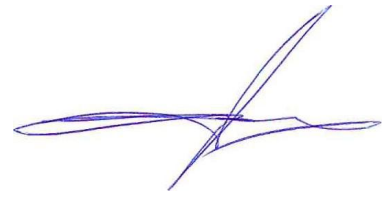


На правах рукописи



Бутко Денис Александрович

Системы обработки сбросных вод станций водоподготовки

Специальность 2.1.4 – Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Самара – 2024 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет».

Научный консультант:

Фесенко Лев Николаевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Водное хозяйство, инженерные сети и защита окружающей среды» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Официальные оппоненты:

Войтов Евгений Леонидович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Гришин Борис Михайлович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Водоснабжение, водоотведение и гидротехника» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Первов Алексей Германович

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград

Защита диссертации состоится «19» апреля 2024 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.05 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, Самарская область, город Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, Главный корпус.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте <http://d24237705.samgtu.ru/node/3>.

Автореферат разослан «____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

О.В. Тупицына

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Федеральный проект «Чистая вода», реализуемый в рамках национальных проектов «Экология» и «Жилье и городская среда», направлен на увеличение доли населения России, имеющего доступ к качественной питьевой воде из систем централизованного водоснабжения. По данным Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, за 2010–2021 гг. сброс неочищенных сточных вод от систем водоснабжения и водоотведения достиг 67 % от общего годового объема, составившего 1986,4–3416,6 млн м³ в год. В бассейне Азовского моря в 2021 г. водность уменьшилась на 33,7 %, а в р. Дон с 2007 по 2021 гг. снижение объема речного стока составило 14,1–57,6 % от многолетних значений. Интегральным решением по снижению объемов сброса неочищенных вод со станции водоподготовки (ВОС) является обработка сбросных вод скорых фильтров и отстойников. Исследованием этого направления в разное время занимались В.Г. Водин, Н.Т. Лубочников, В.Л. Драгинский, В.А. Клячко, М.И. Урванцева, В.М. Любарский, В.А. Лысов, Л.В. Кремадес, Дж. А. Кусидо, Ф. Артазага. В результате разработаны технические решения (схемы) обработки промывных вод скорых фильтров и осадков отстойников станций водоподготовки, работающих на сернокислом алюминии. Внедрение за последние 30 лет в практику водоподготовки на десятках станций новых органических коагулянтов-флокулянтов, обладающих отличными от сернокислого алюминия свойствами и технологическими преимуществами, поставило под сомнение результаты ранее выполненных исследований.

Большинство разработанных конструкций и схем обработки сбросных (промывных) вод фильтров не учитывают гидродинамическое воздействие на взвесь в коллекторе промканализации, имеют неэффективную систему отбора осветленной воды и систему удаления осадка. Кроме того, в них нет возможности осуществить перемешивание, интенсифицируя процесс хлопьеобразования, управляя качеством воды в зависимости от направления утилизации. Отсутствует оценка влияния утилизации сбросных вод после внедрения схемы с органическим коагулянт-флокулянт на длительность фильтроцикла скорых фильтров. Обработка сбросных вод отстойников сводится к их удалению за пределы площадки, в единичных случаях – к механическому обезвоживанию. В естественных условиях на площадке ВОС обезвоживание осадков не рассматривается при проектировании, а возможные направления утилизации обезвоженного или высушенного осадка вообще опускаются.

Экономическая (инвестиционная), технологическая и экологическая эффективность станции очистки природных вод связаны с комплексным решением проблем рационального водопользования и охраны водоемов от загрязнения путем обработки промывных вод фильтров и осадков отстойников, их утилизации.

Таким образом, требуется разработка теоретических основ эффективных технологий обработки промывных вод фильтров, осадков отстойников с направлениями их утилизации.

Степень разработанности темы исследования. Тематика исследования промывных вод скорых фильтров, контактных осветлителей, осадков начала появляться в литературе 50–60-х гг. прошлого века. Отечественными и зарубежными исследователями определены физические, химические и микробиологические показатели промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей, а также сбросных вод (осадка) после промывки отстойников сооружений водоподготовки, работающих на коагулянте. В.Г. Водин, В.Н. Кузнецов, П.Г. Быковой, Н.Т. Лубочниковым определены качественные показатели промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей, использующих в качестве реагента для осветления воды сернокислый алюминий; предложены технические решения по их обработке в осветлителях со слоем взвешенного осад-

ка или отстойниках. В.Л. Драгинским и Л.П. Алексеевой исследована обработка промывных вод и влияние их добавления в основной поток сырой воды станций очистки природных вод городов Коряжма, Ижевск, Калуга и Ярославль. Ю.В. Крыловым и И.М. Миркисом рассмотрена возможность использования промывных вод фильтров для удаления осадка из горизонтальных отстойников. Е.Л. Войтовым выполнены исследования по обработке промывных вод фильтров реагентами сульфат и оксихлорид алюминия, СК-1, Кемфлок, Праестол 650 TR. Большой объем исследований качественных характеристик и технологических решений по обработке осадка отстойников выполнен В.М. Любарским, в том числе предложена классификация осадков. В исследованиях В.А. Лысова, Л.И. Нечаевой данная классификация осадков была скорректирована с учетом дозы коагулянта. Несмотря на обширность исследований, отсутствует единый научно обоснованный подход к обработке как промывных вод скорых фильтров, так и сбросных вод отстойников.

Конструктивные решения сооружений обработки сбросных вод фильтров представлены в виде разработанных Союзводоканалпроектом типовых проектов, осветлителей, фильтров с плавающей загрузкой, выделенных из основной схемы горизонтальных отстойников. Реагентная обработка сбросных вод отстойников проводилась сернокислым алюминием или полиакриламидом. Известные технологические решения по обработке промывных вод фильтров разработаны для станций, работающих на алюминийсодержащих реагентах (в основном сернокислом алюминии).

Разработанные к настоящему времени сооружения и технологические схемы обработки сбросных вод фильтров и отстойников имеют ряд технических и технологических несовершенств, а главное – отсутствуют обоснованные исследования методики расчета сооружений. Обработка и утилизация сбросных вод фильтров не имеет достаточного обоснования и осуществляется либо по аналогии с функционирующими объектами, либо принимая технологию по нормативным документам. Проектирование сооружений обработки сбросных вод фильтров требует комплексного решения вопросов приема сбросных вод, смешения с реагентом и (или) перемешивания, учета воздействия на хлопья взвеси в коллекторе промканализации с увязкой качества воды после них с направлением последующей утилизации.

Внедрение в практику водоподготовки новых коагулянтов, применение органических высокомолекулярных коагулянтов-флокулянтов изменило качество сбросных вод. Требуется проверка существующих решений на применимость, поиск новых способов обработки и утилизации сбросных вод.

Целью исследования является научное обоснование, разработка методов регулирования качества и внедрение в практику обработки и утилизации промывных вод скорых фильтров и отстойников станций водоподготовки.

Задачи исследования:

- определить качество сбросных вод отстойных сооружений и скорых фильтров станций водоподготовки, работающих на органических коагулянтах-флокулянтах; выполнить анализ имеющихся технологических решений утилизации;
- разработать теоретические основы очистки сбросных (промывных) вод скорых фильтров коагулянтами и флокулянтами, получить математические закономерности их реагентного и безреагентного осветления;
- изучить теоретические основы уплотнения осадков, динамику уплотнения осадка из отстойников и из сооружений обработки промывных вод фильтров, их основные физические характеристики в условиях станций водоподготовки, определить возможность и параметры интенсификации обезвоживания в естественных условиях, применяя капиллярное поднятие воды в различных материалах;
- определить пути утилизации сбросных вод скорых фильтров и отстойников,

обезвоженного осадка, методы регулирования качества, оценить целесообразность их применения в условиях станций водоподготовки, работающих на органических коагулянтах-флокулянтах типа полиДАДМАХ;

- разработать конструкции сооружений обработки сбросных вод скорых фильтров, реализующих требуемые параметры смешения-перемешивания и равномерную подачу воды на утилизацию, сооружения для обезвоживания осадка в естественных условиях, использующих капиллярные материалы, сформировать методики их расчета;

- разработать принципы (алгоритмы) выбора технологических схем обработки сбросных (промывных) вод скорых фильтров и схем обработки осадка отстойников и промывных вод, в том числе с использованием новых конструкций, апробировать их в проектной практике, оценить инвестиционную и экологическую эффективность разработанных научных и технологических решений.

Объект исследования – системы водоснабжения населенных мест.

Предмет исследования – методы и технологии обработки сбросных вод скорых фильтров и отстойников на сооружениях водоподготовки на поверхностных источниках малой и средней мутности, их утилизация, обеспечение ресурсосбережения и экологической безопасности станций.

Научная новизна результатов диссертационного исследования, полученных лично автором, заключается в следующем:

- сформулированы основные теоретические положения образования, обработки и утилизации промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей, сформирована концептуальная модель процессов, выполнено ее математическое описание, получены эмпирические зависимости при безреагентном и реагентном осветлении (поли)оксихлоридами алюминия и флокулянтами;

- разработана теоретическая концептуальная модель процессов образования, обработки и утилизации сбросных вод отстойников и сооружений обработки промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей станций водоподготовки, выполнено ее математическое описание, подтвержденное результатами обработки экспериментальных данных;

- определены свойства осадка промывных вод скорых фильтров, показано отличие от осадка отстойных сооружений по динамике уплотнения и физическим характеристикам, установлено изменение его структуры при фильтровании с ростом сопротивления фильтрованию на 1–3 порядка;

- установлена взаимосвязь физических свойств осадка отстойников и сооружений обработки промывных вод скорых фильтров, получены эмпирические зависимости для пар параметров с высоким уровнем корреляции, определены переводные коэффициенты между истинными (в сооружениях) значениями свойств осадка отстойников и полученными в осадке нарушенной структуры;

- теоретически и экспериментально обоснована технология интенсификации процесса обезвоживания осадка посредством погружения в него капиллярно-пористого материала;

- разработаны алгоритмы выбора технологических схем обработки промывных вод скорых фильтров и выбора технологической схемы обработки осадка отстойников и промывных вод в зависимости от направления их утилизации;

- разработаны технологические схемы обработки сбросных (промывных) вод скорых фильтров и отстойников (в естественных условиях), обеспечивающие различные направления их утилизации, выполнена оценка их инвестиционной и экологической эффективности;

- разработаны конструкции и методические основы расчета новых сооружений обработки промывных вод скорых фильтров и площадок подсушивания осадка с интенсификацией его обезвоживания капиллярными материалами.

Теоретическая значимость работы заключается в получении основных теоретических положений образования, обработки и утилизации промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей, формировании концептуальной модели процессов, выполнении ее математического описания, получении эмпирических зависимостей при безреагентном и реагентном осветлении (поли)оксихлоридами алюминия и флокулянтами сбросных (промывных) вод фильтров станций водоподготовки, разработке концептуальной модели процессов образования, обработки и утилизации сбросных вод отстойников и сооружений обработки промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей, ее математическом описании, получении эмпирических зависимостей между реологическими свойствами осадков на водах средней и малой мутности, определении переводных коэффициентов реологических свойств осадка между результатами, полученными в нарушенной структуре (в лабораторных условиях) и в ненарушенном слое осадка, разработке алгоритмов выбора технологических схем обработки сбросных (промывных) вод скорых фильтров и отстойников в зависимости от направления их утилизации, разработке методик расчета сооружения обработки сбросных вод скорых фильтров и сооружений обезвоживания осадка с интенсификацией его обезвоживания капиллярными элементами.

Методы исследований, достоверность и обоснованность результатов.

Исследования выполнены в условиях лабораторий, укомплектованных современным оборудованием, и на полупроизводственных моделях. При проведении исследований использовались аттестованные методики определения качественных показателей воды и твердой фазы, а также разработанные и ранее апробированные методики моделирования процессов водоподготовки. Достоверность результатов обеспечена проведением аналитического контроля в лабораториях, аккредитованных в системе аккредитации аналитических лабораторий, с применением стандартных методик. Статистическая обработка полученных данных выполнена с применением компьютерных программ Microsoft Excel 2021, Statistica 11 и Statistica 13. Обоснованность результатов обеспечивается высоким уровнем корреляции результатов лабораторных и полупромышленных экспериментов.

Практическая значимость результатов работы:

1. Установлены параметры реагентного и безреагентного осветления промывных (сбросных) вод фильтров в сооружениях их обработки, позволяющие управлять качеством воды.
2. Установлены физико-химические свойства осадков из отстойных сооружений и сооружений обработки промывных (сбросных) вод фильтров, позволяющие проектировать системы удаления осадка, уплотнители осадка и сооружения обезвоживания осадка в естественных условиях с капиллярными элементами. Показана возможность совместной обработки осадка из сооружений обработки промывных вод фильтров и сбросных вод отстойников.
3. Получены эмпирические зависимости физических, в том числе реологических, свойств осадков отстойников и сооружений обработки сбросных (промывных) вод скорых фильтров друг от друга, обеспечивающие выполнение расчета систем удаления осадка, шламопроводов.
4. Обоснована технология интенсификации процесса обезвоживания осадка посредством погружения в него капиллярно-пористого материала, определены параметры обезвоживания осадков в естественных условиях капиллярными элементами, использующими тканевые и искусственные каменные материалы.
5. Предложены и оценены технологии утилизации сбросных вод отстойников, образованных при использовании органического коагулянта-флокулянта типа поли-

ДАДМАХ, в составе искусственных каменных строительных материалов и почвогрунта.

6. Разработаны алгоритмы выбора технологических схем обработки сбросных (промывных) вод скорых фильтров и выбора технологической схемы обработки осадка отстойников и промывных вод в зависимости от направления их утилизации. Предложены технологические схемы сооружений с вариантами утилизации сбросных вод, определены требования к качеству промывных вод после обработки и осадка для каждого из направлений.

7. Разработаны конструкции сооружений обработки промывных (сбросных) вод фильтров, допускающие многовариантность использования: усреднение с поддержанием взвеси в объеме воды, усреднение-осветление в безреагентном или реагентом режимах, усреднение-перемешивание-осветление в безреагентном или реагентом режимах, на них получены патенты РФ, методики расчета.

8. Разработаны сооружения обезвоживания сбросных вод отстойных сооружений в естественных условиях с капиллярными элементами, обеспечивающие синергетический эффект испарения с поверхности жидкости, фильтрования в дренаж и испарения с поверхности капиллярного элемента, в том числе защищенные от воздействия атмосферных осадков, на них получены патенты РФ, методика расчета.

9. Результаты работы использованы для разработки проектной и рабочей документации, внедрены в учебный процесс по дисциплине «Водоснабжение» профиля «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «ДГТУ» в учебно-методических пособиях.

Внедрение результатов работы – результаты работы использованы при проектировании и строительстве на станциях водоподготовки Ростова-на-Дону (АО «Ростов-водоканал»), Азова (МП «Азовводоканал»).

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.1.4 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов», а именно: п. 3 «Методы очистки природных и сточных вод, технологические схемы и конструкции используемых сооружений, установок, аппаратов и механизмов»; п. 4 «Методы обработки илов и осадков сточных и природных вод, конструкции используемых сооружений, установок, аппаратов и механизмов»; п. 12 «Экономическая, технологическая и экологическая эффективность систем водного хозяйства городов, промышленных комплексов и производственных предприятий, оптимизация проектных решений строительства новых, технического перевооружения и реконструкции существующих систем, оптимизации режима работы систем и их отдельных элементов в соответствии с фактическим режимом водопотребления и отведения отработанной воды».

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на Международных научно-практических конференциях «Строительство» (Ростов-на-Дону, 2002–2015 гг.); Всероссийских научно-практических конференциях «Техносферная безопасность» (Ростов-на-Дону – Шепси, 2002, 2004, 2005 гг.); Международных научно-практических конференциях «Техновод» (Москва, 2004–2006, 2009, 2012, 2014, 2023 гг.); Международной научно-практической конференции «Техносферная безопасность, надежность, качество, энергосбережение» (Шепси, 2009 г.); Национальных научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники» (Ростов-на-Дону, 2020, 2023 гг.); Международной научно-практической конференции «Инновация в строительстве» (Брянск, 2022 г.).

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертации опубликованы в 26 научных работах, в том числе 7 патентов на изобретения и полезные модели, 15 научных трудов в изданиях, выпускаемых в РФ и рекомендуемых ВАК для публикации основных результатов диссертации доктора наук, 2 публикации в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 2 монографии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретические положения образования, обработки и утилизации промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей, концептуальные модели образования, обработки и утилизации промывных вод скорых фильтров и сбросных вод отстойников и сооружений обработки промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей станций водоподготовки, их математическое описание.
2. Эмпирические зависимости осветления сбросных (промывных) вод при безреагентном и реагентном осветлении (поли)оксихлоридами алюминия и флокулянтами, эмпирические зависимости физических, в том числе реологических, свойств осадков отстойников и сооружений обработки сбросных (промывных) вод скорых фильтров друг от друга.
3. Физические свойства осадка промывных (сбросных) вод скорых фильтров, переводные коэффициенты между истинными (в сооружениях) значениями свойств осадка отстойников и полученными в осадке нарушенной структуры, технологические параметры интенсификации обезвоживания осадка погружением в него капиллярно-пористого материала.
4. Обоснование утилизации осветленных и неосветленных промывных (сбросных) вод фильтров, утилизации сбросных вод отстойников, образованных при использовании коагулянта-флокулянта типа полиДАДМАХ в искусственные каменные строительные материалы и почвогрунты.
5. Алгоритмы выбора технологических схем обработки сбросных (промывных) вод скорых фильтров и выбора технологической схемы обработки осадка отстойников и промывных вод в зависимости от направления их утилизации.
6. Методики расчета и технические решения сооружений обработки промывных (сбросных) вод скорых фильтров и сооружений обезвоживания осадка в естественных условиях с капиллярными элементами.
7. Технологические схемы сооружений с вариантами утилизации сбросных вод, оценка их инвестиционной и экологической эффективности.

Личный вклад диссертанта заключается в определении основных направлений исследований; разработке теоретических положений, методик эксперимента; руководстве проводимыми исследованиями; руководстве и непосредственном участии в обработке и обсуждении результатов отдельных экспериментов; анализе и обобщении полученных данных; проведении экспериментальных исследований; разработке алгоритмов выбора технологической схемы обработки, методик расчета сооружений; выполнении инвестиционных расчетов.

Автор выражает глубокую признательность своим учителям: профессору, к.т.н. В.А. Лысову; доценту, к.т.н. Л.И. Нечаевой; доценту, к.т.н. В.А. Михайлову; доценту, к.т.н. А.В. Бутко; сотрудникам кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ФГБОУ ВО «ДГТУ»; коллективу АО «Ростовводоканал», оказавшим помощь в работе над диссертацией.

Структура и объем диссертации. Общий объем диссертации составляет 258 страницы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, содержит 50 таблиц и 98 рисунков, приложения. Список литературы включает 204 наименования отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследований, сформулирована научная новизна и практическая значимость работы, а также отражены основные положения диссертации, вынесенные на защиту.

В первой главе «Характеристика сбросных вод и сооружений их обработки осадка» проведен анализ качества сбросных вод скорых фильтров и отстойников станций водоподготовки, представлены схемы обработки сбросных вод, разработанные к настоящему моменту, направления утилизации сбросных вод фильтров и отстойников.

Первые работы по повторному использованию промывных вод скорых фильтров и обработке образующегося осадка появились в середине прошлого века. В работах В.Г. Водина, В.Н. Кузнецова, П.Г. Быковой, Н.Т. Лубочникова представлено качество промывных вод скорых фильтров при двухступенчатой схеме водоподготовки с коагуляцией воды поверхностного источника сернокислым алюминием. Ими показано, что промывная вода относится к сточным водам с повышенным содержанием взвешенных веществ (до 400 мг/дм³), высокой цветностью (до 200 °ПКШ), характеризуется величиной общего микробного числа (ОМЧ) до 980 КОЕ/мл, и в ней единично обнаруживаются жизнеспособные яйца гельминтов (до 8 экз/дм³). Всеми исследователями указывается на наличие в воде скоагулированной гидроокиси алюминия с не полностью использованной адсорбционной емкостью.

Разработанные перечисленными выше исследователями, а также В.Л. Драгинским, И.М. Миркисом, Л.П. Алексеевой, И.Т. Гороновским, В.А. Лысовым технологические решения по обработке промывных вод скорых фильтров нами предложено классифицировать по группам:

Группа 1. Аккумулирование промывной воды во время промывки и перекачка на основные сооружения без обработки. В качестве примера такого решения представлено разработанное В.Г. Водиним и сотрудниками Союзводоканалпроекта техническое решение для Слудинской станции водоподготовки Нижнего Новгорода.

Группа 2. Аккумулирование промывной воды в сооружениях, безреагентная или реагентная очистка с последующим перемешиванием с основным потоком. К этой группе отнесены технические решения, разработанные Н.Т. Лубочниковым, для станции контактного осветления воды Кизела с использованием сернокислого алюминия или полиакриламида. Над исследованием реагентных схем обработки промывных вод работал В.Л. Войтов.

Группа 3. Обработка промывной воды в реагентном или безреагентном режиме до качества, удовлетворяющего требованиям для ее последующей утилизации. Техническое решение, относящееся к данной группе, разработано Ю.В. Крыловым и И.М. Миркисом в виде использования промывных вод для удаления осадка из горизонтальных отстойников.

Группа 4. Сброс в емкости длительного хранения воды и осадка. Представлены технические решения, разработанные И.Т. Гороновским и Г.Г. Руденко по сбросу промывных вод в илонакопители, в качестве которых могут использоваться естественные впадины или искусственные выработки; схема утилизации промывных вод фильтров в шламонакопитель для осадка предложена В.А. Лысовым совместно с сотрудниками.

При изучении осадков после промывки отстойников станций водоподготовки В.А. Клячко, А.Н. Пахомов, В.А. Лысов выявили, что осадки после промывки отстойников имеют высокую влажность (96,5–99,5 %) и большой разброс значений потерь при прокаливании (7,4–90 %). В химическом составе осадков прослеживается общность с качеством воды источника водоснабжения по наличию соединений алюминия, железа, калия и фосфора. Отмечается, что осадок способен к загниванию, содержит остаточные концентрации коагулянтов (флокулянтов) и патогенную микрофлору. Исследователями научной школы В.М. Любарского предложен ряд методов для обработки осадков отстойников, выполнена их классификация, разработаны конструкции сооружений обработки. Л.И. Нечаева в своих исследованиях осадков, образованных при осветлении мутных и вы-

сокомутных вод, предложила модернизированную классификацию осадков по соотношению исходной мутности воды к дозе применяемого реагента.

Работами И.М. Миркиса с сотрудниками обоснованы конструктивные решения сооружений обработки осадка, разработаны их типовые проекты. Сооружения обезвреживания и накопления осадка в естественных условиях – шламонакопители – нашли широкое применение в практике. Исследованием их работы еще в СССР занимались В.А. Лысов, Л.И. Нечаева и др. Механическое обезвреживание осадка с использованием фильтр-прессов, центрифуг и утилизация осадков для рециркуляции или регенерации не находят применения на станциях водоподготовки, несмотря на имеющиеся в литературе результаты исследований.

В начале 90-х гг. XX в. на станциях водоподготовки вместо сернокислого алюминия стал внедряться органический коагулянт-флокулянт типа полиДАДМАХ, который может дозироваться в виде товарного раствора непосредственно в обрабатываемую воду, имеет малые дозы (0,1–1 % от мутности), не повышает концентрацию алюминия в воде. В настоящее время он применяется в Ростове-на-Дону, Армавире, Таганроге, Анапе и др. При этом возникла проблема изменения свойств промывных вод фильтров и осадка отстойников, необходимость теоретического обоснования применяемых методов обработки и дальнейшей их утилизации.

В выводах к первой главе указано, что технологические решения обработки промывных (сбросных) вод фильтров и отстойников не находят применения на практике в следствии технического и технологического несовершенства, отсутствия обоснованных исследованиями параметров расчета сооружений. Необходимо научное обоснование процессов безреагентной и реагентной их обработки. Определены цели и задачи исследования.

Во второй главе «Качество и обработка промывных воды скорых фильтров» изучено качество промывных (сбросных) вод скорых фильтров станций водоподготовки, работающих на органических коагулянтах-флокулянтах типа полиДАДМАХ, сформулированы основные теоретические положения и концептуальная модель образования, обработки и утилизации промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей станций водоподготовки, дано ее математическое описание, определены математические закономерности реагентного и безреагентного осветления.

Под руководством автора выполнены исследования качества промывной (сбросной) воды скорых фильтров на очистных сооружениях Александровского (АОС) и Центрального (ЦОС) водопроводов Ростова-на-Дону, Донском водопроводе Таганрога (ОС Донвод). Определено, что качество промывной воды скорых фильтров на объектах исследований (общий объем проб более 1 000) характеризуется следующими значениями показателей: «содержание взвешенных веществ» – в пределах 30–710 мг/дм³ (в 80 % случаев 50–150 мг/дм³); «цветность» 10–47 °ПКШ; «общая щелочность», «активная реакция среды (рН)», «температура» – 1,8–4,9 мг-экв/дм³; 6,6–8,21; 0,1–29,5 °С соответственно. Содержание остаточного хлора в промывной воде 0,73–0,85 мг/дм³ (АОС и ЦОС) и 0,88–1,95 мг/дм³ (ОС Донвод). Остаточные концентрации флокулянта для осветления донской воды (ПолиДАДМАХ) находились в интервале от <0,02–0,23 мг/дм³. Микробиологические и паразитологические показатели качества промывных вод скорых фильтров: ОМЧ – 30–180 КОЕ/мл, коли-индекс 3–9, споры сульфитредуцирующих клостридий – от нуля КОЕ/20мл до «сплошной рост», цисты лямблий от нуля до четырех в 25 л воды, яйца гельминтов – от нуля до трех в 25 л воды.

Разработана концептуальная модель образования, обработки и утилизации промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей как неотъемлемая часть концептуальной модели образования, обработки и утилизации сбросных вод станций водоподготовки (рисунки 1).

В общем виде этапы концептуальной модели предложено описать функциями:

$$X_1 = f(\omega, v, C, a, b, d, n, N); X_2 = f(G, \tau_{\text{тр}}); X_3 = f(D, G, \tau_{\text{кхо}});$$

$$X_4 = f(M(C), \tau_{\text{отст}}); X_5 = f(\text{ОКБ, БПК, ХПК, pH}),$$

где ω – интенсивность промывки; v – скорость фильтрования; C – массовая концентрация взвеси; a – параметр фильтрования, определяющий интенсивность отрыва частиц и зависящий от условий фильтрования; b – параметр фильтрования, определяющий интенсивность адгезии частиц; d – диаметр загрузки; n – число первичных (единичных) частиц; N – число вторичных, третичных и т.д. частиц (хлопьев взвеси); G – градиент скорости; $\tau_{\text{тр}}$ и $\tau_{\text{кхо}}$ – время соответственно движения воды по трубопроводу промканализации и перемешивания в камере хлопьеобразования в сооружении обработки; D – доза реагента для обработки промывных вод; M – мутность воды; $\tau_{\text{отст}}$ – время отстаивания; ОКБ – общие колиформные бактерии; БПК – биохимическое потребление кислорода; ХПК – химическое потребление кислорода; pH – активная реакция среды.

В отличие от природных вод образование взвешенных частиц в промывной воде фильтров происходит в объеме фильтрующей загрузки, задержавшей реагентно-стабилизированные частицы и хлопья. Кроме того, высокомолекулярные флокулянты типа полиДАДМАХ с низкой молекулярной массой и высокой плотностью заряда (6,2 мг-экв/г) образуют хлопья адсорбцией на отрицательных поверхностях частиц положительно заряженными ионами полимерной цепочки по механизму «электростатического пятна», обеспечивая возможность взаимной коагуляции частиц одинакового заряда. При этом процесс хлопьеобразования требует длительного и интенсивного перемешивания обрабатываемой воды ($G \geq 172 \text{ с}^{-1}$, $T \geq 1620 \text{ с}$). Исходя из этого, нами сформулированы основные теоретические положения обработки промывных вод фильтров и контактных осветлителей:

1. В процессе промывки фильтрующей загрузки скорость суффозии частиц много больше скорости их адгезии, интенсивность прилипания частиц стремится к нулю.

2. При промывке фильтровального сооружения поступление взвеси в промывную воду происходит за счет ее отрыва с зерен загрузки, а также за счет разрушения ранее образовавшихся в процессе контактной коагуляции агрегатов.

3. Частицы взвеси в промывной воде представляют собой дестабилизированные или частично дестабилизированные реагентной обработкой частицы, имеющие в своем составе ионы коагулянта, хлопья из продуктов гидролиза коагулянта или сорбированные на поверхности частиц молекулы флокулянта. В потоке промывной воды имеются коагуляционные структуры (частицы), состоящие из двух, трех и более частиц и одиночных (первичных) частиц дисперсной фазы.



Рисунок 1 – Концептуальная модель образования, обработки и утилизации промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей станций водоподготовки

4. При промывке фильтрующей загрузки концентрация частиц дисперсной фазы в подаваемой на промывку от резервуаров чистой воды воде много меньше, чем извлекается из загрузки, поэтому ей можно пренебречь. При промывке неочищенной водой дополнительное количество одиночных частиц следует суммировать с частицами, образовавшимися в процессе промывки.

5. При движении по трубопроводам промканализации станций водоподготовки, в общем случае, коагуляционные структуры подвергаются разрушению (дроблению) за счет взаимного трения и гидродинамического воздействия потока. В случае использования для осветления природных вод на станции водоподготовки некоторых высокомолекулярных флокулянтов, в частности типа ПолиДАДМАХ, следует учитывать возможность хлопьеобразования в условиях высокого градиента скорости.

6. Вводимый реагент до сооружения обработки только смешивается с промывной водой. Коагулянты и флокулянты, используемые в реагентных схемах обработки промывных вод, не образуют двоичных, третичных и т.д. структур (хлопьев) при движении по трубопроводу промканализации.

7. При использовании камеры хлопьеобразования, встроенной в сооружение по обработке промывных вод, происходит укрупнение коагуляционных структур, но не происходит седиментация взвешенных частиц.

Математическое описание образования, транспортировки и обработки промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей станций водоподготовки представляет собой систему

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 (n + n_{\text{пром}} + \sum_{i=2}^{\infty} iN_i)}{\partial x \partial \tau} + \frac{\alpha \omega^2}{d} \frac{\partial (n + n_{\text{пром}} + \sum_{i=2}^{\infty} iN_i)}{\partial x} = 0; \\ \frac{dn}{d\tau} = \frac{dN_i}{d\tau} - K_B N \frac{r_f^2}{r_1^2} G + \frac{4}{3} G n_1 \sum_{i=1}^{p-1} N_i \left(ar_1 \left(i^{\frac{1}{3}} + 1 \right) \right)^3; \\ \frac{dn}{d\tau} = \frac{dN_i}{d\tau} - \frac{4}{3} G n_1 \sum_{i=1}^{p-1} N_i \left(ar_1 \left(i^{\frac{1}{3}} + 1 \right) \right)^3; \\ -\frac{dn}{d\tau} = \frac{2}{3} \psi k T \frac{1}{\eta} n^2 + \frac{1}{K_{\text{ос}}} e^{-\frac{1}{\mu_0 \tau^\beta}} (1 - \mu_0 \beta \tau^{\beta-1}) - \frac{1}{K_{\text{ос}}} \beta \tau^{-1} (1 + \mu_0 \tau^\beta), \end{array} \right.$$

где $n_{\text{пром}}$ – количество первичных частиц в воде из РЧВ, подаваемой на промывку; N_i – численная концентрация хлопьев из i частиц радиусом r_1 ; K_B – константа скорости разрушения хлопьев; r_1 – радиус одиночной (первичной) частицы; $K_{\text{ос}}$ – коэффициент пропорциональности.

Результаты интегрирования отдельных уравнений представлены в главе 2. Однако применение данной системы трудно использовать для практических расчетов. Математическое описание утилизации промывных вод практически невозможно, поэтому нами разработан алгоритм принятия решения о направлении утилизации, представленный в главе 5. Необходимость получения для практических расчетов эмпирических зависимостей потребовала проведения экспериментов, их обработки статистическими методами при различных условиях обработки промывных вод. Нами получены эмпирические зависимости, связывающие эффективность осветления с массовой концентрацией взвеси и временем осветления.

В статических условиях (вода непосредственно из фильтра при его промывке) получено уравнение для определения времени отстаивания воды:

$$\Theta = 12,19 \ln(\tau h^{0,51}) - K_1 t + K_2 C_{\text{взв}}, \quad (1)$$

где Θ – эффект осветления, %; τ – время осветления промывной воды до заданного эффекта осветления, с; h – высота слоя отстаивания, м; K_1 и K_2 – коэффициенты, численно равные $0,93 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и

0,019 дм³/мг соответственно; t – температура промывной воды в процессе осветления, °С; $C_{взв}$ – начальная концентрация взвешенных веществ, мг/дм³.

С достоверностью 95 % уравнение (1) описывает изменение эффекта осветления сбросных вод с содержанием взвешенных веществ от 50–400 мг/дм³, при температуре воды от 5–25 °С и в диапазоне времени осветления от 60–2700 с при высоте слоя осветления до 2,0 м.

В условиях гидродинамического воздействия на взвесь в воде эффект безреагентного осветления:

$$\Xi = 100 - \exp \left(\left(\frac{0,17}{t^{0,03}} \right)^3 \frac{0,01GT + 13085}{(C_{взв}h)^{0,02}} \left(\frac{0,23}{\tau^{0,03}} - 0,01 \right) - 6,53 \right), \quad (2)$$

где GT – критерий Кэмпа.

Уравнение (2) действительно для промывных вод с содержанием взвешенных веществ 50–400 мг/дм³, при температуре воды 5–25 °С, высоте слоя осветления 0,15–3,5 м, критериях Кэмпа $1 \cdot 10^4$ – $9 \cdot 10^4$. Изменение цветности воды при безреагентной обработке не зафиксировано. Уравнение (2) включает в себя высоту слоя осветления (отстаивания), но часто используется равенство отношений времени осветления к высотам столбов жидкости вида $(\tau_1/\tau_2 = (h_1/h_2)^n)$. Выполнен расчет показателя степени n при осветлении промывных вод, который составил: в покое без перемешивания –0,51; с перемешиванием в трубопроводе –0,68; с перемешиванием в трубопроводе и перемешиванием в сооружениях повторного использования –0,63. Величины показателя степени n , рассчитанные по результатам экспериментов, отличаются от рекомендуемых, что следует учитывать при расчетах.

Определены зависимости доз реагентов и эффекта осветления от интенсивности перемешивания в трубопроводах промканализации, а также оптимальные параметры перемешивания в сооружениях обработки промывных (сбросных) вод при введении в воду коагулянтов и флокулянтов. Исследована работа семи коагулянтов (Полвак-40, Полвак-68, Аква-Аурат 30, Аква-Аурат 105, оксихлорид алюминия (АО ПФ «Спектр»), БОПАК-Е, LT32) и четырнадцати флокулянтов на основе полиакриламида. Подбор реагентов производился таким образом, чтобы коагулянты имели разную основность, а флокулянты были представлены всех видов – неионогенные, катионные и анионные.

Коагуляция взвешенных веществ в воде, обработанной Полвак-40 (среднеосновный коагулянт), реагирует на изменения градиента скорости с минимумом эффекта осветления в диапазоне критерия Кэмпа 5500–6500, стабилизируя эффект осветления при достижении дозы 3 мг/дм³ по Al_2O_3 . Обработкой экспериментальных данных получено следующее уравнение:

$$\Xi = A(6,67 - D_{п}) + 98,67, \quad (3)$$

где A – параметр, определяемый как $A = 3 \left(\frac{GT}{10^4} + \frac{2}{3} \right)^2 - 0,516$; $D_{п}$ – доза коагулянта «Полвак-40» по Al_2O_3 , мг/дм³.

Использование Аква-Аурата 30 (низкоосновный коагулянт) позволяет получить зависимость эффекта осветления от критерия Кэмпа при постоянной дозе в виде полиномов второй степени с максимумами в интервале 4 000–5 000. Обработка экспериментальных данных дала следующее уравнение:

$$\Xi = \left(2 \frac{GT}{10^4} - 1 \right)^2 \cdot (D_{AA} - 7,5) + 98,1, \quad (4)$$

где D_{AA} – доза коагулянта «Аква-Аурат 30» по Al_2O_3 , мг/дм³.

Зависимости (3) и (4) действительны в пределах критерия Кэмпа от 10^3 до 10^4 . Эффект обесцвечивания сбросной (промывной) воды фильтров с применением коагулянта «Полвак-40» по мере увеличения критерия Кэмпа убывает по полиному второй степени (рисунок 2). Полиномиальные зависимости с увеличением дозы коагулянта имеют пере-

лом в зоне максимума эффекта обесцвечивания, соответствующий критерию Кэмпа 6700–7300, а при режимах перемешивания критерию Кэмпа 4 800 и 9 600 эффект максимальный.

В обработанной реагентами воде содержание остаточного активного хлора изменялось в зависимости от дозы реагента и составило для Полвак-40 при дозе 1 мг/дм³ по Al_2O_3 – $0,48 \pm 0,46$ мг/дм³, а при дозе 5 мг/дм³ по Al_2O_3 – $0,32 \pm 0,27$ мг/дм³; для Аква-Аурат 30 при дозе 1 мг/дм³ по Al_2O_3 – $0,29 \pm 0,19$ мг/дм³, а при дозе 5 мг/дм³ по Al_2O_3 – $0,17 \pm 0,10$ мг/дм³. Остаточный алюминий (по Al^{3+}) в отстаивной сбросной воде фильтров не превышал 0,15 мг/дм³.

Применение композиционного коагулянта «Аква-Аурат 105» для обработки сбросной (промывной) воды фильтров воды исследовалось в интервале критерия Кэмпа от 8 963 до 21 073. Оценивая результаты осветления коагулянт «Аква-Аурат 105», следует отметить его неэффективность для осветления сбросных вод, так как на малых значениях критерия Кэмпа оптимальная доза весьма высока (7–8 мг/дм³ по Al_2O_3), а с ростом критерия Кэмпа его действие незначительно превышает эффективность коагуляции взвеси без обработки реагентов.

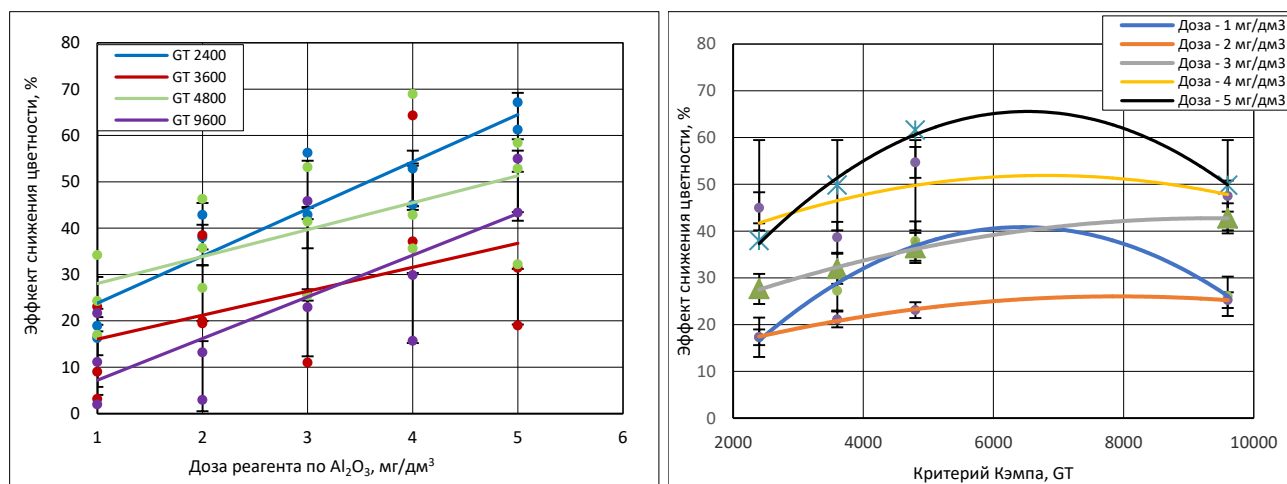


Рисунок 2 – Из^{а)}менение эффекта обесцвечивания в зависимости от^{б)}дозы Полвак-40 и Аква-Аурат 30 и параметров перемешивания:
а – Полвак-40; б – Аква-Аурат 30

Оксихлорид алюминия (ОХА) производства АО ПФ «Спектр» (Волгоград) использовался для обработки сбросных вод со схемой перемешивания, соответствующей диапазону критерия Кэмпа 4044–20762. Аппроксимирующие кривые трех интервалов критерия Кэмпа из четырех находятся в пределах 93,6–96,5 % по эффекту осветления с оптимальными дозами 4 мг/дм³ по Al_2O_3 , 2 мг/дм³ по Al_2O_3 и 8 мг/дм³ по Al_2O_3 соответственно. Исходя из этого, рекомендуемыми к применению с коагулянт ОХА АО ПФ «Спектр» следует считать режимы с критерием Кэмпа 20 436–20 762.

На ОС Донвод для осветления промывных вод фильтров выполнены исследования по эффективности их обработки (поли)оксихлоридами алюминия Полвак-68, БОПАК-Е, Аква-Аурат 30 при перемешивании, соответствующем критерию Кэмпа 25 200. В результате серии экспериментов с оксихлоридом алюминия Полвак-68 получена аппроксимирующая кривая зависимости эффекта осветления от дозы коагулянта, на которой присутствует экстремум в районе 5 мг/дм³, с незначительными колебаниями относительно 98,5 % эффекта осветления при дальнейшем увеличении дозы. Форма аппроксимирующей кривой эффекта осветления от дозы БОПАК-Е отличается от Полвак-68, поэтому интервал оптимальных доз следует принять 5–7 мг/дм³ по Al_2O_3 . Аппроксимирующая кривая эффекта осветления от дозы коагулянта «Аква-Аурат 30»

получена в виде полинома третьей степени. Аква-Аурат 30 по эффективности осветления занимает промежуточную позицию между Полвак-68 и БОПАК-Е, а оптимальную дозу коагулянта следует принять в интервале 5–6 мг/дм³ по Al_2O_3 .

Анализ полученных результатов по применению коагулянтов не выявил устойчивой зависимости эффекта осветления сбросных (промывных) вод фильтров от их основности. Обобщая результаты работ по осветлению воды коагулянтами, сделан вывод о необходимости выполнения подбора марки коагулянта на основании оценки реального (или проектного) режима перемешивания в трубопроводах промканализации и сооружениях обработки сбросных вод.

Влияние изменения дозы указанных выше флокулянтов исследовалось на ОС Донвод при перемешивании с критерием Кэмпбелла 25 200. Полученные результаты по форме кривой «доза реагента – эффект осветления» собраны в две группы (рисунок 3). Первая группа – кривые при определенной дозе реагента достигают своего максимума и дальнейшее увеличение дозы реагента не влияет значимо на величину эффекта осветления. По величине оптимальной дозы флокулянты образуют ряд: LT 26 (0,25 мг/дм³) ← LT 28, LT 253, LT 22S (1,00 мг/дм³) ← LT 30 (1,10 мг/дм³) ← LT 20 (1,20 мг/дм³) ← LT 25S (1,25 мг/дм³) ← LT 27A9 (1,40 мг/дм³) ← LT 24 (1,50 мг/дм³). Вторая группа – кривые имеют максимум на графике с последующим падением линии к минимальному значению. В этом случае ряд оптимальных доз имеет вид: LT 27 (1,25 мг/дм³) ← LT 1253 (1,50 мг/дм³) ← LT 22 (1,50 мг/дм³). Дальнейшее увеличение дозы флокулянта приводит к увеличению мутности отстоянной воды. Сравнивая эффекты осветления и группируя по видам флокулянтов (неионогенные, катионные или анионные), следует отметить, что наибольшую эффективность при осветлении сбросной воды фильтров показывают анионные флокулянты, которые и следует использовать для аналогичных сооружений водоподготовки.

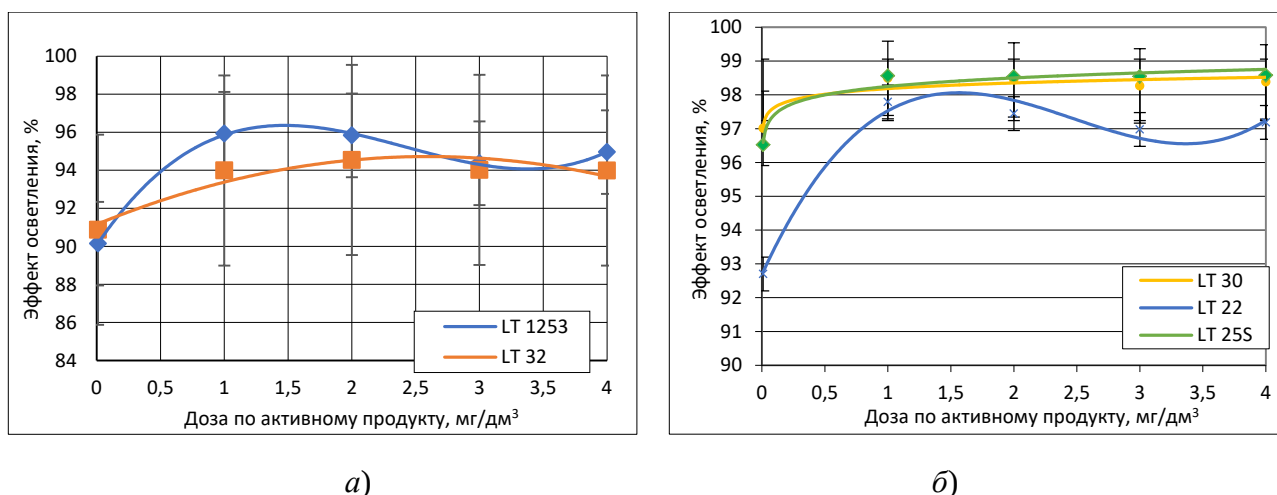


Рисунок 3 – Изменение эффекта осветления в зависимости от дозы флокулянтов на основе полиакриламидов марки Magnafloc LT и коагулянта LT 32 (очистные сооружения Таганрога):

а – кривые первой группы; б – кривые второй группы

В третьей главе «Качество и обработка сбросных вод отстойников и сооружений обработки промывных вод скорых фильтров» сформулирована концептуальная модель образования, обработки и утилизации сбросных вод отстойников и сооружений обработки промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей станций водоподготовки, дано ее математическое описание. Изучен качественный состав сбросных вод отстойников и после сооружений обработки промывных вод фильтров, динамика их уплотнения осадков, определены параметры работы осадкоуплотнителя. Выполнена оценка корреляции между отдельными физическими свойствами, получены коэффициен-

ты пересчета реологических свойств осадка с нарушенной структурой к реальным значениям непосредственно в отстойных сооружениях. Теоретически и экспериментально обосновано использование капиллярно-пористых материалов (тканевых, каменных) для интенсификации обезвоживания осадка, определены параметры для проектирования сооружений подсушивания осадка в естественных условиях с использованием капиллярных элементов.

Определен качественный состав сбросных вод горизонтальных отстойников, осадка сбросных вод скорых фильтров соответственно: химический состав и физические свойства (таблица 1). Осадок, полученный при использовании одного коагулянта-флокулянта типа полиДАДМАХ (ВПК-402), имеет плотную, вязкую структуру темно-серого цвета с едким запахом, содержит маслянистую пленку (осадок и декантированная вода). Совместное применение коагулянта-флокулянта типа полиДАДМАХ с коагулянтом Аква-Аурат формирует светло-серый осадок, менее вязкий и с меньшей плотностью, выраженным запахом, также имеет маслянистую пленку на поверхности.

Таблица 1 – Физические свойства осадка отстойников и промывных вод скорых фильтров

Параметр	Осадок, образованный в отстойнике за весну-лето			Осадок, образованный в отстойнике за осень-зиму			Осадок промывных вод скорых фильтров
	Реагент			Реагент			
	ВПК-402	ВПК-402 + AA	FL-4540 PWG	ВПК-402	ВПК-402 + AA	FL-4540 PWG	
Влажность, %	89,88±1,17	97,52±0,84	91,48±2,12	89,56±2,07	94,41±4,36	92,52±4,75	92,95±2,40
Весовая концентрация, г/дм ³	108,16±12,89	59,56±3,17	106,0±9,7	111,74±23,8	60,14±49,43	100,47±29,27	75,14±27,18
Объемный вес, г/дм ³	1,068±0,012	1,07±0,04	1,052±0,013	1,068±0,016	1,042±0,044	1,047±0,012	1,046±0,031
Удельный вес осадка, г/дм ³	—	1,705±0,375	1,736±0,111	—	1,869±0,26	1,806±0,033	1,711±0,423
Сопrotивление фильтрованию ·10 ⁻¹⁰ , см/г	20,24±5,05	—	22,75±12,97	40,18±21,075	59,13±13,80	67,29±17,66	31,62±23,00 729±176,03
Зольность, %	87,79–71,30						75,02±10,25

Анализ данных таблицы 1 показывает влияние применяемого реагента на качество осадка и необходимость рассмотрения при проектировании систем удаления осадка или его обработки (уплотнения, обезвоживания) двух периодов накопления – «осень-зима» и «весна-лето». Это обусловлено структурой осадка: «осенне-зимний» осадок имеет рыхлую, легкую структуру, при этом меньшую зольность; «весенне-летний», наоборот, имеет значительную минеральную составляющую (зольность высокая) и сравнительно легко отдает воду.

Осадок, образованный в сооружении обработки промывных вод фильтров, и осадок из отстойников имеют близкие значения влажности, объемного и удельного весов, но значительно большее сопротивление фильтрованию и большую зольность (75,02±10,25 %). Отличительной особенностью химического состава осадка исследуемых очистных сооружений является относительно небольшое количество Al_2O_3 , SiO_2 до 45,55 %, Al_2O_3 до 20 % по с.в. Fe_2O_3 до 7,36 % по с.в., а также оксидов калия (до 2,01 % по K_2O) и фосфора (до 0,49 % по с.в.), остаточные концентрации полиДАДМАХ в пределах 5,0–10,0 мг/дм³. В декантированной воде обнаружено значительное содержание ионов железа, магния, алюминия, кальция. Качество декантированной воды делает ее возврат в голову сооружений без обработки невозможным, но могут быть рассмотрены варианты: перекачка в сооружения обработки промывных вод скорых фильтров и (или) сброс в промканализацию.

Санитарно-паразитарная оценка осадка отстойников, сбросных (промывных) вод и декантированной воды выполнялась по стандартным методикам институтом Микробиологии и паразитологии Ростова-на-Дону автором совместно с А.Ю. Скрыбиным. Микробиологические и паразитарные показатели сбросных вод отстойников характеризуются наличием яиц аскарид (не более одного на 25 л), цист лямблий (до двух на 25 л), а сооружений обработки сбросных (промывных) вод скорых фильтров – наличием яиц аскарид (до двух на 25 л), цист лямблий (до четырех на 25 л), токсокар (не более одной на 25 л).

Степень насыщения осадка водой характеризуется величиной структурно-механической гидратации η_0 или η_v . Выполненные определения коэффициентов гидратации осадка сбросных вод отстойников и сооружения обработки промывных вод скорых фильтров, образовавшихся при использовании для осветления воды сочетания флокулянта полиДАДМАХ с оксихлоридом марки Аква-Аурат, дали следующие значения: η_0 $40,92 \pm 10,62$ мл/мл для осадка, извлеченного из отстойников, и $12,56 \pm 0,91$ мл/мл после его уплотнения в течение более 6 ч; η_v $21,41 \pm 4,89$ мл/г и $7,11 \pm 0,56$ мл/г соответственно.

Впервые определены эти же показатели для неуплотненного осадка промывных вод скорых фильтров: η_0 – $12,00 \pm 6,48$ мл/мл и η_v – $7,74 \pm 3,63$ мл/г. Сравнение полученных значений коэффициентов гидратации осадка при использовании органического коагулянта-флокулянта с осадком, образованным сернокислым алюминием, показывает значительно большее обводнение твердых частиц осадка, что связано с иной структурой хлопьев, в которых защемляется большее количество воды. Величины этих же коэффициентов для осадка сбросных вод скорых фильтров значительно меньше, чем у любого из исследованных видов осадка горизонтальных отстойников (до уплотнения).

Концептуальная модель образования, обработки и утилизации сбросных вод отстойников и сооружений обработки промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей станций водоподготовки представлена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Концептуальная модель образования, обработки и утилизации сбросных вод отстойников и сооружений обработки промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей станций водоподготовки

Изменение концентрации взвешенных веществ в сбросных водах при промывке отстойника, допуская равномерное уменьшение слоя осадка в процессе удаления по

длине отстойника, предложено описывать уравнением $dC_0^2 = \left(\frac{4i}{U_{cp}n^2}\right)^2 dh$, так как $h = h(\tau)$, то $dC_0^2 = \left(\frac{4i}{U_{cp}n^2}\right)^2 h'(\tau)d\tau$. Здесь $U_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{cpi}p_i}{P}$; U_{cpi} – гидравлическая крупность, подсчитанная по d_{cp} для i -фракции; $d_{cpi} = \frac{d_{i-1} + d_i}{2}$; p_i – вес i -ой фракции; P – вес всего образца осадка, τ – время протекания процесса, с, в данном случае время удаления осадка из отстойника.

Этапы в общем виде могут быть представлены функциями:

$$X'_1 = f(K_p, h, i, n, U_{cp}); \quad X'_2 = f(C_0, V_{л}, \tau_{пер}, h_0, U_{cp}); \quad X'_3 = f(ТО); \\ X'_4 = f(Cu, Zn, Pb, Al_2O_3, P_2O_5, SiO_2),$$

где K_p – коэффициент разбавления осадка водой, подаваемой на промывку; h – средняя глубина потока, принимаемая равной высоте слоя осадка; i – уклон днища отстойника к сборному трубопроводу (коробу); n – коэффициент шероховатости днища отстойника; U_{cp} – средневзвешенная гидравлическая крупность частиц осадка; $V_{л}$ – скорость движения конца лопасти мешалки в уплотнителе; $\tau_{пер}$ – время перемешивания осадка в уплотнителе; $ТО$ – тип обезвоживания – механическое или в естественных условиях; $Cu, Zn, Pb, Al_2O_3, P_2O_5, SiO_2$ – концентрация в осадке соответствующих веществ и соединений.

Уплотнение разбавленного при удалении из отстойников осадка в осадкоуплотнителе предложено описывать системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{C_0}{C_n} = 1 - U_{cp} \frac{(1-C_0)^4}{1+C_0^2} \tau_l h_0^{-1}; \\ C(\tau_{II}) = C_n \left[\frac{C_n}{C_{кII}} + \left(1 - \frac{C_n}{C_{кII}}\right) e^{-\alpha \tau_{II}^\beta} \right]^{-1}, \end{cases}$$

где C_0 – концентрация взвешенных частиц в объеме неуплотненного осадка; C_n – концентрации взвеси в конце первой фазы или в начале и второй фазы; τ_l – время уплотнения осадка в первой фазе; h_0 – начальная высота налива осадка; τ_{II} – время уплотнения во второй фазе уплотнения; $C_{кII}$ – концентрации взвеси в конце второй фазы.

Обезвоживание осадка реализуется в двух вариантах – механическое обезвоживание и обезвоживание в естественных условиях. Эффективность механического обезвоживания зависит от вида применяемого оборудования, параметров его работы, дозы и вида флокулянта. Обезвоживание осадка в естественных условиях (иногда употребляют термин «сушка») описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{dV_c}{d\tau} + \frac{dV_\phi}{d\tau} + \frac{dV_d}{d\tau}, \quad (5)$$

где V – общее содержание воды в осадке; V_c – объем воды, удаляемый с поверхности осадка в следствии испарения влаги; V_ϕ – объем воды, удаляемый в процессе фильтрования в дренажную систему; V_d – объем воды, удаляемой за счет декантации.

Применительно к площадкам обезвоживания с установленными в них капиллярными патронами уравнение (5) дополним слагаемым $\frac{dV_{с.к}}{d\tau}$, учитывающим испарение с поверхности капиллярного элемента выше уровня воды, тогда

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{dV_c}{d\tau} + \frac{dV_\phi}{d\tau} + \frac{dV_d}{d\tau} + \frac{dV_{с.к}}{d\tau},$$

где $V_{с.к}$ – объем воды, испаряющейся в процессе сушки капиллярного материала.

При напуске осадка на поверхность площадки обезвоживания его уплотнение начинается со второй фазы и продолжается в третьей фазе, тогда удельный (на единицу площади) объем воды, образующейся за счет уплотнения осадка:

$$V_{уд} = \begin{cases} h_{кII} + (h_n - h_{кII}) \cdot e^{-\alpha \tau^\beta} & h > h_{кII}; \\ (60h_{кII}C_k - 80)K & h \leq h_{кII}. \end{cases}$$

Образовавшаяся при уплотнении вода удаляется путем декантирования с поверхности, фильтрования в дренажную систему и испарения с поверхности жидкости (до момента снижения уровня воды ниже уровня осадка). Но с учетом того, что скорость испарения значительно меньше скорости фильтрования и декантации, им можно пренебречь, тогда

$$\frac{dV_{\phi}}{d\tau} + \frac{dV_d}{d\tau} = h_{kII} + (h_{kII} - h_n) \cdot e^{-\alpha\tau^{\beta}} (\beta - 1) \alpha \tau^{\beta-1}.$$

Принимая сушку осадка только за счет испарения воды с поверхности осадка

$$\frac{dV_c}{d\tau} = K_{об} \cdot E_m = 12960 K_{об} (l_0 - l_{200}) (1 + 0,72 V_{200}) d\tau,$$

где $K_{об}$ – модульный коэффициент обеспеченности, зависящий от климатических условий района строительства и требуемой степени обеспеченности; E_m – величина слоя месячного испарения, мм; l_0 – упругость насыщенных водяных паров, мб; l_{200} – средняя месячная абсолютная влажность воздуха на высоте 200 см от водной поверхности, мб; V_{200} – средняя скорость ветра на высоте 200 см, м/с; τ – время, с.

Скорость сушки капиллярного материала:

$$\frac{dV_{с.к}}{d\tau} = F_{к.п} \cdot \sum E'_m = 2,07 \cdot 10^6 F_{к.п} \cdot \sum \frac{l_0 - l_1}{R_{в.п}} d\tau,$$

где $F_{к.п}$ – площадь капиллярного поднятия по всем капиллярным материалам над уровнем воды в площадке, м²; E'_m – величина слоя месячного испарения с поверхности капиллярного материала, расположенной выше уровня воды, мм; l_1 – абсолютная влажность воздуха над сушей для данного месяца, мб, согласно СП 131.13330.2020; $R_{в.п}$ – коэффициент для внутренней поверхности.

Совместное решение представленных уравнений модели обеспечивает полное описание процесса от момента образования сбросных вод влажностью 99,5-99,7 % до обезвоживания при конечной влажности ≈60 %. Математическое описание утилизации осадка представляет значительные трудности, поэтому разработан алгоритм принятия решения о направлении утилизации (глава 5).

Динамика уплотнения сбросных вод исследована на примере осадка, отобранного из горизонтальных отстойников (коэффициент разбавления варьировался от 1,2 до 3) станции водоподготовки Ростова-на-Дону, и уплотнения осадка после безреагентного отстаивания промывных вод скорых фильтров. Установлено, что продолжительность уплотнения в зоне «стеснённого осаждения» составляет около 60 мин для осадка горизонтальных отстойников, а для осадка сбросных вод скорых фильтров 3–15 мин. Скорость и степень уплотнения в «зоне образования сплошной пространственной структуры» зависит не только от концентрации осадка, но и от наличия перемешивания. При этом уменьшение концентрации осадка снижает эффект от перемешивания (кривые с перемешиванием и без перемешивания сближаются друг с другом), что связано с уменьшением интенсивности взаимной коагуляции частиц. Определено, что длительность этого этапа уплотнения осадка сбросных вод отстойников в лабораторных условиях составляет 1–3 ч, а в условиях реальных сооружений от 3 ч до нескольких суток (высококонцентрированные минеральные осадки). Продолжительность уплотнения осадка сбросных вод фильтров находится в пределах 1–17 ч. Исходя из чего считаем строительство отдельных сооружений обезвоживания для них неоправданным и его следует смешивать с осадком отстойников. Уплотнение осадка в «зоне уплотнения хлопьевидных частиц осадка» требует значительного времени и в осадкоуплотнителе, как правило, не происходит.

Выполнена оценка влияния на эффективность уплотнения сбросных вод горизонтальных отстойников перемешивания с разной длительностью и интенсивностью. Варьировались параметры: «скорость вращения наружного края лопасти», «время перемешивания» и «влажность исходного осадка». Установлено, что с увеличением времени перемешивания при всех изученных скоростях вращения повышается эффективность уплотнения

осадка. При этом форма кривой «эффективность – время перемешивания» имеет точку перелома, соответствующую времени перемешивания 8 мин, которое должно быть принято в расчетах как минимальное время работы мешалки. Увеличение скорости вращения наружного края лопасти негативно отражается на эффективности уплотнения осадка и ее следует принимать не более 0,015 м/с. Полученные результаты предложено использовать при проектировании осадкоуплотнителей смеси сбросных вод отстойников и сооружений повторного использования промывных вод скорых фильтров.

В процессе изучения физических, в том числе реологических, свойств осадков сбросных вод отстойников и сооружений обработки промывных вод скорых фильтров сформировалась гипотеза о наличии корреляции между ними. В осадках по общепринятым методикам определялись параметры «предельное напряжение сдвига», «сопротивление фильтрованию», «коэффициент пластической вязкости» (пластическая вязкость), «влажность» и «удельный вес» с оценкой степени корреляции попарно. Определено, что корреляционная зависимость между влажностью и содержанием взвешенных веществ в осадке отстойников независимо от времени его образования «очень высокая» ($R^2 = 0,99$), а влажности осадка в отстойнике и объемного веса – «очень слабая» ($R^2 < 0,1$).

Исследовано изменение величины сопротивления фильтрованию осадка отстойников в разные периоды года. Значение этого показателя в исходном (без разбавления) и в смеси с водой (коэффициентом разбавления 1,2–3) осадке до уплотнения, а также после гравитационного уплотнения (уплотнение производилось в пределах первой и второй стадии) находится в пределах $20\text{--}170 \cdot 10^{10}$ см/г (рисунок 5). Установлено, что осадок, образованный в период «осень-зима», имеет в 2–8 раз большее сопротивление фильтрованию осадка, чем образующийся в период «весна-лето».

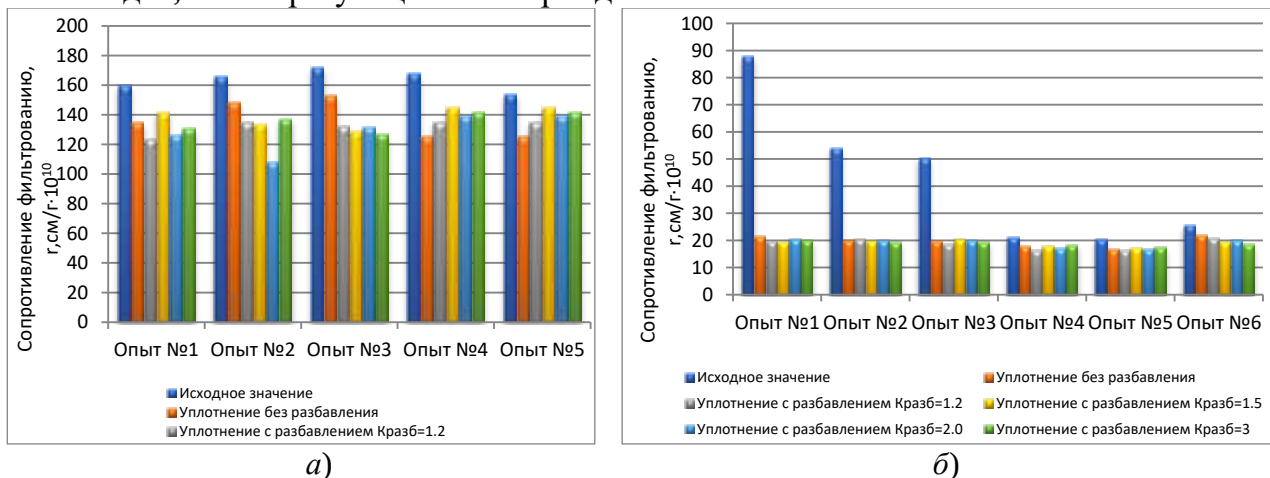


Рисунок 5 – Диаграмма изменения значений сопротивления фильтрованию до и после уплотнения с предварительным разбавлением:

а – осадок, накопленный за зиму; б – осадок, накопленный за весну

Корреляция между влажностью и сопротивлением фильтрованию «очень низкая» ($R^2 = 0,095$), следовательно на изменение этих параметров влияют разные факторы, а корреляция между сопротивлением фильтрованию и плотностью сухого вещества осадка (см. рисунок 5) «высокая».

Возможно использование зависимости

$$r = (-164,37\gamma_T + 417,9) \cdot 10^{10},$$

где γ_T – объемный вес твердого вещества.

При изучении осадка сбросных вод скорых фильтров впервые выявлено явление значительного изменения сопротивления осадка фильтрованию в процессе определения данного показателя – наличие на графике $V\text{--}t/V$ вместо одной прямой двух с различным уклоном к оси абсцисс, пересекающихся в точке «перелома». Точке «перелома» соот-

ветствует время от начала опыта в пределах от 20 до 45 с, при этом увеличение сопротивления фильтрованию происходило на 1–3 порядка (максимум в $3\,197,95 \cdot 10^{10}$ см/г). Исходя из этого, считаем, что осадок сбросных вод фильтров следует характеризовать двумя значениями сопротивления фильтрованию – до и после точки «перелома». Данное явление может быть объяснено изначально меньшими размерами хлопьев в воде, поступающей на фильтры, их меньшей «жесткостью». Под воздействием вакуума в осадке разрушается сложившаяся на втором этапе уплотнения структура – фактически переходим к свойствам осадка в третьей фазе уплотнения, где сопротивление фильтрованию увеличивается.

Рассматривая возможность корреляции между исходной влажностью осадка и сопротивлением фильтрованию, установлено, что ее величина соответствует характеристики «очень слабая» для обеих совокупностей до $R^2 = 0,076$ и после точки «перелома» ($R^2 = 0,174$). В свою очередь, корреляция между объемным весом сухого осадка и сопротивлением фильтрованию, рассчитанного до точки «перелома», характеризуется как «средняя» ($R^2 = 0,5254$) и имеется возможность косвенной оценки показателя «сопротивление фильтрованию» по зависимости

$$r = (-494,74\gamma_T^3 + 2438,5\gamma_T^2 - 3946,6\gamma_T + 2113,7) \cdot 10^{10}.$$

Корреляция этого же показателя с сопротивлением фильтрованию после точки «перелома» характеризуется как «очень слабая» ($R^2 = 0,0899$), использовать ее для косвенной оценки некорректно.

Изучено влияние изменения влажности осадков отстойников на величину предельного напряжения сдвига. Корреляция между влажностью осадка и сопротивлением сдвигу для осадков: минеральный при осветлении воды с сернокислым алюминием; при осветлении воды с ВПК-402 (полиДАДМАХ); при осветлении воды с сернокислым алюминием и ВПК-402 (полиДАДМАХ) высокая и очень высокая. Следовательно, по влажности осадка может быть оценена величина предельного напряжения сдвига по следующим зависимостям:

– минеральный при осветлении воды с сернокислым алюминием:

$$\tau_s = 0,141W^2 - 27,64W + 1360;$$

– при осветлении воды с ВПК-402 (ПолиДАДМАХ):

$$\tau_s = 0,165W^2 - 32,75W + 1647;$$

– при осветлении воды с сернокислым алюминием и ВПК-402 (полиДАДМАХ):

$$\tau_s = 0,053W^2 - 9,95W + 480.$$

При осветлении воды флокулянт полиДАДМАХ с коагулянт Аква-Аурат 10 предельного напряжения сдвига такого осадка имеет корреляцию с влажностью на уровне «средняя» ($R^2 = 0,56$) и можно использовать уравнение

$$\tau_s = 24393e^{-0,0093W}.$$

В отличие от осадка горизонтальных отстойников предельного напряжения сдвига осадка промывных вод фильтров сдвигу не имеет корреляции с влажностью – уровень корреляции «очень слабая». Изучение зависимости предельного напряжения сдвига от удельного веса осадка и объемного веса сухого осадка показали «очень слабую» ($R^2 = 0,27$) и «среднюю» ($R^2 = 0,56$) корреляцию соответственно.

Пластическая вязкость осадка характеризует внутреннее трение между соседними слоями дисперсионной фазы, диспергированными частицами, а также межфазное взаимодействие. Определено, что корреляция между пластической вязкостью осадка и влажностью, пластической вязкостью и массовой концентрацией дисперсной фазы «очень слабая», т.е. можно утверждать об отсутствии взаимовлияния.

Значения коэффициента пластической вязкости группируются в одной области, не превышая значения 0,12 Па·с, а после гравитационного уплотнения без внешнего воз-

действия его величина в 90 % случаев не превышает 0,06 Па·с. Перемешивание осадка меняет его структуру, расширяя интервал значений $\eta_{пл}$ до 0,27–0,51 Па·с. Величина коэффициента пластической вязкости осадка промывных вод скорых фильтров находится в пределах 0,0015–0,151 Па·с, со слабой корреляцией с массовой концентрации дисперсной фазы. Осадок промывных вод скорых фильтров имеет значительно меньший коэффициент пластической вязкости, что следует учитывать при расчете систем удаления осадка из сооружений повторного использования. Выполнены сравнительные исследования сопротивления осадка отстойников сдвигу с использованием прибора для определения его непосредственно в отстойнике (в месте образования) и после его извлечения (осадок нарушенной структуры). Получены величины переводного коэффициента при определении значения сопротивления осадка сдвигу в лабораторных условиях в реальные, наблюдаемые в отстойнике.

Показано, что в тканевых и каменных искусственных строительных материалах имеются открытые капиллярные поры с диаметром, близким к радиусу капиллярного мениска (соответствуют ограничениям закона Лапласа); радиус капилляра (капиллярной поры) в тяжелом бетоне 0,01–1 мкм, а керамическом кирпиче – 0,1–20 мкм. Сделан вывод о потенциальной возможности использования в качестве капиллярных элементов для удаления свободной и физико-механически связанной влаги из осадка тканевыми и каменными строительными материалами. При этом важным условием процесса обезвоживания является самопроизвольное испарение жидкости (сушка) поверхности материала выше уровня воды.

Введено понятие «капиллярный элемент» как конструкции, расположенной в осадке, обеспечивающей извлечение воды из него посредством капиллярного эффекта. Определено, что тканевые капиллярные элементы при погружении в осадок влажностью 84,8–92,5 % обеспечивают эффект обезвоживания в естественных условиях в пределах 19,14–42,03 % (коэффициенты: заполнения – 0,083; соприкосновения – 0,4) в сравнении с 10,14 % при сушке без элементов по прошествии 2–5 сут. Варьирование коэффициентов заполнения и соприкосновения капиллярных элементов в конструкции сооружения обезвоживания показало прямо пропорциональную зависимость с эффектом обезвоживания.

При этом с ростом коэффициента заполнения уменьшается полезный объем сооружения, в связи с чем предложено установить максимальное значение коэффициента заполнения не более 0,1. Установлено, что увеличение скорости воздушного потока над поверхностью осадка обеспечивает незначительный прирост эффекта обезвоживания за счёт испарения воды с поверхности, поэтому в дальнейшем от принудительного обдува принято решение отказаться. Определено, что в процессе обезвоживания тканевые элементы быстро изнашиваются, происходит загрязнение их поверхности осадком.

Основываясь на свойствах искусственных каменных строительных материалов, исследована работа капиллярных элементов в виде параллелепипедов из тяжелого и пенобетона. Установлено, что обезвоживание осадка отстойников продолжительностью от 5 до 25 сут. с использованием пенобетонных элементов обеспечивает эффект 11,37–15,76 %, а из тяжелого бетона – 4,49–34,02 %. Различие в эффективности обезвоживания осадков, накопленных «осенью-зимой» и «весной-летом», не превышает ошибку измерений (2–3 %). Определено, что капиллярные элементы из пенобетона следует применять при нахождении осадка в сооружении естественного обезвоживания не более 5–7 сут., а из тяжелого бетона более чем 7–10 сут. Кроме расположения капиллярных бетонных элементов в площади сооружения исследована эффективность обезвоживания элементов, расположенных по периметру емкости (коэффициент заполнения равен нулю), что обеспечивает возможность работы стационарной системы сгребания осадка. Такая кон-

фигурация позволила получить увеличение эффекта обезвоживания в придонном и среднем слое осадка на 8–10 % в сравнении с контрольной пробой без капиллярных элементов. Выполнена экспериментальная оценка радиуса влияния капиллярных элементов из каменных строительных материалов и установлено, что его величину следует принимать не более пятикратной ширины элемента.

В четвертой главе «Утилизация сбросных вод отстойников и скорых фильтров» рассмотрены направления утилизации сбросных вод скорых фильтров и отстойников, определены качественные и количественные характеристики промывной воды фильтров, возвращаемой в основной поток, которая интенсифицирует процесс хлопьеобразования или снижает рабочую дозу коагулянта, выполнена оценка возможности и целесообразности утилизации сбросных вод отстойников в почвогрунте и строительных материалах.

Выделены два основных направления утилизации сбросных вод скорых фильтров: использование на станции водоподготовки и подача потребителю(ям) на сельскохозяйственные, поливомоечные или иные нужды. Второе направление утилизации перспективно при наличии платежеспособных потребителей такой воды, а управление обработкой промывных вод в безреагентном или реагентом режимах позволит регулировать ее качество на выходе из сооружения. Установка после них УФ-обеззараживания гарантирует безопасность обращения потребителя с поставляемой водой. В этом случае не уменьшается расход от водозаборных сооружений и отсутствует влияние сбросных вод на основной поток, однако появляются дополнительные объемы воды на реализацию. Использование на станции водоподготовки промывных вод может реализоваться по схеме «подача на основную схему очистки природных вод промывных вод без отстаивания» и «подача на основную схему очистки природных вод промывных вод с предварительным отстаиванием».

Установлено, что при подаче промывных вод без отстаивания на процесс осветления оказывается синергетический эффект повышения концентрации взвешенных частиц в воде и введения относительно небольших (остаточных) концентрации флокулянта (коагулянта). Экспериментально показано, что добавление не отстоянной промывной воды в количестве до 8–12 % от объема смеси способствует повышению эффекта осветления на 10–35 %. Введение промывной воды в исходную либо не влияло на эффект обесцвечивания смеси, либо незначительно ухудшало его. Возможность снижения доз вводимого для очистки природной воды реагента исследована на полупромышленной установке, включавшей в себя смеситель, осветлитель со слоем взвешенного осадка и три модели скорого фильтра с загрузками: из кварцевого песка ($d_{\text{экр}}$ 0,8–1,2), антрацита марки PUROLAT и двухслойной загрузкой – кварцевый песок PUROLAT. Одновременно оценивалось влияние введения сбросных вод на длительность фильтроцикла и на изменение качества фильтрата.

Искусственно приготовленная вода ($C_{\text{взв-х}} = 21\text{--}96 \text{ мг/дм}^3$, $\text{Ц} = 18\text{--}27 \text{ }^\circ\text{ПКШ}$, $t = 20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Щ} = 1,1\text{--}1,4 \text{ мг-экв/дм}^3$ и $\text{pH} \approx 7,0$) смешивалась с промывной водой в смесителе ($C_{\text{взв-х}} = 55\text{--}92 \text{ мг/дм}^3$, $\text{Ц} = 30\text{--}47 \text{ }^\circ\text{ПКШ}$, $t = 20\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Щ} = 1,1\text{--}1,4 \text{ мг-экв/дм}^3$ и $\text{pH} \approx 7,0$), куда вводился коагулянт марки Полвак-40 дозой от оптимальной (получена пробной коагуляцией) до 50 % от оптимальной. Обнаружено, что при восьмичасовой длительности фильтроцикла и уменьшении дозы коагулянта на 50 % от оптимальной ввод промывных вод в количестве 5–10 % обеспечивал мутность фильтрата не более $0,8\text{--}1,24 \text{ мг/дм}^3$ и цветность не более $5\text{--}8 \text{ }^\circ\text{ПКШ}$. На длительность фильтроцикла введение не отстоянной промывной воды не отразилось. Результаты работы полупромышленной установки показали возможность не только сохранить качество фильтрата при смешивания неосветленной промывной воды с исходной, но и возможность экономии коагулянта (флокулянта).

Установлено, что введение осветленной сбросной воды скорых фильтров (мутность 1,70–4,78 мг/дм³) в маломутную сырую воду, обработанную флокулянтom типа полиДАДМАХ, обеспечивает повышение эффекта осветления после отстаивания на 5–18 % лишь до соотношения 1:19 по объему. Увеличение количества осветлённой промывной воды приводит к снижению эффекта осветления. Отмечено незначительное влияние на изменение показателя «цветность», отсутствие влияния на pH и щелочность. Следовательно, если целью возврата сбросных вод является интенсификация процесса осветления при недостаточности концентрации взвешенных веществ в сырой воде, то количество вводимой отстойной промывной воды не должно превышать 5 %. Кроме возврата в смеситель отстойная промывная вода может быть направлена на промывку отстойных или фильтровальных сооружений.

Проведена оценка возможности и целесообразности утилизации сбросных вод отстойников в почвогрунте и строительных материалах (бетон и керамические изделия). Установлено, что исследуемый осадок по своему составу соответствует требованиям для технической рекультивации земель, а использование его в биологической рекультивации ограничивается низким содержанием азота и фосфора, а низкое содержание тяжёлых металлов не оказывает негативного влияния на почву.

Определено, что возможна и целесообразна утилизация осадка в составе почвенной смеси при его влажности 60–65 % в количестве до 50 % по массе и до 100 % при влажности 8–12 %. В таких соотношениях обеспечивается нормальное питание и рост растений, отсутствует негативное влияние на аэрационные процессы в почве. Использование осадка влажностью свыше 60 % в количестве более чем половины массы смеси предложено выполнять осенью, перед периодом отрицательных температур, что приведет к промерзанию смеси, ее разрыхлению и нормализации аэрации грунта.

Показано негативное влияние осадка на прочность отвердевшей конструкции при его утилизации в составе бетонной смеси. Установлено, что при содержании в бетонной смеси 11 % осадка влажностью около 10 % прочность снижается на 33–35 %; при содержании 20 % – на 57–61 %; при содержании 33 % – на 75–77 %. Осадок исходной влажности 60–70 % усложняет вымешивание смеси, так как распределяется неравномерно, за счет чего в процессе сушки образуются крупные пустоты. Прочностные характеристики снижаются в этом случае несколько больше: при добавлении 11 % осадка – на 40–56 %, при 20 % – на 69–82 %, при 33 % – на 88–90 %. Раскалывание изделий с количеством осадка в смеси более 11 % в возрасте 28 сут., имеющих сухую внешнюю поверхность, демонстрирует незатвердевшие и влажные частицы кека, легко отделяющиеся от общей массы. Таким образом, установлено, что возможно использование для бетонной смеси осадка отстойников с влажностью не более 12 % в качестве отошающей добавки.

Установлена возможность использования обезвоженного осадка отстойников в качестве сырья для производства керамики только как выгорающей добавки к тугоплавкому глинистому сырью (в случае применения кека в сухом состоянии), способствующей увеличению пористости и снижению веса изделий. Также осадок может быть рассмотрен в качестве отошающей добавки к глинистому сырью в случае применения кека в обожженном состоянии. В обоих случаях максимальное количество осадка в объеме смеси не должно превышать 15 %.

В пятой главе «Конструкции сооружений обработки сбросных вод» приведены разработанные конструкции обработки сбросных вод скорых фильтров и отстойников, приведены методики их расчета, разработаны алгоритмы выбора технологической схемы обработки промывных вод скорых фильтров и выбора технологической схемы обработки осадка отстойников и промывных вод скорых фильтров, дана оценка предлагаемых схем.

В отличие от известных ранее сооружений обработки промывных (сбросных) вод скорых фильтров разработанные нами конструкции оборудованы отдельной емкостью для накопления осветленной воды – приемным резервуаром насосной станции, напорной гидравлической системой удаления осадка, рассредоточенным сбором осветленной воды, автоматизацией отбора воды из отстойной емкости и воздухораспределительной системой (рисунки 6, 7). На конструкции получены патенты № 2124480, 2188799, 93081, 129094. Они универсальны, имеют возможность обрабатывать воду как в реагентном, так и безреагентном режимах, работать как усреднитель в схеме с подачей неосветленных промывных вод фильтров. Разработанные для расчета сооружений методики основываются на результатах исследований по безреагентной и реагентной обработке промывных вод.

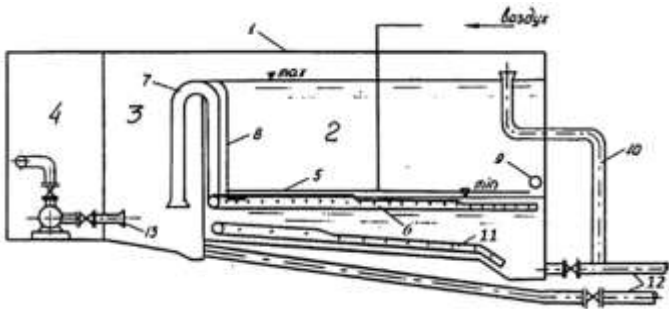


Рисунок 6 – Сооружение для усреднения и обработки сбросных вод после промывки скорых фильтров (патент РФ № 2188799):

- 1 – корпус; 2 – отстойно-регулирующая емкость; 3 – сборная емкость; 4 – машинное отделение; 5 – воздухораспределительная система; 6 – система сбора осветленной воды; 7 – сифонная линия; 8 – воздушная трубка; 9 – трубопровод подачи промывной воды; 10 – переливной трубопровод; 11 – гидравлическая напорная система удаления осадка; 12 – трубопровод удаления осадка; 13 – всасывающие патрубки насосных агрегатов

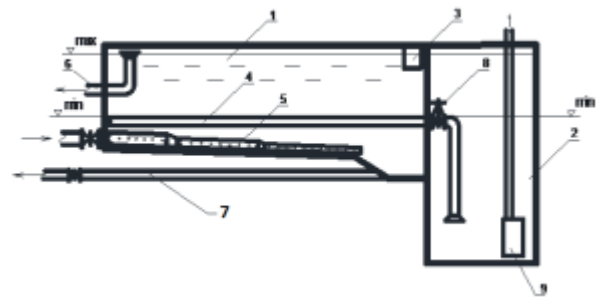


Рисунок 7 – Однообъемный отстойник-усреднитель (патенты на полезную модель № 93081, 129094):

- 1 – отстойная часть; 2 – приемный резервуар насосной станции; 3 – лоток подачи промывной воды; 4 – система сбора осветленной воды; 5 – напорная гидравлическая система удаления осадка; 6 – перелив; 7 – трубопровод удаления осадка; 8 – задвижка системы сбора осветленной воды; 9 – погружной насосный агрегат

Конструкции четырех сооружений обезвоживания осадка в естественных условиях (патенты № 102613, 110739, 127741, 127742) используют предложенный нами способ обезвоживания водопроводного осадка с капиллярными элементами из тканевых и каменных строительных материалов. Предложен вариант конструкции железобетонных стен (пристенных капиллярных элементов) по принципу «сэндвич» – несущая часть стены, выполненная из тяжелого бетона, на который закреплен капиллярный материал, а между ними устроен слой гидроизоляции. Разработанное нами емкостное сооружение для обезвоживания осадка закрытого типа не только эффективно защищает осадок от дождя и снега, но и способствует ускорению процесса обезвоживания (рисунок 8).

Разработанная методика расчета сооружения обезвоживания в естественных условиях с капиллярными элементами основана на общепринятых методиках расчета процесса сушки, испарения с поверхности воды и дренажа, а также на полученных в работе конструктивных параметрах размещения капиллярных элементов.

Разработаны алгоритмы выбора технологических схем обработки промывных вод скорых фильтров и выбора технологической схемы обработки осадка отстойников и промывных вод в зависимости от направления их утилизации (рисунки 9, 10). Мутность осветленной промывной воды и технологическая возможность обеззараживания на УФ-установках, обеспечивая эпидемиологическую безопасность, позволили рассмотреть кроме возврата на основные сооружения иные направления утилизации: промывка контактных осветлителей; техническое водоснабжение (поливомоечные нужды, на произ-

водственные нужды промышленных предприятий и т.п.); для полива сельскохозяйственных культур. Определены требования к качеству обработанных промывных вод по направлениям утилизации. Рассчитана экономическая эффективность применения различных схем утилизации (таблица 2).

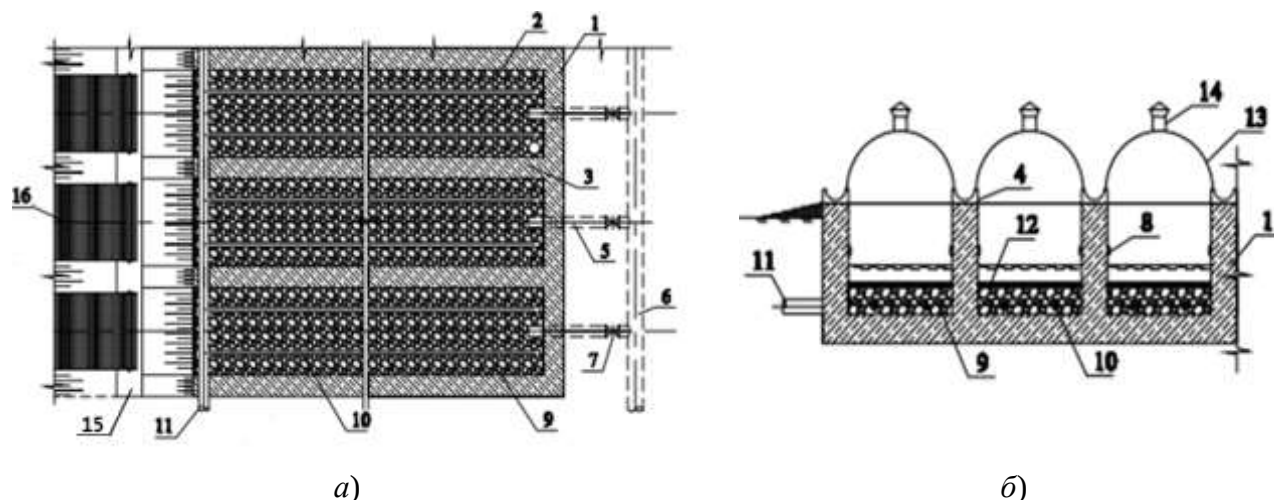


Рисунок 8 – План (а) и разрез (б) емкостного сооружения для обезвоживания осадка закрытого типа (патент на полезную модель № 127742):

- 1 – железобетонный резервуар; 2 – рабочий коридор; 3 – железобетонные стенки; 4 – бетонные лотки сбора конденсата; 5 – впускной трубопровод; 6 – трубопровод подачи осадка; 7 – бесколодезная задвижка; 8 – скребковый механизм; 9 – дренаж из гравия; 10 – дренажные трубы; 11 – трубопровод отвода фильтрата; 12 – дренажные плиты; 13 – кровельное покрытие; 14 – дефлектор; 15 – бункер; 16 – передвижной ленточный конвейер

Таблица 2 – Экономическая эффективность направлений утилизации сбросных (промывных) вод скорых фильтров

Параметр	Направления утилизации промывных вод					
	возврат в основную схему			промывка контактных осветлителей	техническое водоснабжение (поливомоечные нужды, на производственные нужды промышленных предприятий и т.п.)	полив сельскохозяйственных культур
	без отстаивания	с перемешиванием и отстаиванием	с перемешиванием и отстаиванием + АА30			
Электроэнергия на перемешивание, руб. за фильтроцикл/м ³	1,18/ 1,86*	0,006**	0,006**	0,006**	0,006**	0,006**
Реагенты, руб/м ³	–	–	1,2	–	1,2	–
Электроэнергия на УФ-обработку, руб/м ³	0,001	0,001	0,001	–	0,001	0,001
Суммарно дополнительные затраты, руб/м ³	1,181/1,861	0,007	1,207	0,006	1,207	0,007
Сэкономленные ресурсы, руб/м ³	8,027	3,027	3,027	0,027	12,05	8,83
Доход, руб/м ³	6,846/6,166	3,02	1,80	0,021	10,843	8,823

Примечания: * – перемешивание насосом/воздухом; ** – перемешивание воздухом в течение 20 мин с градиентом скорости 30 с⁻¹.

Разработаны и предложены для внедрения в практику проектирования станций водоподготовки технологические схемы сооружений с вариантами утилизации сбросных вод, основанные на полученных в данной работе результатах обработки сбросных вод скорых фильтров и сбросных вод отстойников, оценки целесообразности и применимости направлений их утилизации, а также разработанные конструкции сооружений. Выбор схемы производится с учетом направления использования осадка и ограничений по производительности, имеющимся площадям и применяемой технологии водоподготовки.

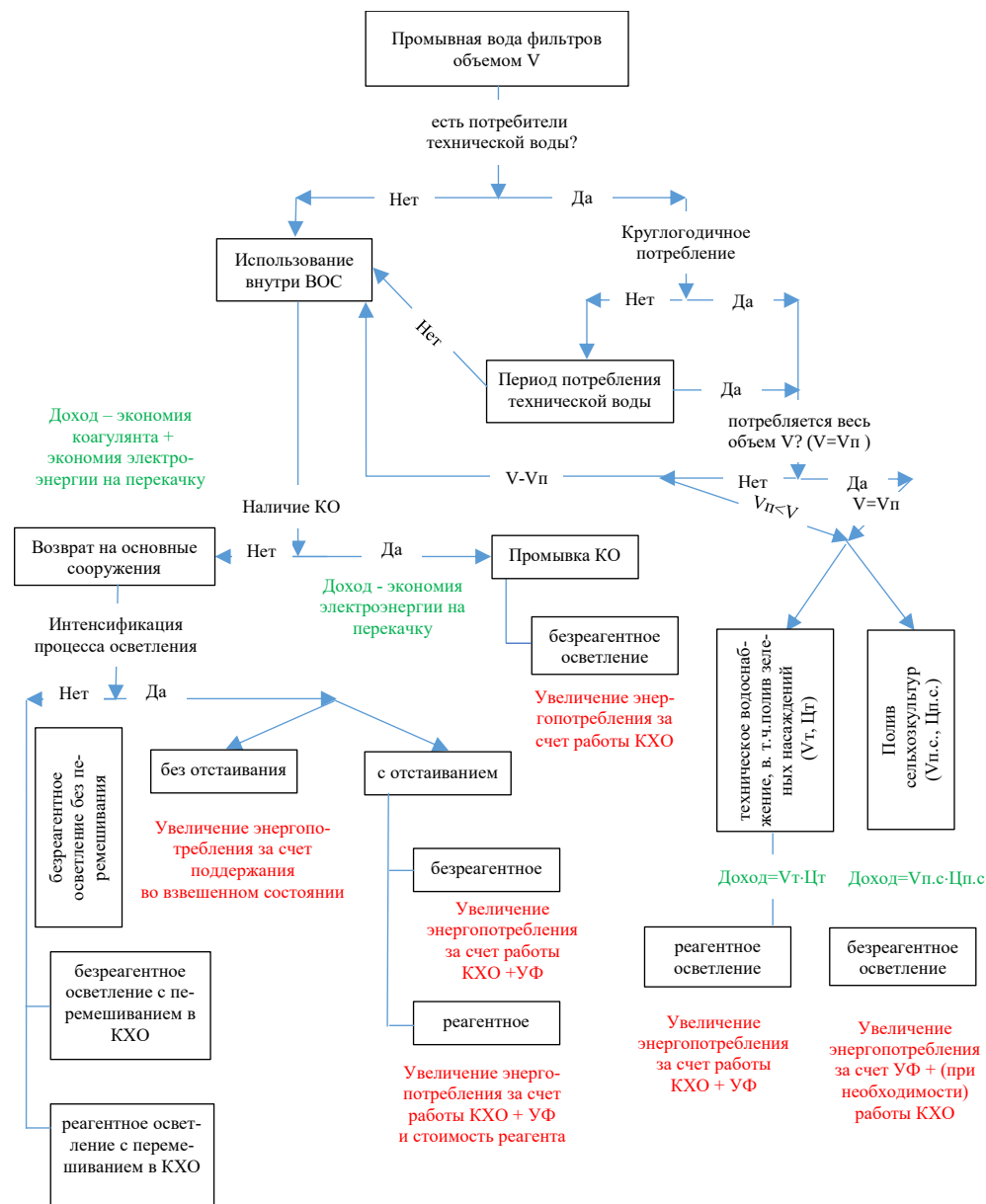


Рисунок 9 – Алгоритм выбора технологической схемы обработки промывных вод скорых фильтров

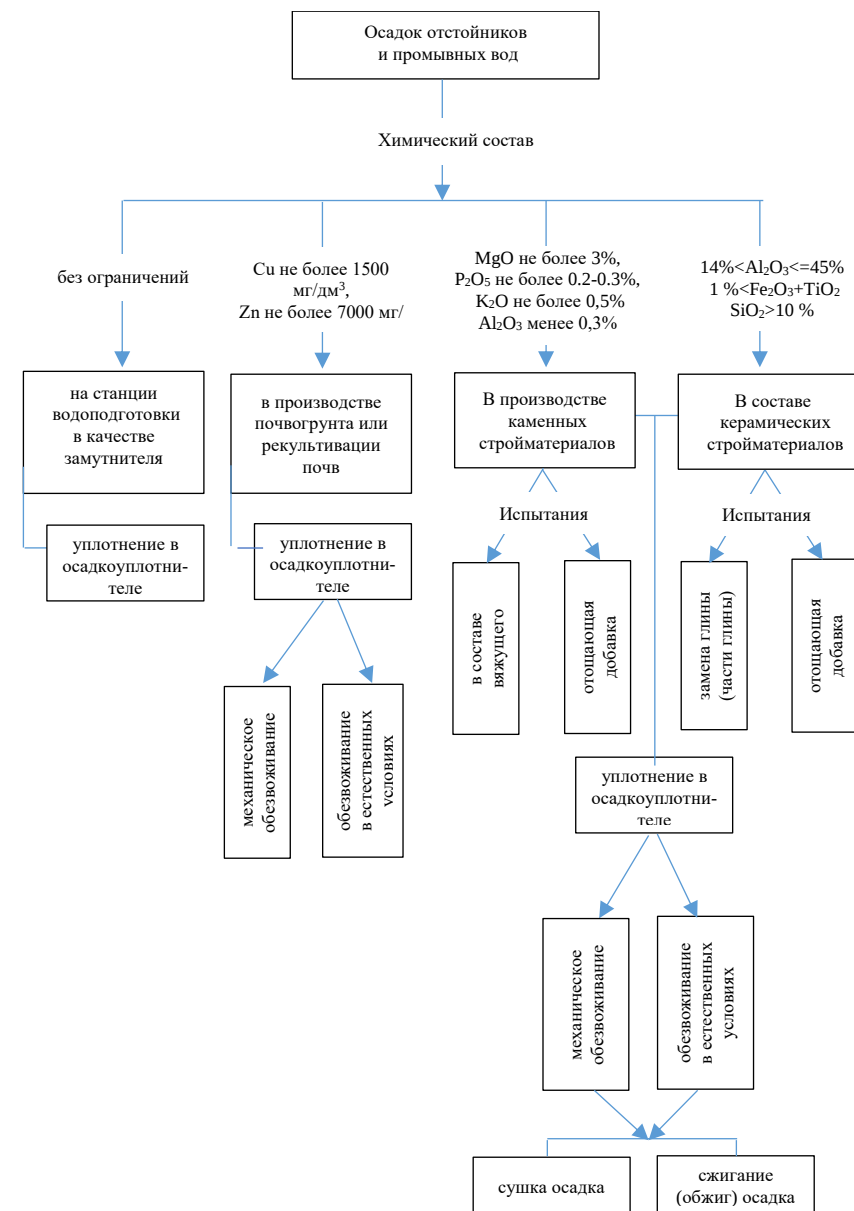


Рисунок 10 – Алгоритм выбора технологической схемы обработки осадка отстойников и промывных вод скорых фильтров

Предложены технологические схемы сооружений водоподготовки с вариантами утилизации сбросных вод, основанные на полученных в данной работе результатах обработки сбросных вод скорых фильтров и сбросных вод отстойников, оценки целесообразности и применимости направлений их утилизации, а также разработанные конструкции сооружений. Приведены расчеты сооружений по каждой из схем, показана возможность использования при проведении реконструкции имеющихся в составе станции сооружений.

В шестой главе «Экономическая и экологическая эффективность, внедрения в практику» представлены результаты расчета экономической эффективности инвестиций строительства схем и сооружений обработки сбросных вод скорых фильтров и отстойников, экологическая эффективность обработки сбросных вод, результаты внедрения в практику. Показана экономическая эффективность для инвесторов предлагаемых решений на примере строительства очистных сооружений водоподготовки по двухступенчатой реагентной схеме производительностью 350 тыс. м³/сут. и внедрения сооружений обработки сбросных вод скорых фильтров и отстойников, использующих разработанные конструктивные решения (таблица 3).

Таблица 3 – Показатели сравниваемых инвестиционных проектов

Показатель	Объект инвестиций				
	Строительство ОС без обработки сбросных вод	Строительство ОС с обезвоживанием осадка и типовыми конструкциями СПИПВ	Строительство ОС с предлагаемыми сооружениями обработки сбросных вод скорых фильтров и сбросных вод отстойников	Строительство типового сооружения повторного использования сбросных (промывных) вод скорых фильтров	Строительство отстойника-усреднителя
Сумма кредита, тыс. руб.	788 019,015	976 867,850	838 359,999	46 972, 532	35 431,637
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.	373 616,649	255 816,553	480 347, 391	115 542,074	137 542,248
Срок окупаемости, месяцы	74	78	73	22	19
Внутренняя норма доходности, %	6,0	5,0	6,0	27,0	34,0

Примечание: ОС – очистное сооружение; СПИПВ – сооружение повторного использования промывных вод фильтров.

Анализ показателей инвестиционных проектов выявил, что внедрение на очистных сооружениях обработки сбросных вод с новыми конструкциями сооружений обеспечивает больший в 1,87 раза чистый дисконтированный доход и меньший на 5 месяцев срок окупаемости. Инвестиционный проект по строительству однообъемного отстойника-усреднителя по сравнению с типовым проектом имеет больший в 1,19 раза чистый дисконтированный доход и меньший на 3 месяца срок окупаемости. Сравнение показателей инвестиционного проекта строительства сооружений механического обезвоживания с комплексным сооружением для обезвоживания осадка показало различие необходимых объемов инвестиций на порядок. В таком случае результат сравнения однозначно в пользу сооружений обезвоживания в естественных условиях. Показано, что использование на станциях водоподготовки обработки сбросных вод скорых фильтров и отстойников обеспечивает экологическую эффективность за счет предотвращенного экологического ущерба в размере 690 380,75 тыс. руб. в год и снижения платы за негативное воздействие на окружающую среду 161,755 тыс. руб.

Результаты работы реализованы в запроектированных и построенных на очистных сооружениях Александровского водопровода новых сооружений обработки про-

мывных вод скорых фильтров с использованием реагента оксихлорида алюминия. Согласно технико-экономическому обоснованию проекта экономический эффект от внедрения составит 95,47 млн руб. в год в ценах 2023 г. В проекте реконструкции очистных сооружений Александровского водопровода внедрена технология обработки осадка природных вод, включающая в себя реагентную обработку шлама перед осадкоуплотнителем и сооружение обезвоживания осадка в естественных условиях с использованием капиллярного эффекта. Экономический эффект составит 2,37 млн руб. в год (в ценах 2023 г.) или 14,46 руб./1000 м³. Предложения по устройству на Центральном водопроводе Ростова-на-Дону сооружений обработки промывных (сбросных) вод скорых фильтров приняты АО «Ростовводоканал» к использованию при реконструкции данных сооружений.

Реконструкция сооружений подготовки питьевой воды Азова Ростовской области (МП «Азовводоканал»), выполненная ОАО «Институт «Ростовский Водоканалпроект», включала запуск в работу сооружений обработки сбросных (промывных) вод скорых фильтров. Исходя из предложений по работе сооружений и существующих объемов емкостей, разработана технологическая схема работы резервуаров, позволяющая минимизировать неравномерность подачи воды в смеситель. Одновременно обеспечивалось необходимое время отстаивания в безреагентном режиме, а также время на удаление из резервуаров выпавшего осадка. Ожидаемый экономический эффект от внедрения 2,041 млн руб. в ценах 2023 г. ежегодно или 46,59 руб./1000 м³.

Дальнейшее развитие представленной работы заключается в распространении методики проектирования систем использования сбросных вод на станции, использующей мембранные технологии очистки, расширение направлений утилизации осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования:

1. Установлено качество сбросных вод отстойных сооружений и скорых фильтров станций водоподготовки, работающих на органических коагулянтах-флокулянтах типа полиДАДМАХ, свойства осадка промывных вод скорых фильтров. В осадке обнаружено содержание полиДАДМАХа до 10 мг/дм³, SiO₂ до 45,55 %, Al₂O₃ до 20 % по с.в., Fe₂O₃ до 7,36 % по с.в., а также оксидов калия (до 2,01% по K₂O) и фосфора (до 0,49 % по с.в.). Осадок отстойников имеет зольность 87,79–71,30 %, отмечена склонность его к загниванию. Показана возможность совместной обработки осадка сбросных вод скорых фильтров и отстойников.

2. Сформулированы основные теоретические положения образования, обработки и утилизации сбросных (промывных) вод скорых фильтров и контактных осветлителей, сформирована концептуальная модель процессов, выполнено ее математическое описание. На основе теоретических положений получены эмпирические зависимости при безреагентном (критерий Кэмпса $1 \cdot 10^4$ – $9 \cdot 10^4$, h от 0,1 м до 3,5 м, $C_{взв}$ от 50 до 400 мг/дм³, t от 5 до 25 °С) и реагентном осветлении (поли)оксихлоридами алюминия и флокулянтами (критерий Кэмпса $2,4 \cdot 10^3$ – $8,3 \cdot 10^4$) сбросных (промывных) вод фильтров станций водоподготовки.

3. Разработана концептуальная модель процессов образования, обработки и утилизации сбросных вод отстойников и сооружений обработки промывных вод скорых фильтров и контактных осветлителей станций водоподготовки, выполнено ее математическое описание, подтвержденное результатами обработки экспериментальных данных.

4. Выполнено исследование корреляции величин физических, в том числе реологических, свойств осадков отстойников и сооружений обработки сбросных (промывных) вод скорых фильтров между собой. Получены эмпирические зависимости для пар параметров с высоким уровнем корреляции. Определены переводные коэффициенты между истинными (в сооружениях) значениями свойств осадка отстойников и полученными в осадке нарушенной структуры.

5. Впервые изучены физические характеристики и динамика уплотнения осадка сооружений обработки промывных вод фильтров от осадка отстойных сооружений. Обнаружено, что в процессе фильтрования осадка происходит изменение его структуры с ростом сопротивления фильтрованию на 1–3 порядка (максимальное значение $3197,95 \cdot 10^{10}$ см/г). Определена необходимость характеризовать осадок двумя значениями сопротивления фильтрованию – до и после «точки» перелома.

6. Теоретически обоснована технология интенсификации процесса обезвоживания осадка посредством погружения в него капиллярно-пористого материала. На основании теоретических предпосылок использования капиллярного поднятия в капиллярно-пористом материале для обезвоживания осадков и полученных экспериментальных данных определены параметры обезвоживания в естественных условиях капиллярными элементами с использованием тканевых и искусственных каменных материалов.

7. Обосновано и экспериментально подтверждено влияние утилизации осветлённых и неосветленных промывных (сбросных) вод фильтров в поток сырой воды, установлены интервалы, в которых возможно снижение до двух раз дозы коагулянта относительно оптимальной или повышение эффекта осветления без уменьшения длительности фильтроцикла. Предложены и оценены технологии утилизации сбросных вод отстойников, образованных при использовании коагулянта-флокулянта типа полиДАДМАХ в составе искусственных каменных строительных материалов и почвогрунта.

8. Впервые разработаны алгоритмы выбора технологических схем обработки сбросных (промывных) вод скорых фильтров и выбора технологической схемы обработки осадка отстойников и промывных вод в зависимости от направления их утилизации. Предложены для внедрения в практику проектирования станций водоподготовки технологические схемы сооружений с вариантами утилизации сбросных вод, определены требования к качеству промывных вод после обработки и осадка для каждого из направлений.

9. Разработаны новые конструкции сооружений обработки сбросных (промывных) вод, реализующие требуемые параметры смешения-перемешивания, удаление выпавшего на дно осадка с возможностью вариативности использования: усреднитель с перекачкой неосветленной воды, усреднение-осветление в безреагентном или реагентом режиме, усреднение-перемешивание-осветление также в двух режимах. Предложена методика расчета отстойника-усреднителя. Новизна предлагаемых сооружений защищена четырьмя патентами РФ. Показано, что обработка сбросных вод станций водоподготовки новыми конструкциями сооружений обеспечивает инвестиционную привлекательность большим чистым дисконтированным доходом и меньшими сроками окупаемости, по сравнению с ранее использованными решениями имеет экологическую эффективность.

10. Разработаны новые конструкции и методика расчета сооружений обработки сбросных вод отстойников в естественных условиях, оборудованных капиллярными элементами, обеспечивающими дополнительный эффект испарения с поверхности жидкости, фильтрования и испарения с поверхности тканевых или каменных капиллярных элементов. Новизна предлагаемых методов и сооружений защищена четырьмя патентами РФ.

11. Проведенные исследования послужили основой для разработки проектной документации реконструкции, включая строительство новых сооружений обработки сбросных вод скорых фильтров и отстойников, сооружений водоподготовки Ростова-на-Дону (АО «Ростовводоканал»), Азова (МП «Азовводоканал»). Ожидаемая суммарная экономическая эффективность составит 99,97 млн руб. (в ценах 2023 г.) ежегодно или 480,50 руб./1 000м³.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

1. Бутко, Д.А. Изменение физико-химических и реологических свойств сбросных вод, подвергающихся искусственному воздействию на станциях водоподготовки с целью снижения нагрузки на окружающую среду / Д.А. Бутко. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2014. – 132 с.

2. Бутко, Д.А. Промывные воды скорых фильтров и их повторное использование: монография / Д.А. Бутко. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2009. – 121 с.

Научные статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук:

1. Бутко Д. А. Оптимизация процесса проектирования систем обработки сбросных вод станций водоподготовки на водах малой мутности // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 10. С.50-60. DOI: 10.35776/VST.2023.10.06. (K1)

2. Бутко, Д.А. Теоретические аспекты систем обработки сбросных вод скорых фильтров/Д.А. Бутко//Строительство и техногенная безопасность. – 2023 – №30(82). С. – 67-74. (K2)

3. Бутко, Д.А. Реагентное осветление промывных вод фильтров станций водоподготовки в нижнем течении Дона /Д.А. Бутко, Л.Н. Фесенко, О.П. Шишова// Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2023. – Вып. 2(91) – С.118-129. (K2)

4. Лысов, В.А. Комплексное применение сооружения обработки и утилизации осадка / В.А. Лысов, Д.А. Бутко // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 1(78). – С. 156–161. (K2)

5. Рыльцева, Ю.А. Изучение качества надосадочной воды, выделенной при уплотнении осадка станций водоподготовки г. Ростова-на-Дону / Ю.А. Рыльцева, Д.А. Бутко // Водоснабжение и санитарная техника. – 2016. – № 4. – С. 59–64. (K1)

6. Рыльцева, Ю.А. Использование осадка водопроводных станций в производстве строительной керамики / Ю.А. Рыльцева, Д.А. Бутко // Водоочистка. – 2015. – № 4. С. 19–24.

7. Бутко Д.А. Возвращаясь к забытому / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, В.С. Дейнер // Научное обозрение. – 2014. - № 11, ч. 3. – С. 713-715.

8. Рыльцева, Ю.А. Использование осадка водопроводных станций в производстве бетона [Электронный ресурс] / Ю.А. Рыльцева, Д.А. Бутко // Инженерный Вестник Дона. – 2014. – № 4. – Режим доступа: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_52_riltseva.pdf_158bff1968.pdf.

9. Бутко, Д.А. Косвенное определение свойств водопроводного осадка / Д.А. Бутко [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – № 2. – С.60–62. (K1)

10. Бутко, Д.А. Расчет напорной гидравлической системы удаления осадка из горизонтальных водопроводных отстойников / Д.А. Бутко [и др.] // Научное обозрение. – 2013. - № 9. – С. 235-238.

11. Бутко, Д.А. Анализ работы скорых фильтров Александровского водопровода г. Ростова-на-Дону [Электронный ресурс] / Д.А. Бутко [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/985>. (K2)

12. Бутко, Д.А. Системы удаления осадка из отстойников / Д.А. Бутко [и др.] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2012. - № 4 (13). – 9 с. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_18822570_10364968.pdf.

13. Бутко, Д.А. Некоторые аспекты создания схем полного оборотного цикла промывных вод станций водоподготовки / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, Г.В. Поповьян // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 1(26). – С. 114–118. (K2)

14. Бутко, Д.А. Определение реологических свойств водопроводных осадков непосредственно в сооружениях его образования / Д.А. Бутко, В.А. Лысов //

15. Реагентное осветление промывных вод скорых фильтров / Д.А. Бутко [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – № 9. – С. 53–56. (K1)

Публикации в изданиях, индексируемых международных реферативных базах:

1. Butko, D.A., Volodina, M.S. Regularities of rapid filter backwash water clarification in reagent-free mode. Magazine of Civil Engineering. 2022; 111(3); Article No. 11107. DOI: 10.34910/MCE.111.7. (K1)

2. Wilson E.V., Butko D.A., Yakovleva E.V. Impact of polynuclear aluminium hydroxo complexes on natural water impurities coagulation. Journal of Water Chemistry and Technology. 2018; 40; 4 (264): 384–394. (Q3)

Патенты и свидетельства:

1. Устройство для отстаивания и перекачки сбросных вод после промывки скорых фильтров: пат. 129094 U1 Рос. Федерация: С02F 1/52 / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, А.В. Бутко, А.Б. Родионова. – 2012158266/05; Заявл. 29.12.2012; Оpubл. 20.06.2013; Бюл № 17. – 9 с.: ил.

2. Сооружение для обезвоживания осадка: пат. 127742 Российская Федерация: МПК С 02 F 11/16. / В.А. Лысов, Д.А. Бутко, Ю.А. Рыльцева. – № 2012150892/05; заявл. 27.11.2012; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13. – 2 с.: ил.

3. Емкостное сооружение для обезвоживания осадка: пат. 127741 Российская Федерация: МПК С 02 F 11/16. / В.А. Лысов, Д.А. Бутко, Ю.А. Рыльцева. – № 2012143285/05; заявл. 09.10.2012; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13. – 2 с.: ил.

4. Площадка подсушивания осадка: пат. 110739 Рос. Федерация: МПК С 02 F 11/16. / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, Г.В. Поповьянц др. – № 2011120505/05; заявл. 20.05.2011; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33. – 2 с.: ил.

5. Площадка подсушивания: пат. 102613 Рос. Федерация: С02F 11/16 / В.А. Лысов, Д.А. Бутко, С.В. Крюков и др. – 2010138402/05; Заявл. 16.09.2010; Оpubл. 10.03.2011. – 8 с.: ил.

6. Устройство для определения сопротивления сдвига осадка в отстойнике: пат. 93535 U1 Рос. Федерация: МПК G01N 11/00 / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, С.В. Крюков и др. – 2010101573/22; Заявл. 19.01.2010; Оpubл. 27.04.2010; Бюл. № 12. – 11 с.: ил.

7. Устройство для отстаивания и перекачки сбросных вод после промывки скорых фильтров: пат. 93081 U1 Рос. Федерация: С02F 1/52 / Д.А. Бутко, В.А. Лысов, А.В. Бутко и др. – 2009143548/22; Заявл. 24.11.2009; Оpubл. 20.04.2010. – 11 с.: ил

Бутко Денис Александрович

Системы обработки сбросных вод станций водоподготовки

Специальность 2.1.4 – Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

В печать 17.01.2024. Формат 60х84/16.
Объем 2,0 усл. п. л. Тираж 100 экз. Заказ № 4

Отпечатано в издательском центре ДГТУ
Адрес университета и полиграфического предприятия:
344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1