

*В печать
17.11.2016г.*

На правах рукописи

Зетсков

ЗЯТИНА ВИТАЛИЙ ИЛЬИЧ

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

05.23.04 – водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных
ресурсов

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Макеевка – 2016

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Донбасская национальная академия строительства и архитектуры", г. Макеевка

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Нездойминов Виктор Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Дрозд Геннадий Яковлевич,
профессор кафедры общетехнических дисциплин института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства ГОУ ВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля»

кандидат технических наук, доцент
Бутко Денис Александрович,
декан инженерно строительного факультета ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «26» января 2017 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.005.01 при Донбасской национальной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, учебный корпус №1, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38(0623) 22-77-19, e-mail: d01.005.01@donnasa.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донбасской национальной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан " ____ " _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 01.005.01



Удовиченко Злата Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.).

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 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 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 иловой смеси.

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 в 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 иловой смеси, 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^а 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 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи научного исследования, определены объект и предмет исследования, изложена научная новизна и практическая ценность результатов работы, приведена информация об объеме и структуре диссертации.

В первом разделе отражен детальный анализ методов разделения иловых смесей, изложены теоретические предпосылки диссертационных исследований, на основе которых представлена предлагаемая научная гипотеза. Рассмотрены основные свойства и характеристики активного ила, представлены основные отличия активного ила после биологической очистки от минерализованного ила. Основным отличием считается повышенное значение зольности (иногда свыше 60%) и меньший размер хлопка ила. Определен средний теоретический размер частиц минерализованного ила, отводимых из отделителя вместе с иловой водой, при помощи формулы Стокса $d=51$ мкм, что значительно меньше размера основной части активного ила после полной биологической очистки, который составляет порядка 200...300 мкм.

Теоретические исследования подтвердили, что основными приемами отделения активного ила являются: гравитационное осаждение, флотация, илоотделение во взвешенном слое осадка и мембранное разделение. Рассмотрены достоинства и недостатки каждого метода.

Метод разделения во взвешенном слое иловых смесей является наиболее перспективным, т.к. имеет простой метод регулировки производительности, низкую капитальную и эксплуатационную стоимость, а также возможность интеграции в существующие сооружения обработки осадка. Установлено, что данный метод имеет высокую эффективность при использовании его в составе технологии глубокой минерализации активного ила. Согласно теории процесса минерализации мелкодисперсный ил слабо задерживается во взвешенном слое и вымывается восходящим потоком жидкости.

Предварительные теоретические и экспериментальные исследования показали ряд проблем, связанных с низкими гидравлическими нагрузками на илоотделитель, а в случаях повышенных концентраций – полную невозможность разделения. Особенностью работы сооружения по илоотделению такого рода смесей является использование разделения потоков на восходящий и нисходящий потоки.

На основании выполненного анализа теоретических данных были представлены и сформулированы основные концепции разделения концентрированных иловых смесей во взвешенном слое осадка.

Во втором разделе на основе современных представлений о гидродинамических процессах и физической сущности механизмов разделения иловых смесей во взвешенном слое сформулированы основные предпосылки и концепция для теоретического обоснования метода илоотделения при работе с повышенными концентрациями ила в сооружении. Для упрощения определения расчетных параметров работы илоотделителя было выполнено зонирование

сооружения относительно его высоты. Высота взвешенного слоя и его пористость зависят от концентрации ила по сухому веществу, илового индекса и скорости восходящего потока.

В качестве базового метода для расчета параметров зоны взвешенного слоя использованы исследования Д.М Минца и С.А. Шуберта. 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

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

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 (1) неизвестными остаются мнимая пористость слоя m и высота взвешенного слоя H . 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

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

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления;

L – длина каналов взвешенного слоя, м;

d_k – эквивалентный диаметр каналов, м;

V – скорость движения воды в так называемых каналах, м/с.

$$d_k = \frac{4 \cdot m}{f}, \quad (3)$$

где f – удельная поверхность флокул ила; для общего случая форма частиц ила принята шарообразной, м²/м³;

$$f = \frac{6(1-m)}{d \cdot \Phi}, \quad (4)$$

где Φ – фактор формы флокул ила, который принимается равным 1;

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

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34, \quad (5)$$

где Re – число Рейнольдса.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (6)$$

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

$$\nu_M = \mu \cdot \left(1 + 2C_v \left(\frac{1+C_v}{1-C_v} \right)^2 \right), \quad (7)$$

где μ – динамическая вязкость жидкого компонента гетерофазной системы, $\text{Па} \cdot \text{с}$;
 C_v – объемная концентрация иловой смеси во взвешенном слое, %.

$$C_v = \frac{a}{\rho_2} \cdot 100, \quad (8)$$

где a – концентрация иловой смеси, подаваемой на обработку во взвешенный слой, $\text{г}/\text{дм}^3$.

Исходя из концепции работы взвешенного слоя, 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 объема 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) на уравнение (1), а также выполнив соответствующие подстановки и преобразования, можем найти мнимую пористость взвешенного слоя

$$1 = \left(\frac{199,5 \cdot \nu_M \cdot (1-m)}{d \cdot V \cdot \rho_1} + 2,34 \right) \cdot \left(\frac{0,75 \cdot \rho_1 \cdot V^2}{d \cdot m \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1)} \right), \quad (9)$$

На основании проведенных в работе аналитических исследований получено уравнение определения высоты взвешенного слоя при различных значениях пористости слоя m , согласно (1), т.е. высота взвешенного слоя при разных значениях скорости восходящего потока связана зависимостью (10). Предельная высота

взвешенного слоя выражается из пропорции в зависимости от исходных параметров экспериментального слоя

$$(1 - m_1)H_1 = (1 - m_2)H_2, \quad (10)$$

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 или коэффициента расширения слоя и высоты взвешенного слоя могут быть определены только на основании экспериментальных данных определения начальной высоты взвешенного слоя H_1 , м. Для чего через слой 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 определяется скоростью свободного осаждения частиц.

Протекание биологических процессов в иловой смеси 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.

Моделирование экспериментальных исследований в лабораторных условиях производилось с целью определения критериев, позволяющих осуществить пересчет полученных результатов на реальные сооружения илоотделения. При разработке конструкции и состава лабораторной установки осветления во взвешенном слое осадка следует использовать комплекс гидродинамического подобия $\Pi_1 = J \cdot a$ и $\Pi_2 = \frac{H \times V}{v}$, то есть соблюдение параметров илового индекса, концентрации 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 $\alpha_v = \sqrt{\alpha_l} = 1$.

На основании концепции интенсификации работы сооружения по илоотделению принято, что иловая смесь движется по принципу восходяще-нисходящего движения. Подаваемый в илоотделитель ил увлекает за собой часть частиц взвешенного слоя, тем самым способствует активному обновлению хлопков ила, формирующего взвешенный слой.

Массообмен в слое обеспечивается скоростью подачи смеси во взвешенный слой осадка и равномерным распределением подводимого потока по площади водного зеркала зоны осветления. Динамика потока смеси обрабатываемого осадка на входе в сооружение илоотделения во взвешенном слое осадка представляет огромный интерес к пониманию процессов, протекающих на границе раздела верхней и нижней зон илоотделителя.

Распределение скоростей смеси в илоотделителе определено при помощи математического моделирования процесса и решено методом последовательных приближений в среде Delphi с определенными входными параметрами. Компьютерная программа реализует итерационный процесс метода Гаусса–Зейделя.

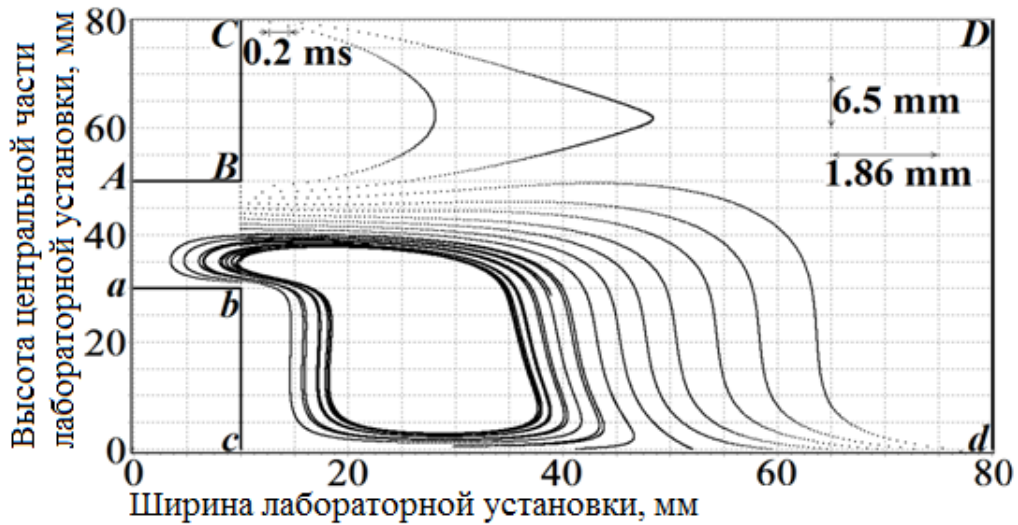


Рис. 1. Линии тока.

Начальные точки взяты на входе в илоотделитель с одинаковым шагом по вертикали. Масштаб координаты вдоль оси $x - 1,86 \cdot 10^{-2}$ м на 10 шагов координатной сетки, масштаб координаты вдоль оси $y - 6,5 \cdot 10^{-2}$ м на 10 шагов координатной сетки, метки времени через 0,2 мс.

На основании рис. 1 установлено, что в зоне входа обрабатываемой смеси в сооружение илоотделения происходит активное перемешивание входящим потоком смеси, распространяющееся, как на нижнюю, так и на верхнюю части.

Для подтверждения теоретических зависимостей приведенных ранее, а также для определения начальной высоты взвешенного слоя, запланированы экспериментальные исследования по определению параметров формирования и стабилизации взвешенного (псевдооживленного) слоя, а также основных его гидродинамических характеристик.

В третьем разделе приведены результаты экспериментальных исследований по изучению гидродинамических параметров взвешенного слоя ила на лабораторной установке, представленной на рис. 2.

Экспериментальная установка (Рис. 2) осветлителя со взвешенным слоем представляет собой колонну из органического стекла высотой 2,7 м квадратного сечения 1, систему подводящих, отводящих трубопроводов с насосным оборудованием 7 и 8, емкости для сбора осветленной иловой воды 2 и емкости смешения осветленной иловой воды и циркуляционного ила 3. Изучение изменения высоты взвешенного слоя в лабораторных условиях выполнено с применением планирования экспериментальных исследований и последующей обработкой в программной среде DataFit.

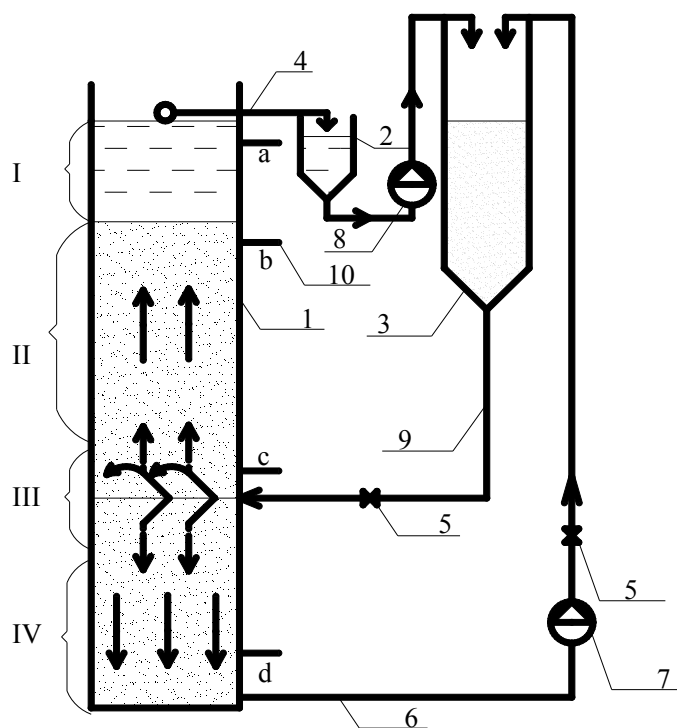


Рис.2. Лабораторная установка осветлителя со взвешенным слоем осадка:

- 1 – илоотделитель со взвешенным слоем осадка;
- 2 – емкость сбора осветленной иловой воды;
- 3 – емкость смешения осветленной иловой воды и циркуляционного ила;
- 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 a, b, c, d;
- I – защитная зона осветленной воды;
- II – зона взвешенного слоя;
- III – зона интенсивного перемешивания;
- IV – зона циркуляции ила.

Емкость 3, выполненная из органического стекла, представляет собой цилиндр 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 илоотделителя 1 и циркуляционного ила из нижней его части посредством насоса 7. В илоотделитель 1 в зону интенсивного перемешивания III, под гидростатическим напором по трубопроводу 9 подается смесь осветленной иловой воды и циркуляционного ила. За счет циркуляционного насоса 7 и запорно-регулирующего вентиля 5 осуществляется регулировка нисходящей скорости в зоне IV, которая обеспечивает постоянство концентраций иловой смеси в исходной жидкости. Гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя регулируется изменением подачи насоса 8. Таким образом, в

сооружении илоотделения для обработки смеси формируется два условных контура движения: восходящий и нисходящий потоки.

Высота защитного слоя рекомендована литературными источниками и составляет 0,5 м. Осветленная иловая вода по трубопроводу 4 в самотечном режиме поступает в сборную емкость осветленной воды 2.

Места установки пробоотборников на рис. 2 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.

Во взвешенном слое ил находится в состоянии непрерывного хаотичного движения. Взвешенный слой при определенной скорости восходящего потока сохранял постоянную высоту. Сооружение находится в состоянии динамического равновесия.

При проведении эксперимента изучалось влияние гидравлической нагрузки на высоту взвешенного слоя и степень его расширения в установившемся режиме.

В ходе исследований определено изменение концентраций ила по зонам илоотделителя в зависимости от гидравлической нагрузки. Лабораторная установка заполнялась иловой смесью с концентрацией 4,9 г/дм³ и зольностью 22,4%. Высота взвешенного слоя поддерживалась на уровне Н=1,1 м. Отношение скорости нисходящего потока к восходящему составляло 3:1.

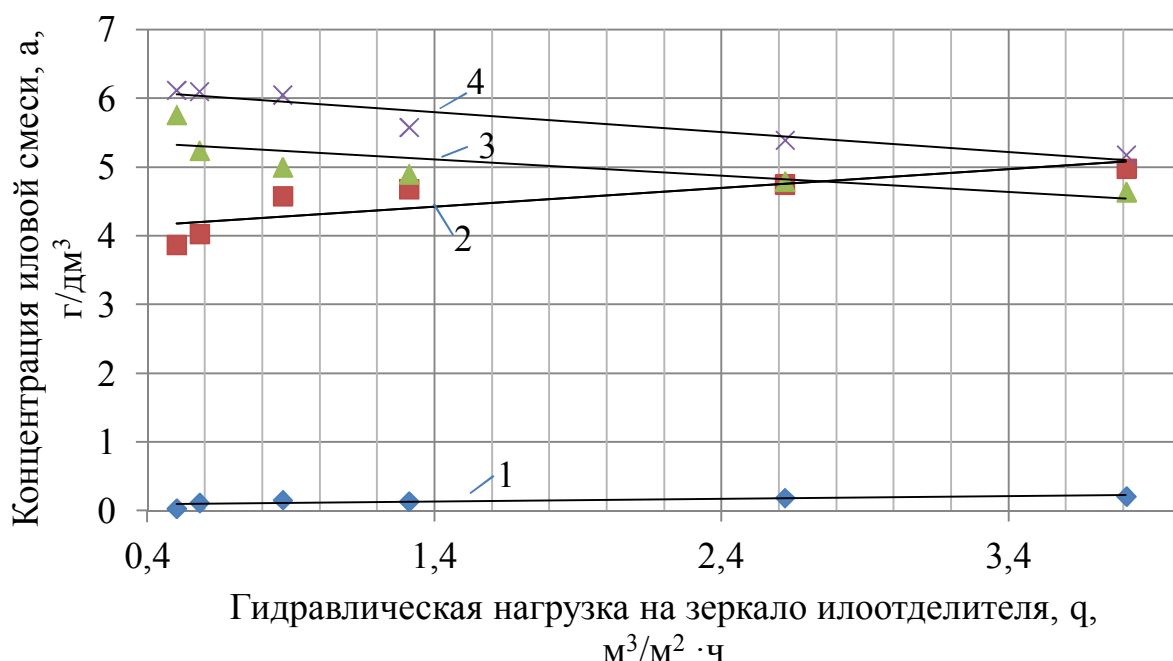


Рис. 3. Изменение концентрации иловой смеси по высоте илоотделителя в зависимости от гидравлической нагрузки:

- 1 – концентрация ила в точке отбора проб **a**, $\text{г}/\text{дм}^3$;
- 2 – то же в точке **b**, $\text{г}/\text{дм}^3$;
- 3 – то же в точке **c**, $\text{г}/\text{дм}^3$;
- 4 – то же в точке **d**, $\text{г}/\text{дм}^3$.

На рисунке 3 представлены изменения концентрации иловой смеси по высоте илоотделителя.

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 $0,03...0,2 \text{ г/дм}^3$, а зольность $42...56\%$. В точке **b** – содержание иловой смеси в пределах $3,9...4,9 \text{ г/дм}^3$ и зольности $27...31\%$, в точке **c** – $4,6...5,8 \text{ г/дм}^3$ с зольностью $26...29\%$, в точке **d** концентрация $5,1...6,1 \text{ г/дм}^3$, и зольность $24...27\%$. Полученные данные свидетельствуют, что концентрация иловой смеси по высоте взвешенного слоя отличается не значительно (не более 10%), в верхней части взвешенного слоя концентрация ила меньше, чем в нижней. Установлено, что в верхней части взвешенного слоя накапливаются частицы с большей зольностью (до 31%). Определено, что концентрация в поступающей иловой смеси и средняя концентрация во взвешенном слое отличаются незначительно (в пределах $0,3 \text{ г/дм}^3$). Исходя из этого, при расчете высоты взвешенного слоя илоотделителя (формула 8) в качестве расчетной можно принимать концентрацию поступающей иловой смеси.

На графике 4, 5 приведены точки, полученные экспериментально, и линии, вычисленные по формулам 9, 10.

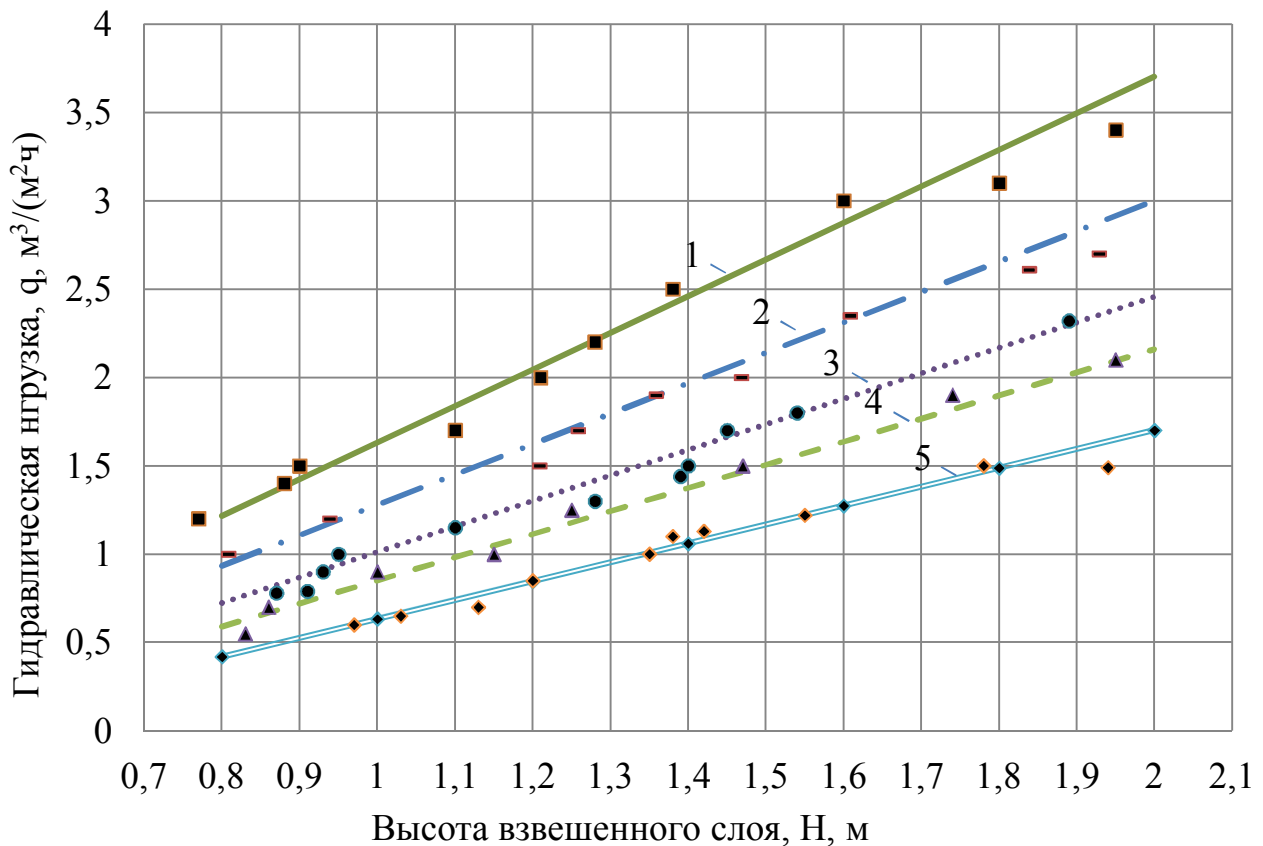


Рис. 4. Зависимость расчетной гидравлической нагрузки от высоты взвешенного слоя при разных концентрациях иловой смеси в поступающей воде:

- 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 $7,2 \text{ г/дм}^3$.

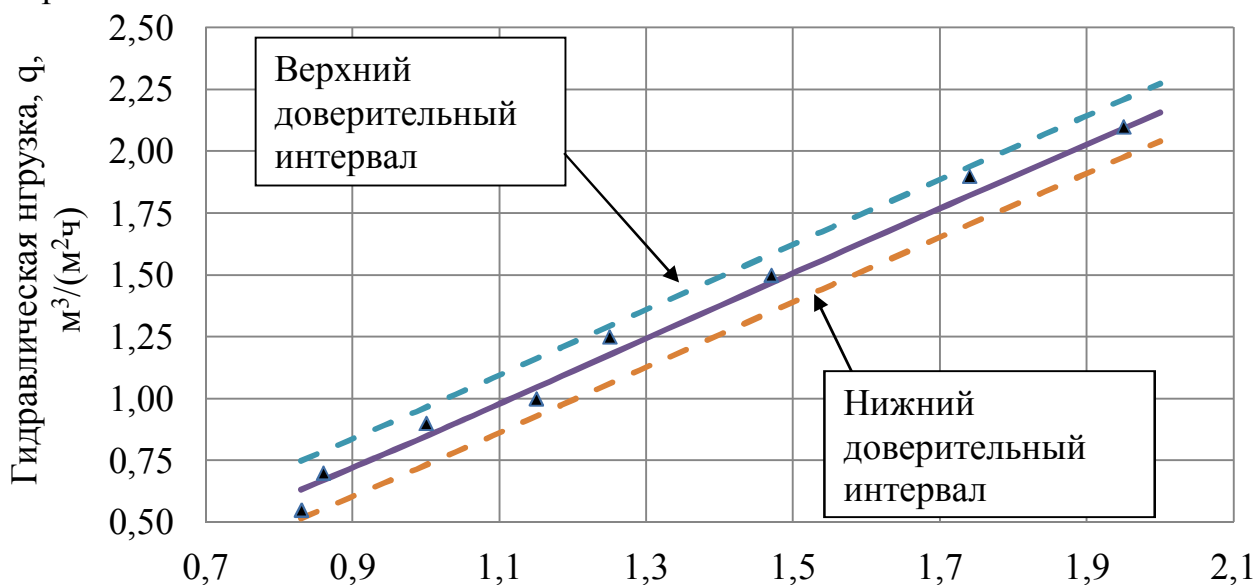
Опытным путем установлено необходимое отношение нисходящей скорости к восходящей или степень нисходящей циркуляции, величина которой составляет $2,5...3$. Исследования проводились на иле с иловым индексом $60...70 \text{ мл/г}$. Вынос

взвешенных веществ с иловой водой на всем протяжении исследований не превышал значения 200 мг/дм^3 .

Анализ графических зависимостей (Рис. 4) показывает, что разделение иловых смесей во взвешенном слое осадка позволяет работать с концентрациями $3 \dots 7,2 \text{ г/дм}^3$. Из рисунка 4 следует, что с увеличением гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя высота взвешенного слоя увеличивается. Отмечено, что с увеличением концентрации ила в исходной иловой смеси, при тех же гидравлических нагрузках, высота взвешенного слоя также увеличивается.

Определен доверительный интервал теоретически полученных зависимостей с помощью уравнений (9, 10). Принятый диапазон изменения гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя был в пределах $0,3 \dots 3,8 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

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 9, 10) с коэффициентом достоверности 0,95. Результаты расчета критерия Стьюдента и доверительного интервала для определенной концентраций ила представлены на рис. 5.



Высота взвешенного слоя H при концентрации $6,0 \text{ г/дм}^3$

Рис.5. Определение доверительного интервала расчетной гидравлической нагрузки на водное зеркало илоотделителя в зависимости от высоты взвешенного слоя.

Экспериментально определено влияние скорости входа иловой смеси в илоотделитель на высоту взвешенного слоя, для различных концентраций (Рис.6).

Высота нижней части сооружения по илоотделению для стабилизации нисходящего потока рекомендуется $0,2 \dots 0,5 \text{ м}$ в зависимости от конструктивных особенностей места расположения илоотделителя.

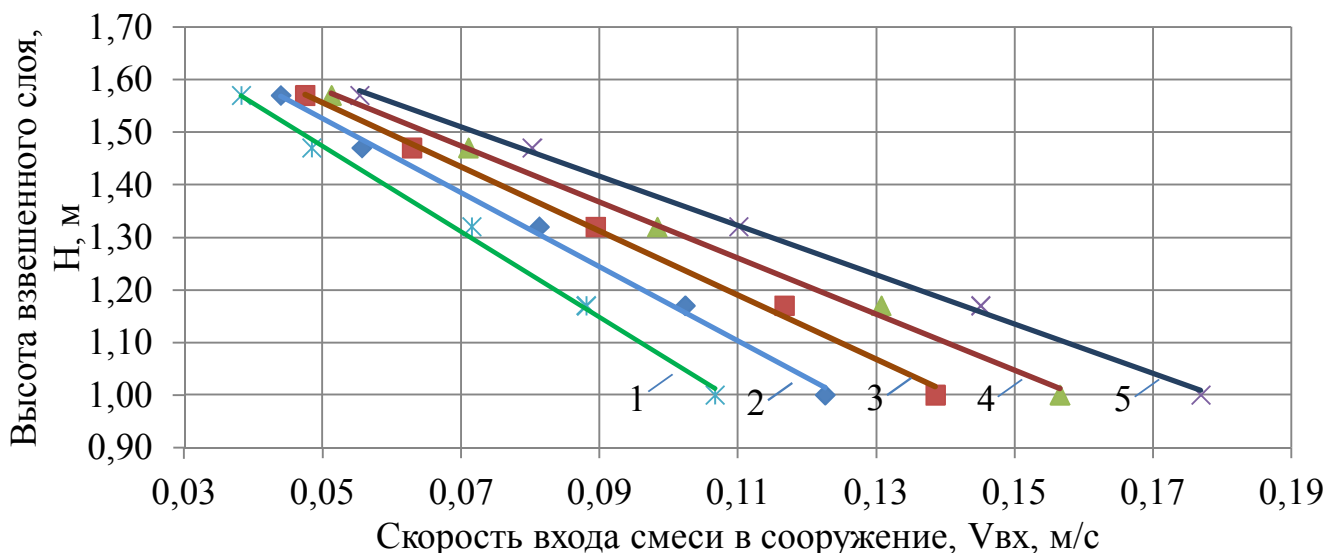


Рис. 6. Зависимость необходимой скорости входа исходной смеси в илоотделитель от высоты взвешенного слоя и концентрации ила в смеси:

- 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.

В лабораторных условиях также проводились исследования 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).

Параметры лабораторной установки были аналогичны установке разделения иловой смеси г. Макеевка. Исходный ил характеризуется повышенным иловым индексом до 110...130 мл/г. Концентрация ила по сухому веществу в минерализаторе варьировалась в пределах 4,0...11,5 г/дм³. Нисходящая циркуляция иловой смеси равнялась 2,25...4,1. Во внимание принимается влияние не только концентрации иловой смеси, но и илового индекса. Для этого вводится безразмерный параметр aJ , равный произведению концентрации ила (a) на иловый индекс (J).

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

Отмечено, что зольность осадка в минерализаторе к концу эксперимента возросла с 20% до 29% при средней зольности исходного осадка 22%.

На рис. 7 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 поверхность илоотделителя с более высоким иловым индексом ниже на 5...8%.

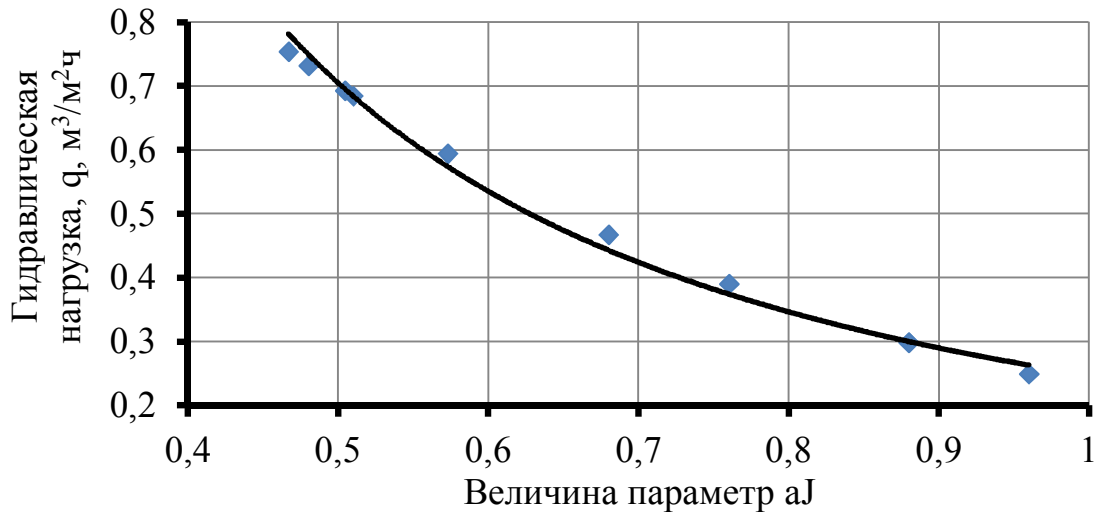


Рис. 7 Экспериментальная зависимость гидравлической нагрузки на илоотделитель со взвешенным слоем осадка.

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

В четвертом разделе приведены результаты промышленных экспериментальных исследований по разделению концентрированных иловых смесей аэробного минерализатора. Испытания проводились на Макеевских канализационных очистных сооружениях несколько лет. Под минерализатор переоборудован радиальный отстойник диаметром 18 м, внутри которого размещался илоотделитель общим объемом 20 м³. Концентрация ила изменялась до 12 г/дм³, иловый индекс составлял порядка 60...75 мл/г, зольность поступающего на минерализацию активного ила 30%.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 8.

Исходная иловая смесь поступает из аэробного минерализатора 1, по распределительному лотку 5 в илоотделитель 2. На разделение иловая смесь подается самотеком в илоотделитель, где происходит восходяще-нисходящее распределение потоков.

После разделения ила осветленная иловая вода по трубопроводу 7 направляется в сборную емкость осветленной иловой воды 3. Эрлифтная система, установленная в илоотделителе, постоянно отводит из нижней его части иловую смесь обратно в минерализатор по трубопроводу 6.

На основании промышленных исследований получена гидравлическая нагрузка на поверхность илоотделителя при различных значениях концентрации ила и илового индекса.

По результатам экспериментов установлено, что с увеличением величины параметра aJ свыше 0,4 гидравлическая нагрузка снижается вплоть до 0,3 м³/м²·ч (Рис. 8).

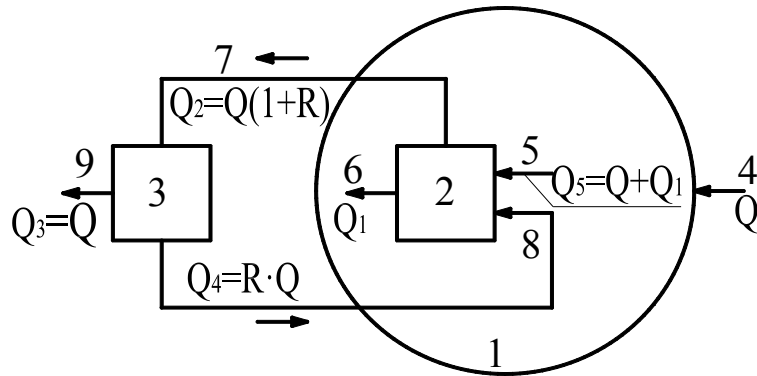


Рис. 8. Схема экспериментальной установки илоотделителя:

1 – аэробный минерализатор;

2 – илоотделитель;

3 – емкость осветленной иловой воды;

4 – расход активного ила, поступающего на минерализацию, Q , $\text{м}^3/\text{ч}$;

5 – подача иловой смеси в илоотделитель, Q_5 , $\text{м}^3/\text{ч}$;

6 – отвод циркуляционного ила в минерализатор, Q_1 , $\text{м}^3/\text{ч}$;

7 – отвод осветленной иловой воды из илоотделителя, Q_2 , $\text{м}^3/\text{ч}$;

8 – подача рециркулирующей осветленной иловой воды для разбавления, Q_4 , $\text{м}^3/\text{ч}$;

9 – отвод избыточной осветленной иловой воды, Q_3 , $\text{м}^3/\text{ч}$;

R – степень рециркуляции иловой воды.

Поэтому с целью увеличения гидравлической нагрузки при концентрации ила в поступающей иловой смеси свыше $8 \text{ г}/\text{дм}^3$ рекомендуется использовать снижение исходной концентрации иловой смеси за счет разбавления осветленной иловой водой.

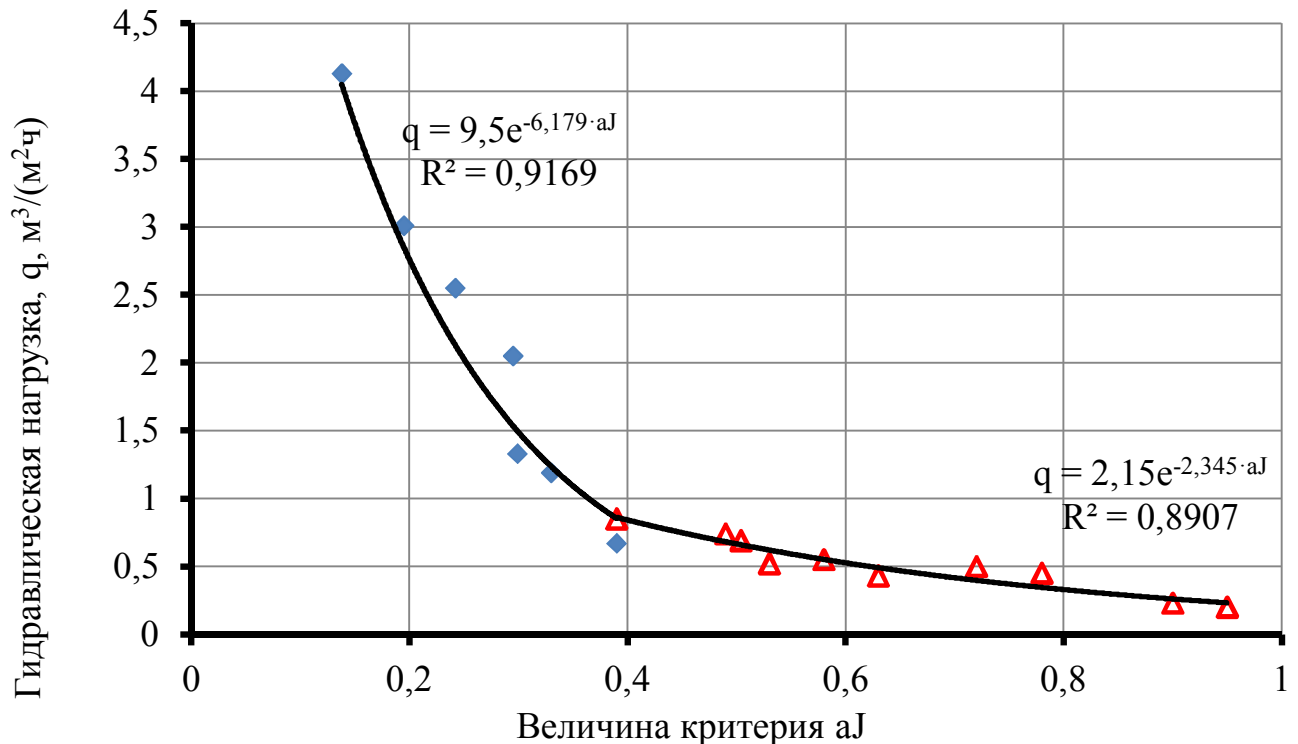


Рис. 9. Влияние безразмерного параметра aJ на гидравлическую нагрузку илоотделителя при высоте взвешенного слоя $H=1,1 \text{ м}$.

Исходя из массового баланса иловой смеси, в соответствии со схемой работы илоотделителя, коэффициент рециркуляции иловой воды R может быть вычислен как

$$R = \frac{a_i - a}{a}, \quad (11)$$

где a_i – концентрация иловой смеси, поступающего на илоотделение, г/дм³;

a – концентрация иловой смеси, поступающего на илоотделение после разбавления осветленной иловой водой, г/дм³.

С учетом разбавления площадь илоотделителя F , м², будет определяться как

$$F = \frac{Q \cdot a_i}{q \cdot a}, \quad (12)$$

где q – гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя, м³/м²·ч.

В таблице 1 приведена гидравлическая нагрузка на водное зеркало илоотделителя при различной степени рециркуляции осветленной иловой воды.

Таблица 1 – Влияние разбавления иловой смеси на производительность 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
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

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 aJ будет равен 0,90. При таком параметре ила в соответствии с приведенным выше графиком (Рис. 8) получим гидравлическую нагрузку 0,33 м³/м²·ч. При разбавлении концентрации ила осветленной иловой водой $R=2$ параметр aJ станет равным 0,30, а гидравлическая нагрузка увеличится до 1,25 м³/м²·ч (Табл. 1). Это приведет к увеличению производительности илоотделителя по исходному илу в 1,25 раза.

В пятом разделе приведены рекомендации к проектированию илоотделителя по разделению концентрированных иловых смесей, а также определен чистый дисконтированный доход от его внедрения.

Технико-экономические расчеты показали, что чистый дисконтированный доход от внедрения илоотделителя с восходяще-нисходящим потоком для разделения концентрированного минерализованного ила производительностью 48 м³/сут составляет 376 тыс. руб. Сравнение осуществлялось с сооружением напорной флотации.

Предложен алгоритм расчета илоотделителя с использованием математического редактора Mathcad и Microsoft Office Excel, для определения

основных гидравлических и конструктивных параметров сооружения (Рис. 10).

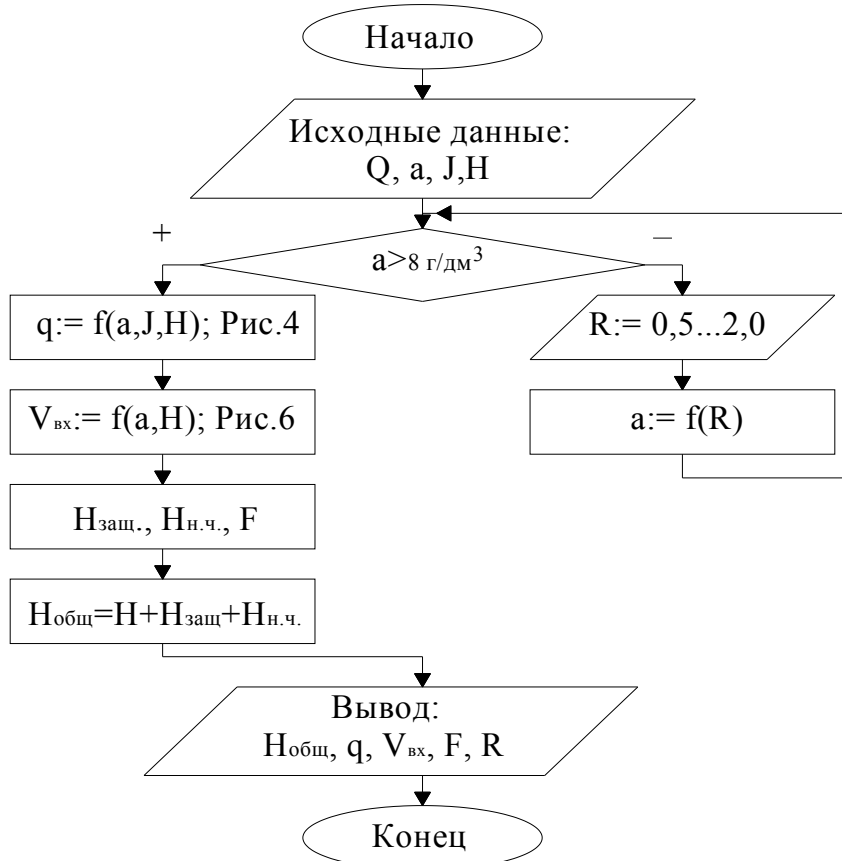


Рис. 10. Алгоритм расчета илоотделителя со взвешенным слоем осадка:

$V_{вх}$ – скорость входа смеси в илоотделитель, м/с;

$H_{защ}$, $H_{н.ч}$ – соответственно, высота защитного слоя (0,5 м) и высота нижней части илоотделителя (0,2...0,5 м в зависимости от конструктивных особенностей места расположения илоотделителя), м;

$H_{общ}$ – общая высота илоотделителя, м.

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 м³/м² ·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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– **публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:**

1. Нездоймінов, В.І. Удосконалення технології очищення стічних вод від миття автотранспорту з повторним їх використанням [Текст] / В.І. Нездоймінов, **В.І. Зятіна** // Науковий вісник будівництва, №57. – Харків, ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. – С. 345–348 (*Выделен вопрос биологической обработки сточных вод*).

2. **Зятіна, В.І.** Современная система очистки воды оборотного типа для автомоек «ЕВРО 2012» [Текст] / **В.І. Зятіна**, И.В. Гонгальский, В.В. Мухин, Г.В. Бакун, Ю.С. Евко // Актуальні проблеми транспортної медицини: навколишнє середовище; професійне здоров'я; патологія. №4. – т.2 (22-2). – 2010. – С. 36–39 (*Представлен вариант использования биологической очистки с системой илоотделения*).

3. Чернышев, В.Н. Исследования работы илоотделителя в технологии глубокой минерализации осадка [Текст] / В.Н. Чернышев, **В.І. Зятіна** // Вісник ДонНАБА, Вип. 2013-3(101) «Будівлі та конструкції із застосуванням нових матеріалів та технологій». – Макіївка, 2013. – С. 85–89 (*Теоретические предпосылки применения илоотделителей со взвешенным слоем осадка*).

4. Чернышев, В.Н. Технология работы илоотделителя в технологии глубокой минерализации осадка [Текст] / В.Н. Чернышев, **В.И. Зятина** // Вісник ДонНАБА, Вип. 2013-5(103) «Інженерні системи та техногенна безпека». – Макіївка, 2013, – С. 21–25 (*Применение илоотделения со взвешенным слоем в технологии глубокой минерализации*).

5. 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 (*Рассмотрен вопрос разбавления исходной смеси, для прироста производительности*).

6. **Зятина, В.И.** Движения жидкости в колонне осветлителя во взвешенном слое осадка [Текст] // Вісник ДонНАБА, Вип. 2015-5(115) «Інженерні системи та техногенна безпека». – Макеевка, 2015. – С. 16–22.

7. Нездойминов, В.И. Математическое описание основных факторов, влияющих на формирование взвешенного слоя осадка в илоотделителе [Текст] / В.И. Нездойминов, В.С. Рожков, **В.И. Зятина**, В.И. Лесной // Современное промышленное и гражданское строительство. – Макеевка, ДонНАСА, 2016.– Т. 12 №2. – С. 51–58 (*Математическое описание определения основных параметров взвешенного слоя*).

– публикации в зарубежных научных изданиях:

8. Nezdoiminov, Viktor. Research of Processes of a Deep Aerobic Mineralization of Activated Sludge [Электронный ресурс] / Viktor Nezdoiminov, **Vitalii Ziatina**, Vitalii Rozhkov, Darya Nemova // Procedia Engineering, Volume 117, 2015, Pp. 1022–1027– Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815018676> (*Формирование смеси активного ила для осветлителей со взвешенным слоем осадка*).

– патенты:

9. Патент на полезную модель № 101528 Украина, МПК C02F 11/02. Способ илоотделения для минерализованного активного ила / В.И. Нездойминов, **В.И. Зятина**, В.Н. Чернышев, П.А. Дмитров, И.С. Голдин; заявлено 23.05.2014; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18.