

*На правах рукописи*

**ХИРШИЕВА Ирина Владимировна**

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ  
ПРИ ОЧИСТКЕ МАЛОМУТНЫХ ЦВЕТНЫХ ВОД**

**Специальность: 05.23.04 – Водоснабжение, канализация,  
строительные системы охраны водных ресурсов**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
**Феофанов Юрий Александрович**

Официальные оппоненты: **Терехов Лев Дмитриевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург, кафедра «Водоснабжения, водоотведения и гидравлики», профессор;

**Васильев Алексей Львович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Водоснабжение и водоотведение», заведующий

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет»**

Защита состоится «29» июня 2015 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.06** при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (ауд. 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
доцент

Виктор Алексеевич Пужкал

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Природные воды многих поверхностных водоемов северного и северо-западного районов Российской Федерации, используемых в качестве источников водоснабжения, относятся к категории маломутных цветных вод. Они имеют, как правило, высокие показатели цветности и окисляемости, характеризуются малой минерализацией, низким щелочным резервом и низкой среднегодовой температурой.

Традиционная технология очистки таких вод включает в себя обработку их коагулянтами и флокулянтами с дальнейшим отстаиванием и фильтрованием обработанной воды. Особенностью очистки маломутных цветных вод является вялое протекание процессов коагуляции воды с образованием мелких плохо оседающих хлопьев, которые не полностью задерживаются в отстойниках, в результате чего происходит увеличение грязевой нагрузки на фильтры, и зачастую приводит к ухудшению качества очищенной воды. Особенно ухудшается процесс коагуляции и хлопьеобразования в холодное время года из-за низкой температуры воды. При традиционной схеме обработки природных цветных вод на водопроводных станциях, данные обстоятельства не позволяют гарантировать получение стабильного качества очищенной воды, соответствующего требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01. Для улучшения качества очищенной воды приходится повышать дозу коагулянта, вводить предварительную обработку исходной воды окислителями, что в результате приводит к увеличению эксплуатационных расходов и образованию вторичных загрязнений воды.

Таким образом, возникает необходимость в разработке эффективных способов интенсификации процесса коагуляции, что особенно актуально для обработки маломутных цветных вод поверхностных водоемов.

Одним из действенных направлений интенсификации процесса коагуляции и повышения эффективности очистки является введение в воду при коагуляции различных добавок. Они играют роль центров хлопьеобразования и служат утяжелителями, ускоряющими процесс формирования хлопьев, способствуя быстрому их осаждению при отстаивании. Данные по применению добавок-утяжелителей при очистке воды весьма малочисленны и разноречивы, и практически отсутствуют применительно к очистке маломутных цветных вод, на водопроводных станциях в РФ этот метод пока не нашел применения.

Проведение процесса коагулирования воды, как с введением добавок-утяжелителей, так и без их использования зависит, прежде всего, от состава и свойств обрабатываемой воды, и условий её обработки. Очевидно, что оптимальные технологические параметры метода интенсификации процесса коагуляции должны определяться для конкретных видов обрабатываемых вод экспериментальным путем. Решение данного вопроса требует проведения специальных комплексных исследований по изучению всех особенностей технологического процесса указанного метода, в частности, при обработке маломутных цветных вод, чем и обусловлена актуальность настоящей работы.

**Степень разработанности темы исследования.** Литературные данные по изучению и применению способа ускорения процесса коагулирования воды с использованием добавок-утяжелителей весьма малочисленны и разноречивы, технологические параметры проводимого процесса комплексно не изучены, отдельные имеющиеся сведения относятся к конкретному водному источнику и ограничены условиями эксперимента. Опыт применения этого способа при очистке маломутных цветных вод, в частности, в РФ, практически отсутствует.

**Цель и задачи исследования.** *Цель исследования* – интенсификация процесса коагуляции при очистке маломутных цветных вод с применением добавок-утяжелителей, выбор разных видов отечественных добавок-утяжелителей, выявление эффективности их применения и определение оптимальных технологических параметров проведения данного процесса.

*Задачи исследования:*

1. Анализ литературных данных по коагуляционной обработке маломутных цветных вод и способов интенсификации процесса коагуляции.

2. Выбор видов добавок-утяжелителей отечественного производства, проведение экспериментальных исследований по определению эффективности коагуляционной очистки маломутных цветных вод с добавлением разных видов добавок-утяжелителей.

3. Выявление технологических параметров и области применения различных видов добавок-утяжелителей, определение оптимальных доз и фракционного состава, порядка их ввода в обрабатываемую воду; определение условий перемешивания при проведении процесса коагуляции маломутных цветных вод с добавлением разных утяжелителей.

4. Определение сравнительной кинетики удаления примесей при коагуляции маломутных цветных вод с добавлением разных утяжелителей.

5. Проведение экспериментальных исследований по интенсификации процесса коагуляции воды р. Невы с применением добавок-утяжелителей при разных температурах исходной воды и в условиях низких температур (ниже 5 °С).

6. Проведение производственных испытаний при очистке маломутных цветных вод с применением добавок-утяжелителей.

7. Обобщение и анализ экспериментальных данных, получение расчетных зависимостей для определения эффективности очистки маломутных цветных вод при проведении процесса коагуляции с применением разных добавок-утяжелителей.

8. Выбор технологических схем обработки маломутных цветных природных вод с применением различных добавок-утяжелителей и определение области их применения.

9. Разработка рекомендаций для расчета и проектирования сооружений по обработке данных вод с использованием различных добавок-утяжелителей.

*Объектом исследования* являлись маломутные цветные воды поверхностных источников.

*Предметом исследования* является способ интенсификации процесса коагуляции маломутных цветных вод путем введения в обрабатываемую воду различных отечественных видов добавок-утяжелителей.

**Научная новизна и значимость проведённых исследований** заключается в следующем:

1. На основании сравнительных исследований кинетики выпадения коагулированной взвеси с добавлением разных отечественных видов утяжелителей (кварцевого песка, магнетита, железного порошка и кальцита) и без них установлено, что время выпадения осадка и продолжительность отстаивания обработанной воды сокращались в 6-30 раз в сравнении с обработкой воды при традиционной коагуляции.

2. Определены оптимальные характеристики различных добавок-утяжелителей (их фракционный состав и дозы), вводимых при коагуляции маломутных цветных вод, порядок их ввода с реагентами в обрабатываемую воду, при которых обеспечивалось лучшее качество осветленной воды (мутность и цветность).

3. Установлены оптимальные условия проведения процесса коагуляции маломутных цветных природных вод (скорости и время быстрого и медленного перемешивания) с добавлением разных видов утяжелителей, при которых вводимые добавки находились во взвешенном состоянии, а образующиеся хлопья не разрушались.

4. Для оценки увеличения скорости осаждения коагулированной взвеси с добавкой утяжелителей введен коэффициент утяжеления и экспериментально определены значения этого коэффициента для испытанных видов утяжелителей.

5. Установлено, что применение различных видов добавок-утяжелителей при коагулировании воды р. Нева позволяет значительно повысить эффект очистки и качество осветленной воды при низких температурах (менее 5 °С), в сравнении с коагуляцией без добавок-утяжелителей. Применение испытанных добавок-утяжелителей способствует эффективному проведению процесса коагуляции воды не зависимо от температуры обрабатываемой воды (в диапазоне 3,3-27 °С).

6. Получены зависимости эффекта снижения мутности, цветности и перманганатной окисляемости маломутных цветных вод при их коагулировании с введением утяжелителей от продолжительности отстаивания, которые позволяют определить время отстаивания для получения требуемого качества осветленной воды (по разным показателям) при применении разных видов добавок-утяжелителей (кварцевого песка, железного порошка и микрокальцита) отечественного производства. Добавление при коагуляции утяжелителей позволяет снизить дозу коагулянта на 10% и дозу флокулянта на 20%.

7. Получены расчетные зависимости для определения доз реагентов и эффективности очистки маломутных цветных вод с применением разных добавок-утяжелителей и сформулированы области применения этих добавок.

**Методологической основой** диссертационного исследования послужили основные теоретические положения процесса коагуляционной обработки воды с учетом современных тенденций его развития, современные методики применения данного процесса очистки воды, проведение лабораторных и производственных исследований на натуральных природных водах, современные методы математической обработки и анализа экспериментальных данных.

В диссертации представлены результаты научно-исследовательских работ, полученные автором лично и в сотрудничестве с научными работниками кафедры водопользования и экологии университета ФГБОУ ВПО СПбГАСУ, со специалистами Южной водопроводной станции ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и химико-бактериологической лаборатории этой станции.

**Область исследования** соответствует требованию паспорта научной специальности ВАК 05.23.04 – «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов» и заключается в совершенствовании методов очистки маломутных цветных вод в развитие пункта 3: «Методы очистки природных и сточных вод, технологические схемы и конструкции используемых сооружений, установок, аппаратов и механизмов».

**Практическая ценность и реализация результатов исследований** состоит в следующем: выявлена эффективность применения различных отечественных видов добавок-утяжелителей для интенсификации процесса коагуляции маломутных цветных вод, определены их оптимальные параметры и условия применения (дозы и фракционный состав, порядок их ввода и условия перемешивания с реагентами), обозначены области их использования; оценено ускорение осаждения коагулированной взвеси при введении добавок-утяжелителей с помощью коэффициентов утяжеления; определено влияние температуры исходной воды на ход процесса коагуляции с применением добавок-утяжелителей при обработке невольской воды; получены результаты производственных испытаний при очистке воды р. Невы с применением добавки-утяжелителя; выбраны технологические схемы обработки маломутных цветных природных вод с применением различных добавок-утяжелителей и определены области их применения; разработаны рекомендации для расчета и проектирования сооружений по обработке маломутных цветных природных вод с применением испытанных видов добавок-утяжелителей.

Полученные результаты данной работы переданы для внедрения в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», а также внедрены научно-производственной фирмой ООО «Винко» (Санкт-Петербург) в проектах водоочистных установок для автономных объектов, расположенных на Крайнем Севере и Восточной Сибири РФ, а также использованы в курсе «Комплексное использование водных ресурсов» и дипломном проектировании в СПбГАСУ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационных исследований докладывались: на I международном конгрессе молодых ученых (аспирантов, докторантов) и студентов, посвященном 180-летию Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета

«Актуальные проблемы современного строительства». – СПбГАСУ, (Санкт-Петербург, 10-12 апреля 2012 г.), на II международном конгрессе студентов и молодых ученых (аспирантов, докторантов) «Актуальные проблемы современного строительства». – СПбГАСУ, (Санкт-Петербург, 10-12 апреля 2013 г.), на VI Невском Международном Экологическом конгрессе «Пути интенсификации процесса очистки природных вод с повышенным антропогенным загрязнением». – ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», (Санкт-Петербург, 2013 г.), на III Международном конгрессе студентов и молодых ученых (аспирантов, докторантов) «Актуальные проблемы современного строительства». – СПбГАСУ, (Санкт-Петербург, 9–11 апреля 2014 г.).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 7 печатных работах, общим объемом 2,45 п.л., лично автором – 2 статьи (1,76 п.л.), в том числе 4 статьи опубликованы в изданиях, которые входят в перечень научных журналов, утвержденных ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой и глав, основных выводов. Диссертация изложена на 188 страницах машинописного текста, содержит 42 таблицы, 41 формулу, 63 рисунка, 7 приложений, и список использованной литературы работ отечественных и зарубежных авторов, состоящий из 145 наименований.

Во введении обоснована актуальность и сформулирована проблема выбранного направления исследований, сформулированы цель и задачи, показана актуальность, научная новизна и практическая значимость проводимых исследований.

В первой главе представлен обзор и анализ научно-технической литературы, посвященный особенностям коагуляционной очистки поверхностных маломутных цветных вод. Представлен обзор существующих технологий интенсификации коагуляционной очистки воды, в т. ч. с использованием добавок-утяжелителей хлопьев коагулянта, отмечены их недостатки и направления совершенствования этого способ очистки. Определены задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены характеристики объектов, принятых при проведении экспериментальных исследований, представлена методика и программа проведения исследований.

Исследования по интенсификации процесса коагуляции маломутных цветных вод с добавками-утяжелителями проводились в три этапа: на модельных растворах, на природной воде р. Нева в лабораторных и в производственных условиях на действующих сооружениях Южной водопроводной станции ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». В качестве утяжелителей хлопьев коагулянта при исследованиях были использованы: кварцевый песок, железный порошок, магнетит и микрокальцит, выпускаемые отечественной промышленностью, а также осадок отстойников, и смесь разных видов добавок, приведены характеристики указанных добавок.

В третьей главе описаны результаты экспериментальных исследований, направленные на интенсификацию процесса коагуляции маломутных цветных

вод с применением добавок-утяжелителей хлопьев коагулянта, в результате которых установлена высокая эффективность применяемого метода для этой категории природных вод. Определены оптимальные параметры утяжелителей, порядок их ввода с реагентами в обрабатываемую воду, условия их перемешивания на стадиях смешения и флокуляции, время отстаивания воды для каждого утяжелителя при коагуляционной очистке модельных растворов цветных вод (без применения флокулянта) и природной воды р. Невы (с добавлением флокулянта). При обработке невской воды установлена возможность снижения доз реагентов при коагуляции с добавлением утяжелителей, а также изучено влияние температуры исходной воды на эффективность коагуляционной очистки.

*В четвертой главе* проведен анализ технологии и работы современного комплекса очистных сооружений блока К-6 Южной водопроводной станции ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» по очистке воды р. Нева. Установлены зависимости оптимальных доз реагентов от исходной мутности, цветности, окисляемости и температуры воды. Изучена эффективность применения при коагуляции воды в качестве утяжелителей осадка из отстойника и смеси осадка с песком. Определены зависимости эффективности очистки невской воды от продолжительности отстаивания при ее коагуляции с применением различных добавок-утяжелителей (кварцевый песок, железный порошок и микрокальцит). Для испытанных видов добавок определены значения коэффициента утяжеления, характеризующие увеличения скорости осаждения коагулированной взвеси с вводимыми добавками.

Изложены условия проведения и результаты производственных испытаний по очистке невской воды с добавлением кварцевого песка на блоке К-6 ЮВС ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

*Пятая глава* содержит рекомендации по применению метода интенсификации процесса коагуляции маломутных цветных вод с применением испытанных добавок-утяжелителей. Приведены рекомендации для расчета и проектирования сооружений по обработке цветных вод с утяжелителями на основе полученных автором экспериментальных данных. Рассчитаны технико-экономические показатели способа интенсификации процесса коагуляции воды, за счет введения добавок-утяжелителей при сравнении с современной схемой очистки, принятой на блоке К-6 ЮВС г Санкт-Петербурга.

## **II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**1. На основании сравнительных исследований кинетики выпадения коагулированной взвеси с добавлением разных отечественных видов утяжелителей (кварцевого песка, магнетита, железного порошка и кальцита) и без них установлено, что время выпадения осадка и продолжительность отстаивания обработанной воды сокращались в 6-30 раз в сравнении с обработкой воды при традиционной коагуляции.**

Объектом экспериментальных исследований по интенсификации процесса коагуляции маломутных цветных вод являлись модельные растворы, а также природная вода р. Невы. Показатели качества модельных растворов приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Физико-химические показатели качества модельных растворов**

Показатели	Единицы измерения	Минимум	Среднее	Максимум
Температура	°С	22,0	23,0	24,0
Цветность	град.	54,0	64,5	75,0
Мутность	мг/л	19,0	25,0	31,0
рН	ед.	6,3	6,75	7,2
Щелочность	ммоль/л	0,20	0,47	0,73

Показатели качества невской воды и смеси ее с очищенной промывной водой в период проведения исследований приведены в таблице 2. Пробы воды отбирались на входе на блок очистных сооружений К-6 Южной водопроводной станции Санкт-Петербурга (ЮВС СПб).

Таблица 2

**Основные физико-химические показатели качества воды**

Показатели	Единицы измерения	Качества воды р. Невы в период проведения исследований			Качество обрабатываемой воды (невская вода и очищенная промывная вода) в период проведения исследований		
		мин. зн.	сред. зн.	макс. зн.	мин. зн.	сред. зн.	макс. зн.
Температура	°С	0,40	1,55	2,70	0,50	2,00	3,50
Мутность	мг/л	0,70	2,45	4,20	1,00	4,30	7,60
Цветность	град.	34,00	37,50	41,00	27,00	32,50	38,00
рН	ед.	7,26	7,43	7,60	7,20	7,45	7,70
Щелочность	ммоль/л	0,55	0,62	0,68	0,55	0,62	0,68
Перманганатная окисляемость	мгО <sub>2</sub> /л	7,80	8,45	9,10	5,60	7,55	9,50
Железо	мг/л	0,02	0,07	0,12	0,02	0,07	0,12
Растворенный алюминий	мг/л	-	-	-	0,01	0,06	0,10

Примечание. Во время штормов на Ладоге мутность невской воды кратковременно повышалась до 9,7 мг/л, цветность до 61 град., перманганатная окисляемость до 12,3 мгО<sub>2</sub>/л

В качестве добавок-утяжелителей хлопьев коагулянта в исследованиях применялись следующие материалы, производимые на территории России: кварцевый песок (фракция 0-0,63 мм), железный порошок ПЖР 3.200 (фр. 0-0,63 мм), магнетит природный (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), кварцевый песок (фр. 0,1-0,3 мм), железный порошок ПЖ 3.200, мрамор молотый (микрокальцит) (фр. 0,1 мм), смесь кварцевого песка и железного порошка, а также осадок из отстойников влажностью 95-97%, смесь осадка и песка.

В качестве реагентов при лабораторных исследованиях на модельных растворах применялись: коагулянт – алюминий сернокислый  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  (1%-ый раствор) и подщелачивающий реагент – кальцинированная сода  $Na_2CO_3$  (1%-ый раствор).

При проведении лабораторных и производственных исследований на природной воде р. Невы применялись: тот же коагулянт и флокулянт *Flopat FO-4290 PWG*.

Экспериментальные исследования (в лабораторных условиях) проводили на установке, приведенной на рисунке 1.

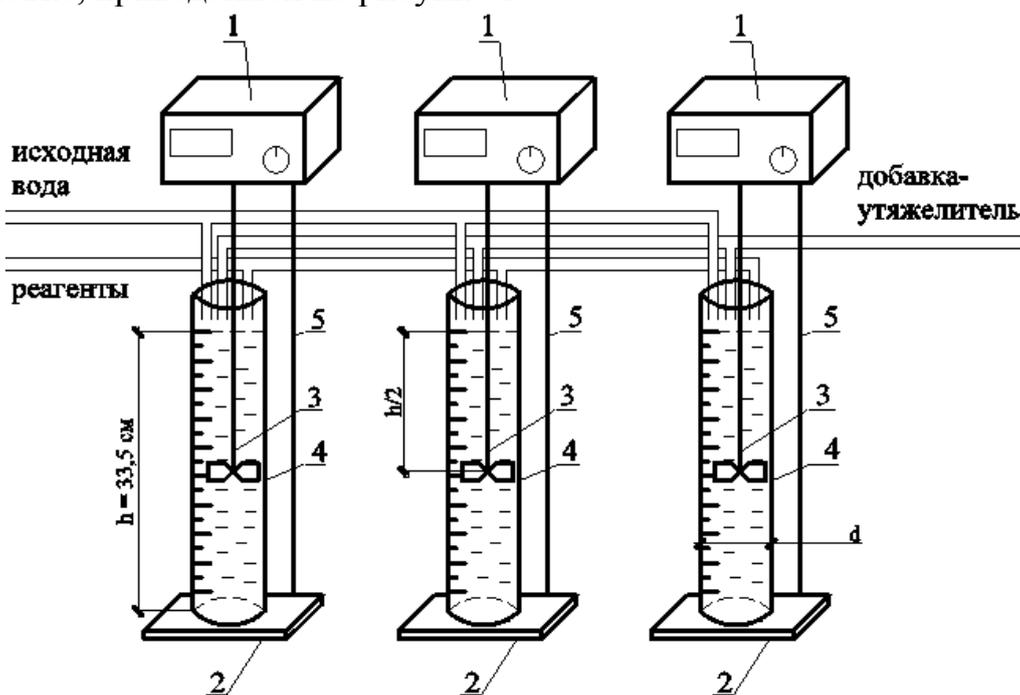


Рисунок 1. Вид установки: 1 – регулятор скоростей перемешивания; 2 – платформа; 3 – мешалка; 4 – стакан с исследуемой водой; 5 – штатив.

Данная установка включает в себя три мешалки пропеллерного типа, с регулятором скорости их вращения 50-1000 об/мин, и лабораторные стаканы емкостью 1 л.

Серии сравнительных лабораторных опытов проводились при одинаковых условиях. Каждый опыт проводился не менее чем в трехкратной повторяемости, для обеспечения достоверности получаемых данных. Дозы реагентов определяли путем пробного коагулирования воды (стандартная методика). Отбор проб воды на анализ и производство анализов производились в соответствии со стандартными методиками.

Качество исходной и очищенной воды определяли по показателям мутность, цветность, водородный показатель ( $pH$ ), щелочность, перманганатная окисляемость, содержание алюминия и железа.

Исследования по определению кинетики выпадения коагулированной взвеси в осадок проводились при оптимальной дозе реагентов при традиционной коагуляции без использования добавок-утяжелителей, а также с использованием разных добавок (рисунок 2).

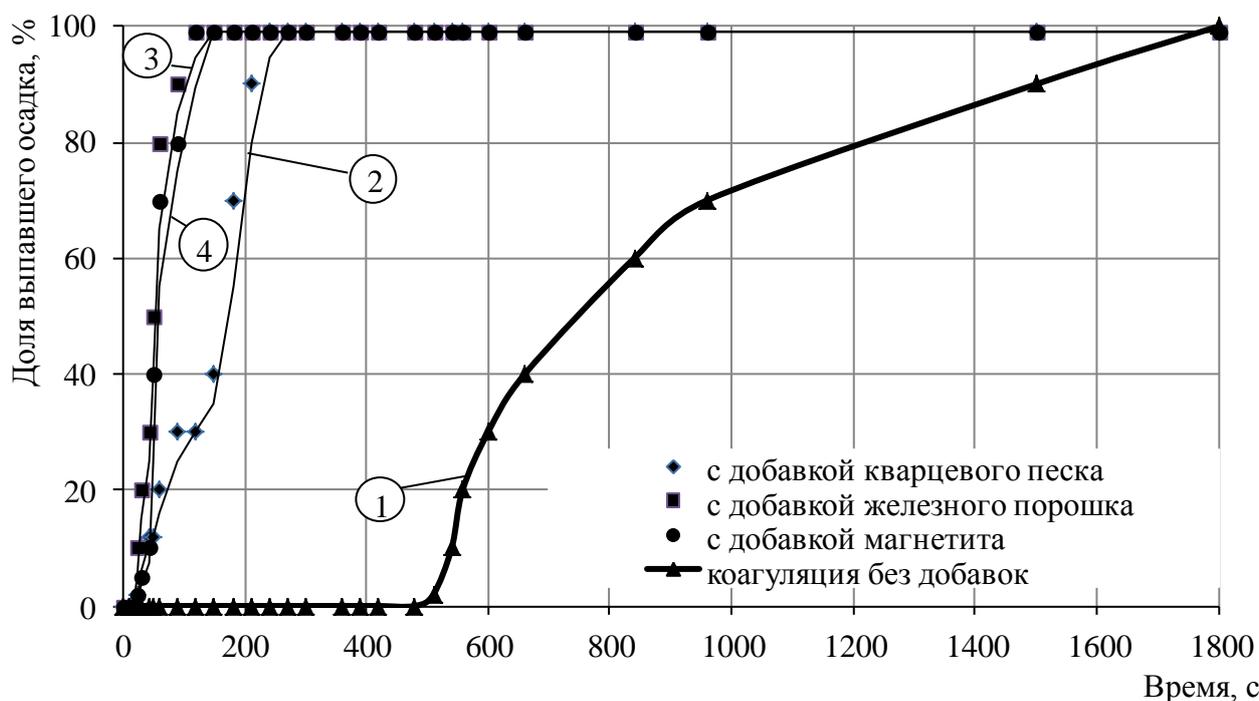


Рисунок 2. Кинетика осаждения коагулированной взвеси: 1 – без использования добавок; 2 – с добавкой песка; 3 – с добавкой железного порошка; 4 – с добавкой магнетита

Время завершения процесса выпадения осадка, составляло (рисунок 2): при коагуляции воды без введения добавок – 30,0 мин; с добавлением песка – 4,5-5,0 мин; с добавлением магнетита и железного порошка – 1,0-1,5 мин. При применении в качестве добавки дробленого мрамора (кальцита) кинетика выпадения осадка была близка к кинетике осаждения коагулированной взвеси с добавлением песка. Таким образом, при применении добавок-утяжелителей время выпадения осадка и, соответственно, продолжительность отстаивания обработанной воды сокращалось в 6-10 раз при добавлении кварцевого песка и кальцита, и в 20-30 раз – при добавлении магнетита и железного порошка при коагуляционной обработке, как модельных растворов, так и невской воды.

На рисунке 3 представлены фотографии комплексов, образованных при коагуляционной обработке исходной воды с введением добавок-утяжелителей (кварцевого песка и железного порошка).

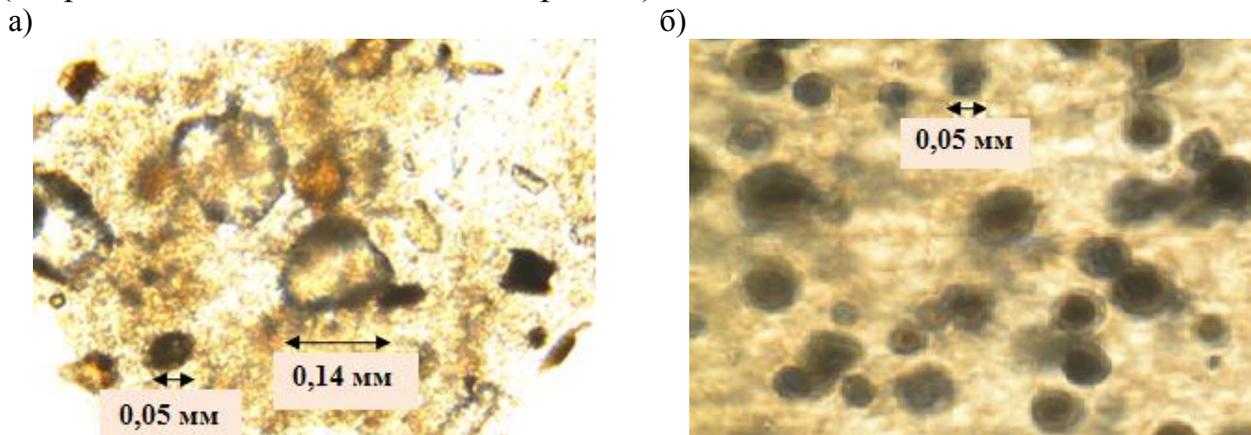


Рисунок 3. Хлопья коагулянта, образующиеся в результате коагулирования воды с введением утяжелителей: а) кварцевого песка фр. 0,05-0,14 мм; б) железного порошка фр. до 0,05 мм.

По экспериментальным данным было определено изменение скорости осаждения осадка с добавками-утяжелителями при разных высотах отстаивания (от 50 до 200 мм) и вычислены средние коэффициенты агломерации  $n$  выпадающей взвеси (таблица 3).

Таблица 3

Значение коэффициента агломерации  $n$  при выпадении осадка с утяжелителем

Вид осадка	Среднее значение коэффициент $n$
Осадок при коагуляции воды (гидроокись алюминия с веществами цветности и флокулянт) + кварцевый песок (утяжелитель)	0,393
Осадок при коагуляции воды (гидроокись алюминия с веществами цветности и флокулянт) + железный порошок (утяжелитель)	0,427

Полученные значения коэффициента агломерации  $n$  (таблица 3) близки к данным АКХ для коагулированной минеральной взвеси (песка).

**2. Определены оптимальные характеристики различных добавок-утяжелителей (их фракционный состав и дозы), вводимых при коагуляции маломутных цветных вод, порядок их ввода с реагентами в обрабатываемую воду, при которых обеспечивалось лучшее качество осветленной воды (мутность и цветность).**

При определении оптимальных размеров фракций добавок-утяжелителей при коагулировании воды испытывались следующие материалы: кварцевый песок с размером частиц 0,05-0,63 мм, железный порошок – 0,05 – 0,63 мм и магнетит – 0,05 – 0,56 мм, при их одинаковой дозе (2 г/л).

Эффективность применения данных утяжелителей определялась по показателям качества осветленной после отстаивания воды (мутность и цветность), а также по характеру образующихся хлопьев и их осаждению.

В качестве примера на рисунке 4 приведены результаты качества очищенной воды с применением при коагуляции кварцевого песка с разными фракциями. Примерно такие же результаты получены при добавлении микроальцита.

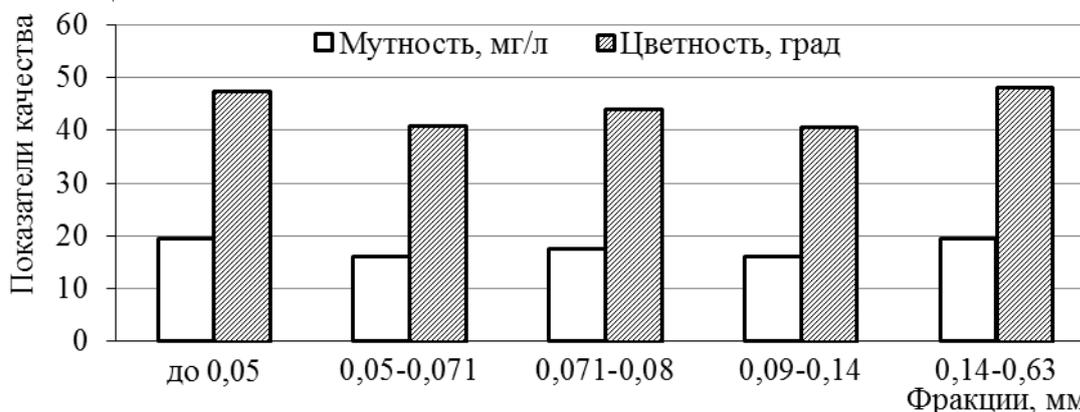


Рисунок 4. Качество осветленной воды после отстаивания ( $t_{отст.} = 5,0$  мин) при коагуляции воды с добавлением в обрабатываемую воду разных фракций кварцевого песка

В результате проведенных исследований установлено, что лучшее качество осветленной воды обеспечивалось при применении фракций добавок-

утяжелителей размером: кварцевого песка и микрокальцита – 0,05-0,14 мм; магнетита и железного порошка – не более 0,05 мм. При коагулировании воды без применения флокулянта эффективная доза вводимых добавок-утяжелителей составляла 0,7 г/л для каждого вида добавки. Исследования по коагуляции невской воды с применением флокулянта показали возможность снизить дозу используемых добавок до 0,05 г/л, при этом качество воды практически не ухудшалось.

Экспериментально было определено влияние места ввода разных видов добавок-утяжелителей на эффективность процесса коагуляции воды. На рисунке 5 приведены показатели качества очищенной воды, полученные при коагуляции с применением кварцевого песка при разных вариантах его ввода в обрабатываемую воду.

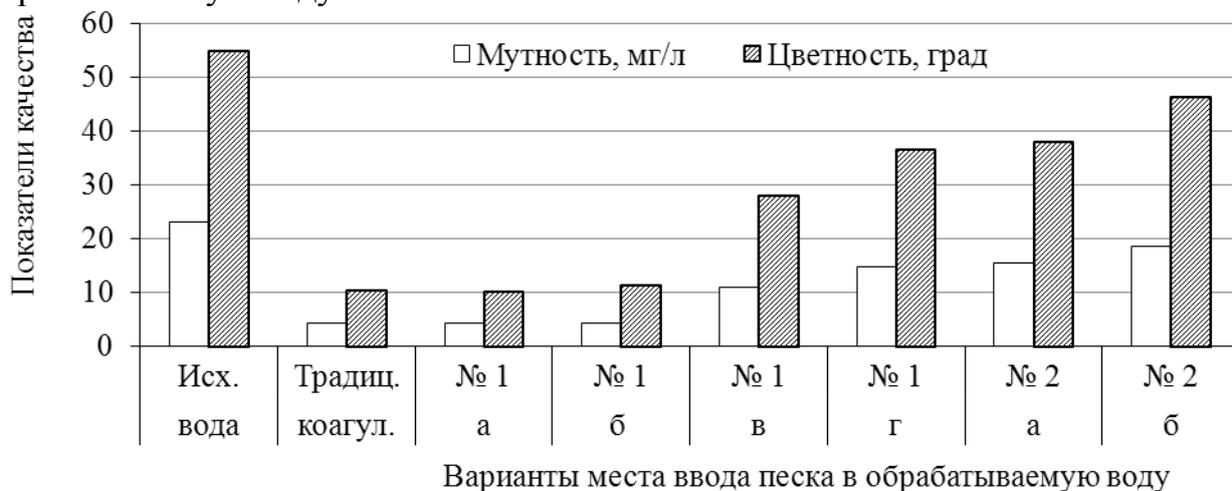


Рисунок 5. Влияние места ввода кварцевого песка в обрабатываемую при коагулировании воду на качество осветленной воды после отстаивания ( $t_{отст.} = 5,0$  мин) при следующих условиях: № 1 а – ввод песка в начале быстрого перемешивания (снизу цилиндра); № 1 б – то же, (сверху цилиндра); № 1 в – 1 мин быстрого перемешивания, ввод песка и еще 1 мин перемешивания; № 1 г – ввод песка в конце быстрого перемешивания; № 2 а – ввод песка в начале медленного перемешивания (аналог технологии «Actiflo»); № 2 б – ввод песка в середине медленного перемешивания; при традиционной коагуляции без применения добавок-утяжелителей  $t_{отст.} = 30,0$  мин

Лучшие результаты были получены при введении утяжелителя в обрабатываемую воду в начале быстрого перемешивания (№ 1 а, б) вместе с коагулянтом. При коагуляции воды с добавлением микрокальцита (при  $t_{отст.} = 5,0$  мин) и железного порошка (при  $t_{отст.} = 1,5$  мин) получены подобные результаты. При этом наблюдалось образование плотных, легко оседающих хлопьев, утяжеленных добавками. При вводе утяжелителя в конце быстрого перемешивания (№ 1 г) и в начале медленного перемешивания (№ 2 а – аналог технологии «Actiflo») эффект очистки снижался, и качество очищенной воды ухудшалось (рисунок 5).

**3. Установлены оптимальные условия проведения процесса коагуляции маломутных цветных природных вод (скорости и время быстрого и медленного перемешивания) с добавлением разных видов**

**утяжелителей, при которых вводимые добавки находились во взвешенном состоянии, а образующиеся хлопья не разрушались.**

В результате экспериментальных исследований по коагулированию невской воды определены оптимальные условия ее перемешивания с реагентами и добавляемыми утяжелителями: при использовании кварцевого песка и кальцита: быстрое перемешивание (смешение) – 3 мин при 300 об/мин, медленное перемешивание (флокуляция) 2 мин при 100 об/мин и 1 мин при 50 об/мин; при использовании железного порошка и магнетита: быстрое перемешивание – 3 мин при скорости 600 об/мин, медленное перемешивание – 2 мин при скорости 150 об/мин и 1 мин при 50 об/мин. В данных условиях добавки не оседали на дно и участвовали в процессе хлопьеобразования, а образующиеся хлопья не разрушались.

Дополнительными исследованиями были определены скорости взмучивания различных видов добавок-утяжелителей и скорости их транспортирования по трубопроводам (таблица 4).

Таблица 4

**Скорости взмучивания и транспортирования добавок-утяжелителей**

Вид утяжелителя	Размер фракций, мм	Скорость вращения мешалки при 100 % взмучивании утяжелителей, об/мин	Скорость транспортирования по трубопроводам, м/с
кварцевый песок	0,05-0,14	500	1,6
микрокальцит	0,05-0,14	500	1,6
магнетит	до 0,05	650	1,8
железный порошок	до 0,05	750	2,0

**4. Для оценки увеличения скорости осаждения коагулированной взвеси с добавкой утяжелителей введен коэффициент утяжеления и экспериментально определены значения этого коэффициента для испытанных видов утяжелителей.**

При коагуляции примесей воды с введением утяжелителя образуется комплекс коагулированных частиц с утяжелителем, при этом меняются и размеры образующихся хлопьев, и их плотность, следовательно, изменяется и их скорость осаждения.

Соотношение скоростей осаждения частиц разного размера и плотности, можно выразить в виде (1):

$$\frac{u_2^2}{u_1^2} = \frac{d_2 \cdot \psi_1}{d_1 \cdot \psi_2} \cdot \frac{(\rho_2 - \rho_0)}{(\rho_1 - \rho_0)} \quad (1)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – размер разных частиц,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность частиц,  $\psi = 3 \cdot \pi / Re$  – коэффициент сопротивления их осаждению;  $\rho_0$  – плотность воды.

Обозначив  $K_p = d_2/d_1$  – коэффициент, характеризующий изменение размера частицы,  $K_c = \psi_2/\psi_1$  – коэффициент, характеризующий изменение сопротивления ее осаждению при введении определенной добавки-

утяжелителя, а отношение  $\frac{K_p}{K_c} = K_{ут}$  – как коэффициент утяжеления, уравнение

(1) можно преобразовать в (2):

$$\frac{u_2^2}{u_1^2} = K_{\text{ут}} \cdot \frac{(\rho_{\text{ут}} - \rho_0)}{(\rho_{\text{ос}} - \rho_0)} = K_{\text{ут}} \cdot \frac{\Delta\rho_{\text{ут}}}{\Delta\rho_{\text{ос}}} \quad (2)$$

где:  $\rho_{\text{ос}}$ ,  $\rho_{\text{ут}}$  – плотность частиц, соответственно, осадка и комплекса осадок-утяжелитель.

Используя экспериментальные данные по кинетике выпадения взвеси при коагулировании воды с добавками-утяжелителями, были получены значения коэффициента утяжеления  $K_{\text{ут}}$  и соотношение скоростей осаждения  $u_{\text{ос-ут}}/u_{\text{ос}}$  при применении испытанных видов добавок-утяжелителей (таблица 5).

Таблица 5

Значения коэффициента  $K_{\text{ут}}$

Вид частиц	Плотность комплекса частиц с утяжелителем	Соотношение плотностей частиц взвеси с утяжелителем и без	Коэффициент утяжеления	Соотношение скоростей осаждения
	$\rho_{\text{комп}}$ , г/см <sup>3</sup>	$\frac{\Delta\rho_{\text{ут}}}{\Delta\rho_{\text{ос}}}$	$K_{\text{ут}}$	$u_{\text{ос-ут}}/u_{\text{ос}}$
Осадок при коагулировании воды (гидроокись алюминия с веществами цветности и флокулянт)	1,06	-	-	-
Осадок + кальцит (утяжелитель)	2,22	20,3	1,77	6,00
Осадок + кварцевый песок (утяжелитель)	2,26	21,0	1,79	6,13
Осадок + магнетит (утяжелитель)	4,19	53,2	7,52	20,00
Осадок + железный порошок (утяжелитель)	6,15	85,8	10,49	30,00

Коэффициент утяжеления определяется для каждого вида испытанных добавок по следующему аналитическому выражению:

$$K_{\text{ут}} = 8,07 \cdot \ln(\rho) - 5,97 \quad \text{при } R^2 = 0,99 \quad (3)$$

где  $K_{\text{ут}}$  – коэффициент утяжеления,  $\rho$  – плотность добавки-утяжелителя, г/см<sup>3</sup>,  $R^2$  – показатель, характеризующий достоверность аппроксимации.

Аналитическое выражение зависимости соотношения скоростей осаждения коагулированной взвеси при ведении разных видов добавок-утяжелителей по отношению к скорости осаждения взвеси без добавок от коэффициента утяжеления имеет вид:

$$\frac{u_{\text{ос-ут}}}{u_{\text{ос}}} = 3,64 \cdot K_{\text{ут}}^{0,88} \quad \text{при } R^2 = 0,99 \quad (4)$$

где  $\frac{u_{\text{ос-ут}}}{u_{\text{ос}}}$  – отношение скорости осаждения коагулированной взвеси с применением добавок-утяжелителей к скорости осаждения без утяжелителей,  $K_{\text{ут}}$  – коэффициент утяжеления.

**5. Установлено, что применение различных видов добавок-утяжелителей при коагулировании воды р. Нева позволяет значительно повысить эффект очистки и качество осветленной воды при низких температурах (менее 5 °С), в сравнении с коагуляцией без добавок-утяжелителей. Применение испытанных добавок-утяжелителей способствует эффективному проведению процесса коагуляции воды не зависимо от температуры обрабатываемой воды (в диапазоне 3,3-27 °С).**

Исследование влияния температуры невской воды на эффективность ее коагуляционной очистки с применением в качестве утяжелителей кварцевого песка и железного порошка проводились при температуре 3,3 и 27 °С (рисунок 6).

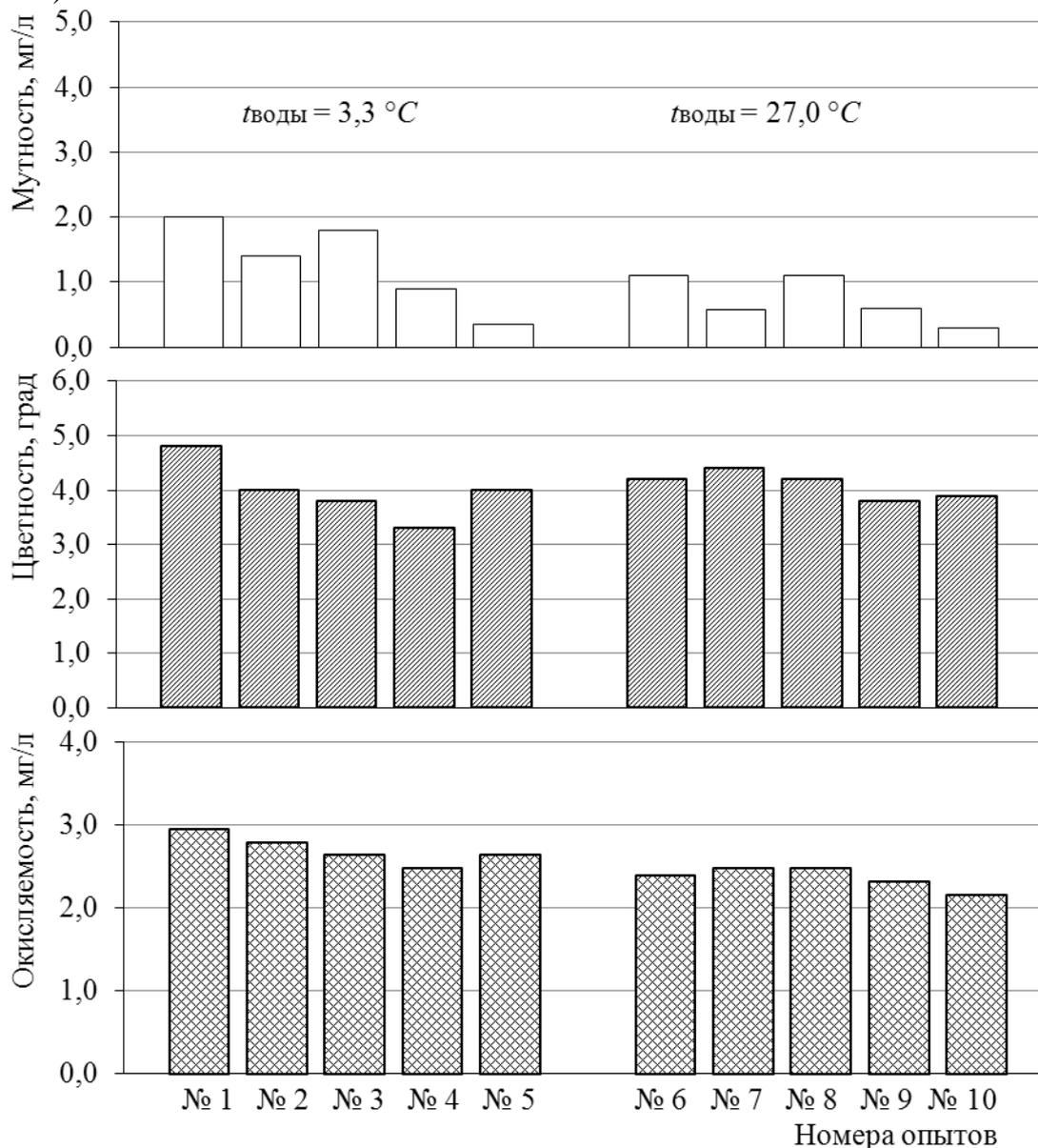


Рисунок 6. Качество воды (мутность, цветность, окисляемость) после отстаивания коагулированной воды без добавок, и с добавлением песка и железного порошка: № 1, № 6 – Коагулирование воды без добавления утяжелителей; № 2, № 7 – Тоже, с добавлением кварцевого песка дозой 0,05 г/л; № 3, № 8 – Тоже, с добавлением песка дозой 0,7 г/л; № 4, № 9 – Тоже, с добавлением железного порошка (0,05 г/л); № 5, № 10 – Тоже, с железным порошком (0,7 г/л).

Дозы утяжелителей в опытах были приняты 0,05 и 0,70 г/л для каждой добавки, коагулирование воды проводилось при оптимальных условиях перемешивания. Продолжительность отстаивания составляла при введении песка  $t_{\text{отст.}} = 5,0$  мин, железного порошка –  $t_{\text{отст.}} = 1,5$  мин, без применения добавок –  $t_{\text{отст.}} = 40,0$  мин.

Как показали результаты проведенных исследований, применение испытанных добавок-утяжелителей способствует эффективному проведению процесса коагуляции воды не зависимо от температуры обрабатываемой воды (рисунок 6), хотя некоторое улучшение качества осветленной воды наблюдалось при более высокой ее температуре. При коагулировании воды с низкой ее температурой также наблюдалось образование крупных и плотных хлопьев. Подобные результаты получены и при применении микрокальцита.

**6. Получены зависимости эффекта снижения мутности, цветности и перманганатной окисляемости маломутных цветных вод при их коагулировании с введением утяжелителей от продолжительности отстаивания, которые позволяют определить время отстаивания для получения требуемого качества осветленной воды (по разным показателям) при применении разных видов добавок-утяжелителей (кварцевого песка, железного порошка и микрокальцита) отечественного производства. Добавление при коагуляции утяжелителей позволяет снизить дозу коагулянта на 10% и дозу флокулянта на 20%.**

По результатам проведенных исследований получены зависимости эффективности снижения мутности, цветности и перманганатной окисляемости при коагулировании воды с введением разных видов добавок-утяжелителей (с оптимальной их дозой) от параметра  $h/t$  (рисунок 7), которые получены при  $h = 50$  мм.

Исследованиями по коагуляции маломутных цветных вод (вода р. Невы) с применением добавок-утяжелителей установлено, что при их введении достигалось снижение рабочих доз коагулянта и флокулянта. В частности, добавление при коагуляции кварцевого песка позволило снизить дозу коагулянта на 10% и дозу флокулянта на 20% (по сравнению с оптимальными их дозами), без ухудшения качества очищенной воды.

Исследования по очистке воды р. Невы с применением в качестве утяжелителя дробленого мрамора (микрокальцита), показали, что по эффективности и качеству очищенной воды она не уступает кварцевому песку. Преимуществом применения микрокальцита является повышение стабильности, щелочности и  $pH$  очищенной воды по сравнению с ее качеством при обычной коагуляции.

Технологией обработки неводской воды на блоке К-6 ЮВС СПб предусмотрена возможность рециркуляции осадка из отстойника в камеру скоростной мешалки, с целью его использования в качестве утяжелителя. Однако на станции этот способ не реализован. Поэтому были проведены опыты по определению эффективности применения в качестве утяжелителя осадка из отстойника при очистке неводской воды.

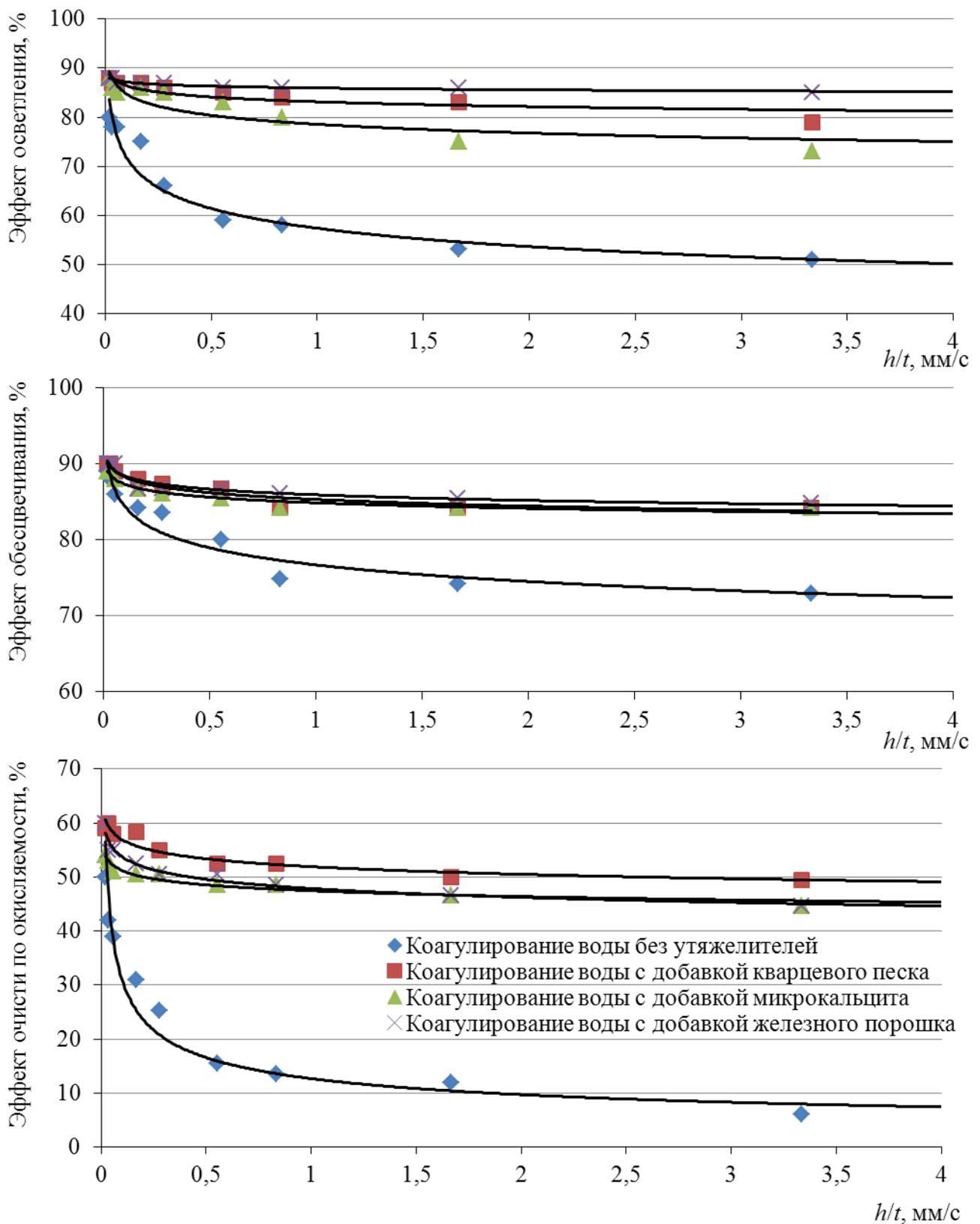


Рисунок 7. Зависимость эффективности коагулированной воды с введением разных видов добавок-утяжелителей

Результаты опытов по применению ранее образованного осадка в качестве добавки для интенсификации процесса коагулирования невской воды оказалось не целесообразным, т.к. приводило к незначительному улучшению

качества осветленной воды, но сопровождалось повышением содержания алюминия в очищенной вод, понижением  $pH$  и щелочности.

Использование при коагулировании воды смеси осадка с песком и песка с железным порошком так же не имело преимуществ по сравнению с однородной добавкой.

Производственные испытания рассматриваемого метода были проведены на действующих очистных сооружениях нового блока К-6 ЮВС СПб при очистке воды р. Невы. Исследования проводились при сравнении работы тонкослойных отстойников блока К-6 в обычном режиме очистки (без добавления песка) и в режиме с добавкой песка при одинаковых дозах реагентов и соответствовали технологическим режимам работы сооружений.

Испытания показали, что эффективность работы тонкослойных отстойников блока К-6 при введении добавки повысилась в среднем на 55,9% по мутности, и на 20,0% по показателю окисляемости в сравнении эффектом их работы без введения добавок.

**7. Получены расчетные зависимости для определения доз реагентов и эффективности очистки маломутных цветных вод с применением разных добавок-утяжелителей и сформулированы области применения этих добавок.**

При обработке данных о работе очистных сооружений блока К-6 ЮВС СПб были определены зависимости доз коагулянта и флокулянта от показателей качества исходной воды (температуры, мутности, цветности и перманганатной окисляемости). Причем, на величину доз реагентов в значительной степени влияли показатели цветности, окисляемости и температуры невиской воды, а величина показателя мутности оказывала малое влияние. Введение при коагуляции добавок-утяжелителей способствовало снижению дозы коагулянта (по  $Al_2O_3$ ) на 10% и флокулянта на 20%. Математической обработкой этих данных получено уравнение для определения дозы реагентов (коагулянта и флокулянта), которое в общем виде имеет следующий вид (5):

$$D_p = k \cdot A \cdot T_v^a \cdot M_{исх}^b \cdot Ц_{исх}^c \cdot Ок_{исх}^d \quad (5)$$

где:  $D_p$  – дозы, реагентов, мг/л;  $T_v$  – температура воды, °С;  $M_{исх}$  – исходная мутность воды, мг/л;  $Ц_{исх}$  – исходная цветность воды, град.;  $Ок_{исх}$  – перманганатная окисляемость исходной воды, мг/л;  $k, A, a, b, c$  и  $d$  – эмпирические коэффициенты, среднее значение этих коэффициентов (для коагулянта и флокулянта) приведено в таблице 6.

Таблица 6

**Значения коэффициентов из уравнения (5)**

Реагенты	Значения коэффициентов					
	$k$	$A$	$a$	$b$	$c$	$d$
Коагулянт (сернокислый алюминий по $Al_2O_3$ )	0,9	0,72	-0,043	-0,034	0,34	0,504
Флокулянт <i>Floram FO-4290PWG</i>	0,8	0,0013	-0,093	-0,091	0,77	1,114

При обработке экспериментальных данных (рисунок 7) получены корреляционные уравнения зависимостей эффективности очистки воды от продолжительности отстаивания для различных видов утяжелителей (6) - (14).

При использовании в качестве утяжелителя хлопьев коагулянта микрокальцита эффективность (в %) снижения мутности ( $\mathcal{E}_m$ ), цветности ( $\mathcal{E}_c$ ) и перманганатной окисляемости ( $\mathcal{E}_{\text{перм. окисл.}}$ ) выражаются следующими зависимостями (6)-(8):

$$\mathcal{E}_m = 78,54 \cdot (h/t)^{-0,033} \text{ при } R^2 = 0,81 \quad (6)$$

$$\mathcal{E}_c = 84,89 \cdot (h/t)^{-0,012} \text{ при } R^2 = 0,96 \quad (7)$$

$$\mathcal{E}_{\text{перм.окисл.}} = 47,44 \cdot (h/t)^{-0,033} \text{ при } R^2 = 0,94 \quad (8)$$

При коагулировании воды с использованием в качестве утяжелителя кварцевого песка, зависимости выражаются уравнениями (9)-(11):

$$\mathcal{E}_m = 83,12 \cdot (h/t)^{-0,017} \text{ при } R^2 = 0,81 \quad (9)$$

$$\mathcal{E}_c = 85,34 \cdot (h/t)^{-0,015} \text{ при } R^2 = 0,93 \quad (10)$$

$$\mathcal{E}_{\text{перм.окисл.}} = 51,91 \cdot (h/t)^{-0,04} \text{ при } R^2 = 0,93 \quad (11)$$

При коагулировании воды с использованием в качестве утяжелителя железного порошка, зависимости имеют вид (12)-(14):

$$\mathcal{E}_m = 85,93 \cdot (h/t)^{-0,006} \text{ при } R^2 = 0,91 \quad (12)$$

$$\mathcal{E}_c = 85,95 \cdot (h/t)^{-0,012} \text{ при } R^2 = 0,92 \quad (13)$$

$$\mathcal{E}_{\text{перм.окисл.}} = 47,86 \cdot (h/t)^{-0,05} \text{ при } R^2 = 0,96 \quad (14)$$

Уравнения (6)-(14) можно использовать для расчета тонкослойных отстойников при глубине отстаивания 50 мм. При другой высоте слоя отстаивания  $h_{\text{ср}}$  (от 50 до 200 мм) можно воспользоваться экспериментальными данными о коэффициентах агломерации при применении добавок-утяжелителей (таблица 3).

При применении в качестве добавки микрокальцита зависимость показателя дополнительной щелочности ( $\Delta \text{Щ}_k$ ) очищенной воды от его дозы выражается (15):

$$\Delta \text{Щ}_k = \text{Щ}_{\text{о.к.}} - \text{Щ}_o = 0,77 \cdot d_k^{1,02} \text{ при } R^2 = 0,93 \quad (15)$$

где  $\text{Щ}_o$  и  $\text{Щ}_{\text{о.к.}}$  – щелочность осветленной воды при коагуляции, соответственно, без применения и с применением кальцита, ммоль/л,  $d_k$  – доза кальцита, г/л. Формула (15) применима к воде р. Невы со средним значением исходной щелочности 0,62 ммоль/л.

На основе результатов этих исследований предложены технологические схемы по обработке маломутных цветных природных вод с применением различных видов добавок-утяжелителей для получения воды питьевого качества, соответствующей СанПиН 2.1.4.1074-01. Схемы разделены в зависимости от требуемой степени очистки исходной воды, от продолжительности отстаивания и показателей ее качества:

1. При очистке исходной воды с низким щелочным резервом и необходимости снижения показателя цветности до 85,8% и окисляемости до 48,9% (рисунок 7) рекомендуется схема с применением в качестве добавки-утяжелителя микрокальцита (рисунок 8). При этом одновременно обеспечивается поддержание щелочного резерва очищенной воды.

Основными узлами технологической схемы являются: реагентное хозяйство, включающее смеситель, куда подаются коагулянт и утяжелитель, камеры флокуляции (с вводом флокулянта), далее полочные отстойники и фильтры. Исходную воду рекомендуется предварительно обрабатывать озоном.

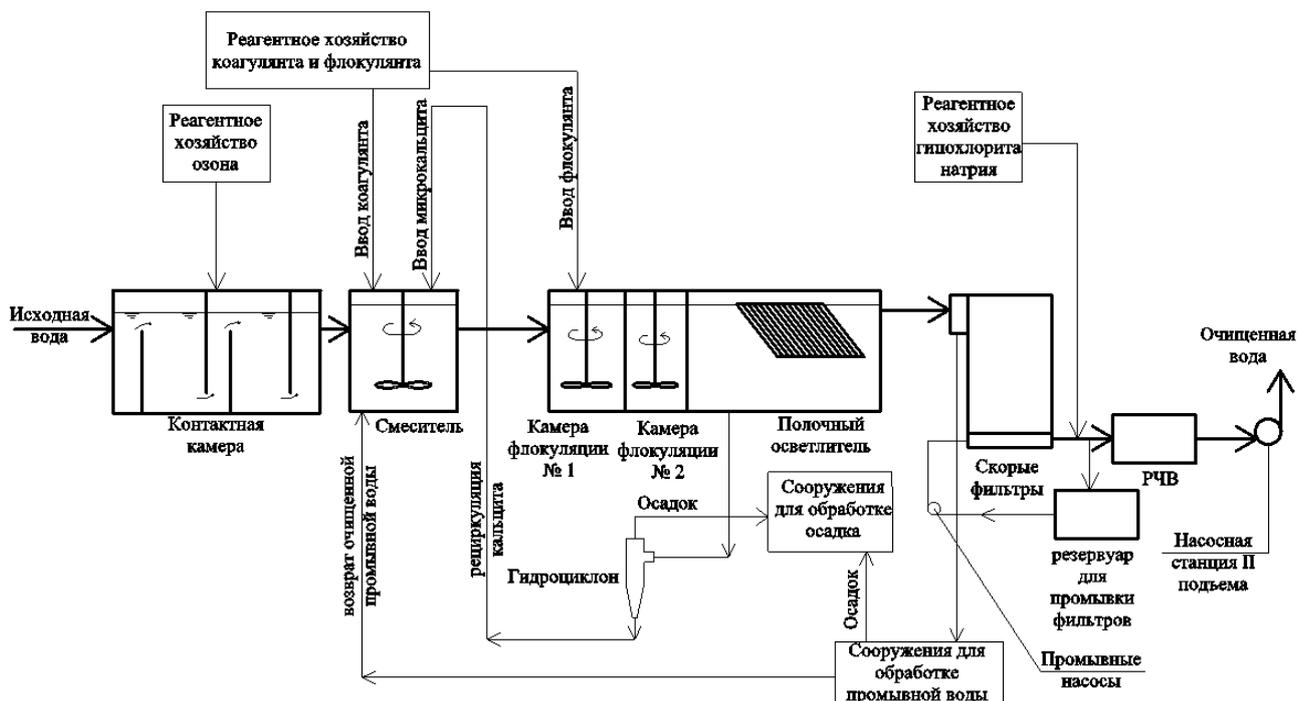


Рисунок 8. Технологическая схема очистки воды с применением микрокальцита

Камеры смешения (смеситель) и флокуляции оборудуются механическими мешалками, с помощью которых поддерживаются необходимые скорости перемешивания, зависящие от вида вводимых добавок-утяжелителей. В технологических схемах предусмотрена циркуляция утяжелителей с целью их повторного использования, для их отделения от осадка устраивается узел регенерации в виде гидрочиклона или сепаратора.

2. При требуемой степени очистки исходной воды: по цветности – до 86,5% и по окисляемости – до 53,8% возможно применение при коагулировании воды в качестве добавки-утяжелителя кварцевого песка. В технологической схеме с кварцевым песком дополнительно в смеситель подается подщелачивающий реагент. Остальные узлы технологической схемы очистки воды с применением кварцевого песка те же, что и в предыдущей схеме.

3. При необходимости снижения показателя цветности исходной воды до 86,9% и окисляемости до 51,0%, а также при необходимости уменьшения продолжительности отстаивания обрабатываемой воды и, соответственно, объемов отстойных сооружений в 3-4 раза по сравнению с предыдущими схемами, рекомендуется применение при коагулировании воды в качестве добавки-утяжелителя железного порошка. Остальные узлы обработки воды с применением железного порошка те же, что и в предыдущей схеме.

Для предотвращения выноса частиц порошка с осветленной водой, на выходе из отстойника вода проходит магнитный сепаратор. Магнитный

сепаратор может быть также установлен вместо гидроциклона в узле регенерации утяжелителя (железного порошка), для его отделения от осадка.

4. При необходимости более высокого снижения эффекта очистки по цветности и окисляемости технологические схемы должны быть дополнены ступенью фильтрования через активированный уголь, либо устройство второго слоя ГАУ на скором фильтре с песчаной загрузкой.

Технико-экономические расчеты показали, что применение добавок-утяжелителей для интенсификации процесса коагуляции при очистке невисской воды позволяет сократить стоимость строительно-монтажных работ по 1-ой ступени очистки: на 398,7 млн. руб., при использовании кварцевого песка и микрокальцита, и 430,5 млн. руб. – при добавлении железного порошка, а эксплуатационных расходов – на 2,74 и 2,68 млн. руб., соответственно, по сравнению с современной технологией обработки воды без добавки утяжелителя.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

1. В результате проведенных комплексных исследований по интенсификации процесса коагуляции при очистке маломутных цветных вод с применением добавок-утяжелителей определены оптимальные технологические параметры разных видов отечественных добавок-утяжелителей и эффективность их использования. Выявлены оптимальные дозы и фракционный состав добавок-утяжелителей, порядка их ввода в обрабатываемую воду; условия перемешивания при обработке маломутных цветных вод, в частности р. Нева.

2. Установлено, что оптимальный размер фракций добавок-утяжелителей, при котором обеспечивалось наилучшее качество очищенной после отстаивания воды, составляли: для песка и микрокальцита – 0,05-0,14 мм; для железного порошка и магнетита – не более 0,05 мм, а доза добавки – 0,05 г/л (при применении флокулянта).

3. Исследованиями установлено, что оптимальными условиями перемешивания воды с реагентами и добавляемыми утяжелителями являются: при использовании кварцевого песка и микрокальцита – быстрое перемешивание (смешение) – 3 мин при 300 об/мин, медленное перемешивание (флокуляция) – 2 мин при 100 об/мин и 1 мин при 50 об/мин; при добавлении железного порошка: быстрое перемешивание – 3 мин при 600 об/мин, медленное перемешивание – 2 мин при 150 об/мин и 1 мин при 50 об/мин. Лучшее качество осветленной воды достигалось при введении утяжелителей в обрабатываемую воду вместе с коагулянтом на стадии смешения.

4. Исследования кинетики выпадения осадка при отстаивании воды после ее коагуляции с введением добавок-утяжелителей показали, что время осаждения сокращалось – с 30-40 мин (без добавок-утяжелителей) до 4,5-5,0 мин при добавлении кварцевого песка и микрокальцита и до 1,0-1,5 мин при добавлении железного порошка и магнетита. Определены значения

коэффициентов агломерации  $n$  при осаждении коагулированных примесей с добавками (для песка – 0,39, для магнетита и железного порошка – 0,43).

5. Установлено, что изменение температуры обрабатываемой воды (в пределах 3-27 °С) при применении испытанных добавок-утяжелителей не оказывало существенного влияния на эффективность процессов коагуляции и флокуляции. При низкой температуре воды продолжительность последующего отстаивания также сокращалась в 8-26 раз (по сравнению с обработкой воды без добавок-утяжелителей). Применение микрокальцита способствовало повышению щелочности,  $pH$  очищенной воды и улучшало ее стабильность.

6. Применение добавок-утяжелителей (на примере кварцевого песка) при коагуляции невской воды позволяло снизить оптимальную дозу коагулянта на 10%, и дозу флокулянта – на 20% (по сравнению с оптимальными их дозами при обычной коагуляции воды), без ухудшения качества очищенной воды;

7. Применение осадка в качестве добавки для интенсификации процесса коагулирования невской воды оказалось не целесообразным, т.к. приводило к незначительному улучшению качества осветленной воды, но сопровождалось повышением содержания алюминия в очищенной вод. Также малоэффективным оказалось применение смеси осадка с песком.

8. Проведенные промышленные испытания на производственных сооружениях блока К-6 ЮВС СПб показали, что добавка кварцевого песка при коагуляции невской воды позволила повысить эффективность работы тонкослойных отстойников в среднем на 55,9% по мутности, и на 20,0% по окисляемости.

9. По результатам исследований рекомендованы технологические схемы процесса коагуляции маломутных цветных вод с введением в качестве утяжелителей кварцевого песка, микрокальцита и железного порошка. Выбор схемы осуществляется в соответствии с требуемым эффектом очистки по показателям цветности и окисляемости исходной воды.

10. Получены расчетные уравнения по определению оптимальных доз реагентов и эффекта осветления маломутных цветных природных вод (по основным качественным показателям) при их коагуляции с введением разных видов добавок-утяжелителей (кварцевого песка, железного порошка и микрокальцита) отечественного производства. Предложены аналитические зависимости для определения величин коэффициента утяжеления и степени повышения скоростей осаждения коагулированной взвеси при введении разных видов добавок-утяжелителей

11. Экономическая эффективность применения способа интенсификации коагуляционной обработки маломутных цветных вод путем применения добавок-утяжелителей заключается в значительном сокращении объема сооружения 1-ой ступени очистки и их стоимости, а также в снижении затрат реагентов и электроэнергии.

### **III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:**

#### **публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Хиршиева, И.В. Результаты исследований по применению добавок-утяжелителей для интенсификации процесса коагуляции / И.В. Хиршиева, Ю.А. Феофанов // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 3(38). – С. 129-134 (0,2/0,38 п. л.).

2. Хиршиева, И.В. Интенсификация процесса коагуляции маломутных цветных вод с введением добавок-утяжелителей / И.В. Хиршиева [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/116-12394> (0,5 п. л.).

3. Хиршиева, И.В. Очистке воды р. Нева с применением добавок-утяжелителей хлопьев коагулянта / И.В. Хиршиева, Ю.А. Феофанов // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 3(44). – С. 175-178 (0,15/0,25 п. л.).

4. Хиршиева, И.В. Технологические схемы процесса коагуляции маломутных цветных вод с введением добавок-утяжелителей / И.В. Хиршиева // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 5(46). – С. 107-111 (0,31 п. л.).

#### **публикации в других изданиях:**

5. Хиршиева, И.В. Исследования по применению добавок-утяжелителей для интенсификации процесса коагуляции маломутных цветных вод / И.В. Хиршиева, Ю.А. Феофанов // Актуальные проблемы строительства: Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / СПбГАСУ. – СПб., 2013. – С. 6-7 (0,1/0,13 п. л.).

6. Хиршиева, И.В. Повышение эффективности процесса коагуляции маломутных цветных вод путем введения добавок-утяжелителей / И.В. Хиршиева, Ю.А. Феофанов // Вода, экология: проблемы и решения. – 2014. – № 2. – С. 24-30 (0,25/0,44 п. л.).

7. Хиршиева, И.В. Особенности коагулирования маломутных цветных вод с применением добавок-утяжелителей / И.В. Хиршиева, Ю.А. Феофанов // Вода, экология: проблемы и решения. – 2014. – № 4. – С. 3-9 (0,25/0,44 п. л.).