена на рис. 4.1.

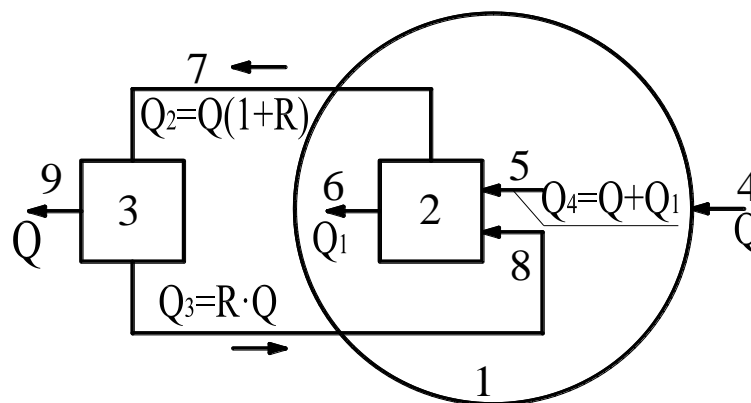


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки илоотделителя:

1 – аэробный минерализатор;

2 – илоотделитель;

3 – емкость осветленной иловой воды;

4 – подача избыточного активного ила на минерализацию, Q , м³/ч;

5 – подача минерализованной иловой смеси в илоотделитель, Q_4 , м³/ч;

6 – отвод циркуляционного (возвратного) ила в минерализатор, Q_1 , м³/ч;

7 – отвод осветленной иловой воды из илоотделителя, Q_2 , м³/ч;

8 – рециркуляция осветленной воды, Q_3 , м³/ч;

9 – отвод осветленной иловой воды, Q , м³/ч;

R – степень рециркуляции иловой воды.

По напорному трубопроводу в минерализатор 1 поступал избыточный активный ил, после проведения продолжительной обработки иловая смесь под гидростатическим давлением поступала в илоотделитель 2. Циркуляцию иловой смеси в минерализатор возможно осуществить откачкой центробежными насосами или удалением эрлифтами. При разделении иловых смесей осветленная иловая вода направлялась в накопительную емкость 3, а циркуляционная иловая смесь, при помощи эрлифтов, обратно в минерализатор. Из емкости 3 осуществлялся отбор воды на разбавление исходной иловой смеси на входе в илоотделитель, а оставшаяся осветленная

иловая вода отводилась в голову очистных сооружений. С учетом основных гидродинамических свойств работы осветлителя со взвешенным слоем иловой смеси была разработана конструкция илоотделителя. Установка промышленного илоотделителя представлена на рис. 4.2 и фотографическое изображение (Рис. 4.3).

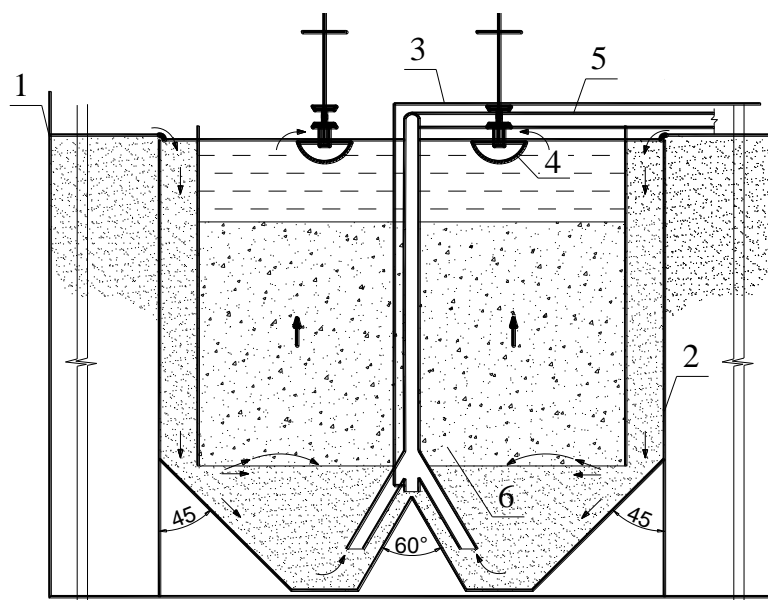


Рис. 4.2. Схема промышленного илоотделителя со взвешенным слоем:

- 1 - аэробной минерализатор;
- 2 - корпус илоотделителя;
- 3 - подача воздуха на эрлифты;
- 4 - отвод осветленной иловой воды;
- 5 - отвод ила обратно в минерализатор;
- 6 - взвешенный слой.



Рисунок 4.3. Общий вид промышленной установки на Макеевских очистных сооружениях

Установка размещалась в радиальном илоуплотнителе диаметром 18 м с рабочей глубиной 3,5 м и рабочим объемом порядка 900 м³, переоборудованном под минерализатор [133]. В центральной части минерализатора смонтирована затопленная эрлифтная система аэрации с размерами в плане 6х4 м, высотой 1,5 м, позволяющая в объеме сооружения поддерживать зоны с разной концентрацией растворенного кислорода. В сооружении культивировались различные группы микроорганизмов как аэробные, так и анаэробные.

Внутри минерализатора размещался илоотделитель общим объемом 20 м³. Илоотделитель устанавливался непосредственно на бетонное днище минерализатора. Встроенный илоотделитель со взвешенным слоем осадка представляет емкость размером в плане 2х4 м и глубиной 3,5 м. С целью обеспечения устойчивости конструкции илоотделения, в качестве материала, для изготовления выбран листовой металл и полиэтиленовые трубопроводы подачи и отвода обрабатываемой жидкости. Конструктивно зазор между низом эрлифта и днищем илоотделителя принят 0,7 м. Илоотделитель снабжен водоподъемной эрлифтной системой откачки циркуляционного ила в минерализатор для регулирования высоты взвешенного слоя.

В илоотделитель, под гидростатическим напором, по двум продольным каналам из минерализатора поступала исходная иловая смесь. Далее иловая смесь направлялась в среднюю часть илоотделителя, где происходило разделение на восходяще-нисходящие потоки. Восходящие потоки ила формировали взвешенный слой. Непосредственно в нем шло основное разделение иловой смеси, а так же вынос с иловой водой частиц минерализованного ила с высоким значением зольности. Осветленная иловая вода из емкости 3 направлялась в голову очистных сооружений.

Нисходящий поток формировался за счет эрлифтов, установленных в нижней части илоотделителя. Эрлифты перекачивали циркуляционную иловую смесь обратно в сооружение аэробной минерализации. Сбор иловой воды осуществлялся при помощи переливных лотков и отводился в кольцевой лоток

радиального отстойника. Регулировка высоты переливных кромок лотков производилась шпиндельным устройством.

Концентрация минерализованного ила в минерализаторе находилась в пределах $3 \dots 12 \text{ г/дм}^3$, иловый индекс составлял порядка $60 \dots 75 \text{ мл/г}$, зольность поступающего на минерализацию ила $32 \dots 36 \%$ [139].

В ходе исследований контролировались основные параметры илоотделителя:

- концентрация взвешенных веществ на входе и выходе из илоотделения;
- общая производительность илоотделителя;
- высота сформировавшегося взвешенного слоя.

В табл. 4.1. приведены результаты промышленных экспериментальных исследований по разделению концентрированных иловых смесей аэробного минерализатора. В ходе экспериментальных исследований с разными концентрациями исходной иловой смеси в минерализаторе определялась гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя [136].

Высота взвешенного слоя была стабилизирована на уровне 1,1 м по аналогии с лабораторными исследованиями. Изменение степени нисходящей циркуляции иловой смеси осуществлялось эрлифтной системой. В результате промышленных исследований получена зависимость гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя от концентрации ила.

Исходные параметры установки и результаты промышленных испытаний приведены в табл. 4.1 и 4.2.

Таблица 4.1 Параметры работы осветлителя со взвешенным слоем осадка

Параметры	Ед. измерения	Значение
Исходные параметры		
Высота взвешенного слоя, Н	м	1,1
Концентрация взвешенных веществ, а	г/дм^3	4, 6, 8, 10, 12
Площадь рабочей поверхности осветлителя	м^2	7,5
Площадь поверхности подающих лотков	м^2	0,5
Степень нисходящей циркуляции, $P = \frac{q_{\text{ц}}}{q}$		$2 \dots 6$

Таблица 4.2 Результаты эксперимента по определению гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя при $a = 4 \dots 12 \text{ г/дм}^3$

Дата	$a, \text{ г/дм}^3$	$q, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	P	$aJ/1000$
1	2	3	4	5
25.04.2013	4,0	2,45	2,60	0,24
27.04.2013		2,40	2,50	
30.04.2013		2,25	2,30	
02.05.2013		2,60	2,80	
05.05.2013		2,55	2,45	
07.05.2013		2,45	2,65	
09.05.2013		2,45	2,55	
21.05.2013	6,0	0,90	3,70	0,39
24.05.2013		0,95	3,70	
26.05.2013		1,10	3,85	
28.05.2013		0,80	3,55	
01.06.2013		0,90	3,65	
18.06.2013	8,0	0,65	4,40	0,48
21.06.2013		0,75	4,35	
24.06.2013		0,70	4,30	
26.06.2013		0,80	4,45	
12.07.2013	10,0	0,45	4,95	0,70
16.07.2013		0,40	4,90	
19.07.2013		0,52	5,20	
22.07.2013		0,38	4,85	
16.08.2013	12,0	0,25	5,90	0,90
23.08.2013		0,35	6,10	
01.09.2013		0,30	6,00	
12.09.2013		0,35	6,15	

По результатам экспериментальных данных построена графическая зависимость (Рис. 4.4).

Данные (Рис. 4.4.) показали, что гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя возрастает с уменьшением величины безразмерного параметра aJ . Резкое снижение гидравлической нагрузки наблюдается при концентрации иловой смеси свыше $7,5 \text{ г/дм}^3$.

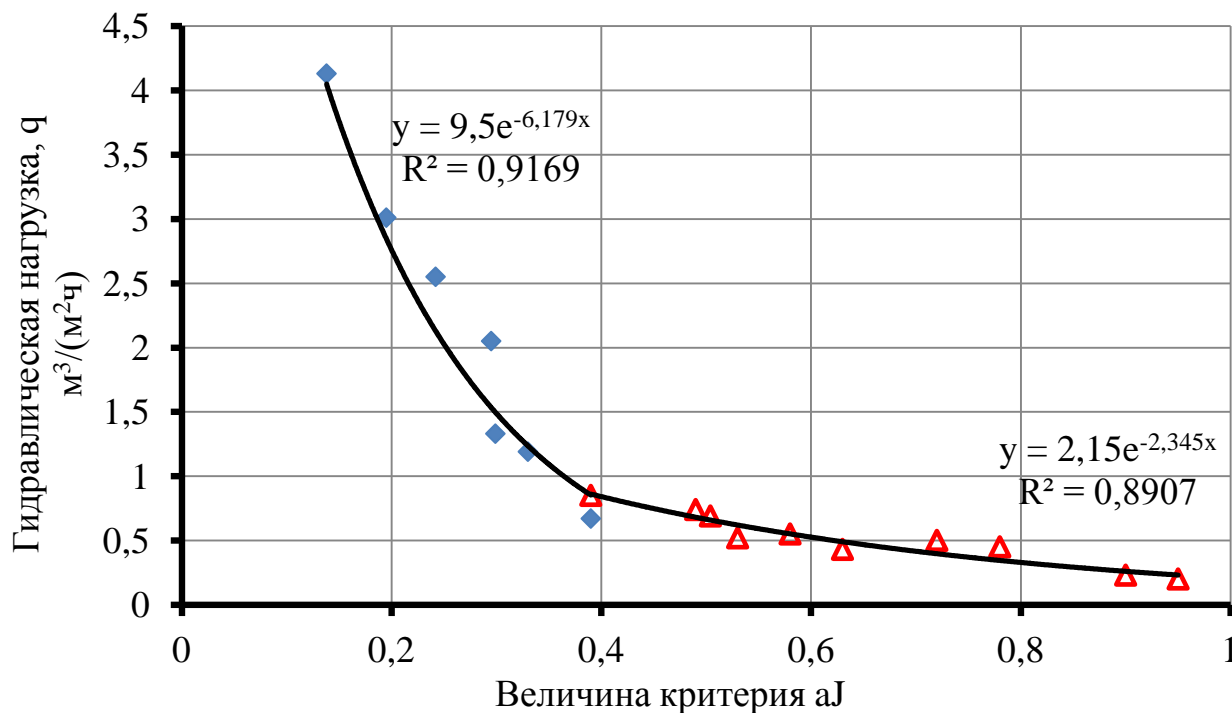


Рис. 4.4. Влияние безразмерного параметра aJ на гидравлическую нагрузку илоотделителя при высоте взвешенного слоя $H=1,1$ м.

При рабочей концентрации иловой смеси в пределах $8...12$ г/дм³ рекомендуемая гидравлическая нагрузка снижается вплоть до $0,24$ м³/м²ч, что существенно снижает производительность работы илоотделителя. Определенный перелом в точке со значением параметра $aJ = 0,4$ предположительно объясняется изменением свойств обтекания хлопков ила. В данном случае увеличивается влияние условий стесненного осаждения частиц.

Исследованиями установлена зона действия от всасывающего трубопровода системы удаления осадка, принимается $1,5...2$ диаметра данного трубопровода.

Зависимость гидравлической нагрузки от критерия aJ (Рис. 4.4) может быть описана экспоненциальными уравнениями. С учетом экспериментальных данных построена номограмма подбора гидравлической нагрузки в зависимости от высоты взвешенного слоя и параметра aJ (Рис. 4.5). Построение осуществлялось путем определения начальных параметров работы взвешенного

слоя, а именно, высоты взвешенного слоя и гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя.

При помощи полуэмпирической модели расчета предложенной в разделе 2 данной диссертационной работы, производился пересчет расчетной пористости слоя с учетом исходной концентрации иловой смеси, умноженной на иловый индекс.

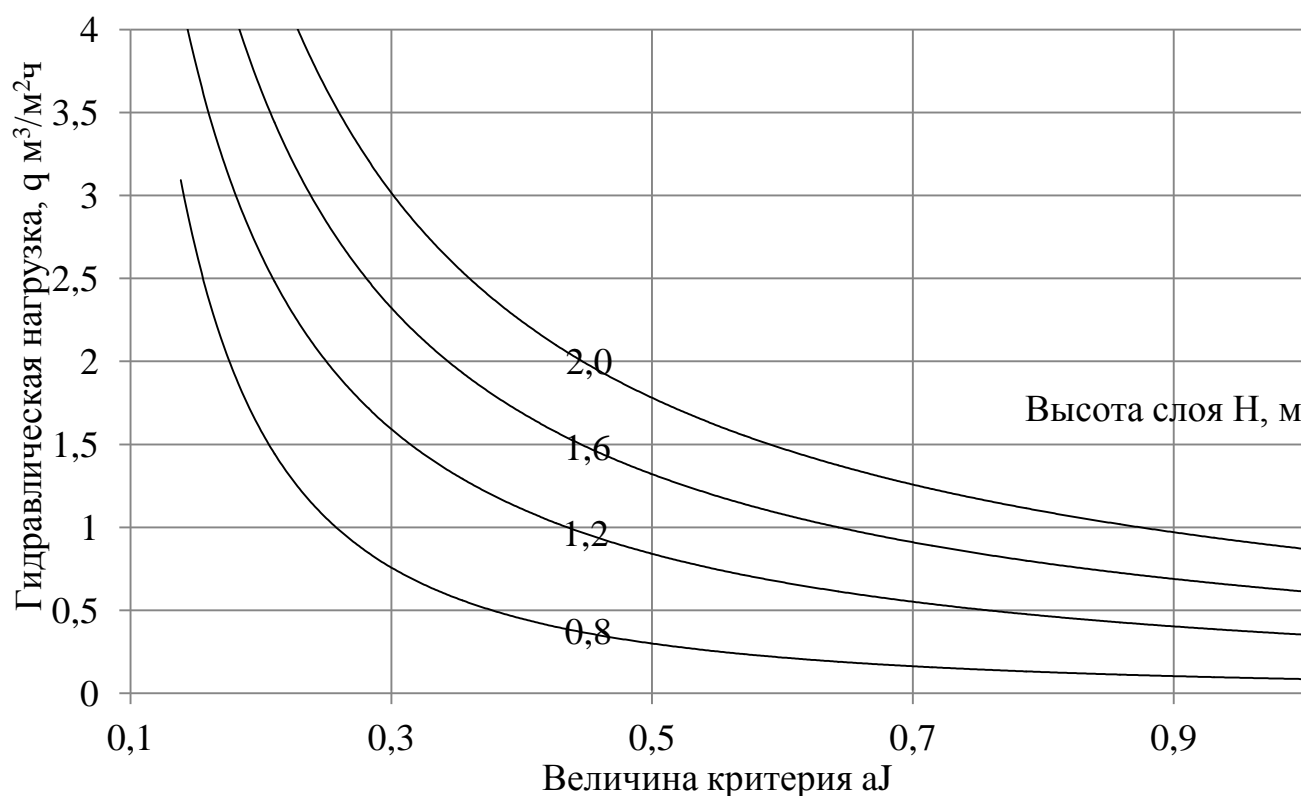


Рис. 4.5. Номограмма подбора гидравлической нагрузки в зависимости от высоты взвешенного слоя и параметра aJ .

Номограмму подбора (Рис. 4.5) рекомендуется использовать для инженерного подбора рекомендуемой гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя при определенной высоте взвешенного слоя.

В результате полупромышленных исследований установлено, что гидравлическая нагрузка в целом ниже, чем при лабораторных исследованиях. Данный факт объясняется большими колебаниями значений илового индекса, который может снижать седиментационную способность ила.

4.2 Расчет степени рециркуляции иловой воды

Разделение потоков иловой смеси в зависимости от потоков восходящей и нисходящей составляющей скорости рабочей жидкости илоотделителя проходит следующим образом:

$$aW = a_1W_1 + a_2W_2, \quad (4.1)$$

где a - начальная концентрация ила, поступающего в илоотделитель;

a_1 - концентрация ила на рециркуляцию;

a_2 - концентрация ила в иловой воде;

W – подача смеси в илоотделитель;

W_1 – подача ила на рециркуляцию;

W_2 - отвод иловой воды на рециркуляцию.

Проанализировав полученную в промышленных условиях графическую зависимость (Рис. 4.4) гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя от параметра aJ , нельзя не отметить более резкое падение производительности илоотделителя при низких значениях aJ . На данном основании предложено проверить возможность повышения общей производительности илоотделителя

Для этого, с целью получения большей производительности илоотделителя, можно воспользоваться разбавлением поступающего ила, т.е. вести процесс илоотделения с рециркуляцией осветленной иловой воды.

Здесь расход иловой воды, подаваемый из емкости накопителя осветленной иловой воды в илоотделитель, должен учитывать необходимую степень рециркуляции для снижения рабочей концентрации иловой смеси на входе в илоотделитель. R – степень рециркуляции иловой воды (Рис. 4.1).

В соответствии со схемой работы илоотделителя коэффициент рециркуляции иловой воды может быть вычислен как

$$R = \frac{a_i - a}{a}, \quad (4.2)$$

где a_i – концентрация иловой смеси в минерализаторе, г/дм³;

a – фактическая концентрация иловой смеси, поступающей во взвешенный слой илоотделителя после разбавления иловой водой, г/дм³.

При рециркуляции иловой воды площадь илоотделителя будет определяться как

$$F = \frac{Q \cdot (R+1)}{q} \text{ или, учитывая выражение } F = \frac{Q \cdot a_i}{q \cdot a}, \quad (4.3)$$

где q – гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя.

В инженерных расчетах целесообразно пользоваться удельной площадью илоотделителя, это отношение общей площади к производительности, м²ч/м³

$$F_{уд} = F/Q, \text{ тогда } F_{уд} = a_i / (q \cdot a) \quad (4.4)$$

В таблице 4.3 приведена гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя при различной степени рециркуляции осветленной иловой воды.

Таблица 4.3 Влияние рециркуляции осветленной иловой воды на гидравлическую нагрузку на водное зеркало илоотделителя

Концентрация иловой смеси, a , г/дм ³	Гидравлическая нагрузка q , м ³ /м ² ·ч при степени рециркуляции R			
	0,5	1,0	1,5	2,0
8	1,0	1,5	2,2	2,6
10	0,8	1,2	1,4	2,1
12	0,6	0,75	1,1	1,4

Возможность увеличения гидравлической нагрузки на илоотделитель путем разбавления ила, поступающего во взвешенный слой, проверена на действующих сооружениях. Данные таблицы свидетельствуют о том, что в илоотделитель из минерализатора поступает иловая смесь с концентрацией 12 г/дм³ и иловым индексом 75 мл/г, в этом случае безразмерный параметр aI будет равен 0,90. При таком параметре ила в соответствии с приведенным выше графиком (Рис. 4.4), получим гидравлическую нагрузку 0,33 м³/м²·ч, что соответствует удельной поверхности водного зеркала илоотделителя

$3,05 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} / \text{м}^3$. Более высокие нагрузки приводили к увеличению высоты взвешенного слоя и выносу ила с иловой водой. При разбавлении ила осветленной иловой водой $R = 2,0$ параметр aJ станет равным $0,30$, а гидравлическая нагрузка увеличится до $1,25 \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{ч}$ (Табл. 4.3). Это приведет к увеличению производительности илоотделителя по исходному илу в $1,25$ раза.

Учитывая полученные различные зависимости гидравлической нагрузки от параметра aJ на разных участках кривой, изображенной на (Рис. 4.4), величина удельной поверхности будет определяться

$$F_{\text{уд}} = \frac{a_i}{9,5 \cdot e^{-6,179 \cdot J \cdot a / 1000 \cdot a}} \quad \text{при } J \cdot a / 1000 < 0,39 \quad (4.5)$$

$$F_{\text{уд}} = \frac{a_i}{2,15 \cdot e^{-2,345 \cdot J \cdot a / 1000 \cdot a}} \quad \text{при } J \cdot a / 1000 \geq 0,39 \quad (4.6)$$

Выражения (4.5) и (4.6) позволяют определить удельную поверхность водного зеркала илоотделителя в зависимости от концентрации ила в минерализаторе и илового индекса, а также степени разбавления иловой водой. На основе этого разработана методика расчета и алгоритм определения производительности.

Графическое выражение зависимости удельной поверхности илоотделителя от концентрации ила во взвешенном слое и иловом индексе приведено на рис. 4.7. Вид кривых свидетельствует о наличии двух минимумов при различных режимах работы илоотделителя.

Уменьшение удельной поверхности приводит к увеличению производительности илоотделителя, поэтому целесообразно стремиться к уменьшению концентрации активного ила во взвешенном слое, увеличивая степень рециркуляции иловой воды.

Дифференцируя выражения (4.5) и (4.6) и приравнивая их к нулю, получим, соответственно, выражения для определения концентрации ила во взвешенном слое, соответствующие минимальной величине удельной поверхности

$$a = 1000 / (6,179 \cdot J) \quad \text{при } J \cdot a / 1000 < 0,39; \quad (4.7)$$

$$a=1000/(2,345 \cdot J) \text{ при } J \cdot a / 1000 \geq 0,39.$$

(4.8)

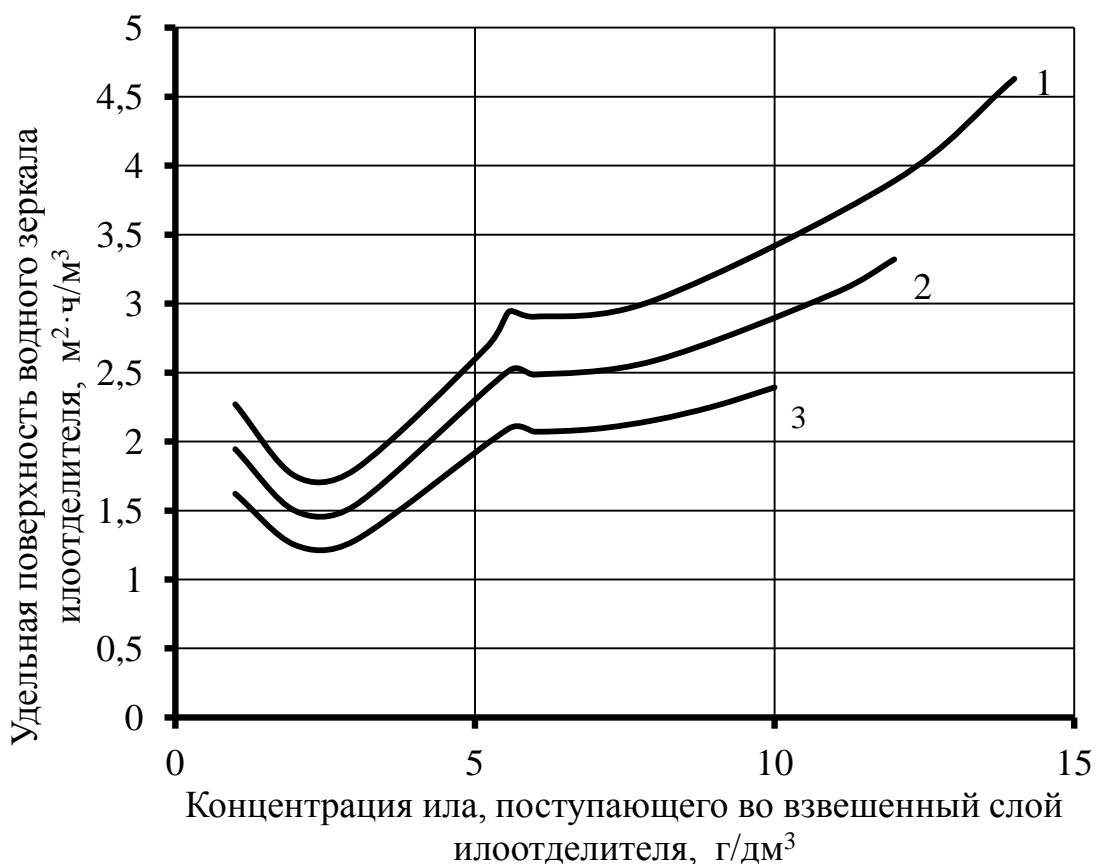


Рис. 4.6. Влияние концентрации ила на величину удельной поверхности водного зеркала илоотделителя:

- 1 - при концентрации ила в минерализаторе 14 г/дм³;
- 2 - при концентрации ила в минерализаторе 12 г/дм³;
- 3 - при концентрации ила в минерализаторе 10 г/дм³.

Как видно, эти концентрации зависят только от илового индекса и режима работы илоотделителя. Длительные исследования производственных сооружений по глубокой минерализации на Макеевских очистных сооружениях показали, что иловый индекс ила минерализаторов колеблется около 60...75 мл/г. Для этих условий, чтобы увеличить производительность илоотделителя, необходимо, в зависимости от количества исходного ила в минерализаторе, поддерживать концентрацию ила, поступающего во взвешенный слой, на уровне 3...8 г/дм³.

Таким образом, проведенные исследования и опыт эксплуатации сооружений глубокой минерализации показали, что при подаче в минерализатор избыточного ила аэротенков работа илоотделителя может осуществляться без рециркуляции иловой воды, при подаче смеси ила до концентрации 8 г/дм³. При более высоких концентрациях следует рекомендовать работу с рециркуляцией.

4.3 Основные выводы по четвертому разделу

1. Разработана промышленная конструкция илоотделителя со взвешенным слоем минерализованного ила, которая использовалась на Макеевских канализационных очистных сооружениях.

2. В производственных условиях впервые получена зависимость гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя от произведения концентрации ила и илового индекса в диапазоне $aJ = 0,15 \dots 0,95$. Полученные данные позволяют применять илоотделитель со взвешенным слоем с повышенными концентрациями минерализованного ила вплоть до 12 г/дм^3 .

3. Построена номограмма для инженерного подбора рекомендуемой гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя в зависимости от значений параметра aJ при заданной высоте взвешенного слоя.

4. Экспериментально подтверждена возможность повышения производительности илоотделителя путем разбавления исходной концентрации иловой смеси осветленной иловой водой. Позволяет увеличить производительность илоотделения до 25%. Установлено рекомендуемое значение концентрации иловой смеси до 8 г/дм^3 без использования разбавления. Степень рециркуляции осветленной иловой воды составляет $R = 0,5 \dots 2,0$.

РАЗДЕЛ 5

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ
ИЛОВОЙ СМЕСИ ВО ВЗВЕШЕННОМ СЛОЕ5.1 Рекомендации на проектирование установок илоотделения со взвешенным
слоем

При расчете систем разделения концентрированных иловых смесей на очистных сооружениях необходимо руководствоваться следующими принципами:

- исходным параметром для расчета илоотделителей со взвешенным слоем осадка являются концентрация поступающего активного ила, а г/дм^3 и требуемая производительность сооружения $Q \text{ м}^3/\text{ч}$;
- при работе с активным илом рекомендуется учитывать его седиментационные характеристики, а именно, иловый индекс;
- предлагается высоту взвешенного слоя назначать предварительно, исходя из условий эксплуатации и месторасположения установки илоотделения, согласно конструктивных условий;
- как представлено в предыдущем разделе данной диссертационной работы, необходимо учитывать возможность интенсификации процесса илоотделения путем разбавления исходной иловой смеси до концентрации ниже 8 г/дм^3 .

В итоге, предложен алгоритм расчета илоотделителей со взвешенным слоем осадка с использованием математического редактора Mathcad и Excel, для определения конструктивной высоты сооружения, согласно вводным параметрам (Рис. 5.1).

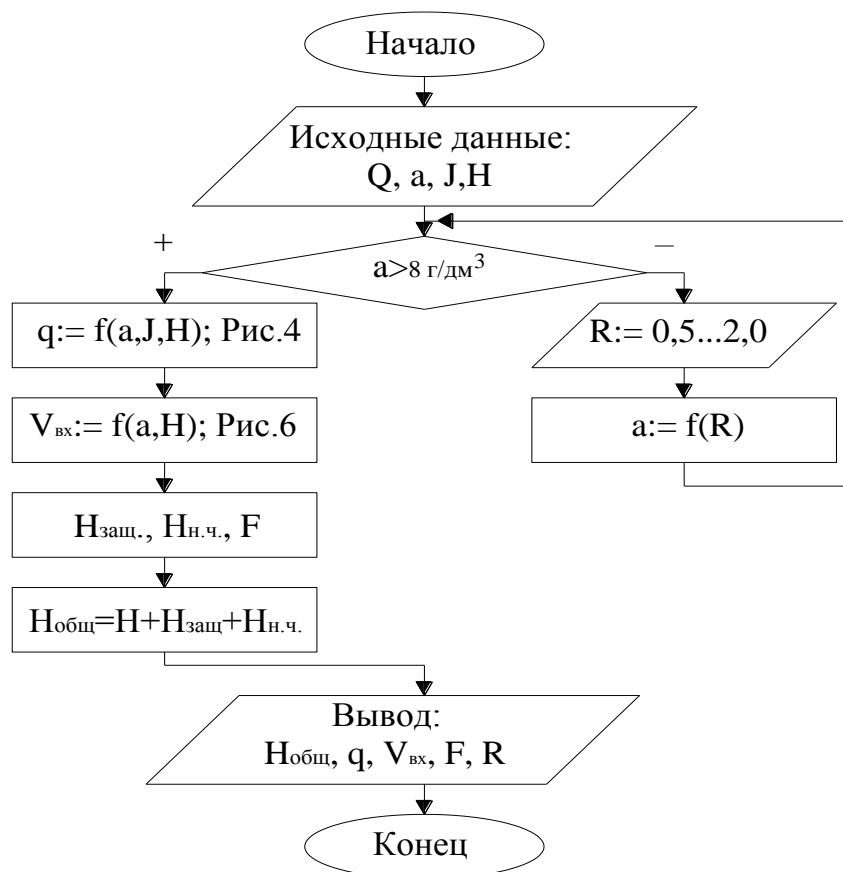


Рис. 5.1. Алгоритм расчета осветлителей со взвешенным слоем осадка.

где Q – производительность сооружения по илоотделению;

$V_{вх}$ – скорость входа иловой смеси в сооружение илоотделения;

$H_{общ}$, $H_{защ}$, $H_{н.ч}$ – соответственно, общая высота, высота защитного слоя и нижней части илоотделителя.

5.2 Экономическая эффективность внедрения отделения активного ила во взвешенном слое на канализационных очистных сооружениях г. Макеевки Донецкой области

Расчет годового экономического эффекта выполнен для станции биологической очистки бытовых сточных вод г. Макеевка производительностью $48 \text{ м}^3/\text{сут}$ избыточного активного ила по двум вариантам.

Как предлагаемый вариант сравнения принято разделение иловой смеси после протекания процесса минерализации, во взвешенном слое осадка, с возможной рециркуляцией осветленной иловой воды (Рис. 5.2, 5.3). Сущность

данного метода заключается в формировании взвешенного слоя ила, в котором повышается эффективность действия гравитационных сил и повышается эффективность осветления иловой воды при повышенных концентрациях. Дополнительным положительным моментом данного варианта является вывод за пределы сооружения минерализации высокозольных, мелкодисперсных частиц ила, ингибирующих процесс дальнейшей минерализации.

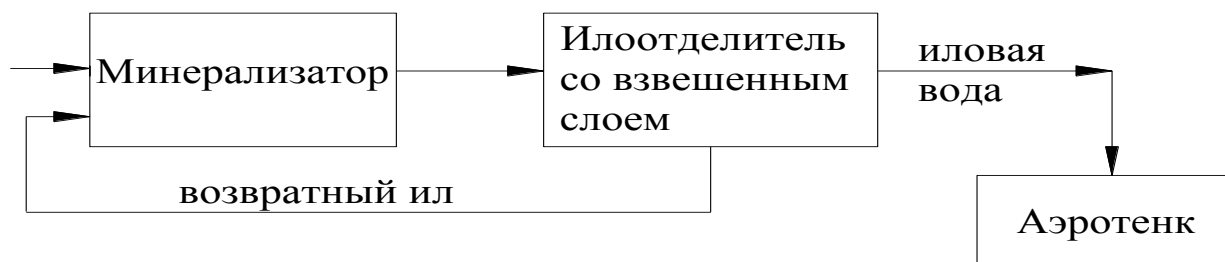


Рис.5.2. Схема с глубокой минерализацией иловых смесей

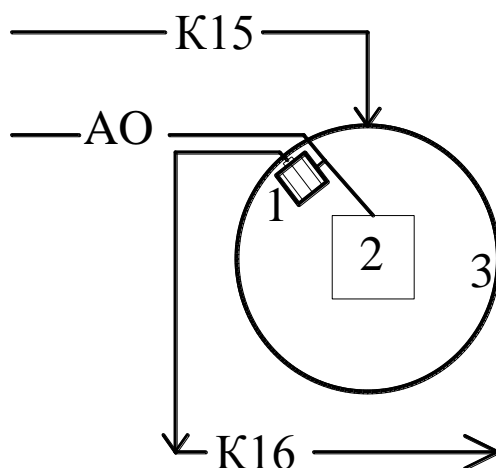


Рис. 5.3. Внедряемый вариант минерализации:

1. – илоотделитель со взвешенным слоем;
2. – затопленная эрлифтная система аэрации;
3. – корпус минерализатора 18 м.

K15 – подача избыточного активного ила на обработку;

K16 – отвод осветленной сточной жидкости;

АО – подвод воздуха от здания насосно-воздуходувной станции.

Процесс разделения иловых смесей производится в заглубленном сооружении, выполненном из листовой стали толщиной 4 мм С245, ГОСТ 19903-74, установленном в затопленной части минерализатора осадка, с

обеспечением надлежащих эксплуатационных рекомендаций. Общая высота промышленного илоотделителя при размещении в минерализаторе составляет до 3,5 м, общая площадь поперечного сечения осветлителя 4 м². Удельный расход воздуха на работу эрлифтных установок 5 л/с на каждую часть отделителя. Они применяются для осуществления массообменных процессов в сооружении. Воздух подается от существующих насосно-воздуходувных станций очистных сооружений по той же линии трубопровода, что и на систему аэрации затопленной аэрационной колонны минерализатора. Годовой расход электроэнергии принят согласно установленным на очистных сооружениях воздуходувным установкам ТВ-80-1,8 с мощностью электродвигателя 200 кВт, соответственно данному расходу воздуха, потребляемая на эрлифты мощность 0,7 кВт.

Эксплуатация илоотделителя со взвешенным слоем осадка в течение 2 лет показала высокую их эффективность и надежность работы.

В предлагаемом к сравнению варианте принята технология илоотделения в напорной флотационной колонне с возможным применением реагентов, увеличивающих эффективность отделения ила (Рис. 5.4).

Сущность метода напорной флотации заключается в частичном насыщении обрабатываемой иловой смеси растворенным кислородом в сатураторе, так называемая «частичная рециркуляция». После чего происходит активное формирование комплекса частица-пузырек и активное всплытие сфлотированной иловой смеси. Осветленная иловая вода и сфлотированный ил отделяются друг от друга. Осветленная иловая вода направляется в голову очистных сооружений, а сфлотированный осадок отводится на дальнейшую минерализацию.

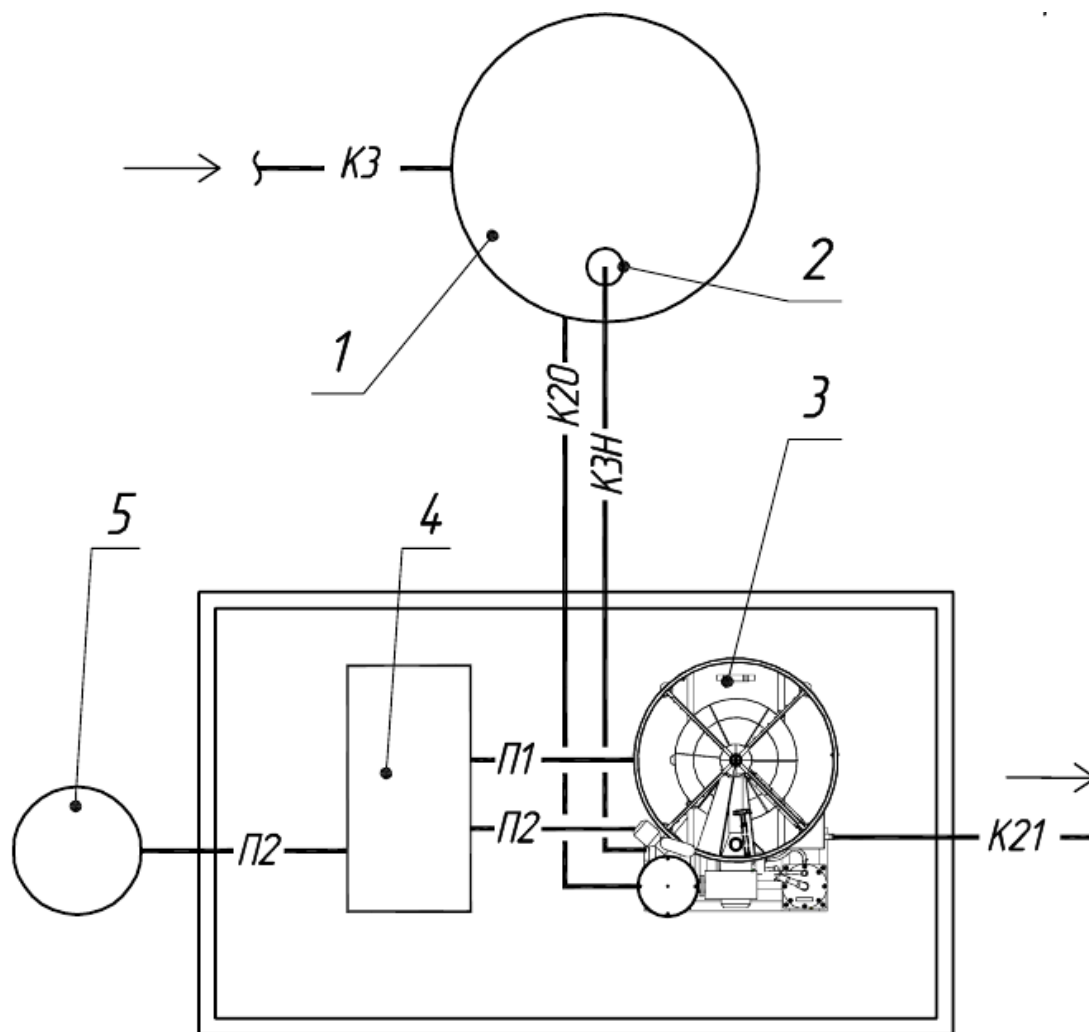


Рис. 5.4 Вариант применения установки напорной флотации фирмы Экосервис ФЛП - 2:

- 1 – приемный резервуар 2 м³;
- 2 – погружной насосный агрегат;
- 3 – флотатор ФДП 2;
- 4 – блок приема флотопены;
- 5 – накопитель шлама.
- КЗ – производственная канализация;
- П1 – сброс осадка;
- П2 – сброс флотошлама;
- КЗН – подача осадка на очистку;
- К20 – сливной трубопровод;
- К21 – сброс очищенной воды.

Согласно коммерческому предложению организации производителя оборудования [125] стоимость блока флотационной установки ФДП-2 составляет от 593 773 р, что согласно курса НБУ оставляет 191 349 грн, без учета монтажа технологического оборудования.

Технические данные и характеристики флотаторов «ФДП» приведены в таблице 5.1:

Таблица 5.1 Характеристика флотатора «ФДП»

Параметры и характеристики	Размерность	Значение
		ФДП-2
Производительность (номинальная)*	м ³ /ч	1,8...2,2
Габаритные размеры в сборе	мм	
-длина		2010
-ширина		1670
-высота		1830
Масса сухая, не более	кг	530
Напряжение питания	В	3Ф~380
Установочная мощность	кВт	2,3

Температура воды, подаваемой во флотатор, не должна превышать 40°C.

Расчетные параметры иловой смеси на входе в сооружение: расчетная часовая подача 2 м³/ч; концентрация активного ила в смеси – 4...12 г/дм³; активная реакция среды – 7...8,5; иловый индекс 60...75 мл/г.

Таблица 5.2 Перечень оборудования для илоотделителя во взвешенном слое осадка производительностью 48 м³/сут

№ п/п	Наименование	Кол.	Цена единицы, грн.	Стоимость, грн.
	Корпус осветлителя со взвешенным слоем осадка	1 шт.		
1.	Сталь листовая 4 мм С245, ГОСТ 19903-74 (лист 1,5х6,0)	6 шт.	3268,2	19609,2
2.	Уголок стальной гнутый равнополочный L50х4 ГОСТ 19771-93	16 м.	13250 грн. т.	622,75
3.	Уголок стальной гнутый равнополочный L60х4 ГОСТ 19771-93	4 м.	12500 грн. т.	312,5
4.	Труба стальная прямошовная горячекатанная диаметр 325х6	2 м.	25000 грн. т.	2700
5.	Шпилька М20-6g×1000.58 ГОСТ 22042-76, (регулировка высоты сборных желобов)	4 шт.	64,42	257,68
7.	Гайка высокая М20 ГОСТ 15523-70	4 шт.	3,45	13,8
8.	Труба ПЭ диаметром 63х4,6 мм, ГОСТ 18599-2001	4 м.	42,60	170,40
9.	Труба ПЭ диаметром 32х2,4 мм, ГОСТ 18599-2001	6 м.	11,32	67,90
10.	Тройник 63х32 мм, ГОСТ 18599-2001	1 шт.	45,00	45,00
11.	Уголок 90, 32х2,4 мм, ГОСТ 18599-2001	4 шт.	15,90	63,60
12.	Сварочные работы с учетом оборудования и материалов	42 м	300	12600
Итого:				36462,73

Экономическое сравнение вариантов обработки избыточного активного ила хозяйственно-бытовых сточных вод выполнено с помощью показателя ЧДД [126] – чистого дисконтированного дохода, который определяется

$$ЧДД = \sum_{t=0}^T \frac{P_t}{(1+e)^t}, \quad (5.1)$$

где t - время реализации проекта ($t = 0...T$), год;

e - норма прибыли проекта или коэффициент дисконтирования;

P_t - чистый денежный поток в t -м периоде (году), который является разницей между суммой притоков (доходов) Π_t и оттоков (затрат) B_t :

$$P_t = \Pi_t - B_t = \Pi_t - K_t - Ba_t - B_{эл_t} - B_{зп_t} - B_{др_t}, \quad (5.2)$$

где K_t - капитальные затраты;

Ba_t - амортизационные отчисления;

$B_{эл_t}$ - стоимость электроэнергии для работы сооружения;

$B_{зп_t}$ - расходы на заработную плату;

$B_{др_t}$ - другие отчисления.

Исходя из вышеперечисленного, следует

$$ЧДД = \sum_{t=0}^T \frac{\Pi_t - K_t - Ba_t - B_{эл_t} - B_{зп_t} - B_{др_t}}{(1+e)^t} = \Pi_n - B_n, \quad (5.3)$$

где Π_n и B_n - дисконтированные величины прибыли и суммарных расходов на начало реализации проекта, то есть при $t = 0$.

Величину дисконтированной прибыли можно определять по формуле

$$\Pi_n = \sum_{t=0}^T \frac{\Pi_t}{(1+e)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{Wp_t \cdot Cm_t}{(1+e)^t}, \quad (5.4)$$

где Wp_t - количество обработанного осадка за t -й год, м³/год;

Cm_t - тариф на очистку стоков в i -м году, грн/м³.

Индекс прибыльности (Profitability Index, PI) рассчитывается по следующей формуле

$$PI = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{P_t}{(1+e)^t}}{\Pi_t}, \quad (5.5)$$

где P_t - чистый денежный поток для i -го периода;

Π_t - начальные инвестиции;

e - ставка дисконтирования (стоимость капитала, привлеченного для инвестиционного проекта).

Себестоимость 1 м³ обработанного осадка определяется по формуле:

$$S = \mathcal{E} / Q_{ср.год}, \text{ грн./м}^3, \quad (5.6)$$

где: S — себестоимость 1 м³ обработанного осадка;

\mathcal{E} — годовые эксплуатационные расходы, тыс. грн.;

$Q_{ср.год}$ — среднегодовое количество осадка, тыс.м³.

Вариант 1:

$$S = 34623/17520 = 1,98 \text{ грн/м}^3.$$

Вариант 2:

$$S = 58646 / 17520 = 3,35 \text{ грн/м}^3.$$

Результаты расчета ЧДД для альтернативного и предлагаемого вариантов сравнения приведены в табл. 5.3. В качестве ставки дисконта принята величина 10%.

Тарифы на электроэнергию для потребителей на территории Украины соответствует постановлению Кабинета Министров Украины от 15.08.2005 № 745 «О переходе к единым тарифам на электрическую энергию, отпускаемую потребителям» и НКРЭ Украины от 26.02.2015 №224.

Таблица 5.3 Экономическое сравнение вариантов по доочистке сточных вод

Отделение ила во взвешенном слое с рециркуляцией		Технология илоотделения во флотационной колонне	
Оборудование и материалы установок, тыс. грн.			
36,463		191,349	
Эксплуатационные расходы, тыс. грн/год			
Затраты на электроэнергию	6,977	Затраты на электроэнергию	22,926
Заработная плата	24	Заработная плата	24
Амортизационные отчисления	3,646	Амортизационные отчисления	11,732
Всего:	34,623	Всего:	58,646
Суммарные затраты по обработке осадков сточных вод за год, тыс.грн			
71,086		249,995	
Чистый дисконтированный доход за 2 года реализации проекта, тыс. грн.			
146,700		-49,878	

Данные табл. 5.3 свидетельствуют об экономической эффективности предлагаемого метода обработки избыточного активного ила относительно базового варианта, индекс прибыльности $PI=5,02$

5.3 Выводы по пятому разделу

1. Разработаны рекомендации по проектированию и эксплуатации установки отделения ила во взвешенном слое осадка. Представлен алгоритм расчета осветлителей со взвешенным слоем осадка.

2. Определен чистый дисконтированный доход от внедрения установки разделения иловой смеси во взвешенном слое осадка на Макеевских очистных сооружениях производительностью, по избыточному активному илу, $48 \text{ м}^3/\text{сут.}$ Чистый дисконтированный доход составил 376 тыс. руб. при сроке реализации проекта 2 года.

3. Эксплуатация илоотделителя со взвешенным слоем осадка в течение 2 лет показала высокую его эффективность и надежность работы.

ВЫВОДЫ

1. Выполнены исследования существующих методов разделения иловых смесей с повышенными концентрациями ила. Установлен наиболее перспективный метод илоотделения в процессе аэробной минерализации осадка, а именно разделение во взвешенном слое. Изучена классическая конструкция осветлителей со взвешенным слоем осадка, показана необходимость совершенствования технологии илоотделения.

2. Изучены особенности работы взвешенного слоя с высокими концентрациями иловой смеси. Уточнена математическая модель расчета высоты взвешенного слоя илоотделителя с учетом скорости восходящего потока для разделения концентрированных иловых смесей.

3. Впервые в качестве метода интенсификации отделения иловых смесей во взвешенном слое используется разделение потока на восходящую и нисходящую составляющие. Построены гидродинамические линии тока, описывающие потокораспределение в илоотделителе. Определено рекомендуемое отношение скорости нисходящего потока к восходящему от 2...4,1:1, для подбора нисходящей скорости иловой смеси.

4. Экспериментально получены зависимости гидравлической нагрузки на зеркало осветлителя от высоты взвешенного слоя и концентрации ила в сооружении, описывающие процесс илоотделения концентрированных иловых смесей во взвешенном слое осадка. Установлено, что при высоте взвешенного слоя в пределах 1,0...2,0 м, гидравлическая нагрузка на зеркало илоотделителя варьируется в диапазоне $0,3...3,4 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$. Установлена зависимость необходимой скорости на входе в илоотделитель от высоты взвешенного слоя и концентрации ила, которая составила 0,04...0,18 м/с.

5. Проведены промышленные экспериментальные исследования разделения ила во взвешенном слое осадка, впервые установлена зависимость гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя от высоких значений илового индекса и концентрации минерализованного ила. Предложен способ повышения производительности илоотделителя на величину 25% за счет

разбавления исходной иловой смеси осветленной иловой водой, рекомендуемая степень рециркуляции 0,5...2,0. Предложена конструкция промышленного илоотделителя, которая нашла свое отражение в патенте Украины на полезную модель № 101528.

6. Разработан алгоритм определения технологических и конструктивных параметров илоотделителя, предлагаемый для инженерных расчетов. Чистый дисконтированный доход от внедрения илоотделителя с восходяще-нисходящим потоком для разделения концентрированного минерализованного ила производительностью 48 м³/сут составляет 376 тыс. руб, при сроке реализации проекта 2 года.

Список использованных источников

- 1 Васильев, Б. В. Обработка и утилизация осадков сточных вод в Санкт-Петербурге [Текст] / Васильев Б. В. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – №9(2). – С. 58-52.
- 2 Эпоян, С. М. Обезвоживание осадков городских сточных вод на иловых площадках Коммунальных хозяйств городов [Текст] / С. М. Эпоян, В. Е. Сорокина, А. С. Карагяур и др. // Коммунальное хозяйство городов. – 2007. – Вып. 74. – С. 76 – 80.
- 3 Эпоян, С. М. Оценка эффективности применения технических средств интенсификации водоотбора для обезвоживания осадков сточных вод на иловых площадках [Текст] / С. М. Эпоян, В. Е. Сорокина, А. С. Карагяур // Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання водних ресурсів та очистки природних і стічних вод: між нар.наук.-практ. конф., 23-27 квіт. 2007 р.: праці. конф. / Нац. університет водного гос-ва та природокористування – К.: Т-во «Знання» України, 2007. – С. 152-156.
- 4 Эпоян, С. М. Разработка модульной установки для удаления иловой воды [Текст] / С. М. Эпоян, А. С. Карагяур, В. Е. Сорокина и др. // Науковий вісник будівництва. – 2008. – Вип. 46. – С. 219 – 222.
- 5 Эпоян, С. М. Направления повышения эффективности обезвоживания осадков городских сточных вод / С. М. Эпоян, Е. Н. Орлова // Науковий вісник будівництва. – 2009. – Вип. 51. – С. 197 – 200.
- 6 Эпоян, С. М. Усовершенствование модульной установки для удаления иловой воды [Текст] / С. М. Эпоян, А. С. Карагяур, О. В. Степанов // Науковий вісник будівництва. – 2009. – Вип. 51. – С. 201 – 205.
- 7 Эпоян, С. М. Рентгеноструктурные исследования смеси осадков городских сточных вод [Текст] / С. М. Эпоян, Е. Н. Орлова, О. В. Степанов // Науковий вісник будівництва. – 2010. – Вип. 56. – С. 157 – 161.
- 8 Эпоян, С. М. Исследование зависимости водоотдачи смеси осадков городских сточных вод [Текст] / С. М. Эпоян, Е. Н. Орлова // Науковий вісник будівництва. – 2010. – Вип. 58. – С. 228 – 231.

- 9 Эпоян, С. М. Модель расчета модульной установки для удаления иловой воды [Текст] / С. М. Эпоян, А. С. Карагяур, И. В. Коринько и др. // Коммунальное хозяйство городов. – 2010. – Вип. 93. – С. 253 – 258.
- 10 Нездойминов, В. И. Миграция ионов тяжелых металлов при использовании осадков городских сточных вод в качестве удобрения [Текст] / Нездойминов В. И., Чернышова О. А. // Вестник ДонНАСА – Макеевка, 2010-2(82) – С. 24-30.
- 11 Евилевич, А. З. Утилизация осадков сточных вод. [Текст] / Евилевич А. З. // Л.: Строй-издат, 1988. – 240 с.
- 12 Фрог, Б. Н. Водоподготовка: Учебное пособие для вузов [Текст] / Фрог Б. Н., Левченко А. П. // М. Издательство МГУ, 1996 г. 680 с; 178 ил.
- 13 Янин, Е.П. Осадки сточных вод городов России как источник эмиссии ртути в окружающую среду [Текст] / Янин Е.П. // Экологические системы и приборы, 2009. - Вип. 7. – С. 14-15.
- 14 Сучкова, Н. Г. Анализ состояния проблемы рекультивации иловых площадок очистных сооружений городов и перспективы для Харьковского региона [Текст] / Н. Г. Сучкова // Сб. докладов Международного конгресса «ЭТЭВК-2007» – Экология, технология, экономика водоснабжения и канализации. Ялта, 22–26 мая 2007 г. /Под ред. Кравченко Н. Д. – К. : НДКТУУМГ, 2007. – С. 279–284.
- 15 WRc, Milieu and RPA (2009): Environmental, economic and social impact of the use of sewage sludge on land, Interim Report, October 2009.
- 16 Музыченко, В. Е. Использование осадков сточных вод [Текст] / Музыченко В. Е., Павлинова Н. И., Королева Е. А. // Водоснабжение и санитарная техника. - 2000. - № 6. - С. 17-19.
- 17 Дрозд, Г. Л. Осадки сточных вод как удобрение для сельского хозяйства [Текст] / Дрозд Г. Л., Зотов Н. И., Маслак В. Н. // Водоснабжение и санитарная техника. - 2001. - № 12. - С. 33-35.
- 18 Правила охрони поверхневих вод від забрунення зворотними водами. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 25, березня 1999 р. № 465 Із змінами: постанова КМУ від 07.08. 2013 р. N 748.
- 19 Мовчан, С. И. Технология утилизации осадков гальванических производств

- [Текст] / С. И. Мовчан, Н. И. Бунин // Научно технический сборник 60, - Харьков, 148-151 с.
- 20 Дрозд, Г. Я. Техничко-економические записки по проблеме утилизации осадков городских и промышленных сточных вод [Текст] / Дрозд Г. Я., Зотов Н. И., Маслак В. Н. // Донецк : ИЭП НАН Украины, 2001. – 340 с. – ISBN 9666022181221.
 - 21 Лукашевич, О.Д. Экологические проблемы обработки и утилизации осадков сточных вод [Текст] / Лукашевич О.Д., Барская И.В. // Экология промышленного производства. – 2007. – № 3. – С. 68 – 75.
 - 22 Державні будівельні норми України. Каналізація зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування: ДБН В.2.5-75:2013. – УкрНДІводоканалпроект, 2013. – 113 с.
 - 23 Туровский И. С. Осадки сточных вод. Обезвоживание и обеззараживание. [Текст] / И. С. Туровский – М.: ДеЛи принт, 2008. – 375 с.
 - 24 Яковлев, С. В. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения. [Текст] / Яковлев С. В., Скирдов И. В., Швецов В. Н. и др.; Под ред. С. В. Яковлева– М.: Стройиздат, 1985.- 208 с.
 - 25 Воюцкий, С. С. Курс коллоидной химии. [Текст] / С. С. Воюцкий– М.: «Химия», 1976. – 512 с.
 - 26 Чурбанова, Н. И. Микробиология. [Текст] / Н. И. Чурбанова– М.: Высшая школа, 1987. – 239 с.
 - 27 Демина М.В., Рекомендации по проведению гидробиологического контроля на сооружениях биологической очистки с аэротенками. Мет. пособие. [Текст] / М. В. Демина, Н. В. Ионова. - Пермь – 2004. – С. 5-10.
 - 28 Жмур, Н.С. Управление процессом и контроль результата очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками [Текст] / Н. С. Жмур. - М.: Луч, 1997. - 172 с. ISBN 57005-0581-9.
 - 29 Shutfleworth, K.F. Influenс of metals and metal speciation on the growth of filamentous bacteria / K.F.Shutfleworth // J.Wat.Res. 1991. – V.25(10).- P.1177-1186
 - 30 Совершенствование технологии аэробной биологической очистки [Текст] //

Труды Академии водохозяйственных наук РФ. Вып. 6. Современная экономическая, нормативно-правовая и техническая политика формирования систем водоснабжения и водоотведения. - 1998.- С. 89-91

- 31 Мосин, О.В. Биологическая очистка сточных вод [Текст] / О.В. Мосин. Авторский проект 080DE.RU. — Режим доступа: http://www.o8ode.ru/article/planetwa/oprecnenie/biologi4eckaa_o4ictka_cto4nyh_vod.htm
- 32 Солодкова, А.Б. Обезвреживание отработанного активного ила с получением материалов для решения экологических проблем химических и нефтехимических предприятий: дис. канд. техн. наук [Текст] / А.Б. Солодкова. - Саратов, 2014. – 157 с.
- 33 Magni J.I. Nature / J.I.Magni, G.J.Shumacher //– 1979. – P.102-134.
- 34 Шигапов, И. И. Механическая очистка сточных вод в животноводческих фермах [Текст] / Кадырова А. М., Губейдуллин Х. Х., Научный вестник 11, Димитровград-2013. - С.105-109
- 35 Дрегуло, А.М. Проблемы эколого-химической детоксикации активного ила и его использование в биологической очистке сточных вод: дис. канд. техн. наук [Текст] / А.М. Дрегуло. – Санкт-Петербург, 2014. - 144 с.
- 36 Fish W. Aquat. Sci. Technol./W. Fish, F.M.M.Morel, Can J. Fish //– 1983.- №40.- P.1270.
- 37 Туровский, И. С. Обработка осадков сточных вод. [Текст] / Туровский И. С. – М.: Стройиздат, 1988. – 256 с.
- 38 Нездойминов, В. И. Математическая модель процесса распределения тяжелых металлов в почве для различных сельскохозяйственных культур. [Текст] / Нездойминов В. И., Чернишева О. А. // Вестник ДонНАСА – Макеевка, 2011-5 (91), Том 1. С.64-69.
- 39 Чернышев, В. Н. Биотехнология глубокой минерализации осадков городских сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов [Текст] / В. Н. Чернышев, В. Ф. Кижаяев // Коммунальное хозяйство городов (93) – X. : ХНАГХ, 2010. — с. 225 – 231.
- 40 Ляликова, Н. Н. Нитрифицирующие бактерии и их роль в природе. [Текст] /

- Ляликова Н. Н., Лебедева Е. В. // Хемосинтез: К 100-летию открытия С.Н. Виноградским. – М.: Наука. – 1989. – С.32-47.
- 41 Рубан, Е. Л. Физиология и биохимия нитрифицирующих микроорганизмов. [Текст] / Рубан Е. Л. – М.: Изд-во АН СССР. – 1961. – 175 с.
 - 42 Brenner, A. Effect of feed composition, aerobic volume fraction and recycle rate on nitrogen removal in the single- sludge system [Текст] / Brenner A. // War. Res. 1990. V. 24, N. 8. - P. 1041-1049.
 - 43 DWA: ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: Deutsche Wasser Assoziation (DWA), 2000,- P. 20.
 - 44 Морозова, К.М. Принципы расчета систем биологической очистки сточных вод. [Текст] / Морозова К.М. // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. - № 1 – С. 26-31.
 - 45 Schmidt, I. Anaerobic Ammonia Oxidation in the Presence of Nitrogen Oxides (NO_x) by Two Different Lithotrophs [Текст] / Schmidt I. // Applied and environmental microbiology. V. 68, N. 11. 2002. - P. 5351-5357.
 - 46 Нездойминов, В. И. Технология биологического удаления соединений азота при дефиците органического субстрата [Текст] / Нездойминов В. И., Чернышев В.Н. // Вісник ДонНАБА, 2005, - С. 23-26.
 - 47 Новиков, О. Н. Утилизация активного ила [Электронный ресурс] / О. Н. Новиков // Режим доступа: [http:// www.eco-potenzial.ru/](http://www.eco-potenzial.ru/) . Загл. с экрана. – Опубликовано 4.11.2011.
 - 48 Гюнтер, Л. И. Метантенки [Текст] / Л. И. Гюнтер, Л. Л. Гольдфарб - М.: Стройиздат, 1991, - с. 128.
 - 49 Воронов, Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод [Текст] / Ю. В. Воронов, С. В. Сковлев – М.: МГСУ, Изд. Ассоциации строительных вузов, 2006, с. 704.
 - 50 Колобанов С. К. Проектирование очистных сооружений канализации. [Текст] / С. К. Колобанов, А. В. Ершов, М. Е. Кигель – К.: Будівельник, 1977. с. 224.
 - 51 Чундак, С. Ю. Очищення комунально-побутових стічних Комунального підприємства «Водоканал» м. Ужгород : [Текст] / С.Ю. Чундак, С.М. Сухарев, Н.В. Бойко, І.І. Чонка, О.Ю. Сухарева // Міжнародна науково-практична

- конференція «Перший Всеукраїнський з'їзд екологів». Збірник тез доповідей. – 27 с.
- 52 Нездойминов, В. И. Использование процессов нитрификации и денитрификации для решения экологических проблем : [Текст] / В. И. Нездойминов // Материалы 3й международной научно-практической конференции «Техновод». – Новочеркасск, 2006. - С. 130-131.
 - 53 Чернышев В. Н., Куликов Н. И., Чернышева Е. Н. Интенсификация аэробной стабилизации осадков городских сточных вод. «Микробиологические методы борьбы с загрязнением окружающей среды» - Тезисы докладов. Пущино.-1988.- С. 187.
 - 54 Ковальчук, В. А. Очистка стічних вод: Навч. посібник. [Текст] / В. А. Ковальчук– Рівне: ВАТ „Рівненська друкарня”, 2003, с. 622.
 - 55 Сорокіна, К. Б. Технологія переробки та утилізації осадів: навч. посібник / К. Б. Сорокіна, С. Б. Козловська; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 226 с.
 - 56 Коробко, М.И. Очистка бытовых сточных вод двухступенчатым фильтрованием. Учебное пособие [Текст] / М.И. Коробко, С.Н. Фомин // Хабаровск. – Издательство ДГУПС, 2000. – 64с.
 - 57 Минц, Д. М. О механизме фильтрационного процесса на скорых водоочистительных фильтрах [Текст] / Д. М. Минц, Л. Н. Поскучкая, З. В. Чернова // Журнал прикладной химии. Том /XL/ 40, вып.8. 1967. Л.: Наука. 1967.-С. 1695-1700.
 - 58 Чернова, З.В. Исследование некоторых закономерностей осветления воды в слое взвешенного осадка / З. В. Чернова ; рук. работы Д. М. Минц. / Автореферат дис. канд. биол. наук. – 1960. – 24с.
 - 59 Кургаев, Е. Ф. Основы теории расчета осветлителей [Текст] / Е. Ф. Кургаев – М., Госстройиздат, 1962. – 164 с.
 - 60 Кургаев, Е.Ф. Закономерности псевдооживленного слоя твердых частиц [Текст] / Е. Ф. Кургаев // Минск: Инженерно-физический журнал – 1970 – № 6.
 - 61 Эпоян, С. М. Производственные исследования по интенсификации водоотбора с

иловых площадок очистных сооружений канализации [Текст] / С. М. Эпоян, А. С. Карагяур, В. Е. Сорокина и др. // Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання водних ресурсів та очистки природних і стічних вод: між нар.наук.- практ. конф., 6-10 квіт. 2009 р.: праці. конф. / Держ. аген. вод. ресур. України. – Т-во «Знання» України, 2009. –Т.1.- С. 71-74

- 62 Zonglian, She Study on granulation of anaerobic sludge in UASB reactor adding cationic polymer treating low strength wastewater at room temperature [Электронный ресурс] / Zonglian She, Jian Wu, Xiaohui Fu, En Shi, Baoshi L, Mengchun Gao // Applied Mechanics and Materials Vols. 71-78 (2011) pp 2974-2977 – Режим доступа : www.scientific.net/AMM.71-78.2974 – Загл. с экрана.– Опубликовано 2011 г.
- 63 Chun, Zhang Dewatering and mineralization of sludge from secondary sedimentation tank in a constructed sludge drying reed bed [Электронный ресурс] / Chun Zhang, Jie Deng and Wei Zhang // Applied Mechanics and Materials Vols. 209-211 (2012) pp 1111-1115– Режим доступа : www.scientific.net/AMM.209-211.1111– Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 64 Xi, Tian Study on activated sludge microorganisms of northern winter sewage treatment plant [Электронный ресурс] / Xi Tian, Shengshu Ai, Yan Zuo, Qingkai Ren, Zhongyan Xie // Applied Mechanics and Materials Vols. 361-363 (2013) pp 1032-1035– Режим доступа : www.scientific.net/AMM.361-363.1032 – Загл. с экрана. – Опубликовано 2013 г.
- 65 Jun YIN. Mathematical Model for the Factors Affecting Catalase Activity in Activated Sludge [Электронный ресурс] / Jun YIN, Jingyi Cui, Jiani Li, Junxiang Wang // Applied Mechanics and Materials Vols. 409-410 (2013) pp 152-155– Режим доступа : www.scientific.net/AMM.409-410.152– Загл. с экрана. – Опубликовано 2013 г.
- 66 Jingming Liu Effects of the Filler Properties on Removal Nitrogen of Wastewater in Hybrid Biofilm-Activated Sludge Process [Электронный ресурс] / Jingming Liu, 1Jie Pan, Zhirong Zhu // Applied Mechanics and Materials Vol. 510 (2014) pp 73-78– Режим доступа : www.scientific.net/AMM.510.73– Загл. с экрана. –

Опубликовано 2014 г.

- 67 Xia, Zhao Performance and Microbial Community of Aerobic Granular Sludge Bioreactor [Электронный ресурс] / Xia Zhao, Jimin Shen, Zhonglin Chen, Xiaochun Wang // Applied Mechanics and Materials Vols. 522-524 (2014) pp 405-410 – Режим доступа : www.scientific.net/AMM.522-524.405– Загл. с экрана. – Опубликовано 2014 г.
- 68 HongWei Wang, Simultaneous Organic Matter Removal in a Cyclic Activated Sludge Reactor from Municipal Waste water [Электронный ресурс] / HongWei Wang, Jian Huang, XinYu Wang, XiaoHong Wu, TieDong Liu, ChangLi Liu // Advanced Materials Research Vols. 113-114 (2010) pp 952-955 - Режим доступа : www.scientific.net/AMM.522-524.405– Загл. с экрана. – Опубликовано 2010 г.
- 69 Zonglian She. Acclimation of anaerobic granular sludge and 2,6-DNP removal in the upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors [Электронный ресурс] / Zonglian She, En Shi, Xiaohui Fu, Jian Wu, Lina Jiang, Liang Guo // Advanced Materials Research Vols. 183-185 (2011) pp 352-361– Режим доступа : www.scientific.net/AMR.183-185.352– Загл. с экрана. – Опубликовано 2011 г.
- 70 Tong Zhengong. Study on the Integrated Vortex-Grid Clarification Process and Its Application [Электронный ресурс] / Tong Zhengong // Advanced Materials Research Vols. 183-185 (2011) pp 2115-2119 – Режим доступа : www.scientific.net/AMR.183-185.2115– Загл. с экрана. – Опубликовано 2011 г.
- 71 Wei Tang. Fermentation Properties of Waste Activated Sludge in an Enriched NO₃⁻-N System [Электронный ресурс] / Wei Tang, Yongzhen Peng, Liangchang Zhang, Shuying Wang // Advanced Materials Research Vol. 281 (2011) pp 96-100– Режим доступа : www.scientific.net/AMR.281.96– Загл. с экрана. – Опубликовано 2011 г.
- 72 Xi Tian. Experimental study on activated sludge form sewage treatment of different oxygen gradient reactor [Электронный ресурс] / Xi Tian, Dejun Bian, Qingkai Ren, Hong Qu, Liguo Wan, Yan Zuo // Advanced Materials Research Vols. 374-377 (2012) pp 1054-1058– Режим доступа : www.scientific.net/AMR.374-377.1054– Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 73 HE Caiyan. Study on Simultaneous Nitrification and Denitrification with Biofilm for

- Chemical Wastewater [Электронный ресурс] / HE Caiyan, XU Yan, CHEN Yanyan, Yu sheng, LIU Jingming // Advanced Materials Research Vols. 396-398 (2012) pp 1944-1949– Режим доступа : www.scientific.net/AMR.396-398.1944– Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 74 Junguo He. Treatment of Tannery Wastewater With Salt Tolerant Bacteria Basing On Different Culture Mediums [Электронный ресурс] / Junguo He, Fei Liu, Baoping Han, Bowei Zhao, Jian Liu // Advanced Materials Research Vols. 403-408 (2012) pp 625-633– Режим доступа : www.scientific.net/AMR.403-408.625 - Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 75 Limin Zhao. Progress and perspectives of microfauna as a powerful method for excess sludge reduction in wastewater treatment [Электронный ресурс] / Limin Zhao, Sen Wen // Advanced Materials Research Vols. 446-449 (2012) pp 2824-2828 – Режим доступа : www.scientific.net/AMR.446-449.2824– Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 76 Jinsheng Liu. The characteristics of the aerobic granular sludge on nitrogen and phosphorus removal simultaneously [Электронный ресурс] / Jinsheng Liu, Yongjiong Ni, Genyuan Jia, Jun Li // Advanced Materials Research Vols. 446-449 (2012) pp 2840-2843– Режим доступа : www.scientific.net/AMR.446-449.2840– Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 77 Dengling Jiang. Performance Analysis of Anaerobic/Anoxic/Oxic (A/A/O) Process Municipal WWTPs [Электронный ресурс] / Dengling Jiang, Guowei Ni, Jingli Jia // Advanced Materials Research Vol. 461 (2012) pp 478-481– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.461.478– Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 78 Hansoo Lee. Automated Precipitate Identification for Sludge Volume Indicator [Электронный ресурс] / Hansoo Lee, Sudaek Kim, Yong Hyun Kim, Jungmin Kim and Sungshin Kim // Advanced Materials Research Vols. 488-489 (2012) pp 1636-1640– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.488-489.1636– Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 79 Yadong GUO. Performance and modeling of a pilot-scale up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) treating pharmaceutical wastewater containing berberine

- [Электронный ресурс] / Yadong GUO, Cuiting FU, Guorong LIU, Chunshuang LI // Advanced Materials Research Vols. 518-523 (2012) pp 2625-2630 – Режим доступа: www.scientific.net/AMR.518-523.2625– Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 80 Chengjin Zhou. Startup of Simultaneous low dissolved oxygen coupled with low F/M system and the Prevention of Sludge Bulking by Acclimating Limited-mineralization Sludge with Higher-concentration [Электронный ресурс] / Chengjin Zhou, Wenjie He, Tiantian Zhang, Haining Tian // Advanced Materials Research Vols. 518-523 (2012) pp 3476-3482– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.518-523.3476– Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 81 Zhang Liqing. Evaluation of flocs size inside the blanket clarifier [Электронный ресурс] / Zhang Liqing, Zhang Gang // Advanced Materials Research Vols. 518-523 (2012) pp 3687-3690– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.518-523.3687– Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 82 Ruijing Su. Determination of Main Components in the Excess Activated Sludge [Электронный ресурс] / Ruijing Su, Dengxin Li // Advanced Materials Research Vol. 534 (2012) pp 249-252– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.534.249– Загл. с экрана. – Опубликовано 2012 г.
- 83 Yafeng Nie. Research Progress: Reduction of Excess Sludge by Ozone in the Sewage Biotreatment Process [Электронный ресурс] / Yafeng Nie, Caihong Lu, Bo Liu, Xiuwen Qu, Xiaobo Bai // Advanced Materials Research Vols. 610-613 (2013) pp 2410-2415– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.610-613.2410– Загл. с экрана. – Опубликовано 2013 г.
- 84 Chen Yingming. Solid Distribution in Clarifier Blanket: Numerical Modeling and Experimental Measurement [Электронный ресурс] / Chen Yingming, Zhang Liqing // Advanced Materials Research Vol. 663 (2013) pp 729-735– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.663.729– Загл. с экрана. – Опубликовано 2013 г.
- 85 Min Xie. Study on Excess Sludge Reduction in Quiescent Condition [Электронный ресурс] / Min Xie, Cong Huang, Xiaobo Liu // Advanced Materials Research Vols. 726-731 (2013) pp 2394-2397 – Режим доступа: www.scientific.net/AMR.726-731.2394– Загл. с экрана. – Опубликовано 2013 г.

- 86 Bingbing Hao. Identification and Characterization of an Aerobic Denitrifier from MBR on Treatment of Aquaculture Waste Water [Электронный ресурс] / Bingbing Hao, Peirong Zhan, YingyingWei, JiangxiongYe // Advanced Materials Research Vols. 864-867 (2014) pp 1816-1821 – Режим доступа: www.scientific.net/AMR.864-867.1816– Загл. с экрана. – Опубликовано 2014 г.
- 87 Zhang Liqing. Full Scale Optimization of Flocs Blanket Process Applied in Ferric Flocs Sludge Treatment [Электронный ресурс] / Zhang Liqing, Zhang Gang // Advanced Materials Research Vols. 864-867 (2014) pp 2100-2103– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.864-867.2100– Загл. с экрана. – Опубликовано 2014 г.
- 88 Liu Meijie. The Effect of Heavy Metal Ion on Microorganism in Activated Sludge [Электронный ресурс] / Liu Meijie, Dong Guori, Wang Jibin // Advanced Materials Research Vols. 926-930 (2014) pp 4377-4380– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.926-930.4377– Загл. с экрана. – Опубликовано 2014 г.
- 89 Zhang Gang. Effects of Operational Condition on Flocs Density in Flocs Blanket [Электронный ресурс] / Zhang Gang, Zhang Liqing // Advanced Materials Research Vols. 864-867 (2014) pp 2104-2107– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.864-867.2104– Загл. с экрана. – Опубликовано 2014 г.
- 90 Di WU. Inhibition and Recovery of Nitrification During theProcess of Sludge Reduction Induced by a Metabolic Uncoupler, 2,6-dichlorophenol (2,6-DCP) [Электронный ресурс] / Di WU, Xing-wang WEN, Hui-ling LIU // Advanced Materials Research Vol. 937 (2014) pp 92-9– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.937.92– Загл. с экрана. – Опубликовано 2014
- 91 Hua Wenqiang. SHARON-anammox process and its application [Электронный ресурс] / Hua Wenqiang, Li Kai, Wu Luhan, Hou Wanbing // Advanced Materials Research Vols. 955-959 (2014) pp 471-474 – Режим доступа: www.scientific.net/AMR.955-959.471– Загл. с экрана. – Опубликовано 2014 г.
- 92 Wei Liu. Effects of heavy metals on the characteristics of microorganisms in activated sludge: A review [Электронный ресурс] / Wei Liu, Jin-hua Tang, Guang-qing Xia // Advanced Materials Research Vol. 1051 (2014) pp 600-604– Режим доступа: www.scientific.net/AMR.1051.600 – Загл. с экрана. – Опубликовано 2014

- 93 Printed in Great Britain : [Текст] : War. Res. - Vol. 27. - No. 12. – 1993. - p. 1707-1714.
- 94 Physical and chemical properties of activated sludge floc andreas d. Andreadakis: [Текст] : Water Resources Division, Department of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Greece (First received January 1992; accepted in revised form April 1993). - p. 1707-1714.
- 95 Нездойминов, В. И. Процессы денитрификации и их роль в деструкции ароматических углеводов. [Текст] / В. И. Нездойминов // Вісник ДонДАБА. Інженерні системи та техногенна безпека в будівництві. Вип. №4 (46), 2004. – С. 36-40.
- 96 Безкровна, М. В. Очищення стічних вод від мінерального азоту в проточних біореакторах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук [Текст] / М. В. Безкровна. – Донецьк, 2009 - 20 с.
- 97 Яковлев, С. В. Канализация [Текст] / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, А. И. Жуков, С. К. Колобанов – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1975 –с. 632.
- 98 Яковлев, С. В. Очистка производственных сточных вод / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов – Москва: Стройиздат, 1979 – 320 с.
- 99 Бельков, В.М. Методы технологии и концепции утилизации углеродсодержащих промышленных и твердых отходов. Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) [Электронный ресурс] / В.М. Бельков. Режим доступа: [http: // www.rambler.ru](http://www.rambler.ru) – Загл. с экрана. – Опубликовано 05.04.10.
- 100 Новиков, О.Н. Утилизация активного ила [Электронный ресурс] / О. Н. Новиков // [http: // www.eco-potenzial.ru](http://www.eco-potenzial.ru) – Загл. с экрана. – Опубликовано 4.11.2011.
- 101 Трунов, П. В. Особенности процесса очистки сточных вод в погружных мембранных биореакторах [Текст] / П.В. Трунов // Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб. – К. : Техніка, 2010. – Вып. 93. – С. 133–137. – (Серия „Технические науки и архитектура”). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eprints.kname.edu.ua/16939/> – Загл. с экрана. – Опубликовано 2010 г.
- 102 Карагяур, А.С. Исследования режимов промывки установки мембранной

- ультрафильтрации : [текст] / А.С. Карагяур, В.А. Сташук, А.В. Чунарев, С.М. Эпоян // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2012. – Вип. 69. – С. 291-295.
- 103 Жибоедов, А. В. Повышение эффективности доочистки сточных вод на фильтрах из нетканых материалов: дис. канд. техн. наук [Текст] / А. В. Жибоедов. - Макеевка, 2015. - 153 с.
- 104 Липатов, С. В. Закономерности обезвоживания осадков биологических очистных сооружений с использованием полиэлектролитов и их смесей с изменяемой гидрофильностью: дис. канд. техн. наук [Текст] / С. В. Липатов. – Волгоград, 2007. - 125 с.
- 105 Шевцов, В. С. Комбинированные сооружения для биологической очистки сточных вод, включающие в себя биореактор с псевдоожиженным слоем носителя активной биомассы и осветлитель. [Текст] / В. С. Шевцов, В. П. Колпакова // Сборник «Инновации. Коммерческая информация ЦНИИ «Румб». – Ленинград, №1, 1990. – 2с.
- 106 Пат. 94152 Україна. МПК C02F 11/00, C02F 11/02. Спосіб обробки осадів міських стічних вод / Нездойминов В.И., Чернишев В.М., Кіжаєв В.Ф., Нудненко А.М.; заявник та володар ДонНАБА. – № а2009 09239; заявл. 08.09.2009; опубл. 11.04.11; Бюл. №7. – 4с.
- 107 Яковлев, С. В. Биохимические процессы в очистке сточных вод. [Текст] / С. В. Яковлев, Т. А. Карюхина – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
- 108 JWPCF, Vol. 45, 1973, N 7
- 109 Храменков, С. В. Современное положение и перспективы развития. [Текст] / С. В. Храменков // Водоснабжение и санитарная техника. – 1996. – No1. – С.3 - 5.
- 110 Данилович Д . А. Перспективные технологии в области обработки осадков сточных вод. [Текст] / Д . А. Данилович, М. Н. Козлов и др. // Водоснабжение и санитарная техника . –1997. – No1. – С. 12-14.
- 111 Олійник, О. Я. Моделювання процесів осадження і зневоднення осадів на мулових майданчиках / О. Я. Олійник, В. Ю. Сорокіна // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравлики. – 2005. – Вип. 4 – С. 54-67.

- 112 Горносталя, С. А. Описание процессов, происходящих в системе «аэротенк – вторичный отстойник», и их физическое моделирование [Текст] / С. А. Горносталя, А. П. Созник // Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб. – К. : Техніка, 2008. – Вып. 81. – С. 133–139.
- 113 Абрамов А. А. Флотационные методы обогащения. [Текст] / А. А. Абрамов – М.: «Недра», 1984. – 383с.
- 114 Роуч, П. Вычислительная гидродинамика. [Текст] / П. Роуч – М.: Мир, 1980. – 616 с.
- 115 Безуглый, В. Ю. Численные методы теории конвективного теплообмена. [Текст] / Безуглый В. Ю., Беляев Н. М. – Киев–Донецк: Вища школа, 1984. – 176 с.
- 116 Гельперин, Н. И. Основы техники псевдоожижения [Текст] / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша – М. – 1967, 203 с.
- 117 Романков, П. Г. Гидромеханические процессы химической технологии. [Текст] / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. 3-е изд., пер. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.
- 118 Грабовский, П.А. Математическая модель фильтрования воды через зернистый слой с убывающей скоростью : [Электронный ресурс] / П.А. Грабовский, Н.А. Гуринчик // Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб. – К. : Техніка, 2007. – Вып. 74. – С. 230–237. – (Серия „Технические науки и архитектура”). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eprints.kname.edu.ua/view/subjects/Vipusk74.html>. – Загл. с экрана. – Опубликовано 2007 г.
- 119 А. Г. Гудков Биологическая очистка городских сточных вод: Учебное пособие. [Текст] / А. Г. Гудков– Вологда: ВоГТУ, 2002. – 127 с.
- 120 Кожинов, В. Ф. Очистка питьевой и технической воды [Текст] / В. Ф. Кожинов 3-е изд., пер. - Москва, Книга по требованию, 1971. – 300 с.
- 121 ФР 1.31.2008.04397 Методика выполнения измерений масоовой концентрации активного ила, Москва, ООО Акварос, 2008г.
- 122 ФР 1.31.2008.04398 Методика выполнения измерений дозы ила по объему и расчету илового индекса, Москва, ООО Акварос, 2008г.

- 123 Яворский, В. А. Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных. Методические указания к лабораторным работам [Текст] / В. А. Яворский – М: Московский физико-технический институт (государственный университет) – 2006. – 43 с.
- 124 Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий : [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский // Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : «Наука», 1976. – 278 с.
- 125 ООО «Экосервис» Техничко-коммерческое предложение на подбор очистного оборудования канализационных очистных сооружений производительностью 48 м³/сут : [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.ecosvc.ru/catalog/Flotatory_FDP.htm. – Загл. с экрана
- 126 Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво : [Текст] / Затверджена Мінекономіки та з питань європейської інтеграції та Мінфіном України 26.09.01, № 218/446. - 32 с. Николаев, В. П. Введение в рыночную экономику строительства : [Текст] / В. П. Николаев - К.: Будівельник, 1991. - 88 с.
- 127 Муравьева Н.В. Теоретические предпосылки снижения избыточного активного ила в аэрационных сооружениях, 1981, № 47, с. 95–102.
- 128 Долобовская, А. С. Об аэробном окислении активного ила. [Текст] / А. С. Долобовская, М. И. Невзоров // Сб. «Очистка сточных вод и обработка осадков», вып. VII, Труды Харьковского отделения водного хозяйства ВНИИ ВОДГЕО. – Харьков: 1977. - 172 с.
- 129 Тетеря, А. И. Установки биологической очистки малых объемов сточных вод «Biotal» : [Текст] / А. И. Тетеря // Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб. – К. : Техніка, 2010. – Вып. 93. – С. 85–93. – (Серия «Технические науки и архитектура»). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://eprints.kname.edu.ua/16926/>. – Загл. с экрана. – Опубликовано 2010 г.
- 130 Simon, Judd The status of membrane bioreactor technology [Текст] / Simon Judd // TRENDS in Biotechnology. - Vol.26. - No.2. - P 109-116.
- 131 Laure, Defrance Contribution of various constituents of activated sludge to membrane

- bioreactor fouling : [Текст] / Laure Defrance, Michel Y. Jaffrin, Bharat Gupta, Patrick Paullier, Valery Geaugey // Bioresource Technology 73 – 2000. - P. 105-112.
- 132 Farshid, Pajoum Shariati Performance of a Novel Hybrid Membrane Bioreactor: Effect of Bacterial Floc Size on Fouling : [Текст] / Farshid Pajoum Shariati, Mohammad Reza Mehrnia, Mohammad Hossien, Sarrafzadeh¹, Sara Rezaee, Parya Mohtasham¹, Christelle Wisniewski, Marc Heran // Chemical engineering transactions 01/2011; 24: P. 781-786. DOI:10.3303/CET1124131.
- 133 Пат. 4295 Україна. C02F 1/00, 3/00. Пристрій для очищення стічних вод активним мулом / В.І. Нездоймінов, Г.М. Береза, А.Ю. Разумов, заявник та володар Нездоймінов В.І., Береза Г.М., Разумов А.Ю. – № 20040402868; заявл. 20.04.2004; опубл. 17.01.2005, Бюл. №1.– 1с.
- 134 Чернышев, В.Н. Исследования работы илоотделителя в технологии глубокой минерализации осадка [Текст] / В.Н. Чернышев, В.И. Зятина // Вісник. Будівлі та конструкції із застосуванням нових матеріалів та технологій, Випуск 2013-3(101), Макеевка, 2013. – С. 85-89.
- 135 Чернышев, В.Н. Технология работы илоотделителя в технологии глубокой минерализации осадка [Текст] / В.Н. Чернышев, В.И. Зятина // Вісник ДонНАБА, Випуск 2013-5(103) , Макеевка, 2013. – С. 21-25.
- 136 Чернышев, В.Н. Исследование илоотделения во взвешенном слое осадка в условиях повышенных концентраций активного ила [Текст] / В.Н. Чернышев, В.И. Зятина // Науковий вісник будівництва №75 Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, - 2014. С. 95-100.
- 137 Nezdoiminov, Viktor. Research of Processes of a Deep Aerobic Mineralization of Activated Sludge [Text] / Viktor Nezdoiminov, Vitalii Ziatina, Vitalii Rozhkov, Darya Nemova // Procedia Engineering, Volume 117, 2015, Pages 1022–1027 – Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815018676> – Загл. с экрана. – Опубликовано 2015.
- 138 Зятина, В. И. Движения жидкости в колонне осветлителя во взвешенном слое осадка [Текст] / В. И. Зятина // Вісник ДонНАБА, вип. 2015-5(115) «Інженерні системи та техногенна безпека»,), Макеевка, 2015. – С. 16-22.

- 139 Пат. 101528 Украина, МПК C02F 11/02. Способ илоотделения для минерализованного активного ила [Текст] / В. И. Нездойминов, В. И. Зятина, В. Н. Чернышев, П. А. Дмитриев, И. С. Голдин; заявитель и владелец патента В. И. Нездойминов, В. И. Зятина, В. Н. Чернышев, П. А. Дмитриев, И. С. Голдин. – № u 2014 05525; заявлено 23.05.2014; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18. – 4 с.
- 140 Ибадулаев, Ф.И. Флотационные методы и технологии очистки воды и опыт их применения [Текст] / Ф. И. Ибадулаев, Обз. инф. сер. Химия и нефтепереработка. Азерб. НИИ НТИ техн.-экон. исслед. Госплана АзССР.- Баку, 1990.- 24с.
- 141 Сколубович, Ю.Л. Моделирование нестационарных характеристик движения частиц контактной массы в реакторе - осветлителе [Текст] / Ю.Л. Сколубович, М.С. Соппа, Синеева Н.В // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015.- № 7 (679) . – С. 38-43.
- 142 Колпакова, В. П. Опыт применения осветлителей со взвешенным слоем осадка для очистки городских сточных вод [Текст] / В. П. Колпакова // Известия научно-технического общества «КАХАК». – 2010. – № 5(30). –С. 127–129.
- 143 Первов, Г.Г. О выборе диаметра модели осветлителя со слоем взвешенного осадка [Текст] / Г.Г. Первов // Труды ВНИИ ВОДГЕО. – М: 1963. – № 3. –С.26-43.
- 144 Клячко, В.А. Очистка природных вод [Текст] / В.А. Клячко, И.Э. Апельцин // М: Стройиздат. – 1971.
- 145 Минц, Д.М. Фильтры АКХ и расчеты промывки скорых фильтров [Текст] / Д.М. Минц, С.А. Шуберт // Л: Издательство Мин.ком. хоз.РСФСР. – 1951. –174 с.
- 146 Исмаилов, Э. К. К вопросу очистки сточных вод с высоким содержанием взвешенных веществ [Электронный ресурс] / Э. К. Исмаилов, М. К. Оспанулова, А. К. Киргизбаев, А. С. Куйчиев. // arch.kyrlibnet.kg/uploads/kgusta Ismailova E. K., Ospankulova M. K., Kirgizbaev A. K., Kujchiev A. S.pdf

Приложение А

Движение жидкости в колонне осветлителя во взвешенном слое осадка

В работе рассмотрена циркуляция жидкости в колонне осветлителя со взвешенным слоем осадка применимо к циркуляции смеси обрабатываемого активного ила и иловой воды (Рис. А.1). Циркуляция жидкости позволяет существенно снизить концентрацию активного ила во взвешенном слое и, соответственно, увеличить производительность сооружения в целом. Так же возникла необходимость определения зоны влияния места входа в илоотделитель на массообменные процессы во взвешенном слое.

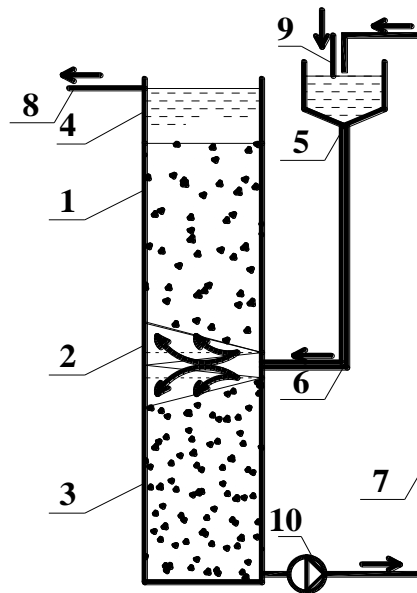


Рис. А.1. Корпус осветлителя со взвешенным слоем жидкости:

1 – взвешенный слой минерализованного активного ила; 2 – ввод и распределение потоков в илоотделителе; 3 – осаждение и отвод минерализованного активного ила; 4 – защитный слой илоотделителя; 5 – сооружение минерализации активного ила; 6 – подача активного ила на минерализацию; 7 – рециркуляция активного ила; 8 – отвод осветленной воды перед аэротенками; 9 – подача активного ила на минерализацию; 10 – иловый насос.

Целью данной работы является математическое моделирование процесса распределения обрабатываемой смеси, формирование восходящих и

нисходящих потоков, определение кинетических параметров газожидкостной смеси на входе в сооружение илоотделения.

Динамика потоков смеси обрабатываемого осадка в жидкой среде, при входе в сооружение по илоотделению во взвешенном слое осадка, представляет огромный интерес к пониманию процессов, протекающих на границе раздела верхней и нижней зон илоотделителя. Процесс на данной конструкции илоотделителей не изучен должным образом.

На основании лабораторных экспериментов на смоделированной установке осветлителя со взвешенным слоем осадка, приведенном выше, установлено оптимальное значение восходящей и нисходящей скоростей смеси, при строго фиксированной нагрузке. Для различных нагрузок данные показатели различны. Предварительные поисковые исследования легли в основу данного математического моделирования, но конечной целью представляется определение стационарного решения при работе с любыми начальными параметрами.

Постановка задачи. Уравнение Навье–Стокса для вертикальной и горизонтальной составляющих размерных скоростей:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} + \bar{\nu} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} \right), \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} + \bar{\nu} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (1b)$$

Здесь и далее размерные величины обозначены чертой сверху (только те, которые используются и в безразмерном виде).

Имеем два уравнения с тремя неизвестными \bar{u} , \bar{v} , \bar{P} . Чтобы замкнуть систему, к уравнениям Навье–Стокса присоединяют уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0. \quad (2)$$

Начальные условия не имеют существенного значения, поскольку ищется стационарное решение.

Решение задачи. Продифференцировав (2а) по y и (2b) по x , исключив давление и определив вихрь как

$$\bar{\zeta} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}, \quad (3)$$

получим уравнение переноса вихря

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{t}} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}} - \bar{v} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}} + \bar{v} \left(\frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (4a)$$

Это же уравнение в консервативной форме [2]

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{t}} = -\frac{\partial(\bar{u} \bar{\zeta})}{\partial \bar{x}} - \frac{\partial(\bar{v} \bar{\zeta})}{\partial \bar{y}} + \bar{v} \left(\frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (4b)$$

Консервативная форма записи конечно-разностного уравнения обеспечивает выполнение интегральных законов сохранения, справедливых для исходных дифференциальных уравнений.

Определяя функцию тока $\bar{\psi}$ соотношениями

$$\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial y} = \bar{u}, \quad \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial x} = -\bar{v}, \quad (5)$$

уравнение (3) записываем в виде

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{y}^2} = \bar{\zeta}. \quad (6)$$

Введя безразмерные величины $u = \bar{u} / \bar{U}_0$, $v = \bar{v} / \bar{U}_0$, $x = \bar{x} / \bar{L}$, $y = \bar{y} / \bar{L}$, $\zeta = \bar{\zeta} \bar{L} / \bar{U}_0$, $t = \bar{t} \bar{U}_0 / \bar{L}$, приведем уравнения (4b) и (3) к безразмерному виду:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial(u\zeta)}{\partial x} - \frac{\partial(v\zeta)}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right), \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (8)$$

Компьютерная программа реализует итерационный процесс метода Гаусса–Зейделя. Направление обхода узлов координатной сетки циклически изменяется, как показано на рис.А. 2.

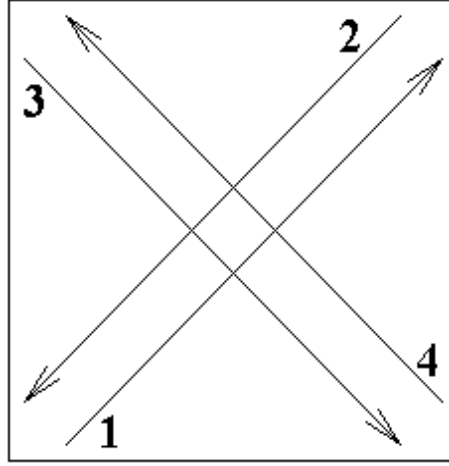


Рис. А. 2. Последовательность
обхода узлов координатной сетки.

Уравнение (7) в конечных разностях (верхний индекс при ζ , ψ , u , v – номер шага времени, нижние индексы – номера ячеек: первый – по горизонтали, второй – по вертикали):

при $i \uparrow, j \uparrow$

$$\begin{aligned} \zeta_{i,j}^{n+1} = & \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \\ & + \frac{\tau}{\text{Re}} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^{n+1}}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^{n+1}}{\eta^2} \right); \end{aligned} \quad (9a)$$

при $i \downarrow, j \downarrow$

$$\begin{aligned} \zeta_{i,j}^{n+1} = & \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \\ & + \frac{\tau}{\text{Re}} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^n}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^n}{\eta^2} \right); \end{aligned} \quad (9b)$$

при $i \uparrow, j \downarrow$

$$\begin{aligned} \zeta_{i,j}^{n+1} = & \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \\ & + \frac{\tau}{\text{Re}} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^{n+1}}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^n}{\eta^2} \right); \end{aligned} \quad (9c)$$

при $i \downarrow, j \uparrow$

$$\begin{aligned}\zeta_{i,j}^{n+1} = & [\zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi}(u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta}(v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \\ & + \frac{\tau}{\text{Re}} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^n}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^{n+1}}{\eta^2} \right).\end{aligned}\quad (9d)$$

Функцию тока ψ находим итерационным методом Ричардсона

$$\psi_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{2(1+\beta^2)} (\psi_{i+1,j}^k + \psi_{i-1,j}^k + \beta^2 \psi_{i,j+1}^k + \beta^2 \psi_{i,j-1}^k - \xi^2 \zeta_{i,j}^k), \quad (10)$$

где $\beta = \xi/\eta$ – отношение размеров сетки.

Начальные условия берем в виде

$$u_{i,j}^0 = 0; \quad v_{i,j}^0 = 0; \quad \zeta_{i,j}^0 = 0; \quad \psi_{i,j}^0 = 0. \quad (11)$$

Наиболее сложным моментом в решении задачи является задание граничных условий [2]. Функция тока для стенок (условие с прилипанием): для участка abc (рис. 3) $\psi_{i,j} = 0$, для участка ABC $\psi_{i,j} = 1$, для участка Dd $\psi_{i,j} = 1 - Q_u/Q_d$, где Q_u – расход в колонне осветлителя выше трубы входа, Q_d – расход в колонне осветлителя ниже трубы входа. Вихрь для стенок: для участка ab $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j})/\eta^2$, для участка AB $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i,j-1} - \psi_{i,j})/\eta^2$, для участка Dd $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i-1,j} - \psi_{i,j})/\xi^2$, для участков BC и bc $\zeta_{i,j} = 2(\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j})/\xi^2$. Вихрь для угловой точки B в разностном уравнении, записанном для узла $(i, j-1)$, $\zeta_{i,j} = 2\psi_{i,j-1}/\eta^2$, а в разностном уравнении, записанном для узла $(i+1, j)$, $\zeta_{i,j} = 2\psi_{i+1,j}/\xi^2$. Вихрь для угловой точки b в разностном уравнении, записанном для узла $(i, j+1)$, $\zeta_{i,j} = 2\psi_{i,j+1}/\eta^2$, а в разностном уравнении, записанном для узла $(i+1, j)$, $\zeta_{i,j} = 2\psi_{i+1,j}/\xi^2$. На входе Aa функция тока $\psi_{i,j} = \psi_{i+1,j}$. На выходе CD : функция тока $\psi_{i,j} = 2\psi_{i,j-1} - 2\psi_{i,j-2}$, вихрь $\zeta_{i,j}^{n-1} = \zeta_{i,j-1}^{n-1} = 0$. На выходе cd : функция тока $\psi_{i,j} = 2\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j+2}$, вихрь $\zeta_{i,j}^{n-1} = \zeta_{i,j+1}^{n-1} = 0$.

Уравнение решается методом последовательных приближений. Компьютерная программа составлена в среде Delphi на языке Object Pascal.

Неустойчивости решения, зарождающиеся на входной границе, распространяются вниз по потоку, а неустойчивости, зарождающиеся на выходной границе – вверх по потоку. Численное решение даёт результаты, согласующиеся с физическим экспериментом, лишь в том случае, когда вход и выход потока находятся достаточно далеко от интересующей нас области, в идеале на бесконечности. На рис. А.3 показаны линии тока, получаемые при условии, что начальные точки взяты не у границы координатной сетки, соответствующей входу потока ($i = 0$), а на удалении 10 ячеек от неё, с одинаковым шагом $L/10$ по вертикали. Следует также принимать во внимание наличие искажений, вызванных неустойчивостями на выходах.

Начальные расчетные параметры взяты исходя из опытных данных лабораторно смоделированного осветлителя со взвешенным слоем осадка. Приняты наиболее оптимальные и устойчивые параметры.

Параметры расчёта:

$L = D_s = 0,013$ m – характерный размер (диаметр подводящей трубы);

$D_c = 0,095$ m – диаметр колонны осветлителя;

$Q = 0,25$ m³/h = $6,94 \cdot 10^{-5}$ m³/s – расход через подводящую трубу;

$\mu = 1,30 \cdot 10^{-3}$ Pa·s – динамическая вязкость;

$\rho = 1000$ kg/m³ – плотность;

$e = 1/1000$ – относительная погрешность итераций;

$t_i = 200$ μs – интервал времени между точками на линии тока;

$Q_d/Q = 75$ % – доля входного расхода, идущая вниз;

$U_0 = U_s = 523$ mm/s – характерная скорость (скорость в подводящей трубе);

$U_d = 42,9$ mm/s – скорость в нижней части колонны;

$U_u = 14,3$ mm/s – скорость в верхней части колонны;

$\nu = 1,30 \cdot 10^{-6}$ m²/s – кинематическая вязкость;

$Re_s = U_s D_s / \nu = 5232$ – число Рейнольдса для подводящей трубы;

$Re_d = U_d D_d / \nu = 4186$ – число Рейнольдса для нижней части колонны;

$Re_u = U_u D_u / \nu = 1046$ – число Рейнольдса для верхней части колонны;

$Fr_s = U_s^2 / (gD_s) = 2,15$ – число Фруда для подводящей трубы;

$Fr_d = U_d^2 / (gD_d) = 0,00352$ – число Фруда для нижней части колонны;

$Fr_u = U_u^2 / (gD_u) = 0,00022$ – число Фруда для верхней части колонны (up);

$q_a = 20$ – число шагов координаты вдоль диаметра подводящей трубы;

$q_l = 10$ – число шагов координаты вдоль длины подводящей трубы;

$\xi = 0,0143$ – безразмерный шаг координаты вдоль оси x ;

$\bar{\xi} = \xi \bar{L} = 0,0143 \cdot 13 \text{ mm} = 0,186 \text{ mm}$ – размерный шаг координаты вдоль оси x ;

$\eta = 0,0500$ – безразмерный шаг координаты вдоль оси y ;

$\bar{\eta} = \eta \bar{L} = 0,0500 \cdot 13 \text{ mm} = 0,650 \text{ mm}$ – размерный шаг координаты вдоль оси y ;

$\tau = 0,000179$ – безразмерный шаг итераций;

$\psi_L = 1,00$ – функция тока на левой стенке потока в подводящей трубе;

$\psi_o = 0,75$ – функция тока в правой части колонны;

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ – плотность жидкости;

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – ускорение свободного падения.

Число шагов координатной сетки по горизонтали 80, по вертикали – 80, шаг координаты вдоль оси x – 0,186 mm, шаг координаты вдоль оси y – 0,65 mm. В формулы (9) подставляем значение числа Рейнольдса $Re = Re_s = 5232$.

Выводы. Анализ результатов расчёта, представленных на графике рис. А. 3, показывает, что на входе потока в колонну осветлителя возникает интенсивное вихревое движение жидкости, способствующее активному её перемешиванию. Это в значительной степени способствует обновлению взвешенного слоя, исключая появление застойных и неподвижных зон. Так же определены соотношения восходящее-нисходящих потоков, характеризующих работу осветлителя со взвешенным слоем осадка. Установлены зоны влияния от места подачи осадка в илоотделитель до границы зеркала взвешенного слоя.

Определен режим движения смеси на входе в сооружение, характеризуемый числом Рейнольдса $Re = 5232$, режим движения турбулентный.

В самом взвешенном слое, в нижней его части, $Re = 1046$ – ламинарный режим движения смеси, число Рейнольдса кверху взвешенного слоя снижается до 20...40.

Разработанная компьютерная программа позволяет подобрать параметры и режимы работы осветлителя на стадии проектирования. А именно установить граничные показатели восходящей и нисходящей скорости потока обрабатываемой смеси.

Обозначения

Если используются размерные и безразмерные значения величины, то размерная величина выделяется верхним подчёркиванием: D – диаметр, м; e – относительная погрешность итераций; Fr – число Фруда; g – ускорение свободного падения, m/s^2 ; L, \bar{L} – характерный размер; Q – расход, m^3/s ; q – число шагов координаты; Re – число Рейнольдса; t, \bar{t} – время, с; U_0, \bar{U}_0 – характерная скорость, м/с; u, \bar{u} – горизонтальная составляющая скорости, м/с; v, \bar{v} – вертикальная составляющая скорости, м/с; x, y, \bar{x}, \bar{y} – координаты, м; β – отношение размеров сетки; $\zeta, \bar{\zeta}$ – вихрь, s^{-1} ; $\bar{\eta}, \eta$ – шаг координаты по вертикали, м; $\bar{\nu}$ – кинематическая вязкость, m^2/s ; μ – динамическая вязкость, $Pa \cdot s$; $\xi, \bar{\xi}$ – шаг координаты по горизонтали, м; $\bar{\rho}$ – плотность, kg/m^3 ; τ – шаг итераций по времени, с; $\psi, \bar{\psi}$ – функция тока, m^2/s . Индексы: а – across; с – колонна осветлителя (column); d – часть колонны осветлителя ниже трубы ввода (down); i – интервал времени (interval); i, j – номера расчётных ячеек по горизонтали и по вертикали; L – левый (left); l – длина (length); k – номер итерации; n – номер шага времени; o – стенка колонны противоположная трубе ввода (opposite); s – подводящая труба (supply); u – часть колонны осветлителя выше трубы ввода (up).

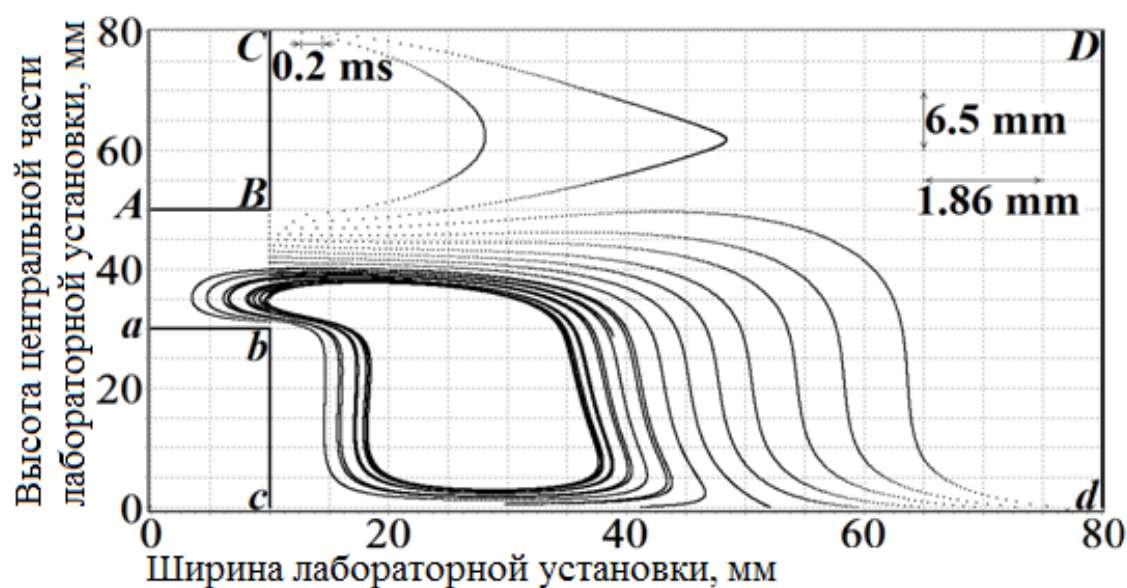


Рис. А.3. Линии тока. Начальные точки взяты на входе в колонну осветителя с одинаковым шагом по вертикали. Масштаб координаты вдоль оси x – 1,86 mm на 10 шагов координатной сетки, масштаб координаты вдоль оси y – 6,5 mm на 10 шагов координатной сетки, метки времени через 0,2 ms.

Анализ результатов расчёта, представленных на графике (Рис. А. 3), показывает, что на входе потока в колонну осветителя возникает интенсивное вихревое движение жидкости, способствующее активному её перемешиванию. Разработанная компьютерная программа позволяет подобрать параметры и режимы работы осветителя на стадии проектирования.

Приложение Б

Пример расчета массового баланса в лабораторной установке илоотделителя со взвешенным слоем осадка

С помощью закона сохранения массы можно сформулировать, что в сооружении илоотделения, при установившемся режиме движения, в различных точках концентрации активного ила отличаются, но сумма массовой их части соответствует начальной массе загружаемого в илоотделитель активного ила.

При проведении лабораторного эксперимента исследовались данные изменения концентраций активного ила для различных точек в зависимости от гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя.

Расчетная схема массового баланса приведена на рис. Б.1

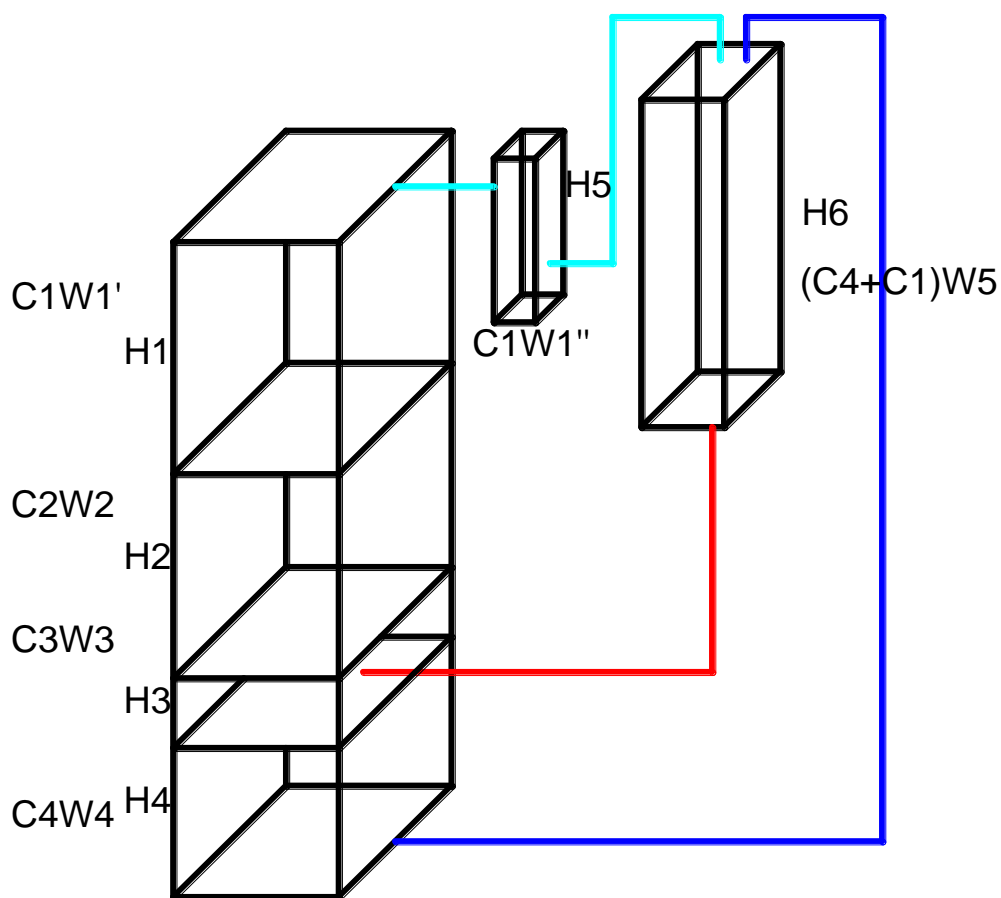


Рис. Б.1 Схема лабораторной установки илоотделения для проверки массового баланса

Таким образом, представив лабораторную установку илоотделения во взвешенном слое осадка как совокупность расчетных блоков, можно определить вид зависимости, определяющей массу активного ила во всем сооружении (1)

$$C_1 \cdot W_1 + C_2 \cdot W_2 + C_3 \cdot W_3 + C_4 \cdot W_4 + (C_1 + C_4)W_5 = M \quad (1)$$

где C – концентрация активного ила в определенной точке лабораторной установки, г/дм³;

W – объем зоны лабораторной установки имеющий данную концентрацию, г/дм³.

Исходная концентрация активного ила, которым заполнялась лабораторная установка, составила 4,9 г/дм³, полный объем лабораторной установки составлял 0,024 м³. Соответственно, полная исходная масса загружаемого активного ила составила $M = 0,118629$ кг.

Расчет массового состава активного ила приведен в таблице А.1.

Наименование	Концентрация г/дм ³	Наименование	Объем, м ³	Наименование	Высота, м
--------------	-----------------------------------	--------------	--------------------------	--------------	-----------

(при гидравлической нагрузке 0,5 м³/м²ч)

C_1	0,035	$W_1 = W'_1 + W''_1$	0,00354	H_1	0,3
C_2	3,87	W_2	0,00946	H_2	1,1
C_3	5,76	W_3	0,00172	H_3	0,2
C_4	6,12	W_4	0,00774	H_4	0,9
		$W_5 = (W_1 + W_4)$	0,00175	H_5	0,1
		сумма	0,02421	H_6	0,7

$M_1 = 0,104781$ (кг)

(при гидравлической нагрузке $0,58 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$)

C_1	0,12	W_1	0,00354	H_1	0,3
C_2	4,03	W_2	0,00946	H_2	1,1
C_3	5,24	W_3	0,00172	H_3	0,2
C_4	6,10	W_4	0,00774	H_4	0,9
		$W_5 =$ $(W_1 + W_4)$	0,00175	H_5	0,1
		сумма	0,02421	H_6	0,7

$M_1 = 0,10566 \text{ (кг)}$

(при гидравлической нагрузке $0,87 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$)

C_1	0,16	W_1	0,0044	H_1	0,4
C_2	4,58	W_2	0,00946	H_2	1,1
C_3	5,00	W_3	0,00172	H_3	0,2
C_4	6,10	W_4	0,00688	H_4	0,8
		$W_5 =$ $(W_1 + W_4)$	0,00175	H_5	0,1
		сумма	0,02421	H_6	0,7

$M_1 = 0,107446 \text{ (кг)}$

(при гидравлической нагрузке $1,31 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$)

C_1	0,139	W_1	0,0044	H_1	0,4
C_2	4,68	W_2	0,00946	H_2	1,1
C_3	4,90	W_3	0,00172	H_3	0,2
C_4	5,58	W_4	0,00688	H_4	0,8
		$W_5 =$ $(W_1 + W_4)$	0,00175	H_5	0,1
		сумма	0,02421	H_6	0,7

$M_1 = 0,101711 \text{ (кг)}$

(при гидравлической нагрузке $2,62 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$)

C_1	0,192	W_1	0,00354	H_1	0,3
C_2	4,75	W_2	0,00946	H_2	1,1
C_3	4,79	W_3	0,00172	H_3	0,2
C_4	5,39	W_4	0,00774	H_4	0,9
		$W_5 =$ $(W_1 + W_4)$	0,00175	H_5	0,1
		сумма	0,02421	H_6	0,7

$M_1 = 0,105341 \text{ (кг)}$

(при гидравлической нагрузке $3,81 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$)

C_1	0,212	W_1	0,00354	H_1	0,3
C_2	4,98	W_2	0,00946	H_2	1,1
C_3	4,64	W_3	0,00086	H_3	0,1
C_4	5,18	W_4	0,0086	H_4	1
		$W_5 =$ $(W_1 + W_4)$	0,00175	H_5	0,1
		сумма	0,02421	H_6	0,7

$M_1 = 0,105836 \text{ (кг)}$

Данные таблицы А.1 свидетельствуют о достаточной сходимости показателей массы активного ила в сооружении илоотделения во взвешенном слое осадка, разница массы загружаемого активного ила от активного ила в сооружении не превышает 14%.

Приложение В

Обработка результатов экспериментов по определению вида зависимости, описывающей работу илоотделителя со взвешенным слоем в программной среде DataFit

DataFit version 9.1.32

Results from project "Untitled1"

Equation ID: $a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d$

Model Definition:

$Y = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d$

Number of observations = 51

Number of missing observations = 0

Solver type: Linear

Sum of Residuals = -8,21565038222616E-14

Average Residual = -1,61091183965219E-15

Residual Sum of Squares (Absolute) = 0,338056433282168

Residual Sum of Squares (Relative) = 0,338056433282168

Standard Error of the Estimate = 8,48097286272828E-02

Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9518065256

Proportion of Variance Explained = 95,18065256%

Adjusted coefficient of multiple determination (R_a^2) = 0,9487303464

Durbin-Watson statistic = 0,79975454562403

Regression Variable Results

Variable	Value	Standard Error	t-ratio	Prob(t)
a	0,616720376705524	2,04018870408852E-02	30,22859481	0,0
b	-2,35146033526516E-02	8,26075653805825E-02	-0,284654356	0,77716
c	0,484731987335695	0,182282004720268	2,659242135	0,01067
d	-1,1013552211893	0,181633553513712	-6,063611045	0,0

68% Confidence Intervals

Variable	Value	68% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	0,616720376705524	2,05059366647937E-02	0,59621444004073	0,637226313370318
b	-2,35146033526516E-02	8,30288639640234E-02	-0,106543467316675	5,95142606113719E-02
c	0,484731987335695	0,183211642944341	0,301520344391354	0,667943630280036
d	-1,1013552211893	0,182559884636632	-1,28391510582593	-0,918795336552671

90% Confidence Intervals

Variable	Value	90% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	0,616720376705524	3,42323262659012E-02	0,582488050439623	0,650952702971425
b	-2,35146033526516E-02	0,138607233952079	-0,162121837304731	0,115092630599428
c	0,484731987335695	0,305850975720138	0,178881011615557	0,790582963055833
d	-1,1013552211893	0,304762939440657	-1,40611816062996	-0,796592281748645

95% Confidence Intervals

Variable	Value	95% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	0,616720376705524	4,10424761601487E-02	0,575677900545375	0,657762852865673
b	-2,35146033526516E-02	0,166181639276118	-0,189696242628769	0,142667035923466
c	0,484731987335695	0,366696708895763	0,118035278439932	0,851428696231458
d	-1,1013552211893	0,365392219603534	-1,46674744079284	-0,735963001585768

99% Confidence Intervals

Variable	Value	99% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	0,616720376705524	5,47709059499603E-02	0,561949470755564	0,671491282655484
b	-2,35146033526516E-02	0,221768270020712	-0,245282873373363	0,19825366666806
c	0,484731987335695	0,489354269872032	-4,62228253633656E-03	0,974086257207727
d	-1,1013552211893	0,487613437762911	-1,58896865895221	-0,613741783426391

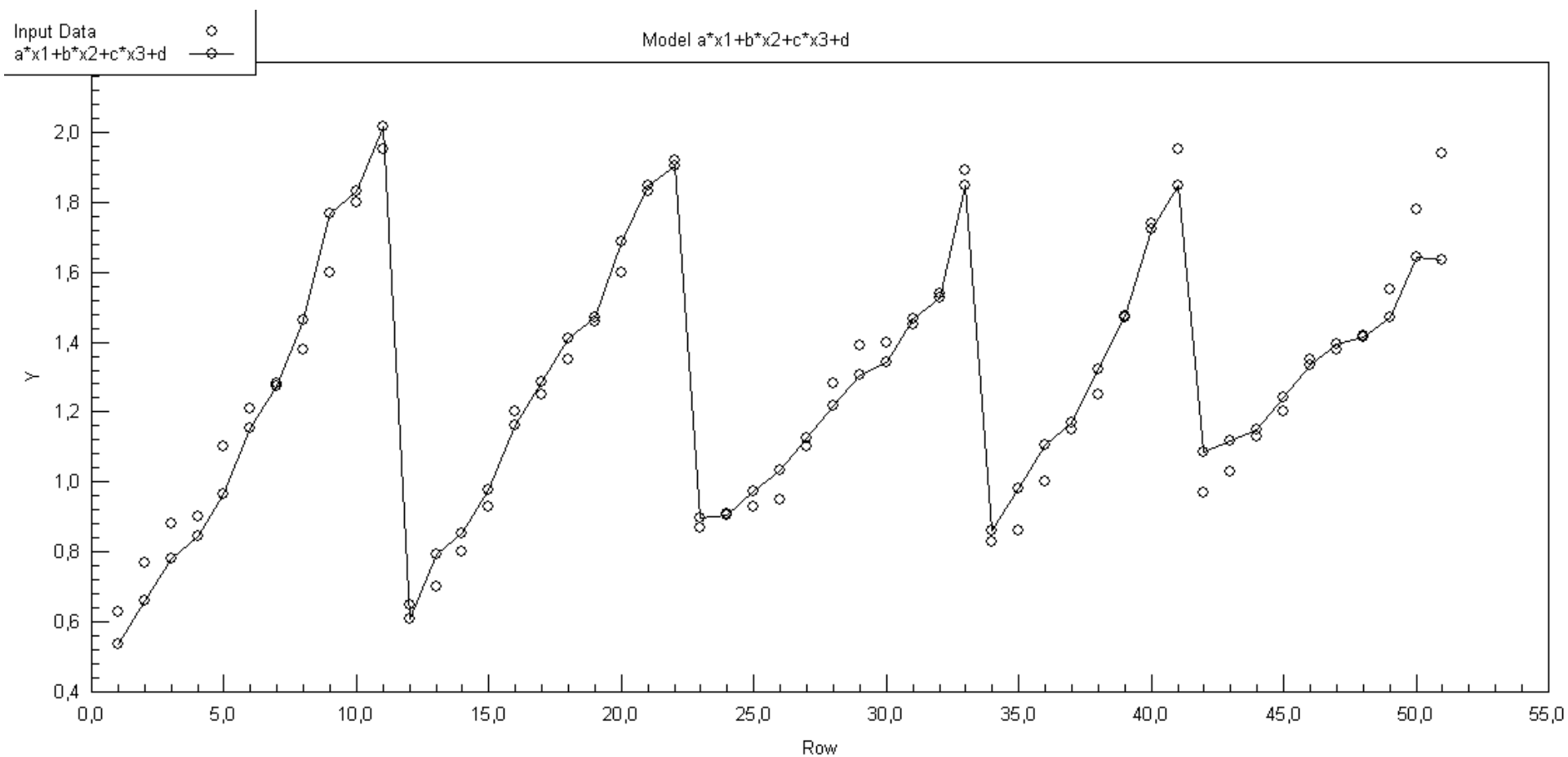


Рис. В.1. Графическое отображение функции $Y = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d$.

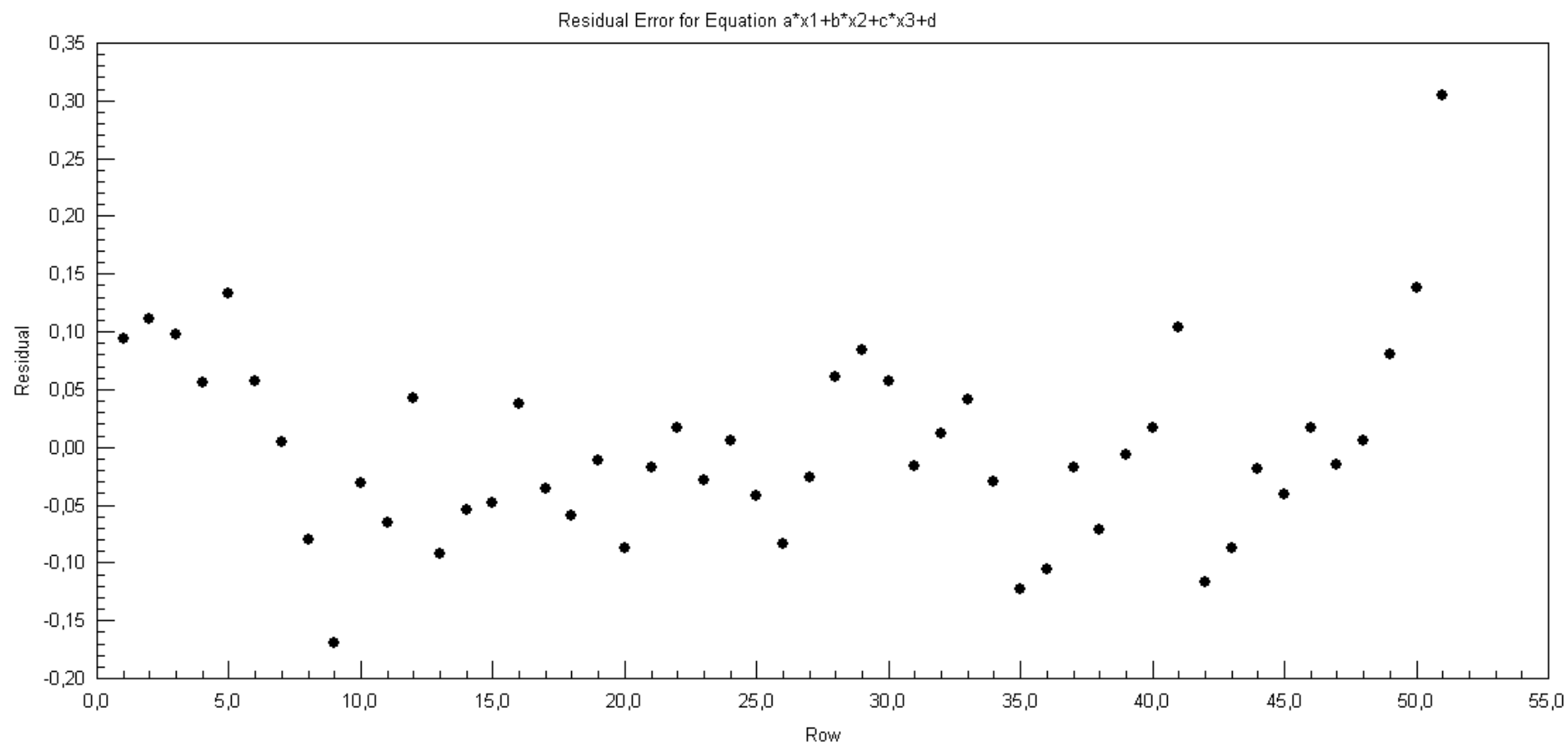


Рис. В.2. Распределение остаточной ошибки статистической обработки функции $Y = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d$.

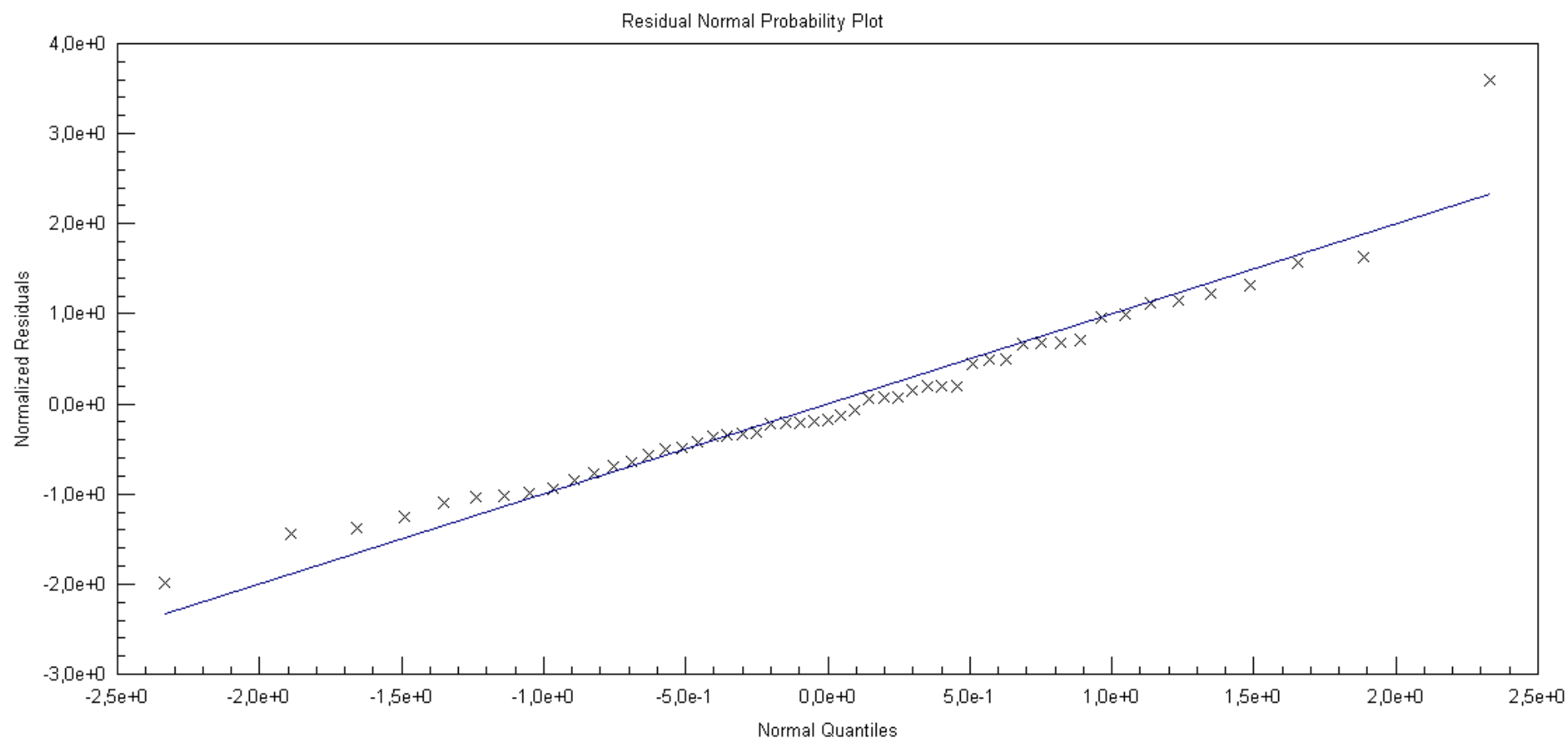


Рис. В.3 Распределение регрессионных остатков функции $Y = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + d$.

Приложение Г

Обработка результатов экспериментов по определению вида зависимости, описывающей работу илоотделителя со взвешенным слоем в программной среде DataFit

DataFit version 9.1.32

Results from project "Untitled1"

Equation ID: exp

Model Definition:

$Y = a \cdot \exp(b \cdot x)$

Number of observations = 36

Number of missing observations = 0

Solver type: Nonlinear

Nonlinear iteration limit = 250

Diverging nonlinear iteration limit = 10

Number of nonlinear iterations performed = 6

Residual tolerance = 0,0000000001

Sum of Residuals = -3,70668807183394E-04

Average Residual = -1,02963557550943E-05

Residual Sum of Squares (Absolute) = 9,11809926685069E-03

Residual Sum of Squares (Relative) = 9,11809926685069E-03

Standard Error of the Estimate = 1,63761836274967E-02

Coefficient of Multiple Determination (R^2) = 0,9924991556

Proportion of Variance Explained = 99,24991556%

Adjusted coefficient of multiple determination (R_a^2) = 0,9922785425

Durbin-Watson statistic = 2,20641843421044

Regression Variable Results

Variable	Value	Standard Error	t-ratio	Prob(t)
a	2,1582638196986	5,03326896476363E-02	42,879962	0,0
b	-2,2525508168499	4,15572454062773E-02	-54,20356414	0,0

68% Confidence Intervals

Variable	Value	68% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	2,1582638196986	5,07957503923946E-02	2,10746806930621	2,20905957009099
b	-2,2525508168499	4,19395720640151E-02	-2,29449038891395	-2,2106112447859

90% Confidence Intervals

Variable	Value	90% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	2,1582638196986	8,51075449251883E-02	2,07315627477341	2,24337136462379
b	-2,2525508168499	7,02691462574743E-02	-2,32281996310741	-2,1822816705924

95% Confidence Intervals

Variable	Value	95% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	2,1582638196986	0,102286091901927	2,05597772779667	2,26054991160053
b	-2,2525508168499	8,44526341146367E-02	-2,33700345096458	-2,1680981827353

99% Confidence Intervals

Variable	Value	99% (+/-)	Lower Limit	Upper Limit
a	2,1582638196986	0,137327710434611	2,02093610926399	2,29559153013321
b	-2,2525508168499	0,113384788366487	-2,36593560521643	-2,1391660284834

Variance Analysis

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Regression	1	1,20649160265453	1,20649160265453	4498,822977

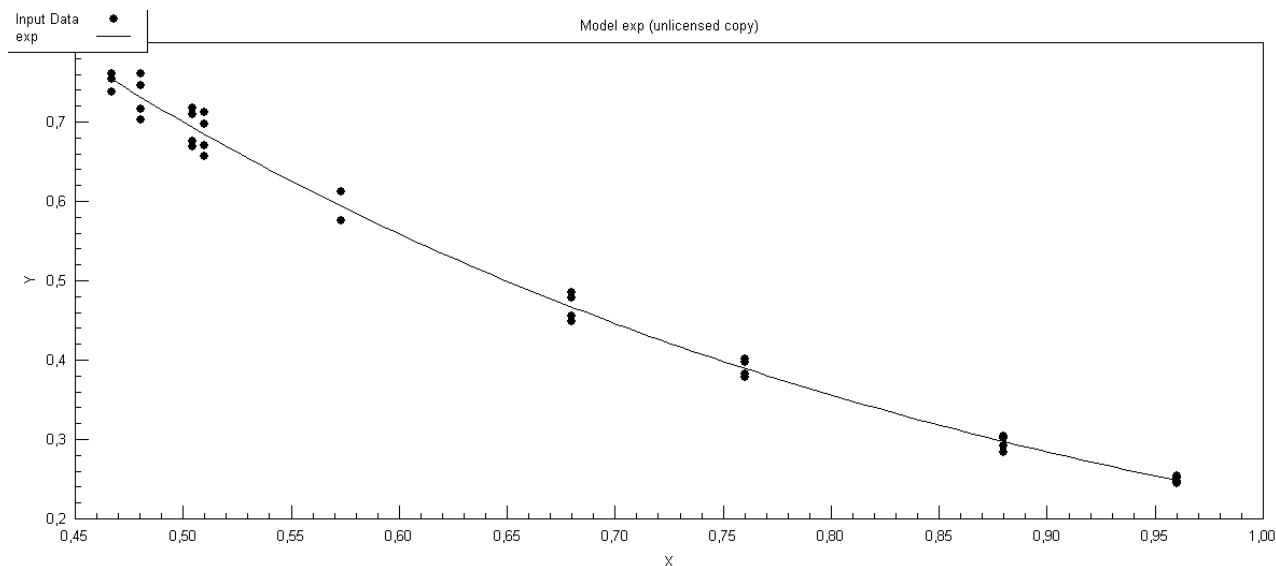


Рис. В.4. Графическое отображение функции $Y = a \cdot \exp^{b \cdot X}$.

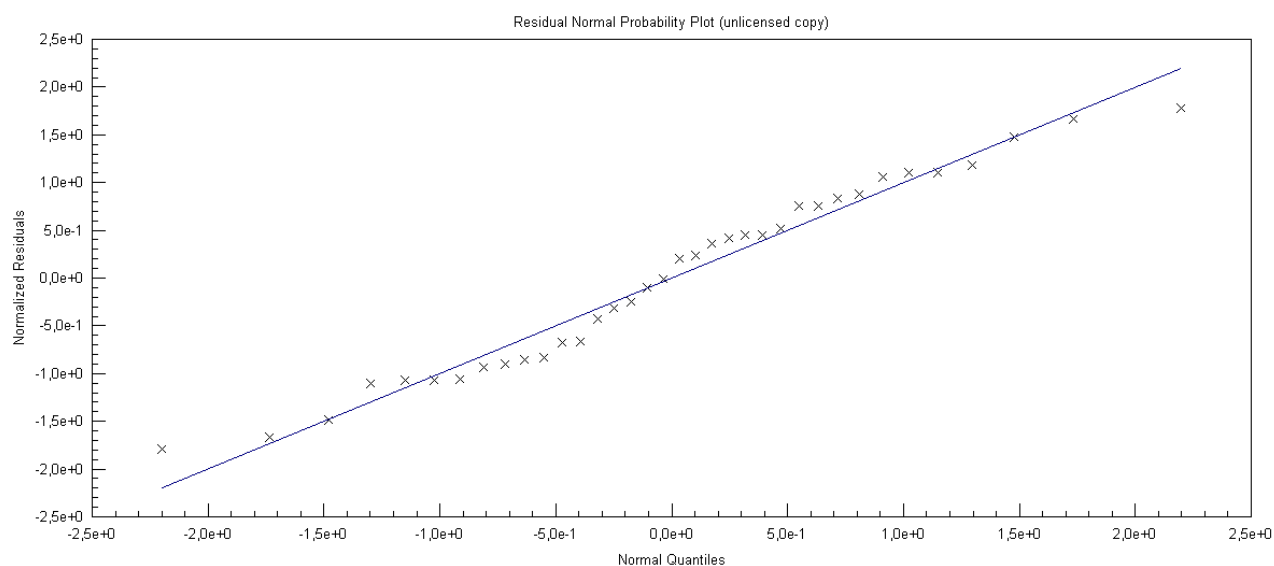


Рис. В.5. Распределение остаточной ошибки статистической обработки функции $Y = a \cdot \exp^{b \cdot X}$

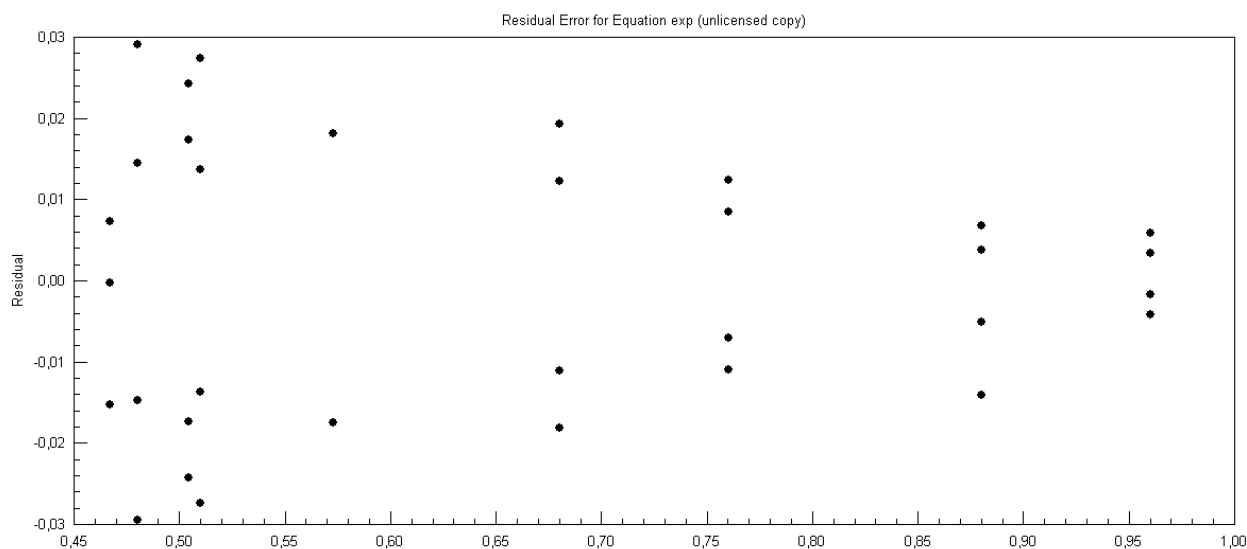


Рис. В.6. Распределение регрессионных остатков функции $Y = a \cdot \exp^{b \cdot X}$

Статистическая обработка экспериментальных данных

По экспериментальным данным, с помощью компьютерной программы “DataFit 9.1.32”, была определена зависимость гидравлической нагрузки от параметра произведения концентрации на иловый индекс. Программе было задано, используя полученные значения параметра aJ и гидравлической нагрузки, определить величину коэффициента a и показателя степени b в формуле

$$Y = a \cdot \exp^{b \cdot X} \quad (B.1)$$

Программа определила величину $a = 2,158$, $b = -2,252$.

$$q = 2,158 \cdot \exp^{-2,252 \cdot aJ}$$

Для определения доверительного интервала экспериментальной зависимости гидравлической нагрузки от параметра aJ , была выполнена статистическая обработка данных в соответствии с рекомендациями [124]:

1. Определены средние значения давления в ресивере пневмопатрона $\langle q_{cp} \rangle$ при различном давлении в баллоне

$$\langle q_{cp} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q)_i, \quad (B.2)$$

где n – количество измерений при одинаковом значении нагрузки, $n=4$;
 i – номер эксперимента.

2. Вычислены значения дисперсии:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - q_{cp})^2. \quad (B.3)$$

3. Получена величина среднего квадратичного отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - q_{cp})^2}. \quad (B.4)$$

4. Определены верхняя и нижняя доверительные границы:

$$[q]_{\text{верх}} = \langle \Delta q \rangle + \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}}; \quad (B.5)$$

$$[q]_{\text{ниж}} = \langle \Delta q \rangle - \frac{t \cdot \sigma}{\sqrt{n}}, \quad (\text{B.6})$$

где t – коэффициент распределения Стьюдента для доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, при количестве измерений $n=4$.

Значение t определялось из таблицы, приведенной в [124] $t_{0,95} = 2,1318$.

При попадании значения q , вычисленного теоретически по формуле (B.1), в найденный интервал, гипотезу о совпадении экспериментального среднего и определенного теоретически значения нагрузки нужно расценивать как справедливую для уровня значимости α . Расчет доверительных границ сведен в табл. B.1

Таблица B.1 Статистическая обработка экспериментальных данных

Величины и их характеристики	Величина параметра aJ								
	0,46	0,48	0,50	0,51	0,573	0,68	0,76	0,88	0,95
$q_1, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	0,768	0,702	0,709	0,711	0,576	0,478	0,378	0,301	0,2616
$q_2, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	0,738	0,760	0,716	0,697	0,611	0,485	0,401	0,283	0,2466
$q_3, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	0,776	0,746	0,675	0,656	0,611	0,448	0,382	0,304	0,254
$q_4, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	0,738	0,716	0,668	0,670	0,576	0,455	0,397	0,292	0,240
$q_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	0,753	0,731	0,692	0,684	0,594	0,467	0,390	0,295	0,250
$q_1 - q_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	0,015	-0,029	0,017	0,0273	-0,0178	0,0116	-0,0117	0,005	0,0109
$q_2 - q_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	-0,015	0,029	0,024	0,0136	0,0178	0,0186	0,0117	-0,0119	-0,0039
$q_3 - q_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	0,022	0,014	-0,0173	-0,027	0,0178	-0,0186	-0,0078	0,008	0,0034
$q_4 - q_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	-0,015	-0,014	-0,024	-0,0136	-0,0178	-0,0116	0,0078	-0,0029	-0,0104
$(q_1 - q_{\text{ср}}), \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	0,001	0,0008	0,0003	0,00075	0,00032	0,00014	0,00014	0,00004	0,00012
$(q_2 - q_{\text{ср}}), \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	0,00023	0,0008	0,00059	0,00019	0,00032	0,00035	0,00014	0,00014	0,00002
$(q_3 - q_{\text{ср}}), \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	0,0005	0,0002	0,0003	0,00075	0,00032	0,00035	0,00006	0,00008	0,00001
$(q_4 - q_{\text{ср}}), \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$	0,0002	0,0002	0,00059	0,00019	0,00032	0,00014	0,00006	0,00001	0,00011
$\sum_{i=1}^n ((q)_i - \langle q_{\text{ср}} \rangle)^2$	0,00119	0,00214	0,00177	0,00187	0,00127	0,00097	0,00039	0,00026	0,00025
σ^2	0,000398	0,000713	0,000592	0,000624	0,000423	0,000324	0,000132	0,000089	0,000086
σ	0,019938	0,026710	0,024326	0,024981	0,020577	0,017986	0,011483	0,009429	0,009287
$t_{0,95}$	2,1318	2,1318	2,1318	2,1318	2,1318	2,1318	2,1318	2,1318	2,1318
$\Delta q = t \cdot \sigma / \sqrt{n}$	0,021251	0,028470	0,025929	0,026627	0,021933	0,019172	0,012240	0,010050	0,009899
$[q]_{\text{верх}}$	0,774819	0,759956	0,718596	0,710764	0,615935	0,486178	0,402297	0,305235	0,260520
$[q]_{\text{нижн}}$	0,732316	0,703015	0,666739	0,657509	0,572070	0,447835	0,377817	0,285135	0,240722

На основании данных, полученных при лабораторных исследованиях (табл. В.1), построен график зависимости гидравлической нагрузки от параметра aJ .

Графически сравнение теоретической и экспериментальной зависимости гидравлической нагрузки от параметра aJ показано на рис. В.7.

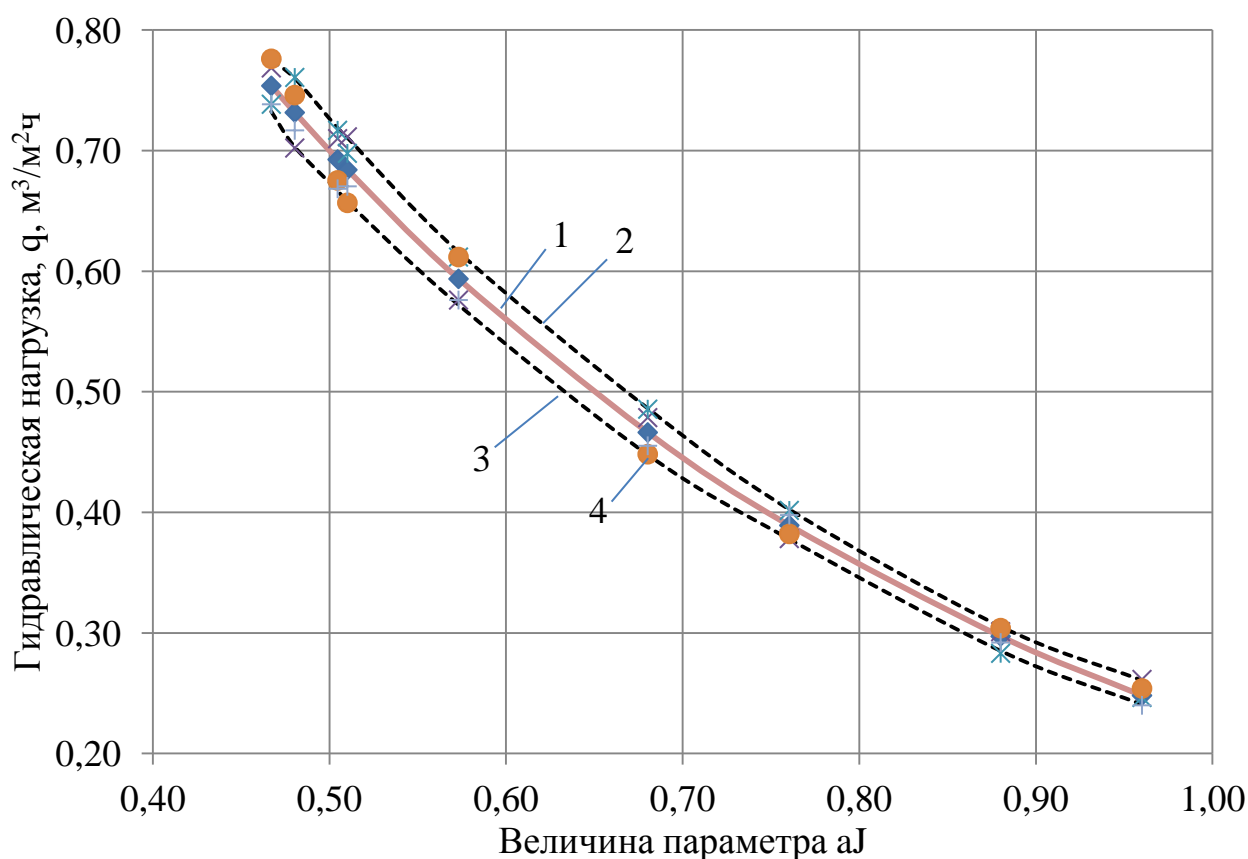


Рис. В.7 Зависимость гидравлической нагрузки на илоотделитель со взвешенным слоем осадка

1 — экспериментальная зависимость гидравлической нагрузки от параметра aJ ;

2, 3 — верхняя и нижняя границы доверительного интервала;

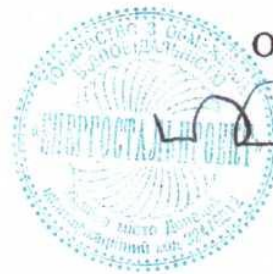
4 — экспериментальные значения.

Выводы:

1. Получена экспериментальная зависимость гидравлической нагрузки от параметра aJ .
2. Определены верхняя и нижняя границы доверительного интервала для уровня значимости $\alpha=0,95$.

Приложение Д
Акт внедрения ООО «Энергостальпроект»

Директор



ООО «Энергостальпроект»

В. В. Кульченко

АКТ

об использования результатов диссертационной работы Зятин Виталия Ильича

Настоящий акт составлен о том, что предложенные д.т.н. доцентом кафедры В.И. Нездойминовым и аспирантом кафедры ВВ и ОВР Донбасской национальной академии строительства и архитектуры В.И. Зятина рекомендации по расчету и конструкции илоотделителей со взвешенным слоем осадка внедрены для повышения эффективности сооружений по обработке осадков станций очистки сточных вод.

Главный инженер

ООО «Энергостальпроект»

A handwritten signature in blue ink, belonging to G. S. Yastrebov.

Г. С. Ястребов

Заведующий кафедрой «ВВ и ОВР»

ДонНАСА

A handwritten signature in blue ink, belonging to V. I. Nezdoyminov.

В. И. Нездойминов

Аспирант кафедры «ВВ и ОВР»

ДонНАСА

A handwritten signature in blue ink, belonging to V. I. Ziatina.

В. И. Зятин

Акт внедрения КП «Компания «Вода Донбасса»

Директор

Макеевского ПУВКХ КП «Компания Вода Донбасса»



А.А. Григорьев

«14» 09 2016 г.

АКТ

об использования результатов диссертационной работы Зятина Виталия Ильича

Настоящий акт составлен о том, что предложенные д.т.н. профессором кафедры В.И. Нездойминовым и аспирантом кафедры ВВ и ОВР ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» В.И. Зятина способ глубокой минерализации осадков городских сточных вод с илоотделением во взвешенном слое осадков внедрен на станции биологической очистки г. Макеевки. Работа системы илоотделения с восходяще-нисходящим распределением потока обеспечивает общую производительность до 48 м³/сут.

Директор

Макеевского ПУВКХ КП

«Компания Вода Донбасса»

Заведующий кафедрой «ВВ и ОВР»

ГОУ ВПО «Донбасская национальная

академия строительства и архитектуры»

Аспирант кафедры «ВВ и ОВР»

ГОУ ВПО «Донбасская национальная

академия строительства и архитектуры»

A blue ink signature of A.A. Grigoriev.

А.А. Григорьев

A blue ink signature of V.I. Nezdoyminov.

В.И. Нездойминов

A blue ink signature of V.I. Ziatina.

В.И. Зятина

Акт внедрения ООО «Титан Д»



Директор ООО «Титан -Д»

Н. Й. Аносов

«22» 01 2015 г.

АКТ

об использования результатов диссертационной работы Зятина Виталия Ильича

Настоящий акт составлен о том, что предложенные д.т.н. доцентом кафедры В.И. Нездойминовым и аспирантом кафедры ВВ и ОВР Донбасской национальной академии строительства и архитектуры В.И. Зятина рекомендации по расчету и конструкции илоотделителей со взвешенным слоем осадка внедрены для повышения эффективности сооружений по обработке осадков станций очистки сточных вод.

Главный инженер ООО «Титан-Д»

А.И. Малахов

Заведующий кафедрой «ВВ и ОВР»
ДонНАСА

В. И Нездойминов

Аспирант кафедры «ВВ и ОВР»
ДонНАСА

В. И. Зятина

Акт внедрения в учебный процесс ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»
Диссертационный совет Д 01.005.01 при
Донбасской национальной академии
строительства и архитектуры

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»,
д.т.н., профессор

Н.М. Зайченко

«6» сентября 2016 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы ассистента кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов
Зятины Виталия Ильича на тему "Интенсификация процесса разделения
концентрированных иловых смесей во взвешенном слое", представленную
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.04 – водоснабжение, канализация, строительные системы
охраны водных ресурсов в учебный процесс ГОУ ВПО «Донбасская национальная
академия строительства и архитектуры»

Результаты диссертационных исследований Зятины Виталия Ильича "Интенсификация процесса разделения концентрированных иловых смесей во взвешенном слое", а именно, способ разделения концентрированных иловых смесей во взвешенном слое и пути увеличения производительности сооружения по обработке осадков сточных вод использованы при подготовке бакалавров и магистров по направлению "Строительство" по профилю "Водоснабжение и водоотведение" в курсах дисциплин «Канализационные очистные сооружения» и «Новые технологии процессов обработки сточных вод».

Начальник учебного отдела
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»,
канд. н. гос. упр., доцент



А.А. Сухина

Заведующий кафедрой «Водоснабжение, водоотведение
и охрана водных ресурсов»
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»,
д.т.н., профессор



В.И. Нездойминов