

На правах рукописи



Котовская Елена Евгеньевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ
СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ**

2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы
охраны водных ресурсов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара - 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского».

Научный руководитель:

Теплых Светлана Юрьевна
доктор технических наук, доцент,
доцент кафедры «Водоснабжение и
водоотведение» ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

Бутко Денис Александрович
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Водоснабжение и
водоотведение»
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»

Пчельников Игорь Викторович
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Водное хозяйство,
инженерные сети и защита окружающей
среды» ФГБОУ ВО «Южно-Российский
государственный политехнический
университет (НПИ) им. М.И. Платова»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Новосибирский
государственный архитектурно-
строительный университет (Сибстрин)»

Защита состоится «03» декабря 2024 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244, ауд.200.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Самарского государственного технического университета» и на сайте <https://24237705.samgtu.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тупицына Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Увеличение антропогенных нагрузок приводит к ухудшению качества поверхностных вод источников централизованного водоснабжения (ИЦВ), как следствие, снижение барьерной способности водопроводных очистных сооружений (ВОС) в отношении задержания органических загрязнений, способствующих образованию хлорорганических соединений в процессе обеззараживания. Решению проблем экологического состояния водохозяйственных комплексов городской инфраструктуры посвящены работы известных ученых: М.Г. Журбы, Ж.М. Говоровой, В.В. Найденко, В.Л. Драгинского, Л.П. Алексеевой, П.Г. Быковой, А.Д. Смирнова, Л.И. Кантора, Е.А. Лебедевой, А.О. Родиной, А.Н. Лукова, В.В. Гончарука, А.Я. Найманова и др. Ухудшение качества вод ИЦВ обусловлено естественным обмелением рек и водохранилищ, интенсивной застройкой территорий, прилегающих к источникам водоснабжения, отсутствием канализования, хаотическим развитием гостинично-ресторанных комплексов, ослаблением контроля за промышленными и сельскохозяйственными объектами. Известные научные подходы к удалению органических соединений и взвешенных веществ из вод ИЦВ требуют уточнения и корректировки входных параметров с составлением математических моделей, учитывающих изменение качественного состава воды, что и определила актуальность выбранной темы.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа проводилась в соответствии с планами НИР по договору с Крымским республиканским производственным предприятием «ППВКХ г. Симферополь» (производственное предприятие водопроводно-канализационного хозяйства г. Симферополь) №2617/2006 «Разработка технологической схемы и режима реагентной обработки воды из водохранилищ «Межгорное» и «Партизанское». Работа выполнялась по плану тематики кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники НАПКС в 2006-2009 гг. НИР №2041/2012 «Разработка новых конструкций и технологических процессов для повышения энергетической эффективности гидравлического оборудования систем водоснабжения и водоотведения». В соответствии с НИР №11/6-15/Д-111/2021 «Разработка технологических решений по очистке воды реки Салгир по технологической схеме водопроводных очистных сооружений «Жаворонки» (ГУ «Межгорное») в Республике Крым» №121053100134-7.

Степень разработанности темы характеризуется подготовкой математических моделей технологических процессов реагентной очистки воды в компактной установке последовательных процессов: осветления в слое взвешенного осадка, фильтрования через плавающую фильтрующую загрузку и сорбции на угольном фильтре, на основании полученных автором аналитических зависимостей в результате обработки экспериментальных данных и теоретического обоснования.

Объект исследования – компактная установка подготовки природных вод для систем централизованного водоснабжения в условиях изменения качественного состава воды ИЦВ.

Предмет исследования - технологические процессы подготовки природных вод для систем централизованного водоснабжения в условиях изменения качественного состава воды ИЦВ.

Цель работы. Усовершенствование методов очистки природных вод в условиях изменяющегося качества.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Сбор и систематизация статистической информации качественных показателей поверхностных источников централизованного водоснабжения (ИЦВ) за десятилетний период наблюдений.
2. Составление методики определения количества закупаемого реагента, базирующейся на данных статистической обработки качественных показателей воды ИЦВ.
3. Разработка и апробация методики прогноза качества изменения органических загрязнений ИЦВ на всех основных стадиях очистки.

4. Разработка конструкции опытно-промышленной фильтровальной установки, предназначенной для удаления взвешенных веществ и органических соединений из обрабатываемой воды.

5. Формирование набора основных критериев процесса осветления, уточнение критериев процессов фильтрования и сорбции при очистке вод поверхностных ИЦВ.

6. Моделирование процессов очистки поверхностных вод ИЦВ при использовании различных коагулянтов с обобщением экспериментальных данных по выбранным критериям и получением математических моделей процесса очистки, с возможностью оптимизации по экономическим критериям.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Предложена методика определения эффективности функционирования ВОС по снижению органических загрязнений, основанная на оценке не пиковых или усредненных значений, а учитывающая количественную оценку статистических данных.

2. Теоретически обоснованы критерии процесса осветления воды в осветлителе – рециркуляторе, учитывающие влияние скорости и температуры потока, концентрации входящих загрязнений, а также учета влияния дозы вводимого реагента на эффективность очистки.

3. Уточнена система критериев осветления воды при фильтровании через плавающую загрузку и сорбции.

4. Оптимизированы параметры водоочистки для обеспечения максимальной степени очистки обрабатываемой природной воды.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы состоит в том, что теоретические положения, представленные в диссертации, доведены до уровня конкретных технических решений практических рекомендаций.

1. Методика определения количества закупаемых реагентов, полученная в ходе выполненной статистической обработки накопленной базы данных качественного состава, принята к внедрению ГУП РК «Вода Крыма».

2. Методика определения барьерной способности водопроводных очистных сооружений по органическим соединениям с последующим повышением эффективности функционирования водопроводных очистных станций принята к внедрению ГУП РК «Вода Крыма».

3. Новые конструктивные решения установки для очистки воды, позволяющие удалять более половины органических загрязнений, содержащихся в воде, и большую часть взвешенных веществ, подтверждены получением патентов [1, 2]. Конструкция установок позволила реализацию экспериментальных исследований с составлением методики выбора технологических параметров процесса осветления, фильтрования, сорбции при очистке поверхностных вод ИЦВ, принятую к внедрению Симферопольским филиалом ГУП РК «Вода Крыма».

4. Технологическая схема очистки, базирующаяся на основных результатах исследования, принята к внедрению строительной компанией «Консоль-СТРОЙ».

Методология и методы диссертационного исследования. Достоверность полученных результатов экспериментальных исследований подтверждается применением стандартных методов определения в природных водах ИЦВ и водах, прошедших очистку на ВОС, взвешенных веществ и органических соединений, определенных по показателю перманганатная окисляемость. При решении поставленных задач были использованы следующие методы: теория размерности, теория вероятности, математическая статистика, корреляционно-регрессионный анализ, математическое моделирование процессов очистки от антропогенных загрязнений. **Степень достоверности** полученных аналитических выражений, описывающих процессы очистки, проверялась при помощи индекса корреляции, критерия Стьюдента и критерия Пирсона.

Положения, выносимые на защиту. 1. Методика определения количества закупаемого реагента для ВОС, основанная на результатах статистической обработки данных многолетнего периода наблюдений качественных показателей воды ИЦВ.

2. Методика оценки барьерной способности ВОС по органическим соединениям, позволяющая оценить эффективность работы очистных сооружений для принятия дополнительных схем очистки или интенсификации процессов в существующей технологии.

3. Конструкция установки, совмещающей процессы осветления в слое взвешенного осадка, фильтрования через пенополистирольную загрузку и сорбцию на угольном фильтре, которые являются основными ступенями очистки с применением коагулянтов.

4. Теоретическое обоснование скоростного критерия K_v , определяющего остаточную концентрацию загрязнений на выходе из рециркулятора-осветлителя.

5. Математические модели процесса очистки в опытно-промышленной фильтровальной установке, учитывающие влияние скоростного критерия, вида и дозы вводимого реагента, высоты фильтрующего слоя и скорости восходящего потока очищаемой воды.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует паспорту научной специальности 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов, пункты 2, 3, 7.

Личный вклад автора. Автором лично выполнен информационный поиск и анализ научной литературы, обоснована цель и задачи исследований, выполнен комплекс экспериментальных исследований. Получены критерии процесса осветления природной воды в осветлителе – рециркуляторе. Усовершенствована система критериев осветления воды при фильтровании через плавающую загрузку и сорбции. Проведено обобщение и анализ полученных результатов, разработана математическая модель, предложены рекомендации и технологические решения на их основе.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на конференции Международного Водного Форума «Аква-Украина», Донецк – 2007; на конференциях Международного Конгресса «ЭТЭВК: Экология, технология, экономика, водоснабжение, канализация», Ялта - 2007, 2009; на II Всеукраинской молодежной научной конференции «Вода-источник жизни на Земле» Луганск - 2008; на конференциях преподавателей, аспирантов и студентов НАПКС в 2004-2015 г. Симферополь; на V Международном научном семинаре «Методы повышения ресурса городских инженерных инфраструктур», г. Харьков - 2012; на 68 - ой научно-технической конференции ХНУБА, г. Харьков – 2013 (Харьковской национальной академии строительства и архитектуры); на VIII Международной научно-технической конференции «Решение экологических проблем в строительной отрасли» г. Хошимин (Вьетнам) – 2022; на XVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева, Москва, 2023; на 81-й Всероссийской научно-технической конференции «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре», г. Самара -2024.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 17 научных работ, из которых 3 – в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, утвержденных ВАК РФ; получены 2 патента на полезную модель.

Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из введения, шести глав, выводов, приложений и списка литературы. Полный объем диссертации - 179 стр., в том числе 107 рисунков, 73 таблицы. Список литературы на 15 страницах и состоит из 179 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель, задачи, объект, предмет и методы исследования, связь работы с государственными научными направлениями. Раскрыты научная новизна и практическое значение полученных результатов, их апробация, приведены публикации автора, структура и объем диссертации.

В первой главе представлен аналитический обзор технологий подготовки воды на ВОС, с выявлением недостатков наиболее распространенных схем водоочистных сооружений. Рассмотрены существующие конструкции осветлителей со слоем взвешенного осадка (первая традиционная ступень очистки) и выявлены технологические недостатки, приводящие к снижению эффективности процесса осветления. Исследованием работы осветлителей со слоем взвешенного осадка занимались Паттерсон, Леклер, С.Х. Азерьер, Е.Н. Тетеркин, Е.Ф. Кургаев, Л.А. Кульский. В изучении второй традиционной ступени очистки – фильтрования значительный вклад внесли такие ученые, как: Д.М. Минц, С.А. Шуберт, В.З. Мельцер, Е.В. Веницианов, Р.Н. Рубинштейн, Р.И. Аюкаев, В.А. Жужиков, Ю.М. Шехтман, М.Г. Журба, А.М. Фоминых. Определено отсутствие теоретических моделей процесса реагентного фильтрования, в зависимости от вида коагулянта и его дозы, учитывающих высоту фильтрующего слоя, скорость и продолжительность фильтроцикла.

Во второй главе рассмотрены особенности формирования качественного состава источников централизованного водоснабжения РК. Проведена классификация ИЦВ г. Симферополя, представлены результаты лабораторных анализов органолептических показателей и химического анализа по содержанию хлорорганических соединений в пробах воды, прошедшей очистку на ВОС. Собрана и систематизирована статистическая информация по формированию качественных показателей поверхностных ИЦВ г. Симферополя по органическим загрязнениям, что позволяет определить функции плотности распределения содержания в воде органических загрязнений по показателю ПО для четырех источников ИЦВ г. Симферополя, и выявить их подчиненность нормальному закону распределения (табл. 1).

Таблица 1 - Сводная таблица результатов обработки значений ПО для четырех ИЦВ г. Симферополя

$ПО_{min}$	$ПО_{max}$	$M(ПО)$	$\sigma_{ПО}$	Закон распределения
Симферопольское водохранилище				
2	9	4,646	1,591	$f(ПО)=0,219 \cdot \exp[-0,198 \cdot (ПО-4,646)^2]$
Партизанское водохранилище				
2,94	5,52	4,041	0,592	$f(ПО)=0,217 \cdot \exp[-1,43 \cdot (ПО-4,041)^2]$
Межгорное водохранилище				
5,8	7,6	6,656	0,346	$f(ПО)=0,346 \cdot \exp[-0,4167 \cdot (ПО-6,656)^2]$
Аянское водохранилище				
0,6	4,8	2,381	1,009	$f(ПО)=0,208 \cdot \exp[-0,491 \cdot (ПО-2,381)^2]$

На рисунках 1.1-1.4 представлены функции плотности распределения ПО для четырех ИЦВ г. Симферополя, представлено математическое ожидание для каждого распределения, а также указаны предельные значения для $ПО_{lim}$, соответствующие 1 классу по ГОСТ 2761-84. Вероятности превышения предельного значения $7 \text{ мг} \text{ O}_2 / \text{дм}^3$ содержания органических веществ в воде Симферопольского и Межгорного водохранилища определяется по формуле:

$$P(ПО > 7) = 1 - \Phi \left[\frac{(M(ПО) - 7)}{\sigma} \right], \quad (1)$$

где $M(ПО)$ – математическое ожидание концентрации органических загрязнений в воде водохранилищ; σ – среднее квадратическое отклонение концентрации органических загрязнений в воде водохранилищ; $\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$ – функция Лапласа.

Из расчета по зависимости (1) установлено, что значения вероятности распределения содержания органических соединений в воде Межгорного и Симферопольского водохранилищ превышают значения граничной концентрации органических веществ в воде ИЦВ на 66,11% и 6,94% соответственно. Наибольшая концентрация органических веществ

соответствует воде Межгорного водохранилища, воды которого были подвергнуты наибольшему антропогенному воздействию, с математическим ожиданием органических загрязнений равным $6,656 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$.

Аналогичным образом выполняется определение статистических характеристик показателей качества воды (табл. 2), прошедшей очистку на ВОС.

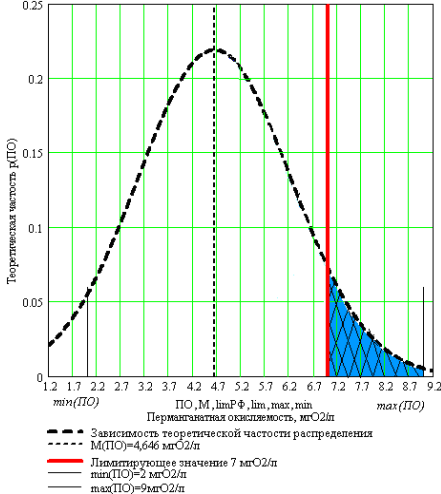


Рисунок 1.1 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из Симферопольского водохранилища и предельное значение $PO_{\text{lim}}=7 \text{ мгО}_2/\text{л}$

Условные обозначения



Область значений ПО, превышающих лимитирующее значение на уровне $7 \text{ мгО}_2/\text{л}$

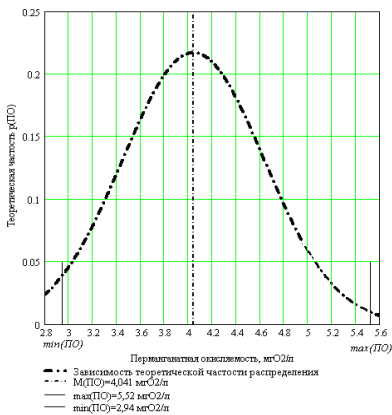


Рисунок 1.3 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из Партизанского водохранилища

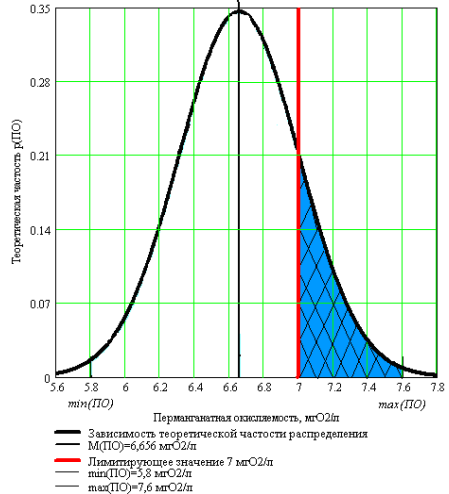


Рисунок 1.2 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из Межгорного Водоохранилища предельное и значение $PO_{\text{lim}}=7 \text{ мгО}_2/\text{л}$

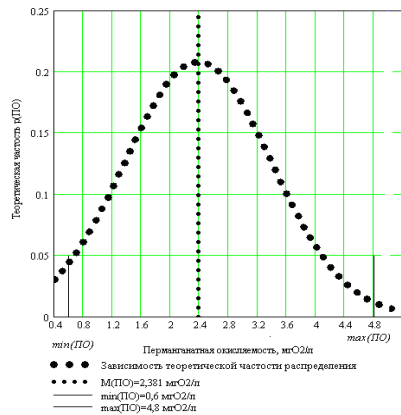


Рисунок 1.4 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из РЧВ Аянского водохранилища

Таблица 2 - Сводная таблица результатов обработки значений ПО для воды из четырех резервуаров чистой питьевой воды

$ПО_{min}$	$ПО_{max}$	$M(ПО)$	$\sigma_{ПО}$	Закон распределения
Симферопольский гидроузел				
1,9	6,56	4,179	0,928	$f(ПО)=0,25 \cdot \exp[-0,581 \cdot (ПО-4,179)^2]$
Партизанский гидроузел				
2,18	4,9	3,306	0,577	$f(ПО)=0,235 \cdot \exp[-1,502 \cdot (ПО-3,306)^2]$
Межгорный гидроузел				
5	7	5,931	0,411	$f(ПО)=0,243 \cdot \exp[-2,959 \cdot (ПО-5,931)^2]$
Аянский гидроузел				
0,6	4,8	2,381	1,009	$f(ПО)=0,208 \cdot \exp[-0,491 \cdot (ПО-2,381)^2]$

На рисунках 2.1-2.4 указана плотность распределения содержания органических загрязнений для воды четырех гидроузлов г. Симферополя, а также указаны лимитирующие значения содержания органических веществ согласно стандартам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и Европейского союза (ЕС) ($ПО_{lim}=2 \text{ мг } O_2/\text{дм}^3$) и СанПиН 2.1.4-1074-01 ($ПО_{lim}=5 \text{ мг } O_2/\text{дм}^3$).

Из анализа рисунков 2.1-2.4 следует, что содержание органических загрязнений в воде из РЧВ четырех гидроузлов г. Симферополя превышают предельное значение. Вероятность превышения значений органических соединений граничного значения на уровне $5 \text{ мг } O_2/\text{дм}^3$ определяется по выражению:

$$P(ПО > 5) = 1 - \Phi \left[\frac{(M(ПО) - 5)}{\sigma} \right], \quad (2)$$

Таким образом, вероятность превышения содержания органических загрязнений предельного значения по СанПиНу 2.1.4-1074-01 в воде, прошедшей очистку на ВОС, составляет для воды из РЧВ Межгорного гидроузла – 98,8%; Симферопольского гидроузла – 18,8%; для воды из РЧВ Партизанского гидроузла – 0,17%; воды из РЧВ Аянского гидроузла – 0,47%. Вероятность превышения значений органических соединений граничного значения на уровне $2 \text{ мг } O_2/\text{дм}^3$ (норм ВОЗ и ЕС) определили по выражению:

$$P(ПО > 2) = 1 - \Phi \left[\frac{(M(ПО) - 2)}{\sigma} \right], \quad (3)$$

Тогда вероятность превышения предельного значения нормативов ВОЗ и ЕС содержания органических загрязнений для воды, прошедшей очистку на водопроводных очистных сооружениях, составляет для воды из РЧВ Симферопольского гидроузла - 99,05%; для воды из РЧВ Партизанского гидроузла – 98,76%; для воды из РЧВ Межгорного гидроузла – 100%; воды из РЧВ Аянского гидроузла – 64,72%.

Оценку барьерной способности ВОС относительно органических соединений и установления требуемой эффективности очистки выполнили по формуле:

$$\frac{M(ПО_{II}) - M(ПО_{РЧВ})}{M(ПО_{II})} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $M(ПО)$ - математическое ожидание концентрации органических загрязнений в воде источника централизованного водоснабжения; $M(ПО_{РЧВ})$ - математическое ожидание концентрации органических загрязнений в воде РЧВ.

Следовательно, барьерная способность водопроводных очистных сооружений относительно органических загрязнений составляет: Симферопольские ВОС - 10,05%; Партизанские ВОС – 18,18%; Межгорные ВОС - 10,89%.

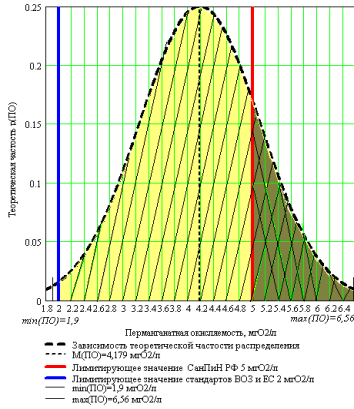


Рисунок 2.1 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из РЧВ Симферопольского гидроузла и предельное значение ПО (стандарты ВОЗ и ЕС и СанПиН)

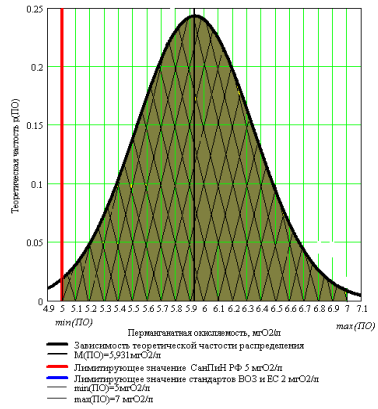
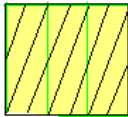
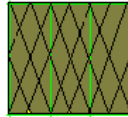


Рисунок 2.2 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из РЧВ Междунного гидроузла и предельное значение ПО (стандарты СанПиН)

Условные обозначения



Область значений ПО в воде РЧВ, превышающих лимитирующее значение стандартов ВОЗ и ЕС на уровне 2 мгО2/л



Область значений ПО в воде РЧВ, превышающих лимитирующее значение СанПиН РФ на уровне 5 мгО2/л

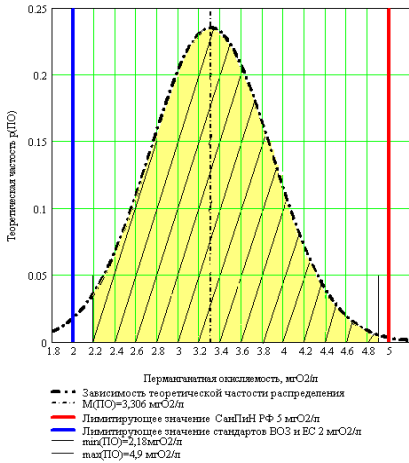


Рисунок 2.3 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из РЧВ Партизанского гидроузла и предельное значение ПО (стандарты ВОЗ и ЕС и СанПиН)

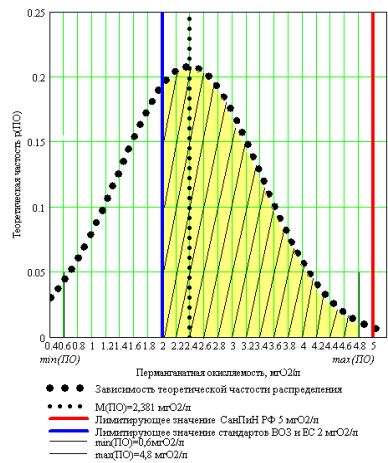


Рисунок 2.4 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из Аянского водохранилища и предельное значение ПО (стандарты ВОЗ и ЕС и СанПиН)

В соответствии со стандартами ВОЗ и ЕС, при $M(ППО_{PЧВ})$ - математическом ожидании концентрации органических загрязнений в воде РЧВ на уровне $2 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$, эффективность удаления органических загрязнений должна составлять: Симферопольские ВОС - 57%; Партизанские ВОС - 51,25%; Межгорные ВОС - 69,95%. Полученные результаты показывают необходимость усовершенствования технологии и разработки новых технических решений по удалению антропогенных загрязнений. Уменьшение содержания органических соединений достигается использованием конструкции для удаления взвешенных веществ и органических соединений, выполненной по патенту [2].

В третьей главе представлена конструкция для очистки воды от взвешенных веществ и органических соединений, состоящая из первой ступени (осветлитель – рециркулятор осадка и слой плавающей пенополистирольной загрузки) и второй ступени – сорбционной колонны, загруженной активированным углем марки АГ-3. Вода подается в корпус установки 1 (рис.3) по трубопроводу 2, в который дозируется коагулянт и при необходимости – замутнитель (раствор бентонита). При прохождении воды через нижнюю камеру 4 образуются скоагулированные частицы, которые при прохождении через рециркулятор осадка 9 образуют слой взвешенного осадка 5. При фильтровании через загрузку 6 происходит очистка от загрязнений. Очищенная вода выходит из верхней камеры 7 через трубопровод 3 при открытии задвижки 11. Осадок 5 из нижней камеры 4 поступает в рециркулятор осадка 9, затем в сгуститель шлама 8, из которого удаляется при поступлении сигнала от пьезометров 12 и после открытия задвижки 11 на трубопроводе отвода шлама 10 при регенерации. Очищаемая вода по трубопроводу 3 поступает в колонну 13 и проходит через слой загрузки 14, затем отводится по трубопроводу 21. Подачу воды на промывку загрузки осуществляют по трубопроводу 22, при открытии задвижки 11 на сифоне 20.

Корпус опытно-промышленной фильтровальной установки (ОФУ) выполнен из трубы круглого сечения $D=300 \text{ мм}$ и имеет общую высоту 4300 мм . Высота слоя плавающей фильтрующей загрузки - 1200 мм , крупность зерен $1,5...3,0 \text{ мм}$. Над загрузкой расположен бак объемом $0,4 \text{ м}^3$ для сбора осветленной воды, под слоем загрузки - нижняя камера с осветлителем-рециркулятором осадка высотой 1200 мм .

В серии опытов применяли коагулянты: сернокислый алюминий, хлорное железо, «Полвак-40», «ПолиДАДМАХ». Удаление органических загрязнений происходит как в первой ступени установки, так и во второй ступени при применении «ПолиДАДМАХ» (табл. 3).

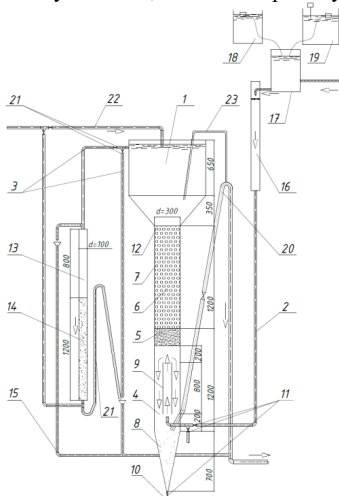


Рисунок 3. – Опытно-промышленная фильтровальная установка

- 1 - корпус установки;
- 2 – трубопровод подачи воды для очистки;
- 3 – трубопровод отвода очищенной воды;
- 4 – нижняя камера – осветлитель-рециркулятор;
- 5 – слой взвешенного осадка;
- 6 – плавающая фильтрующая загрузка;
- 7 – верхняя камера;
- 8 – сгуститель шлама;
- 9 – рециркулятор осадка;
- 10 – трубопровод для отвода шлама;
- 11 – задвижка на трубопроводах 2, 3, 10;
- 12 – пьезометр;
- 13 – сорбционная колонна;
- 14 – загрузка сорбционной колонны активированным углем марки АГ-3, высотой $1,2 \text{ м}$;
- 15 – трубопровод отвода промывной воды;
- 16 – воздухоотделитель;
- 17 – смеситель; 18 – бак суспензии замутнителя;
- 19 – бак дозатора коагулянта; 20 – сифон;
- 21 – трубопровод отвода очищенной воды из сорбционной колонны;
- 22 – трубопровод подачи воды на промывку загрузки;
- 23 – трубопровод перелива из верхней камеры 7.

Таблица 3 - Технологические показатели очистки воды от органических веществ в опытно-промышленной фильтровальной установке с применением коагулянта «ПолиДАДМАХ»

Номер фильтроцикла	1	2	3	4	5	6	7
Скорость фильтрования в сорбционном фильтре, м/ч	6,9	4,0	4,0	4,0	5,03	5,10	4,06
Производительность установки, м ³ /час	0,08	0,045	0,045	0,045	0,06	0,057	0,046
ПО на входе в КФУ, мгО ₂ /дм ³	6,4	6,5	6,5	6,7	6,55	6,43	6,57
ПО на входе в сорбционный фильтр, мгО ₂ /дм ³	5,5	5,6	5,6	4,4	5,2	4,6	5,2
Остаточная ПО в фильтрате (на выходе II -ой ступени установки), мгО ₂ /дм ³	4,35	3,63	3,58	3,58	3,2	2,90	3,10
Эффективность очистки в сорбционной колонне, %	20,9	35,17	36,07	18,6	38,46	36,95	40,38
Доза коагулянта, мг/дм ³	0,109	0,110	0,162	0,087	0,118	0,071	0,079
Эффективность очистки по ПО в I-ой ступени установки, %	14	13,8	13,8	34,3	20,6	28,5	20,9
Общая эффективность очистки, %	32	44,2	44,9	46,6	51,14	54,9	52,8

Продолжительность фильтроциклов изменялась в диапазоне $t=4...22$ часов, скорость $v=4...6,9$ м/ч, доза коагулянта $d=0,071...0,162$ мг/дм³; исходное содержание органических веществ по показателю перманганатная окисляемость - $ПО_0=6,4...6,7$ мгО₂/дм³, содержание органических веществ после установки (I ступень) - $ПО_I=5,2...5,6$ мгО₂/дм³. Содержание органических веществ после сорбционного фильтра (II ступень) - $ПО_{II}=3,1...4,35$ мгО₂/дм³, эффективность очистки на I-ой ступени - $\mathcal{E}=13,8...34,3\%$, эффективность очистки на II-ой ступени - $\mathcal{E}=18,6...40,38\%$, суммарная эффективность очистки - $\mathcal{E}=32...54,9\%$.

В четвертой главе получены критерии подобия течения в осветлителе-рециркуляторе и уточнены критерии фильтрования через слой плавающей загрузки и при сорбции. В осветлителе-рециркуляторе (рис. 4) смешанная с реагентом вода осветляется восходящим потоком сквозь слой взвешенного осадка, образованного реагентом и загрязнениями, и который периодически удаляется, вместе с частью частиц, выпавших в осадок (шлам).

В работе Е.Ф. Кургаева показано, что остаточное содержание загрязнений в воде, проходящей осветлитель, C_p , мг/дм³ определяется критерием сепарации K_c :

$$C_p = 260 / K_c. \quad (5)$$

$$K_c = (30 + 0,5\Theta)C_{об}^2 H_c, \quad (6)$$

где Θ - температура воды, °C; $C_{об}$ - объемная концентрация загрязнений в слое взвешенного осадка; H_c - высота осветлителя (см).

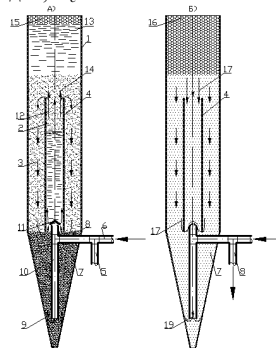


Рисунок 4. - Схема осветлителя-рециркулятора опытно-промышленной фильтровальной установки

- 1 - корпус фильтра, 2 - слой взвешенного осадка;
- 3 - нисходящий (циркулирующий) слой взвешенного осадка;
- 4 - корпус рециркулятора;
- 5 - трубопровод отвода воды во время регенерации фильтра и рециркулятора;
- 6 - трубопровод подачи исходной воды;
- 7 - зона концентрированного осадка рециркулятора;
- 8, 10 - трубопровод подачи исходной воды в установку и ее отвода во время регенерации установки;
- 9 - направление потока осадка;
- 11 - распределитель исходной воды,
- 12 - направление движения циркулирующего осадка;
- 13 - слой воды, поступающий на фильтр;
- 14 - направление движения воды из рециркулятора в фильтр;
- 15 - фильтрующий слой в режиме фильтрования;
- 16 - фильтрующий слой во время его регенерации;
- 17, 19 - направление потока промывочной воды;
- 18 - поток промывочной воды.

Для расчета критерия сепарации K_c (6) необходима объемная концентрацию $C_{об}$:

$$\frac{v}{v_q} = \frac{(1 - C_{об})^4}{1 + C_{об}^2} \approx (1 - 3,5C_{об}), \quad (7)$$

где v - расчетная скорость восходящего потока воды, v_q - скорость свободного осаждения частиц загрязнений. Из соотношения (7) видно, что при $v_q = v$, ($v_q - v = 0$), объемная концентрация $C_{об} = 0$, следовательно, $K_c = 0$, $C_p \rightarrow \infty$, т.е. очистка воды не происходит. При $v_q > v$, значение $C_{об} > 0$ происходит очистка воды, что очевидно, т.к. $v_q > v$ частицы загрязнений успевают осесть, поэтому время осаждения меньше, чем время пребывания воды в осветлителе.

Сравнение рассчитанных с помощью соотношений (5) - (7) и графической зависимости $v_q = f(C_0)$ по Е.Ф. Кургаеву остаточных значений загрязнений не дало результатов, что связано с более сложным характером процесса в осветлителе - рециркуляторе установки: вода поступает вверх в рециркулятор через трубку - б (рисунок 5), затем часть потока отклоняется вниз с последующим движением вверх. В отличие от традиционной схемы в шлам отводится не слой взвешенного осадка, а то, что выпадает в сгуститель шлама из взвешенного осадка и при движении потока «сверху - вниз». Основываясь на том, что при $v_q > v$ происходит очистка воды, а при $v_q - v = 0$ очистка не осуществляется, на основании гидродинамики течения получим критерий для отношения $(v_q - v)/v$ при течении воды в рециркуляторе. Силы, действующие на частицу загрязнения (рис. 5).

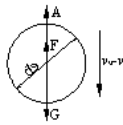


Рисунок 5. - Силы, действующие на частицу загрязнений при ее осаждении:

A - сила Архимеда; F - сила Стокса;

G - сила тяжести

Из выражения (8) получим:

При равномерном осаждении силы уравниваются:

$$A + F = G, \quad (8)$$

где $A = \rho g \pi d^3 / 6$; $F = 3\pi\mu(v_q - v)d$;

$G = \rho_s g \pi d^3 / 6$.

(ρ , ρ_s - плотность воды и частицы; μ - коэффициент динамической вязкости воды).

$$v_q - v = \frac{g d_s^2 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)}{18\nu}, \quad (9)$$

где ν - коэффициент кинематической вязкости воды.

Найдем выражение для эквивалентного диаметра d_s . Исходную концентрацию загрязняющих частиц запишем следующим образом:

$$C_0 = \frac{\sum n_i m_i}{W}, \quad (10)$$

где n_i - количество частиц массой m_i ; W - объем рециркулятора.

Из соотношения (10) получим:

$$\sum n_i m_i = \rho_s \frac{\pi d_s^3}{6} N = C_0 W, \quad (11)$$

где N - количество эквивалентных частиц с диаметром d_s .

Формула (11) позволяет найти следующую связь:

$$d_s = \left(\frac{6C_0 W}{\pi N \rho_s} \right)^{1/3}. \quad (12)$$

С использованием зависимостей (9) и (12) получим:

$$v_q - v = \frac{g \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)}{18\nu} \left(\frac{6}{\pi N} \right)^{2/3} \left(\frac{C_0}{\rho_s} \right)^{2/3} W^{2/3}. \quad (13)$$

В уравнении (13) примем $\left(\frac{C_0}{\rho_v}\right) = \left(\frac{C_0}{\rho}\right)$, тогда запишем:

$$\frac{v_v - v}{v} = \frac{v_v}{v} - 1 \sim \frac{g(C_0 / \rho)^{2/3} W^{2/3}}{Uv} \sim K_v. \quad (14)$$

Правая часть выражения (14) является безразмерной величиной ($v, м/с$), которую примем в качестве основной части скоростного критерия в осветлителе - рециркуляторе:

$$K_v = \frac{g(C_0 / \rho)^{2/3} W^{2/3} 10^{-7}}{Uv}, \quad (15)$$

где размерность $g - м/с^2$; $v - м^2/с$; $W - м^3$; $v - м/с$; $C_0 - мг/дм^3$; $\rho - кг/дм^3$.

Тогда с увеличением K_v , должно происходить увеличение C_p . Чем меньше K_v , тем меньше C_0 и лучше очистка, C_p меньше. Для подобных систем скоростной комплекс K_v становится критерием. По экспериментальным данным построили график C_p от C_0 (рисунок 6).

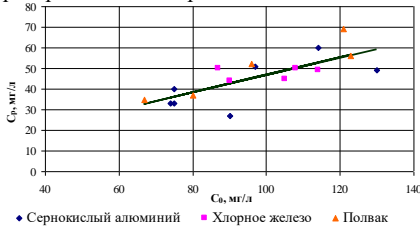


Рисунок 6. - График зависимости C_p от C_0

Экспериментальные точки (рис. 6) обобщены выражением:

$$C_p = 0,7354 \cdot C_0^{0,9017}. \quad (16)$$

Из рисунка 6 и выражения (16) видно, что с увеличением C_0 изменение C_p линейно. Для определения скорости свободного осаждения в работе Е.Ф. Кургаева приведен график зависимости скорости v_v от концентрации механических примесей в воде.

Эта зависимость с погрешностью не более 12% аппроксимируется выражением:

$$v_v = 0,219 \cdot C_0^{0,061}, \quad (17)$$

где $v - см/с$, $C_0 - мг/дм^3$. Поэтому можно записать для восходящего потока:

$$K_v \sim \left(\frac{v_v}{v} - 1\right) = \frac{0,219 C_0^{0,061}}{v} - 1. \quad (18)$$

Отсюда следует, что увеличение K_v с увеличением C_0 подтверждается ростом отношения скоростей с повышением C_0 . Скоростной критерий K_v возрастает с ростом температуры воды, т.к. уменьшается ее вязкость, с воздействием на разность скоростей (9), с которой связан критерий K_v , так же, как критерий сепарации Е.Ф. Кургаева. Коэффициент K_c не связан с дозой коагулянта, что объясняется принципом работы осветлителя, за счет соотношения скорости потока воды и скорости частиц и не связан с коагулянт, который при этом оказывает влияние на разброс точек зависимости C_p от K_v .

В осветлителе – рециркуляторе поток, вышедший из трубы - б, направляется вверх, а затем он резко отклоняется вниз с последующим движением вверх. Такое движение потока способствует выпадению частиц в осадок. Чем больше скорость частиц v_v , тем больше их выпадет при движении потока «вниз», тем ниже будет величина C_p . Скорость движения частиц «вниз» складывается со скоростью нисходящего потока ($v_v + v$). Характер сил, действующих на частицу, будет при этом такой же, как на рисунке 6, но уже при скорости $v_v + v$. Тогда, проведя выводы аналогичные, как для скорости $v_v - v$, получим:

$$\frac{v_v + v}{v} = \frac{v_v}{v} + 1 \sim \frac{g \left(\frac{C_0}{\rho}\right)^{2/3} W^{2/3}}{Uv} \sim K_v. \quad (19)$$

Откуда следует, что для указанного соотношения скоростей при нисходящем потоке получим тот же скоростной критерий K_v , как и в случае восходящего потока.

При эксперименте изменялась продолжительность фильтрования t , доза коагулянта d , скорость фильтрования v , концентрация взвешенных веществ в исходной воде C_p и концентрации взвешенных веществ в очищенной воде C . На основании теории размерностей получили безразмерные комплексы процесса реagenтного фильтрования из шести параметров: $C_p, \text{кг/м}^3$ – начальная концентрация взвеси в воде на входе в фильтр (выход из рециркулятора); $C, \text{кг/м}^3$ – конечная концентрация взвеси; $v, \text{м/ч}$ – скорость движения воды; $t, \text{ч}$ – продолжительность фильтрования; $l_\phi, \text{м}$ – высота слоя фильтрующей загрузки; $d, \text{кг/м}^3$ – доза реагента.

$$\frac{C}{C_p}; \frac{d}{C_p}; \frac{l_\phi}{v \cdot t}. \quad (20)$$

Комплекс d/C_p представляет собой дозу реагента, приходящуюся на единицу начальной концентрации взвеси. Комплекс l_ϕ/vt , представляет собой объем фильтра, приходящийся на единицу расхода воды за время фильтрования. Функциональная связь представлена в виде:

$$\frac{C}{C_p} = f\left(\frac{d}{C_p}, \frac{l_\phi}{vt}\right); \quad (21)$$

В пятой главе обобщены экспериментальные данные по выбранным критериальным комплексам K_v и d/C_0 и сформированы математические модели реagenтного фильтрования с результатами, приведенными на рисунках 7-8, а результаты обобщений данных при использовании коагулянта хлорное железо в фильтровальной части установки приведены на рисунках 9-10.

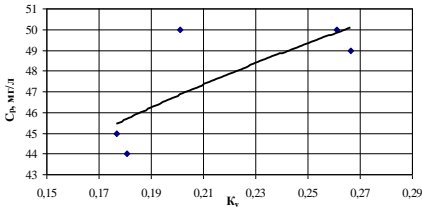


Рисунок 7 - График зависимости C_p от K_v при использовании коагулянта хлорное железо

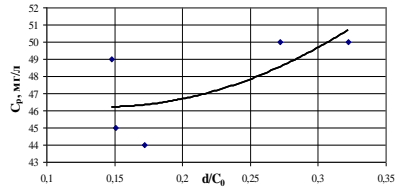


Рисунок 8 - График зависимости C_p от d/C_0 при использовании коагулянта хлорное железо

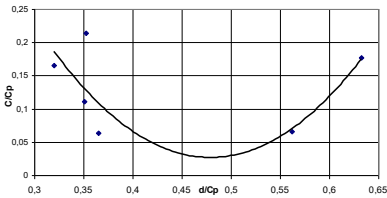


Рисунок 9 - Зависимость C/C_p от критерия d/C_p для коагулянта хлорное железо

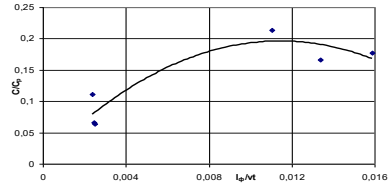


Рисунок 10 - Зависимость C/C_p от критерия l_ϕ/vt для коагулянта хлорное железо

Экспериментальные точки (рисунок 7) аппроксимируются соотношением:

$$C_p = 68,6 K_v^{0,24}; \quad (22)$$

Экспериментальные точки (рисунок 8) обобщены выражением:

$$C_p = 46,2 \cdot \left[1 + 3,36 \cdot \left(\frac{d}{C_0} - 0,15 \right)^2 \right]. \quad (23)$$

Зависимость C_p от критерия K_v и d/C_0 при применении коагулянта хлорное железо:

$$C_p = 57,851 \cdot K_v^{0,138} \cdot \left[1 + 3,36 \cdot \left(\frac{d}{C_0} - 0,15 \right)^2 \right]^{0,576}. \quad (24)$$

Экспериментальные точки обобщены по критерию d/C_p (рисунок 9) соотношением:

$$\left(\frac{C}{C_p} \right) = 0,025 + 86,24 \left(\frac{d}{C_p} - 0,49 \right)^2. \quad (25)$$

Результаты эксперимента (рисунок 10) обобщены по критерию l_ϕ/vt :

$$\left(\frac{C}{C_p} \right) = 0,196 - 1389 \left(\frac{l_\phi}{vt} - 0,0114 \right)^2. \quad (26)$$

При выравнивании функции с использованием соотношений (25) и (26) получим:

$$\frac{C}{C_p} = 0,127 + 3,52 \cdot \left(\frac{d}{C_p} - 0,49 \right)^2 - 1763,92 \left(\frac{l_\phi}{vt} - 0,0114 \right)^2. \quad (27)$$

Выражение для процесса очистки с применением коагулянта хлорное железо имеет индекс корреляции $0,848$ (сильная корреляционная связь):

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_p}{C_0} \times \frac{C}{C_p} = \left[\frac{57,851 \cdot K_v^{0,138} \cdot \left[1 + 3,36 \cdot \left(\frac{d}{C_0} - 0,15 \right)^2 \right]^{0,576}}{C_0} \right] \times \left[0,127 + 3,52 \cdot \left(\frac{d}{C_p} - 0,49 \right)^2 - 1763,92 \left(\frac{l_\phi}{vt} - 0,0114 \right)^2 \right]. \quad (28)$$

Общее выражение, описывающее процесс очистки воды с применением коагулянта серноокислый алюминий, имеет индекс корреляции $0,766$:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_p}{C_0} \times \frac{C}{C_p} = \frac{0,02 + \left\{ 9,46 + 460 \cdot K_v^{1,98} \cdot \left[1 - 3685 \cdot \left(\frac{d}{C_0} - 0,258 \right)^2 \right] \right\}}{C_0} \times \left[0,1717 - 0,4 \cdot \left(\frac{d}{C_p} - 0,51 \right)^2 - 3,1 \cdot \left(\frac{l_\phi}{vt} - 0,031 \right)^{1,29} \right]. \quad (29)$$

Для процесса очистки с коагулянтном «Полвак-40», индекс корреляции $0,752$.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_p}{C_0} \times \frac{C}{C_p} = \left[\frac{157,09 K_v^{0,507} \left(1 - 0,75 \frac{d}{C_0} \right)^{0,528}}{C_0} \right] \times \left[0,093 \cdot \left(\frac{d}{C_p} \right)^{1,4} - 0,075 \cdot \exp \left(0,005 - 106,9 \cdot \frac{l_\phi}{vt} \right) \right]. \quad (30)$$

Для описания процесса, протекающего в фильтрующей части установки, для коагулянта «ПолиДАДМАХ» получены соотношения (31) и (32). В интервале значений критерия d/C_0 от $0,0001$ до $0,0055$ получено следующее выражение, при индексе корреляции $0,968$.

$$\left(\frac{C}{C_0} \right) = 0,002636 \cdot \left(\frac{d}{C_0} \right)^{-0,623} + 0,000453 \cdot \left(\frac{l_\phi}{vt} \right)^{-0,687} - 0,09581. \quad (31)$$

В интервале значений критерия d/C_0 от $0,0055$ до $0,021$ получено следующее выражение, при индексе корреляции $0,935$:

$$\left(\frac{C}{C_0} \right) = 575,47 \cdot \left(\frac{d}{C_0} \right)^{1,71} - 0,0001035 \cdot \left(\frac{l_\phi}{vt} \right)^{-0,687} - 0,0664. \quad (32)$$

Составленные математические модели применимы для оценки эффективности коагулянтов при очистке поверхностных вод: $C_0=100 \text{ мг/дм}^3$, скорость $v=6,1 \text{ м/ч}$ ($0,0017 \text{ м/с}$), комплекс $K_v=0,21$, при оптимальных условиях по комплексам d/C_p (d/C_0) и l_ϕ/vt (таблица 4).

Таблица 4 - Оптимальные критерии при использовании различных видов коагулянтов

Коагулянт	d/C_0	d/C_p	l_ϕ/vt	C/C_0
Серноокислый алюминий	0,258	0,51	0,031	0,052
Хлорное железо	0,15	0,49	0,0023	0,059
«Полвак-40»	0,866	0,9	0,004	0,013
«ПолиДАДМАХ»	0,0055	-	0,025	0,011

Эффективность очистки соответствует «ПолиДАДМАХ» ($C/C_0=0,011$), затем «Полвак-40» - ($C/C_0=0,013$), серноокислый алюминий - ($C/C_0=0,052$), хлорное железо - ($C/C_0=0,059$).

Начальное и конечное содержание органических веществ по показателю «перманганатная окисляемость» обладают размерностью - $мгО_2/дм^3$ и в соответствии с методикой анализа размерностей прием для критерия удаления органических веществ те же критерии, что и для удаления взвешенных веществ. В исследованиях, при использовании коагулянта «ПолиДАДМАХ», очистка от органических соединений происходит в I ступени, а затем во II ступени. Результаты обобщений приведены на рисунках 12-13.

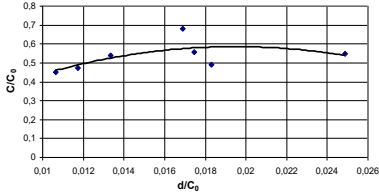


Рисунок 12. - Зависимость C/C_0 от критерия d/C_0 для коагулянта «ПолиДАДМАХ»

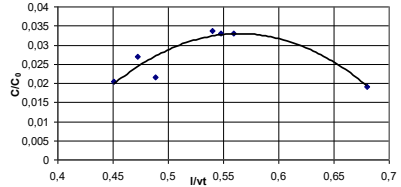


Рисунок 13. - Зависимость C/C_0 от критерия l_ϕ/vt для коагулянта «ПолиДАДМАХ»

Для получения уравнения, в зависимости от двух критериев, выполнили выравнивание функции с использованием соотношений, при индексе корреляции $0,625$ (связь средняя).

$$\frac{C}{C_0} = 0,439 - 1764,59 \cdot \left(\frac{d}{C_0} - 0,019\right)^2 + 0,5077 \cdot \left(\frac{l}{vt} - 0,56\right)^2. \quad (33)$$

В шестой главе при помощи полученных математических моделей (28)-(33) для четырех коагулянтов определена эффективность и стоимость применения оптимального коагулянта. При расчетах принято: $t=72$ ч; $v=6$ м/ч; $C_0=15$ мг/дм³; (в установке $l_\phi=1,2$ м; $W=30$ м³). В результате расчетов строится зависимость $C/C_0=f(d/C_0)$, рисунки 14 - 18.

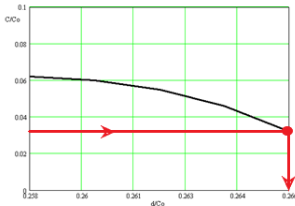


Рисунок 14. - Зависимость C/C_0 от d/C_0 для сернокислого алюминия

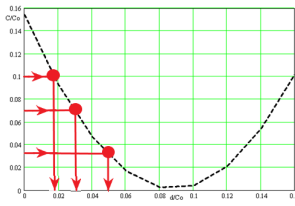


Рисунок 15. - Зависимость C/C_0 от d/C_0 для хлорного железа

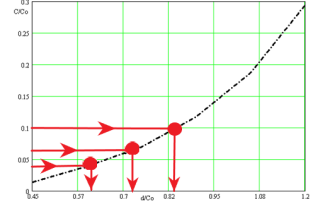


Рисунок 16. - Зависимость C/C_0 от d/C_0 для «Полвак-40»

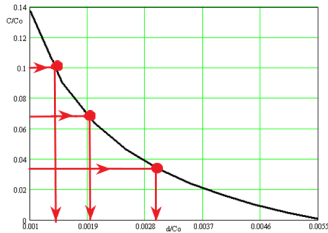


Рисунок 17. - Зависимость C/C_0 от d/C_0 для «ПолиДАДМАХ» в диапазоне $0,001 \dots 0,0055$

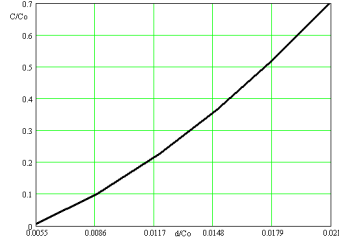


Рисунок 18. - Зависимость C/C_0 от d/C_0 для «ПолиДАДМАХ» в диапазоне $0,0055 \dots 0,021$

Для каждого коагулянта определена необходимая доза d при трех значениях остаточной концентрации загрязнений $C=0,5; 1; 1,5$ мг/дм³ (таблица 5).

Таблица 5 - Зависимость необходимой дозы коагулянта d от остаточной концентрации C

$C, \text{ мг/дм}^3$	$d, \text{ мг/дм}^3$			
	серноокислый алюминий	хлорное железо»	«Полвак-40»	«ПолиДАДМАХ»
0,5	-	1,275	9,9	0,0495
1	-	0,87	13,65	0,03
1,5	3,75	0,48	16,5	0,027

Данные из таблицы 5, применены для проведения расчетов, результаты которых сведены в таблицу 6, при расходе очищаемой воды в течение фильтроцикла 30 м^3 .

Таблица 6 - Результаты экономических расчетов

Реагент	d/C_0	$d, \text{ мг/дм}^3$	$d, \text{ кг}$	Стоимость, руб./тонн	Затраты на фильтроцикл, руб.
$C=1,5 \text{ мг/л}$ ($C/C_0=0,1$)					
хлорное железо	0,0175	0,2625	0,0078	37000	0,289
«Полвак-40»	0,84	12,6	0,378	40000	15,120
«ПолиДАДМАХ»	0,0014	0,021	0,00063	175000	0,110
$C=1 \text{ мг/л}$ ($C/C_0=0,066$)					
серноокислый алюминий	0,266	3,99	0,1197	30000	3,591
«хлорное железо»	0,03	0,45	0,0135	37000	0,499
«Полвак-40»	0,76	11,4	0,342	40000	13,68
«ПолиДАДМАХ»	0,002	0,03	0,0009	175000	0,158
$C=0,5 \text{ мг/л}$ ($C/C_0=0,033$)					
хлорное железо	0,05	0,75	0,0225	37000	0,833
«Полвак-40»	0,73	10,95	0,329	40000	13,16
«ПолиДАДМАХ»	0,003	0,045	0,00135	175000	0,236

На основании данных, приведенных в таблице 6, наиболее экономически выгодным является применение коагулянта «ПолиДАДМАХ», который также обладает эксплуатационными преимуществами, обусловленными высокой плотностью шлама и организации дозирования, что позволяет рекомендовать использование «ПолиДАДМАХ» при очистке питьевой воды из поверхностных источников централизованного водоснабжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено задание по теоретическому обоснованию и разработке технических решений по созданию опытно-промышленной установки, последовательно воспроизводящей основные технологические процессы очистки воды. Результаты серии экспериментов обобщены с получением математических моделей процессов очистки.

1. Собрана статистическая информация по качественному составу вод поверхностных ИЦВ Республики Крым за многолетний период наблюдений.

2. На основе анализа статистической информации качественного состава вод поверхностных ИЦВ получены дифференциальные функции плотности распределения значений мутности, цветности, перманганатной окисляемости, с составлением методики определения количества закупаемого реагента.

3. Разработана и апробирована методика прогноза качества изменения органических загрязнений на всех основных стадиях очистки питьевой воды из поверхностных источников централизованного водоснабжения, позволяющая определить необходимые технические решения интенсификации процесса очистки.

4. Сконструирована и запатентована опытно-промышленная фильтровальная установка по очистке вод поверхностных ИЦВ, конструктивные решения которой обеспечивают удаление органических загрязнений (54,9 %) и взвешенных веществ (90%).

5. Сформирован и уточнен набор основных критериев процесса осветления в слое взвешенного осадка, фильтрования и сорбции при очистке вод поверхностных ИЦВ от антропогенных загрязнений.

6. Выполнено моделирование процессов очистки природных вод поверхностных источников централизованного водоснабжения при использовании различных реагентов с обобщением экспериментальных данных и получением аналитических выражений по выбранным критериям, с последующей оптимизацией параметров процесса очистки по экономическим критериям. Экономический анализ показал, что наиболее эффективным коагулянтom является «ПолиДАДМАХ», обеспечивающий высокую эффективность очистки воды поверхностных ИЦВ.

Рекомендуется использовать полученные автором аналитические выражения для определения степени очистки от взвешенных и органических соединений и затрат на ее проведение в зависимости от вида, дозы и стоимости коагулянта, продолжительности фильтроцикла, скорости фильтрования, высоты слоя фильтрующей загрузки для поверхностных вод ИЦВ. Предложенную методику оценки эффективности работы ВОС по органическим загрязнениям также использовать для оценки работы ВОС и по другим показателям качества.

Дальнейшими перспективами разработки темы является внедрение рекомендаций, полученных на основе исследований, в практику эксплуатации очистных сооружений, а также использование определенных технологических параметров в проектировании новых компактных установок очистки воды для малых населенных пунктов Республики Крым.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации из перечня рецензируемых научных журналов и изданий:

1. Стрелков, А. К. Определение эффективности очистки воды поверхностных источников централизованного водоснабжения от органических загрязнений на примере г. Симферополя / А. К. Стрелков, **Е. Е. Котовская**, С. Ю. Теплых // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7, № 3(28). – С. 35-45. – DOI 10.17673/Vestnik. 2017.03.7. (K1).
2. Теплых, С. Ю. Обоснование технологии обработки промывных вод водопроводных очистных сооружений с последующим возвратом в технологический цикл / С. Ю. Теплых, **Е. Е. Котовская** // Градостроительство и архитектура. – 2023. – Т. 13, № 4(53). – С. 38-48. – DOI 10.17673/Vestnik. 2023.04.05. (K2).
3. Разработка модульных комплексов очистки воды Северо-крымского канала для полива сельскохозяйственных культур / С. Ю. Теплых, **Е. Е. Котовская**, П. А. Горшкалев, М. Г. Гайдайчук // Градостроительство и архитектура. – 2024. – Т. 14, № 1(54). – С. 34-45. – DOI 10.17673/Vestnik. 2024.01.05. (K2).

Объекты интеллектуальной собственности:

1. Пат. 7595 Україна, B01D 21/00. Прояснявач для очищення води / М. М. Гіроль, С. Д. Бойчук, В. О. Мякішев, О. Є. Котовська. — № u20041210372; заявл. 16.12.2004; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6.
2. Пат. 45093 Україна, МПК (2009) C02F 1/00, B01D 25/00. Пристрій для очищення води / О. Є. Котовська. — № u2009 05184; заявл. 25.05.2009; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20.

Публикации в других изданиях:

1. **Котовская, Е. Е.** Гидрохимическая оценка качества воды водохранилища «межгорное» и оптимизация технологии водоподготовки / Е. Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. – 2006. – № 13-14. – С. 186-188.
2. **Котовская, Е. Е.** Экспериментальная проверка эффективности современных реагентов при очистке природных вод / Е. Е. Котовская, В. А. Мякишев // Строительство и техногенная безопасность. – 2006. – № 15-16. – С. 223-226.
3. **Котовская, Е. Е.** Трансформация органических веществ в воде поверхностных источников централизованного водоснабжения и методы их удаления / Е. Е. Котовская // Сборник материалов II Всеукраинской молодежной научной конференции "Вода-источник жизни на Земле". — Луганск, 2008. — С. 84—87.

4. Боровский, Б.И. Составление математических моделей очистки промывных вод скорых фильтров водоочистной станции "Петровские скалы" с использованием установки с плавающим фильтрующим слоем / Б. И. Боровский, С. Д. Бойчук, **Е. Е. Котовская** // Сборник докладов Международного Конгресса "ЭТЭВК – 2009". — Ялта, 2009. — С. 97—104.

5. **Котовская, Е. Е.** Определение оптимальных доз коагулянта ПолиДАДМАХ при очистке природных вод в системе централизованного водоснабжения / Е. Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. — 2009. — № 27. — С. 87-92.

6. **Котовская, Е. Е.** Анализ эффективности работы водопроводных очистных сооружений по органическим загрязнениям / Е. Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. — 2011. — № 37. — С. 122-130.

7. Боровский, Б. И. Моделирование влияния дозы реагента на эффективность очистки природной воды в осветлителе установки с плавающим фильтрующим слоем / Б. И. Боровский, Е. Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. — 2012. — № 41. — С. 55-59.

8. Боровский, Б. И. Математическая модель очистки природной воды в осветлителе установки с плавающей фильтрующей загрузкой с учётом влияния дозы реагента / Б. И. Боровский, Е. Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. — 2012. — № 44. — С. 100-104.

9. **Котовская, Е. Е.** Эффективность работы водопроводных очистных сооружений г. Симферополя по удалению органических загрязнений / Е. Е. Котовская // Motrol Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. — 2012. — Т. 14, № 6. — С. 193-200.

10. **Котовская, Е. Е.** Математическая модель очистки природной воды в установке с плавающей фильтрующей загрузкой с учётом влияния дозы реагента в осветлителе / Е. Е. Котовская // Науковий вісник будівництва. — 2012. — № 70. — С. 301-307.

11. **Котовская, Е. Е.** Методика оценки степени очистки воды поверхностных источников централизованного водоснабжения от органических загрязнений / Е. Е. Котовская // Науковий вісник будівництва. — 2013. — № 71. — С. 402-409.

12. **Котовская, Е.** Сравнение экономической эффективности различных коагулянтов при очистке природных вод / Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. — 2016. — № 5(57). — С. 62-66.

13. **Котовская, Е. Е.** Оценка качественных показателей источников централизованного питьевого водоснабжения г. Симферополя и их влияния на технологию очистки / Е. Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. — 2017. — № 7(59). — С. 73-81. (К2).

14. Water treatment for small boiler houses in water-deficient regions / N.M. Vetrova, **Е. Е. Kotovskaya**, M. Afonina, [et al.] // AIP Conference Proceedingst: VIII international scientific and technical conference «Solving environmental problems in the constructions industry» ESCI 2022, Ho Chi Minh City, Vietnam. Vol. 2560. —AIP PUBLISHING, 2023. — P. 040001. — DOI 10.1063/5.0131956.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 26.09.2024 г.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз.

Отпечатано с оригинал-макета в типографии ИТ «АРИАЛ».
295015, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Севастопольская, 31-а/2,
тел.: +7 978 71 72 901, e-mail: it.arial@yandex.ru, сайт: arialprint.ru