

На правах рукописи



САЛМИН Сергей Михайлович

**КОАГУЛЯЦИЯ ПРИМЕСЕЙ ПРИРОДНЫХ ВОД С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРУПНОЗЕРНИСТОЙ
КОНТАКТНОЙ ЗАГРУЗКИ**

Специальность 05.23.04 - Водоснабжение, канализация, строительные
системы охраны водных ресурсов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза 2015

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Гришин Борис Михайлович

Официальные оппоненты – Говорова Жанна Михайловна,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет», профессор
кафедры «Водоснабжение»

Лушкин Игорь Александрович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», доцент кафедры
«Теплогазоснабжение, вентиляция,
водоснабжение и водоотведение»

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Нижегородский
государственный архитектурно-
строительный университет»

Защита состоится 12 ноября 2015 г. в 13.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.02, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, ПГУАС, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/>.

Автореферат разослан “___” _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



М. В. Бikuнова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время на большинстве водопроводных очистных сооружений (ВОС) применяются гидравлические или механические смесительные устройства. Гидравлические смесители просты по конструкции и надёжны в эксплуатации, однако при расходах воды ниже расчётных значений эти устройства не обеспечивают эффективного смешения с коагулянтом вследствие снижения турбулизации потока. Более совершенными являются механические смесители, позволяющие быстро и равномерно смешать реагенты с водой, а также изменять режимы перемешивания в зависимости от качества воды. Недостатком механических смесителей является их весьма высокая энергоёмкость и недостаточная эксплуатационная надёжность.

Поэтому разработка новых конструкций смесителей и рациональных способов коагулирования воды, позволяющих интенсифицировать процесс агломерации примесей при незначительных энергозатратах и улучшить работу осветлительных сооружений станций водоподготовки, является актуальной задачей.

Одним из наиболее эффективных способов быстрой агломерации взвешенных веществ в воде после добавления коагулянта является контактная коагуляция, происходящая на зёрнах контактной загрузки из инертного материала. Кроме высокой интенсивности процесса, контактная коагуляция отличается применением меньших доз коагулянта, независимостью от щелочности и температуры воды, меньшим влиянием рН на агломерацию примесей. До настоящего времени контактная коагуляция применялась на сооружениях очистки воды – контактных осветлителях и фильтрах, где совместно с процессом агломерации примесей осуществляется одновременное осветление воды в условиях ламинарной фильтрации через слой мелкозернистой загрузки. Экспериментальные исследования показали, что контактная коагуляция может происходить на поверхности грубозернистой загрузки и при турбулентном фильтровании. Использование грубозернистых загрузок, обладающих весьма высокой удельной поверхностью и низким сопротивлением, в смесителях гидравлического типа на станциях водоподготовки позволит интенсифицировать процессы хлопьеобразования и повысить эффективность работы осветлительных сооружений (отстойников и фильтров). Снижение доз коагулянтов, требуемых для каче-

ственной очистки природной воды, при этом можно обеспечить за счёт совместного применения контактных загрузок и безреагентных методов интенсификации процесса коагуляции, не требующих, как правило, значительных эксплуатационных затрат и сложного оборудования.

Степень разработанности темы Исследованиями процессов коагуляции природных вод в присутствии контактных сред занимались такие ученые, как Д.М. Минц, В.З. Мельцер, Е.Д. Бабенков, Р.И. Аюкаев, М.Г. Журба, Ж.М. Говорова, Е.Ф. Кургаев, А.В. Бутко, В.А. Лысов, В.А. Михайлов, Ю.Л. Сколубович, Е.Л. Войтов и др. Теоретические и экспериментальные зависимости, полученные данными авторами, могут быть использованы для расчетов сооружений, работающих в условиях ламинарного фильтрования, стеснённого осаждения или коагуляции в свободном объеме воды. В настоящей диссертации исследуются малоизученные закономерности процессов коагуляции примесей воды при турбулентном фильтровании через крупнозернистые загрузки.

Цель работы. Целью диссертации является разработка и исследование реагентосберегающей технологии коагуляции воды поверхностных источников в гидравлических смесителях с применением крупнозернистых контактных загрузок и безреагентных способов интенсификации процессов агломерации примесей.

Задачи исследования. В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи исследований:

- теоретический анализ процессов агломерации примесей при обработке воды коагулянтами;
- теоретические и экспериментальные исследования процесса турбулентного фильтрования малоконцентрированной водной суспензии через крупнозернистые загрузки различного фракционного состава;
- экспериментальные исследования влияния режимов коагуляционной обработки с применением грубозернистой контактной загрузки на эффективность осветления воды отстаиванием и фильтрованием;
- теоретическое обоснование и экспериментальное исследование реагентосберегающей технологии коагуляционной обработки природной воды в сме-

сителях с применением контактной загрузки и перспективных безреагентных способов интенсификации процессов коагуляции примесей;

- разработка рекомендаций к расчёту и проектированию гидравлических смесительных устройств с контактной грубозернистой загрузкой.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- установлены основные закономерности турбулентного фильтрования воды через слой крупнозернистой загрузки;

- получены математические зависимости для определения гидравлических характеристик контактной загрузки при турбулентном фильтровании природной воды, обработанной коагулянтом;

- разработан новый реагентосберегающий способ коагулирования воды, включающий в себя рециркуляцию части коагулируемой воды, её турбулентное фильтрование через слой контактной загрузки и концентрированный ввод коагулянта в рециркуляционный поток;

- определено влияние технологических характеристик предложенного способа обработки воды (степени рециркуляции коагулируемой воды, точек ввода реагентов, параметров фильтрования через контактную загрузку и её фракционного состава) на эффективность последующей очистки и выбор оптимальных доз коагулянта;

- разработана новая конструкция гидравлического смесителя, обеспечивающая интенсивный процесс хлопьеобразования при добавлении коагулянта при широком диапазоне изменения параметров качества исходной воды;

- получена математическая модель, устанавливающая зависимости повышения эффекта очистки воды от технологических характеристик предложенного смесителя в различные периоды года (на примере сурской воды).

Теоретическая и практическая значимость диссертации.

Теоретически определены гидравлические характеристики зернистых загрузок при турбулентном режиме фильтрования и установлены закономерности укрупнения примесей коагулируемой природной воды в процессе её движения через слой крупнозернистой контактной массы.

Предложена и апробирована в промышленных условиях новая реагентосберегающая технология коагуляционной обработки воды поверхностных ис-

точников с применением гидравлических смесительных устройств с крупнозернистой контактной загрузкой, обеспечивающая высокое качество водоподготовки. Разработаны рекомендации к расчету и проектированию устройств и оборудования, входящих в состав предложенной технологической схемы реагентной обработки воды.

Технология с применением рециркуляции части коагулируемой воды, концентрированного ввода коагулянта и контактной коагуляции на крупнозернистой загрузке внедрена в проект реконструкции водопроводных очистных сооружений пл. «Кирпичная» г. Пензы производительностью 220 тыс. м³/сут. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения за счет экономии алюмосодержащих коагулянтов составил 1 883 тыс. руб. в ценах 2015 года.

Методология и методы диссертационного исследования.

Методология исследования диссертационной работы включает системный подход к аналитическому обобщению сведений, содержащихся в научно-технической и специальной литературе, использование методов химического анализа и планирование эксперимента, автоматизированную обработку полученных экспериментальных данных с применением компьютерных программ. Объектом исследования являлась природная вода поверхностного источника, а предметом исследования – способ и технология коагуляционной обработки воды в смесительных устройствах станций водоподготовки.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретические и экспериментальные исследования процессов турбулентного фильтрования и коагуляции примесей природной воды с применением крупнозернистых контактных загрузок;
- обоснование реагентосберегающего способа коагулирования воды, включающего рециркуляцию части обрабатываемой воды в гидравлическом смесителе, концентрированный ввод коагулянта и контактную коагуляцию рециркуляционного потока на крупнозернистой загрузке;
- результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров обработки воды по предлагаемому способу коагулирования на эффективность последующей двухступенчатой очистки воды;

- математические зависимости для определения гидравлических характеристик контактной загрузки при турбулентном фильтровании и величины повышения эффекта осветления при заданных технологических параметрах обработки воды по предлагаемому способу коагулирования;

- разработка и апробация новой экономически эффективной технологии обработки природной воды поверхностного источника с применением смесителя гидравлического типа, оборудованного системой рециркуляции и контактной камерой;

- рекомендации к расчету и проектированию устройств, входящих в предложенную технологическую схему коагуляционной обработки воды.

Достоверность результатов исследований. В диссертации использованы фундаментальные научные положения, касающиеся исследования процессов коагуляции примесей воды и движения жидкостей в пористых средах. Применены современные общепринятые методики экспериментальных исследований и химических анализов, а также поверенное оборудование и приборы. Результаты лабораторных экспериментов соответствуют данным производственных испытаний.

Апробация работы и публикации.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 11 региональных, всероссийских и международных конференциях в гг. Пензе, Тюмени, Казани в 2011-2015 г. По материалам диссертации опубликованы 15 работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК. Получен патент РФ на полезную модель № 143766 «Смеситель».

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 149 страницах машинописного текста, включает 4 таблицы, 68 рисунков, и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 85 наименований и одного приложения.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Определены цель диссертации, её научная новизна, практическая значимость, данные о производственном внедрении, полученном экономическом эффекте и апробации результатов работы.

В первой главе приведен анализ современных технологий и устройств коагуляционной обработки природных вод поверхностных источников.

Дан анализ роли коагуляции в процессах водоподготовки и произведена оценка эффективности использования алюмосодержащих коагулянтов при очистке вод поверхностных источников волжского бассейна и, в частности, реки Суры.

Рассмотрены существующие способы перемешивания воды с коагулянтами и типы смесительных устройств, применяемых на водопроводных очистных сооружениях. Показано, что коагуляционное структурообразование значительно ускоряется в присутствии дополнительных поверхностей раздела фаз в воде, обрабатываемой коагулянтами. Проанализированы преимущества контактной коагуляции с применением зернистых загрузок, рассмотрены конструкции водоочистных устройств, в работе которых используется принцип контактной коагуляции.

Показано, что сооружения с контактными стационарными загрузками работают при незначительных скоростях фильтрования, которые соответствуют ламинарному режиму движения жидкости в порах зернистого слоя, что позволяет одновременно с контактной коагуляцией осуществлять процесс осветления воды.

Проведенные исследования показали, что контактная коагуляция успешно осуществляется и при турбулентном режиме фильтрования воды, обработанной коагулянтами, через слои крупнозернистой загрузки (гравия, щебня и т.п.). Использование крупнозернистой контактной массы в смесительных устройствах может быть целесообразным при любой производительности очистных сооружений вследствие незначительного гидравлического сопротивления крупных фракций загрузки и весьма высоких значений скорости фильтрования. Так как на большинстве водопроводных очистных станций используются в основном безнапорные гидравлические смесители, то практический интерес представляет дополнительное их оборудование контактными камерами с крупнозернистой загрузкой.

Применение в составе технологических линий ВОС конструкций гидравлических смесителей, совмещающих в себе процессы коагуляции в свободном

объёме и на поверхности крупнофракционной контактной загрузки, позволит уменьшить зависимость коагулируемой способности реагентов от температуры, щелочности и рН воды поверхностных источников, а также снизить дозы коагулянта при сохранении высокого качества очистки.

Вторая глава посвящена исследованиям процессов движения воды и коагуляции примесей в толще зернистой загрузки.

На основании анализа закономерностей процесса турбулентной фильтрации получены уравнения, показывающие характер зависимости скорости движения жидкости в зернистой пористой среде от ее гранулометрического состава и потенциальной энергии потока.

Расчётным путем получена зависимость между гидравлическим уклоном i для заиленного пространства зернистой загрузки в произвольный момент времени и начальным гидравлическим уклоном i_0 (в чистой загрузке) при турбулентном режиме фильтрования малоцентрированной водной суспензии

$$\frac{i}{i_0} = F^{1,1} \left(\frac{m_0}{m} \right)^3 = F^{1,1} \left(\frac{1}{1-\delta} \right)^3, \quad (1)$$

где m , m_0 – соответственно пористость загрузки в произвольный и начальный моменты времени фильтрования; δ – насыщенность порового пространства в произвольный момент времени; F – параметр, определяемый по формуле

$$F = 1 + \frac{m_0 \delta}{1 - m_0} = \frac{1 - m_0 + m_0 \delta}{1 - m_0} = \frac{1 - m}{1 - m_0}. \quad (2)$$

Графики зависимости $F=f(\delta)$ при изменении m_0 от 0,4 до 0,6 приведены на рисунке 1.

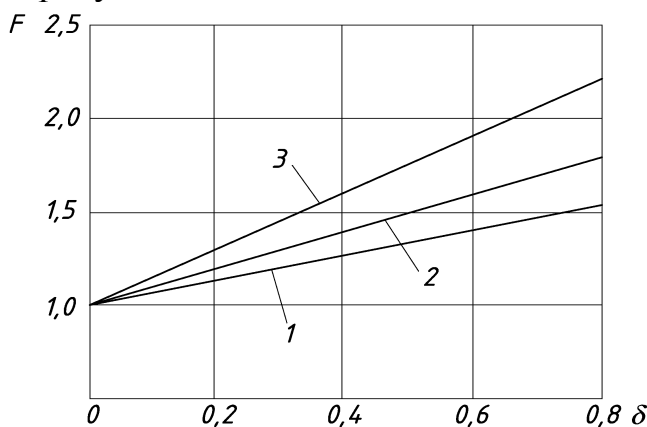


Рисунок 1. Графики зависимости параметра F от насыщенности зернистого слоя δ :
1 – при $m_0=0,4$; 2 – при $m_0=0,5$; 3 – при $m_0=0,6$

Установлено, что после определенного промежутка времени фильтрования наступает состояние предельной насыщенности порового пространства крупнозернистой загрузки, при котором скорость прилипания хлопьев скоагулированной взвеси к зернам загрузки становится равной скорости отрыва и выноса хлопьев из толщи загрузки. При этих условиях

гидравлический уклон i становится постоянным и не зависящим от времени фильтрования при расходе $Q = \text{const}$.

Получено уравнение, описывающее интенсивность процесса укрупнения хлопьев скоагулированной взвеси при движении воды в толще зернистой загрузки, находящейся в состоянии предельной насыщенности порового пространства

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\alpha_f}{\beta_f} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_l \cdot m_{np} \cdot v}{g \cdot v \cdot i_{np}}} = \frac{\alpha_f}{\beta_f} \frac{\sqrt{n_1 \cdot n_l}}{G}, \quad (3)$$

где n_1, n_2 – соответственно численные концентрации микрохлопьев в воде, поступающей на зернистый слой и в воде, выходящей из слоя; α_f – коэффициент, характеризующий степень уплотнения хлопьев; β_f – константа; n_l – осредненное количество микрохлопьев в хлопке (агрегате) скоагулированной взвеси; m_{np} и i_{np} – соответственно пористость загрузки и гидравлический уклон; v – скорость фильтрования, м/с; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; G – градиент скорости перемешивания в зернистой загрузке, определяемый по формуле

$$G = \sqrt{\frac{g \cdot H_3 \cdot i_{np}}{t \cdot \nu}}, \text{с}^{-1}, \quad (4)$$

где H_3 – толщина загрузки, м; t – время контакта воды с зернистой загрузкой, с

На основании теоретических исследований сделан вывод о том, что интенсификация процесса агломерации частиц примесей воды в гидравлическом смесителе, снабженном контактной камерой с крупнозернистой загрузкой, должна обеспечить улучшение последующей очистки воды. Целесообразным также является экспериментальное исследование способа контактной коагуляции на крупнозернистой загрузке в сочетании с безреагентными способами интенсификации процесса коагуляции с целью сокращения доз алюмосодержащих реагентов.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований по определению предельной насыщенности и гидравлических характеристик крупнозернистой контактной загрузки при фильтровании в турбулентном режиме. Объектом исследований являлась вода Сурского водохранилища. Эксперименты проводились на лабораторной установке, смонтированной на площадке ВОС г. Пензы, состоящей из фильтровальной колонны с крупнозерни-

стой загрузкой из гранитного щебня, пьезометров, отводного трубопровода, соединенного с напорным водоводом сырой воды, запорно-регулирующей арматуры и вентиляей, а также насосов-дозаторов. Толщина загрузки в фильтровальной колонне составляла 1,0 м.

Лабораторные эксперименты проводились несколькими сериями. Для каждой серии опытов в фильтровальную колонну засыпалась однородная зернистая загрузка определенного диаметра, у которой заранее находилась пористость m_0 в водонасыщенном состоянии. В начальные моменты фильтрования исходная вода не обрабатывалась коагулянтном, и при помощи пьезометров определялся гидравлический уклон i_0 в чистой загрузке. Далее в воду вводился раствор коагулянта и замутнитель (промывная вода скорых фильтров), при этом ее мутность изменялась от 120 до 200 мг/л. В течение всего периода фильтрования снимались показания пьезометров и определялись значения гидравлического уклона i при заданной скорости фильтрования $v_1 = \text{const}$ до момента, когда значение i не становилось постоянным, что соответствовало состоянию полной (предельной) насыщенности порового пространства загрузки осадком ($\delta = \delta_{\text{пр}}$). После этого осуществлялась промывка загрузки обратным током водопроводной воды и эксперимент повторялся при новой скорости фильтрования $v_2 = \text{const}$. Всего проводилось 6 серий экспериментов с однородной загрузкой диаметрами зерен $d_3 = d_{\text{экв}}$, равными 10, 20, 30, 40, 50 и 70 мм.

Графики изменения гидравлического уклона от времени фильтрования в контактной однородной загрузке крупностью зерен $d_3 = 20$ мм показаны на рисунке 2.

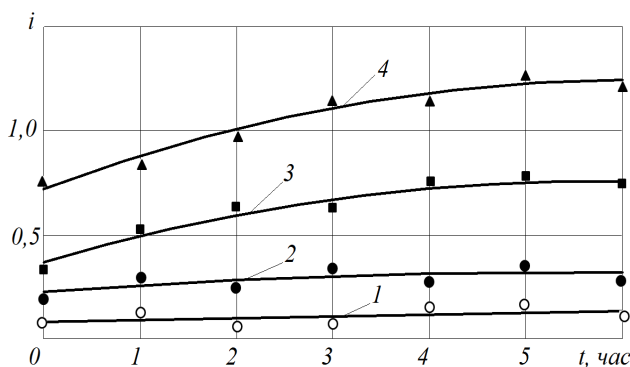


Рисунок 2. Графики $i=f(t)$ в однородной контактной загрузке $d_3=20$ мм: 1 – $v=0,03$ м/с; 2 – $v=0,05$ м/с; 3 – $v=0,07$ м/с; 4 – $v=0,09$ м/с

В ряде экспериментов исследовалась неоднородная загрузка с эквивалентным диаметром $d_{\text{экв}}=33$ мм и коэффициентом неоднородности $K_H=1,7$, которая по гидравлическим характеристикам сравнивалась с однородной загрузкой $d_3 = d_{\text{экв}} = 30$ мм и $K_H \approx 1$.

Числа Рейнольдса определялись по формуле

$$\text{Re} = \frac{\rho v d_3}{6\mu(1-m)\alpha_\phi}, \quad (5)$$

где μ и ρ – соответственно динамический коэффициент вязкости, Па·с и плотность воды, кг/м³, α_ϕ – коэффициент формы зерен.

В процессе экспериментальных исследований выявлен характер зависимости изменения гидравлического уклона крупнозернистой контактной загрузки с $d_3=10-70$ мм от времени фильтрования коагулированной природной воды при развитом турбулентном режиме ее движения в порах ($\text{Re}>76$). Установлено, что при фактически одном и том же эквивалентном диаметре зерен гидравлическое сопротивление однородной загрузки меньше, чем сопротивление неоднородной контактной массы.

Расчетным путем на основании экспериментальных данных получены зависимости изменения пористости и насыщенности порового пространства контактной загрузки с различной крупностью зерен от времени фильтрования, а также эпюры распределения загрязнений по толщине слоя загрузки в условиях предельной насыщенности порового пространства. Установлено, что величина предельной насыщенности увеличивается с возрастанием скорости фильтрования и уменьшается с увеличением крупности зерен контактной загрузки.

Графики изменения расчетных значений пористости и насыщенности однородной контактной загрузки с $d_3=40$ мм в процессе фильтрования показаны на рисунке 3.

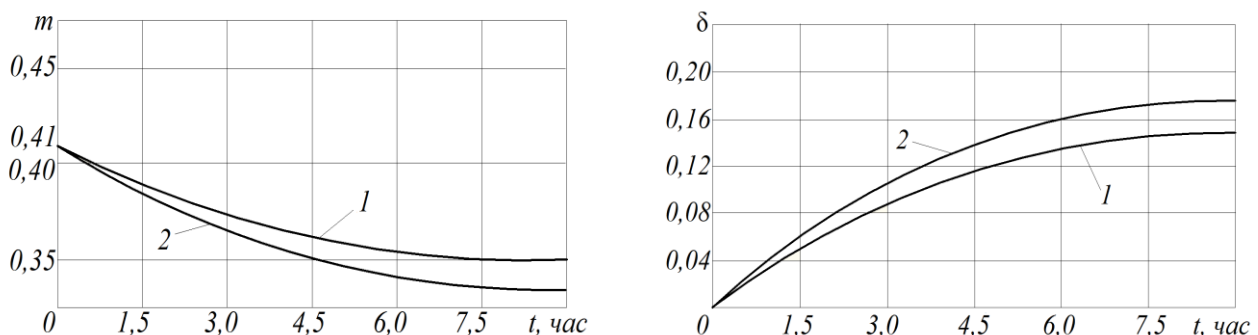


Рисунок 3. Графики зависимости расчетных значений пористости и насыщенности от времени фильтрования для однородной загрузки с $d_3=40$ мм при: 1- $v=0,07$ м/с, 2- $v=0,15$ м/с

В результате обработки полученных данных было установлено, что при турбулентном фильтровании коагулированной воды через слой однородной крупнозернистой загрузки в условиях предельного насыщения порового про-

странства величина гидравлического уклона может быть определена по формуле

$$i_{np} = K \frac{(1 - m_{np})^{1,1} \cdot v^{1,9}}{m_{np}^3 \cdot d_3^{1,1}}, \quad (6)$$

где K – коэффициент, $K=0,1$; m_{np} – пористость заиленной загрузки, $0,335 \leq m_{np} \leq 0,37$; v – скорость фильтрования, $0,03 \leq v \leq 0,15$ м/с; d_3 – крупность зерен загрузки, $0,01 \leq d_3 \leq 0,07$ м.

В четвертой главе дано описание экспериментальных исследований процессов коагулирования примесей природной воды с использованием крупнозернистой контактной загрузки. Объектом исследования являлась вода Сурского водохранилища.

Исследования влияния контактной коагуляции с использованием крупнозернистой загрузки на эффективность очистки исходной воды, обработанной коагулянтом и требуемые дозы коагулянта (сернокислого алюминия с содержанием активной части 16%) проводились на лабораторной установке, смонтированной в помещении блока водоподготовки площадки «Кирпичная» ВОС г. Пензы. Лабораторная установка состояла из контактной камеры с крупнозернистой загрузкой, работающей под избыточным напором, соединённого с напорным водоводом ВОС отводного трубопровода, смесителя, сбросного трубопровода, насосов-дозаторов раствора коагулянта, запорно-регулирующей арматуры и манометров. Толщина загрузки в контактной камере составляла 2,0 м. Контактная камера была снабжена патрубками для отбора проб после прохождения водой слоя загрузки толщиной H_3 соответственно 0,5; 1,0 и 2,0 м. Скорость фильтрования воды через загрузку изменялась от 0,03 м/с до 0,12 м/с. Градиент скорости G при этом находился в пределах от 146 с^{-1} до 4104 с^{-1} для исследуемой однородной загрузки с d_3 от 10 до 70 мм.

Время контакта t , с, обработанной коагулянтом воды с крупнозернистой загрузкой находилось по формуле:

$$t = \frac{H_3}{v} m_{np}, \quad (7)$$

где m_{np} – пористость загрузки в состоянии предельного насыщения; H_3 – толщина слоя загрузки, после прохождения которого отбирались пробы.

Время контакта t изменялось в указанном диапазоне скоростей фильтрования от 5,6 с до 24,6 с для H_3 от 0,5 до 2,0 м.

Целью проведения экспериментов являлось нахождение наиболее экономичных доз коагулянта, обеспечивающих высокое качество двухступенчатой очистки исходной воды при её обработке раствором сернокислого алюминия (СА) в условиях комбинированного перемешивания в порах контактной загрузки и свободном объеме воды. В соответствии с программой экспериментов предусматривалось три этапа исследований.

На первом этапе испытаний моделировался способ комбинированной коагуляционной обработки воды, при котором большая часть расхода исходной воды подавалась в свободный объем смесителя, а меньшая часть после предварительной контактной коагуляции смешивалась с основным расходом воды в начале смесителя.

На втором этапе испытаний моделировался способ комбинированной коагуляционной обработки воды, при котором определенная часть коагулируемой воды $Q_p=(0,02-0,1)Q$ рециркулировала в начало гидравлического смесителя через контактную камеру с крупнозернистой загрузкой.

Эксперименты третьего этапа исследований отличались от экспериментов второго этапа тем, что весь раствор СА вводился перед контактной камерой. Таким образом моделировался способ комбинированной коагуляционной обработки с концентрированным введением реагента в рециркуляционный поток перед контактной камерой (рисунок 4).

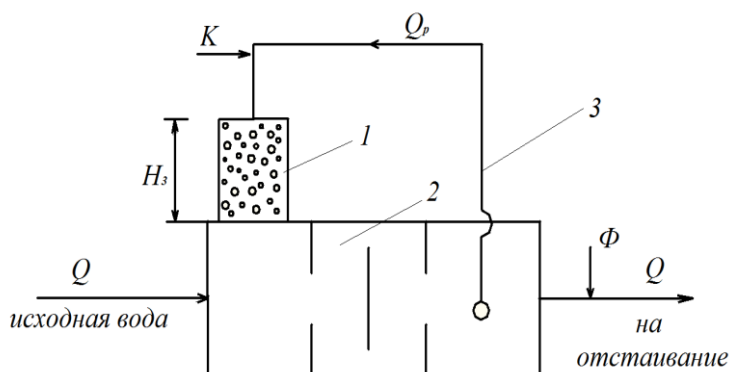


Рисунок 4. Схема моделирования контактной обработки воды на третьем этапе исследований:

1 – контактная камера; 2 – гидравлический смеситель; 3 – рециркуляция коагулируемой воды;
 K – ввод коагулянта; Φ – флоккулянт; H_3 – высота загрузки

Эффективность действия коагулянта при различных способах и схемах реагентной обработки природной воды оценивалась по показателям мутности, цветности, перманганатной окисляемости (ПО) и остаточному алюминию в исходной и очищенной воде. Кроме вышеуказанных показателей определялись также рН и щелочность воды. Контрольные пробы воды готовились по стандартной методике перемешивания реагентов в свободном объеме воды с последующим отстаиванием и фильтрованием.

Анализ качества очищенной воды в контрольных и опытных пробах показал, что перемешивание рециркуляционного расхода природной воды с раствором СА в толще крупнозернистой контактной загрузки позволяет улучшить эффект удаления примесей после двухступенчатой очистки отстаиванием и фильтрованием по сравнению с традиционным способом перемешивания в гидравлическом смесителе в периоды года с незначительной мутностью, температурой и щелочностью воды в поверхностном источнике.

Было экспериментально установлено, что наиболее значимое снижение мутности, цветности и перманганатной окисляемости в процессе очистки воды с применением сульфата алюминия (СА) имеет место при концентрированном вводе всего расхода раствора СА в рециркуляционный поток коагулируемой воды, пропускаемый через крупнозернистую контактную загрузку с его возвратом в начало гидравлического смесителя.

Диаграммы мутности, цветности и перманганатной окисляемости очищенной воды при рециркуляции 10% объема коагулируемой воды через контактную камеру с концентрированным вводом раствора СА для осенне-зимнего периода года показаны на рисках 5 и 6. Мутность исходной воды при этом составляла $M_{исх}=6,8$ мг/л, перманганатная окисляемость $ПО_{исх}=4$ мгО₂/л, цветность $Ц_{исх}=16$ град. Доза СА составляла $D_k=15-16$ мг/л, доза флокулянта $D_{ПАА}=0,1$ мг/л.

Экспериментально установлены рекомендуемые параметры процесса перемешивания рециркуляционного потока воды с раствором коагулянта в слое контактной загрузки: градиент скорости перемешивания от 180 до 800 с⁻¹, время контакта воды с крупнозернистой загрузкой не менее 9,0 с, крупность

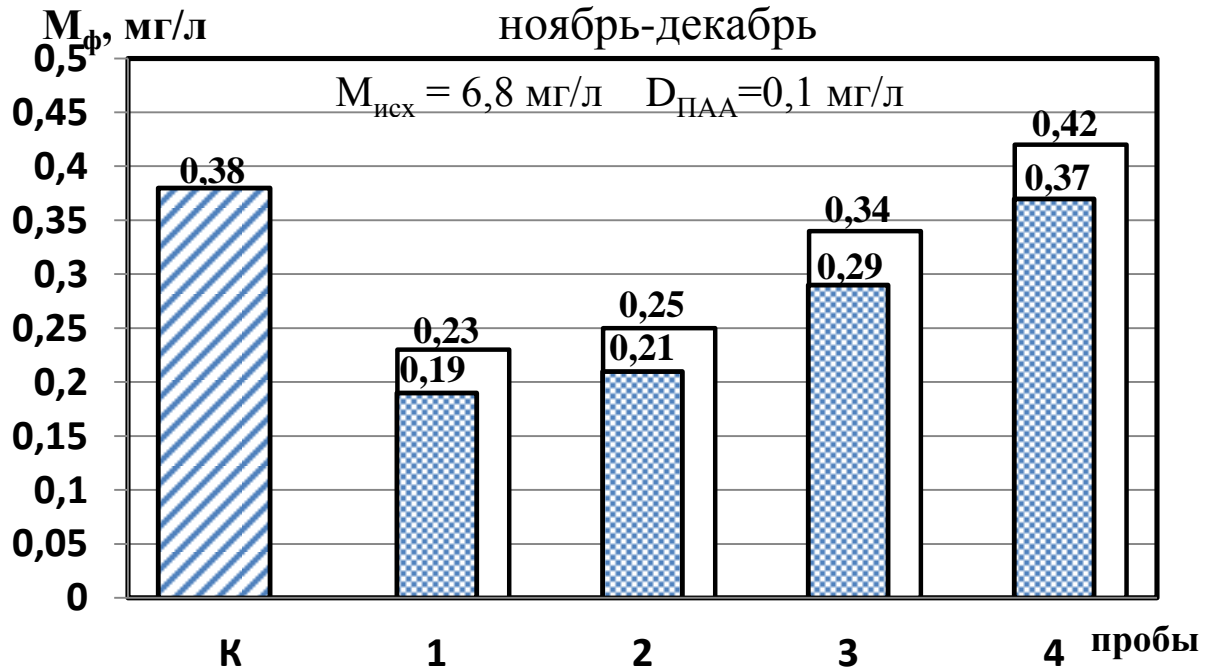


Рисунок 5. Диаграммы мутности фильтрата при рециркуляции 10 % объема коагулируемой воды через контактную камеру с концентрированным вводом раствора СА для загрузки с $d_3 = 30 \text{ мм}$, $H_3 = 2,0 \text{ м}$ при значениях v : 1 – 0,03 м/с; 2 – 0,05 м/с; 3 – 0,08 м/с; 4 – 0,12 м/с;

К – контрольная проба при $D_k = 15,0 \text{ мг/л}$

– опытные пробы при $D_{кo} = 15,0 \text{ мг/л}$; – опытные пробы при $D_{кo} = 11,0 \text{ мг/л}$

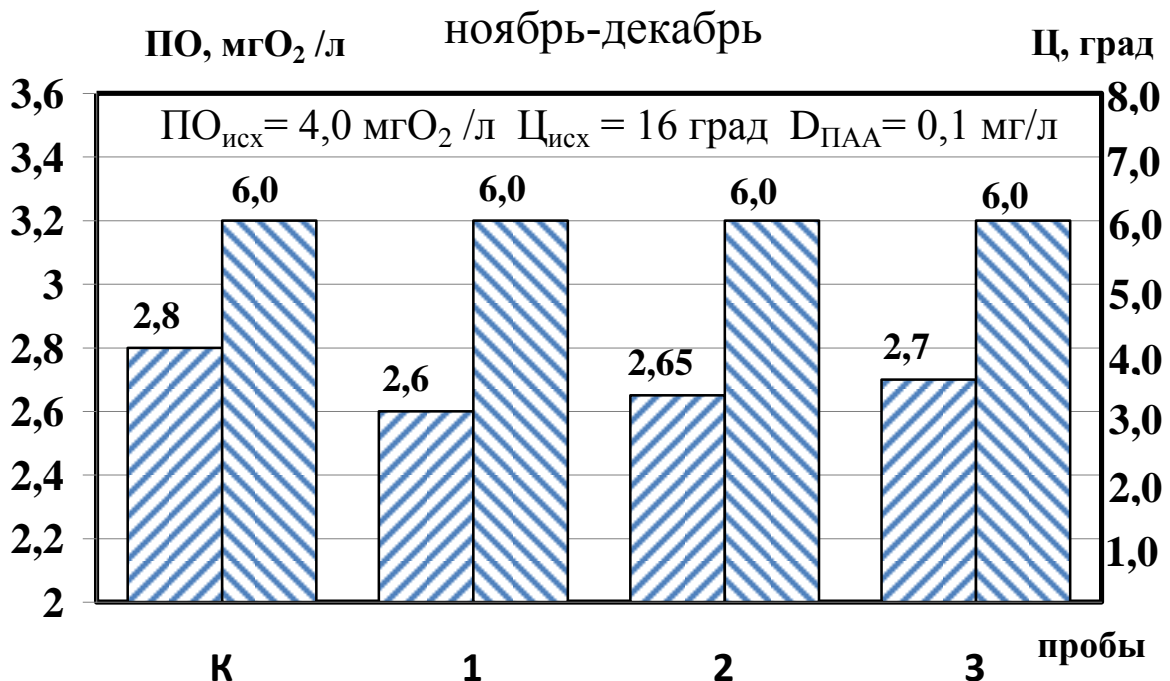


Рисунок 6. Диаграммы перманганатной окисляемости (ПО) и цветности (Ц) фильтрата при комбинированном вводе СА с $D_k = 12,0 \text{ мг/л}$ и 10 %-ной рециркуляции коагулируемой воды через контактную загрузку с $H_3 = 2,0 \text{ м}$, $v = 0,05 \text{ м/с}$ и крупностью фракций:

1 – 10 мм; 2 – 30 мм; 3 – 50 мм; К – контрольная проба при $D_k = 16,0 \text{ мг/л}$

– ПО; – Ц

загрузки от 10 до 50 мм, величина рециркуляционного расхода в пределах 7-10% от общего расхода обрабатываемой воды.

Обработка полученных экспериментальных данных показала, что при использовании способа концентрированного ввода СА в рециркуляционный поток коагулируемой воды, пропускаемый через крупнозернистую контактную загрузку с возвратом в начало гидравлического смесителя, повышение эффекта осветления природной воды после ее двухступенчатой очистки отстаиванием и фильтрованием может быть определено по формуле

$$\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = 1,12 \cdot G^{0,17} (t - 8,6)^{0,28} \left(\frac{0,01}{d_3} \right)^{0,1} \left(\frac{Q_p}{Q} \right)^{0,3}, \% \quad (8)$$

где \mathcal{E}_1 – эффект осветления природной воды при ее обработке коагулянтom СА предлагаемым способом, %; \mathcal{E}_2 – эффект осветления природной воды при ее обработке коагулянтom СА с той же дозой традиционным способом в смесителе гидравлического типа, %; G – градиент скорости при перемешивании рециркуляционного потока коагулируемой воды с раствором СА в слое контактной крупнозернистой загрузки, с^{-1} , ($180 < G < 800 \text{ с}^{-1}$); t – время контакта рециркуляционного потока с крупнозернистой загрузкой, с, ($t \geq 9,0 \text{ с}$); d_3 – средний диаметр зерен однородной крупнозернистой загрузки, м ($0,01 \leq d_3 \leq 0,05 \text{ м}$); Q – общий расход обрабатываемой воды, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_p – рециркуляционный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$, $Q_p = (0,07 - 0,1)Q$.

Пятая глава посвящена производственным испытаниям технологии коагулирования воды Сурского водохранилища с применением крупнозернистой контактной загрузки.

Испытания разработанной технологии коагулирования с применением крупнозернистой контактной загрузки в производственных условиях производились на блоке II площадки «Кирпичная» водопроводных очистных сооружений (ВОС) г. Пензы, имеющем фактическую производительность 80 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ ($3334 \text{ м}^3/\text{ч}$).

В состав блока II ВОС пл. «Кирпичная» входят два контактных резервуара со смесителями гидравлического типа, двенадцать горизонтальных отстойников со встроенными камерами хлопьеобразования и шесть скорых фильтров.

В контактных резервуарах предусмотрены дырчатые смесители, каждый из которых оборудован тремя перфорированными стальными перегородками с отверстиями 100×100 мм.

До реконструкции в первом и втором контактных резервуарах ввод коагулянта осуществлялся непосредственно перед дырчатыми смесителями. При проведении реконструкции второго контактного резервуара после дырчатого смесителя был установлен эрлифт с диаметром ствола d_y 250 мм. Подача сжатого воздуха в смесительное устройство эрлифта осуществлялось при помощи воздуходувки Lutos производительностью 220 м³/ч и развиваемым избыточным давлением до 50 кПа. Непосредственно перед первой дырчатой перегородкой смесителя была установлена выполненная из полиэтилена открытая контактная камера с размером 1,0×1,0 м и высотой 2,5 м. Камера имела дырчатое днище с размерами отверстий 30 мм. В камеру засыпалась крупнозернистая контактная загрузка из однородного гранитного щебня крупностью 40 мм. Высота загрузки составляла 1400 мм. Верхняя часть камеры соединялась со стволом эрлифта горизонтальным рециркуляционным трубопроводом диаметром 250 мм и длиной 6,5 м. Раствор коагулянта СА вводился в рециркуляционный трубопровод непосредственно перед контактной камерой.

Система рециркуляции коагулируемой воды имела следующие технические характеристики: расчетный расход рециркуляционного потока - 167 м³/ч; скорость фильтрования рециркуляционного потока в слое крупнозернистой загрузки - 0,046 м/с; время контакта коагулируемой воды с крупнозернистой загрузкой - 11 с; потери напора в слое контактной загрузки - до 0,15 м.

Производственные испытания предлагаемой технологии, предусматривающей концентрированный ввод раствора коагулянта в рециркуляционный поток коагулируемой воды, пропускаемый через слой крупнозернистой контактной загрузки проводились в летний и осенне-зимний периоды года, а также во время паводка. Отбор проб очищенной воды, обработанной коагулянтом СА в контрольном смесителе, осуществлялся после скорых фильтров, входящих в общую секцию с данным смесителем.

Анализ результатов промышленных испытаний позволил сделать следующие выводы:

- при использовании стандартной технологии коагулирования средние дозы раствора СА составляли в летний период – 13,9 мг/л и осенне-зимний период - 14,1 мг/л. Средние дозы СА при использовании предлагаемой технологии коагулирования составляли соответственно 11,3 и 10,9 мг/л при этом качество очищенной воды после отстойников и фильтров в опытной и контрольной секциях по мутности, цветности и перманганатной окисляемости было стабильно высоким:

- в период паводка даже незначительное снижение дозы коагулянта (на 9-10%) с использованием предлагаемой технологии коагулирования привело к ухудшению качества фильтрованной воды по мутности и перманганатной окисляемости ниже нормативных требований к питьевой воде.

Таким образом, разработанная технология коагулирования воды с применением контактных камер с крупнозернистой загрузкой может быть рекомендована к использованию на водопроводных очистных сооружениях в качестве реагентосберегающей за исключением периода паводка.

Технико-экономическая оценка эффективности предлагаемой технологии коагулирования с применением крупнозернистой контактной загрузки по сравнению с традиционной технологией коагулирования показала, что за счет экономии реагента расчетный годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составляет 1883 тыс. руб. (в ценах 2015 г.).

В данной главе приведены также рекомендации к расчету основных устройств и оборудования, входящих в состав предлагаемой технологической схемы.

Заключение

1. На основе анализа литературных источников показано, что способ контактной коагуляции с использованием зернистых загрузок во многих случаях обеспечивает повышение скорости агломерации примесей природной воды после ее коагуляционной обработки. Применение крупнозернистой контактной загрузки в конструкциях гидравлических смесителей водопроводных очистных сооружений позволяет стабильно интенсифицировать процесс хлопьеобразования в условиях постоянно изменяющегося в течение года качества воды по-

верхностного источника при сохранении высокой пропускной способности смесительных устройств.

2. Установлено, что эффективность процесса укрупнения микрохлопьев скоагулированной взвеси при контактной коагуляции с использованием крупнозернистых загрузок определяется величиной гидравлического сопротивления контактной массы, скоростью фильтрования, начальной концентрацией скоагулированных примесей, а также пористостью загрузки в условиях предельной насыщенности.

3. На основании экспериментальных исследований выявлен характер зависимости изменения гидравлического уклона крупнозернистой контактной загрузки от времени фильтрования коагулированной природной воды при развитом турбулентном режиме ее движения в порах ($Re > 76$).

Получена математическая зависимость, адекватно описывающая закономерность изменения гидравлического уклона от скорости фильтрования, крупности и пористости крупнозернистой контактной массы в условиях предельной насыщенности ее порового пространства при турбулентном режиме движения коагулированной воды.

4. Предложен, теоретически и экспериментально обоснован реагентосберегающий способ коагуляционной обработки природной воды в гидравлическом смесителе, предусматривающий рециркуляцию части коагулируемой воды, концентрированный ввод коагулянта, пропуск рециркуляционного потока через слой крупнозернистой загрузки при турбулентном режиме движения и возврат его в начало смесителя.

Экспериментально установлены рекомендуемые параметры процесса перемешивания рециркуляционного потока воды с раствором коагулянта в слое контактной загрузки; градиент скорости перемешивания от 180 до 800 с^{-1} , время контакта воды с крупнозернистой загрузкой не менее 9,0 с, крупность загрузки от 10 до 50 мм, величина рециркуляционного расхода в пределах 7-10% от общего расхода обрабатываемой воды.

5. Использование предлагаемого способа и технологии концентрированного коагулирования воды с рекомендуемыми параметрами перемешивания рециркуляционного потока в крупнозернистой загрузке позволит снизить дозы

СА в летний период на 20%, а в осенне-зимний период на 25% без ухудшения качества водоочистки по сравнению с традиционным способом коагуляционной обработки и перемешивания всего расхода природной воды в типовом смесителе. В период паводка при значительной мутности исходной воды ($M > 50$ мг/л) ее реагентная обработка с применением крупнозернистой загрузки нецелесообразна вследствие отсутствия экономии коагулянта.

6. Получена математическая зависимость, адекватно описывающая повышение эффекта осветления природной воды после ее коагуляционной обработки предлагаемым способом и последующей двухступенчатой очистки отстаиванием и фильтрованием.

7. Технология коагулирования с применением крупнозернистой контактной загрузки прошла производственные испытания на блоке II пл. «Кирпичная» ВОС г. Пензы производительностью 80 тыс. м³/сут. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения новой технологии составил более 1 млн. 800 тыс. руб. (в ценах 2015 года).

8. Разработаны рекомендации к расчету основных устройств и оборудования, входящих в состав технологической схемы коагуляционной обработки воды с использованием крупнозернистой контактной загрузки. Результаты работы могут быть рекомендованы к внедрению на очистных сооружениях коммунальных водопроводов с коагуляционной обработкой воды поверхностных источников.

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Салмин, С.М. Реагентосберегающие технологии очистки природных вод / Б.М. Гришин, К.В. Борисов, Е.А. Титов, С.М. Салмин // Сб. науч. тр. XIII Международ. науч.-практ. конф.: Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах. – Пенза: ПГУАС, АОНН «Приволжский дом знаний». – 2012. – С. 65-67.

2. Салмин, С.М. Интенсификация процессов коагуляции примесей при водоподготовке с применением реагентных методов / Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, К.В. Борисов, С.М. Салмин, Е.А. Савицкий // Сб. науч. тр. XIII Международ. науч.-практ. конф.: Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах. – Пенза: ПГУАС, АОНН «Приволжский дом знаний». – 2012. – С. 56-58.

3. Салмин, С.М. Исследование реагентной очистки природных вод с применением алюмосодержащих коагулянтов / Б.М.Гришин, С.М. Салмин // Сб. тр. Международ. науч.-практ. конф.: Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов. – Пенза: ПГУАС. – 2012. – С. 116-119.

4. Салмин, С.М. Перспективные способы интенсификации процессов коагуляции природных вод / С.М. Салмин // Сб. тр. Международ. науч.-практ. конф.: Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов. – Пенза: ПГУАС. – 2012. – С. 337-342.

5. Салмин, С.М. Улучшение работы смесителей на водопроводных очистных сооружениях / С.М. Салмин // Сб. док. Международ. науч.-практ. конф.: Стратегические проекты освоения водных ресурсов в XXI веке: правовые, социальные и экологические. –Тюмень: ТюмГАСУ. – 2013. – С. 222-224.

6. Салмин, С.М. Закономерности турбулентного движения жидкостей в порах фильтрующей загрузки /Б.М.Гришин, А.Н. Кошев, С.М. Салмин // Сб. тр. II Международ. науч.-практ. конф.: Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов. – Пенза: ПГУАС. – 2013. – С. 74-79.

7. Салмин, С.М. Закономерности изменения гидравлического сопротивления крупнозернистой контактной загрузки при фильтровании водной суспензии / Б.М. Гришин, С.Ю. Андреев, С.М. Салмин // Региональная архитектура и строительство. - 2013. -№3 (17). - С. 121-128.

8. Салмин, С.М. Использование крупнозернистой контактной загрузки для интенсификации процессов коагуляции примесей природных вод / Б. М. Гришин, А.Н. Кошев, С.М. Салмин // Сб. науч. тр. XIV Международ. науч.-практ. конф.: Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах. – Пенза: ПГУАС, АОНН «Приволжский дом знаний». – 2013. – С. 72-75.

9. Салмин, С.М. Теоретические исследования процесса коагуляции примесей с использованием крупнозернистой контактной загрузки / Б.М.Гришин, А.Н. Кошев, С.М. Салмин // Водоочистка. - 2014. -№6. - С. 22-26.

10. Салмин, С.М. Экспериментальные исследования гидравлического сопротивления крупнозернистой загрузки / Б.М. Гришин, Н.Н. Ласьков, М.А. Сафронов, С.М. Салмин // Сб. науч. тр. XV Международ. науч.-практ. конф.: Проблемы энергосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах. – Пенза: ПГУАС, АОНН «Приволжский дом знаний». – 2014. – С. 64-68.

11. Пат. 143766 Российской Федерации, МПК В01F 5/00. Смеситель / Б.М. Гришин, С.М. Салмин; патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУАС. – заявлено 04.02.2014, опубликовано 27.07.2014. Бюл. №21.

12. Салмин, С.М. Новая конструкция смесителя для реагентной обработки воды поверхностного источника / Б.М. Гришин, С.М. Салмин, А.А. Зебрев // Сб. науч. тр. Международ. науч.-практ. конф.: Совершенствование работы системы водоснабжения и водоотведения. – Пенза: ПГУАС. – 2014. – С. 29-32.

13. Салмин, С.М. Технологические схемы коагуляционной обработки воды с применением крупнозернистой контактной загрузки / Гришин Б.М., Шеин А.И., Салмин С.М. // Материалы X международ. научн.-практ. конф.: Наука и инновации – 2014». – Польша. – 2014. – с. 49-51.

14. Салмин, С.М. Экспериментальные исследования очистки воды с применением контактной коагуляции на крупнозернистой загрузке / Б.М.Гришин, А.И. Шеин, С.М. Салмин // Водочистка. - 2015. -№4. - С. 26-33.

15. Салмин, С.М. Повышение эффективности очистки воды с применением контактной коагуляции на крупнозернистой загрузке / С.М. Салмин // Сб. тр. IV Международ. науч.-практ. конф.: Актуальные проблемы инженерных наук в области промышленности, экологии и охраны водных ресурсов. – Пенза: ПГУАС. – 2015. – С. 185-191.

*Примечание. Жирным шрифтом выделены работы в журналах, рекомендованных ВАК.

Коагуляция примесей природных вод с использованием крупнозернистой контактной загрузки

Салмин Сергей Михайлович
05.23.04 - Водоснабжение, канализация, строительные
системы охраны водных ресурсов

Автореферат

Подписано к печати 7.09.2015. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная №2. Печать офсетная. Объем 1,5 печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 120.

Издательство Пензенского государственного
университета архитектуры и строительства.
Отпечатано в цехе оперативной полиграфии ПГУАС
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.
E-mail: office@pguas.ru