

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 - 2023

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

Научный руководитель:

**Боровский Борис Иосифович**

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

**Щербаков Владимир Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Гидравлика,  
водоснабжение и водоотведение»

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»

**Лапшакова Ирина Васильевна**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Водоснабжение  
и водоотведение»

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»

Ведущая организация:

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

Защита состоится «06» сентября 2023 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 <http://d24237705.samgtu.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.377.05,  
доктор технических наук, доцент

Тупицына Ольга Владимировна



## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Увеличение антропогенных нагрузок приводит к ухудшению качества поверхностных вод некоторых источников централизованного водоснабжения, как следствие, снижение барьерной способности водопроводных очистных сооружений (ВОС) в отношении задержания органических загрязнений. Неудалённые органические загрязнения обуславливают содержание в очищенной воде, вредных для здоровья человека, хлорорганических соединений, образующихся при обеззараживании. 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.А. Мильнера, Г.Д. Резникова, В.С. Тарасенко, А.Я. Найманова и др. Поверхностные источники централизованного водоснабжения формируются в условиях антропогенной нагрузки, поэтому снижение этого влияния требует обоснования новых технологических решений, которые направлены на уменьшение содержания органических соединений и взвешенных веществ, что должно базироваться на результатах экспериментально-теоретических и экологических исследований. Ухудшение качества вод, поверхностных источников обусловлено естественным обмелением рек и водохранилищ, интенсивной застройкой территорий, прилегающих к источникам водоснабжения, отсутствием канализования, хаотическим развитием гостинично-ресторанных комплексов, ослаблением экологического контроля за промышленными и сельскохозяйственными объектами. Известные научные подходы к удалению органических соединений и взвешенных веществ из вод поверхностных источников водоснабжения требуют постоянного уточнения и корректировки входных параметров, разработки математических моделей, с учетом динамики изменения качественного состава антропогенных загрязнений, 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. Симферополя» (производственное предприятие водопроводно-канализационного хозяйства г. Симферополя) №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 год. 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.

**Цель и задачи исследования.** Усовершенствование методов очистки природных вод с высокой степенью защиты от негативного воздействия антропогенных загрязнений поверхностных источников централизованного водоснабжения Республики Крым.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- сбор и систематизация численной информации по формированию качественных показателей поверхностных источников централизованного водоснабжения (ИЦВ);
- получение математических моделей прогноза качества по органическим загрязнениям в воде источника централизованного водоснабжения и в воде, прошедшей очистку на ВОС;
- подготовка крупномасштабной фильтровальной установки, предназначенной для удаления взвешенных веществ и органических соединений из обрабатываемой воды;
- формирование основных критериев процессов осветления, уточнение критериев процессов фильтрования и сорбции при очистке вод поверхностных ИЦВ от антропогенных загрязнений;
- моделирование процессов очистки поверхностных вод ИЦВ при использовании различных коагулянтов;

- обобщение экспериментальных данных по выбранным критериям и полученной математической модели;
- оптимизация параметров очистки от взвешенных веществ и органических соединений по экономическим критериям.

**Объект исследования** - устройство подготовки природных вод для систем водоснабжения в условиях изменения качественного состава источников централизованного водоснабжения.

**Предмет исследования** - технологические процессы подготовки природных вод для систем водоснабжения в условиях изменения качественного состава источников централизованного водоснабжения

**Методы исследования.** При решении поставленных задач были использованы следующие методы: теория размерности, теория вероятности и математической статистики, корреляционно-регрессионный анализ, математическое моделирование процессов очистки воды от антропогенных загрязнений.

**Научная новизна полученных результатов** заключается в теоретическом обосновании, разработке технических решений по усовершенствованию технологии очистки природных вод в Республике Крым, путем совершенствования методов удаления загрязнений из поверхностных вод, подвергшихся антропогенному воздействию.

*Впервые получены:*

- методика оценки барьерной способности ВОС по сравнительному мониторингу показателей качества воды из ИЦВ и воды, прошедшей очистку по органическим загрязнениям;
- критерии процесса осветления воды при ее ресурсосберегающей очистке;
- математические модели процесса очистки в осветлителе-рециркуляторе, фильтрации через плавающую загрузку и сорбции при использовании различных коагулянтов, для обеспечения максимальной защиты от антропогенного воздействия на ИЦВ.

*Усовершенствованы:*

- критерии процесса осветления природной воды в осветлителе-рециркуляторе.

*Разработаны* математические модели процесса очистки в осветлителе-рециркуляторе, фильтрования через плавающую загрузку и сорбции при использовании различных коагулянтов для обеспечения максимальной защиты от антропогенных загрязнений.

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

*Получили дальнейшее развитие:*

- методика определения барьерной способности ВОС относительно органических загрязнений, необходимого уровня защиты от антропогенных загрязнений действующих водохозяйственных комплексов;

- концепция обоснования технологической схемы, совмещающей процессы осветления, фильтрования и сорбции, для обеспечения высокой степени защиты от органических соединений и взвешенных веществ;

- оптимизация параметров водоочистки от антропогенных загрязнений, путем применения полученных моделей.

**Практическое значение полученных результатов** состоит в том, что теоретические положения, представленные в диссертации, доведены до уровня конкретных технических решений практических рекомендаций и уточняют комплекс мониторинга, систем технико-экономического обеспечения функционирования водохозяйственных комплексов. Новые конструктивные решения установки для очистки воды позволяют удалять более половины органических загрязнений, содержащихся в воде, и большую часть взвешенных веществ (патенты Украины [10, 11]);

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

- 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»;

- методика выбора технологических параметров процесса осветления, фильтрования, сорбции при очистке поверхностных вод ИЦВ приняты к внедрению Симферопольским филиалом ГУП РК «Вода Крыма»;

- техническое решение рекомендуемой схемы очистки, базирующееся на основных результатах исследования, принято к внедрению строительной компанией «Консоль-СТРОЙ»;

- научные положения работы используются в Крымском федеральном университете им. В.И. Вернадского при разработке лекционного и практического курса по дисциплинам: «Новые инженерно-технические решения систем водоснабжения и водоотведения»; «Технология очистки природных вод».

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- 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.

- Конструкция фильтровальной установки, совмещающей процессы осветления в слое взвешенного осадка, фильтрования через пенополистирольную загрузку и сорбцию на угольном фильтре, которые являются основными ступенями очистки с применением современных и традиционных коагулянтов. При проведении экспериментальных исследований были получены технологические параметры эксплуатации, которые могут быть применены в аналогичных условиях.

- Теоретическое обоснование скоростного критерия  $K_v$ , определяющего остаточную концентрацию загрязнений на выходе из рециркулятора-осветлителя, учитывающего влияние дозы реагента.

- Результаты оптимизации по выбору наиболее эффективного и экономически обоснованного коагулянта с определением расчетных значений доз.

**Личный вклад автора.** Автором выполнен информационный поиск и анализ научной литературы, самостоятельно 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. По итогам работы диссертантом получены два патента Украины по очистке воды.

**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.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях из перечня ВАК, 1 работа в международном сборнике «Motrol».

**Структура и объем диссертационной работы.** Работа состоит из введения, семи разделов, выводов, приложений и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 222 стр., в том числе 82 рисунка, 30 таблиц. Список использованной литературы на 14 страницах и состоит из 172 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 первом разделе** представлен аналитический обзор современных технологий подготовки воды на муниципальных очистных сооружениях, с учетом технологий удаления природных и антропогенных загрязнений из вод поверхностных ИЦВ. Выявлены недостатки наиболее распространенных схем водоочистных сооружений и отдельных сооружений, такие как: появление сложных хлорорганических соединений, а также соединений с металлами в процессе водоподготовки из-за недостаточного удаления органических соединений, взвешенных веществ из поверхностных вод. Среди водопроводных очистных сооружений наибольшее распространение получили двухступенчатые схемы очистки, включающие отстаивание или осветление в слое взвешенного осадка и фильтрование на скорых фильтрах с последующим обеззараживанием. Рассмотрены существующие конструкции осветлителей со слоем взвешенного осадка (первая традиционная ступень очистки) и выявлены технологические недостатки, приводящие к нестабильной 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, К.И. Айвес. Среди зернистых загрузок особое место занимают фильтрующие плавающие загрузки (ФПЗ), обладающие такими преимуществами по сравнению с традиционными грузками из кварцевого песка, как возможность их быстрого получения на ВОС (сокращение транспортных расходов и времени работы машин и механизмов); неподверженность заиливанию (сокращение энергетических ресурсов на их регенерацию); обладание механической и химической прочностью (длительный срок эксплуатации). Исследованиями по применению ФПЗ занимались С.И. Мороз, М.Г. Журба, Д.Д. Мякий, В.К. Шабратько, В.Г. Ильин, П.Г. Луценко, Н.Н. Гироль, В.О. Орлов. Выявлено отсутствие теоретических моделей процесса реагентного фильтрования, в зависимости от вида коагулянта и его дозы, учитывающих высоту фильтрующего слоя, скорость и продолжительность фильтроцикла, т.е. всех значимых показателей функционирования ВОС. Выполненный литературный обзор позволил сформулировать основные цели и задачи исследования.

**Во втором разделе** были сформулированы основные задачи исследования, заключающиеся:

- в выполнении анализа эффективности работы ВОС по показателю органические загрязнения, путем получения математических моделей прогноза качества по органическим загрязнениям в воде источника централизованного водоснабжения и в воде, прошедшей очистку на ВОС.

- в создании крупномасштабной фильтровальной установки (КФУ) для очистки воды из поверхностных источников централизованного водоснабжения, позволяющей реализацию эксперимента по осветлению воды во взвешенном слое осадка, фильтрованию через пенополистирольную загрузку и сорбцию на активированных углях.

- в получении основных критериев процесса удаления взвешенных веществ и органических соединений из природных вод. Получить математическую модель описания процесса очистки природных вод на КФУ.

- в разработке методики определения вида коагулянта и его дозы, исходя из экономических показателей.

- в определении основных параметров очистки воды: вид и доза коагулянта, скорость фильтрования, продолжительность фильтроцикла и т.д.

В качестве методов проведения исследования были выбраны статистический анализ и физический эксперимент. Статистический анализ позволил оценить барьерную способность ВОС по органическим загрязнениям. При помощи анализа размерностей уточнили основные критерии процесса фильтрования воды. Обработка экспериментальных данных при помощи корреляционно-регрессионного анализа позволила получить математические модели описания процесса очистки воды на трех этапах: осветления, фильтрования и сорбции при использовании различных коагулянтов. При помощи полученных моделей проведена оптимизация экономических параметров процессов очистки.

**В третьем разделе** были рассмотрены особенности формирования качества источников централизованного водоснабжения. Проведена классификация ИЦВ г. Симферополя, представлены результаты лабораторных анализов органолептических показателей качества и химического анализа по содержанию хлорорганических соединений в пробах воды, прошедшей очистку на ВОС. Собрана и систематизирована численная информация по формированию качественных показателей поверхностных ИЦВ г. Симферополя по органическим загрязнениям, что позволило определить функции плотности распределения содержания в воде органических загрязнений по показателю ПО для четырех источников ИЦВ г. Симферополя, и выявлено, что они подчинены нормальному закону распределения (табл. 1).

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

$ПО_{min}$	$ПО_{max}$	$M(ПО)$	$\sigma$	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. Из анализа полученных результатов следует, что значение теоретической частоты распределения содержания органических загрязнений Межгорного и Симферопольского водохранилища превышает предельное значение для источника 1 класса, а содержание органических загрязнений для Партизанского и Аянского водохранилища практически не превышают предельное значение. Вероятности превышения предельного значения  $7 \text{ мг}O_2/\text{дм}^3$  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;  $\sigma$  – 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.

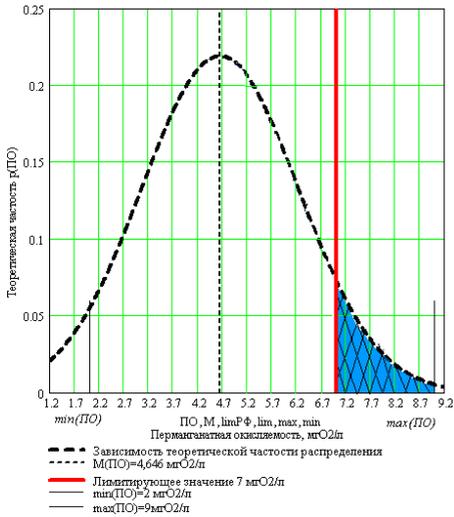


Рисунок 1.1 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из Симферопольского водохранилища и предельное значение  $PO_{lim}=7 \text{ мгO}_2/\text{л}$

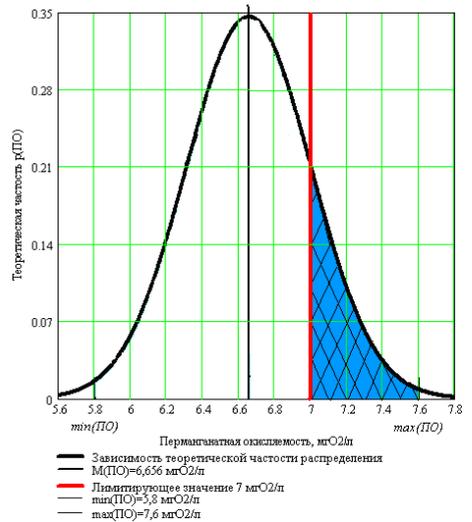
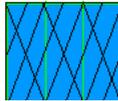


Рисунок 1.2 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из Межгорного Водоохранилища предельное и значение  $PO_{lim}=7 \text{ мгO}_2/\text{л}$

Условные обозначения



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

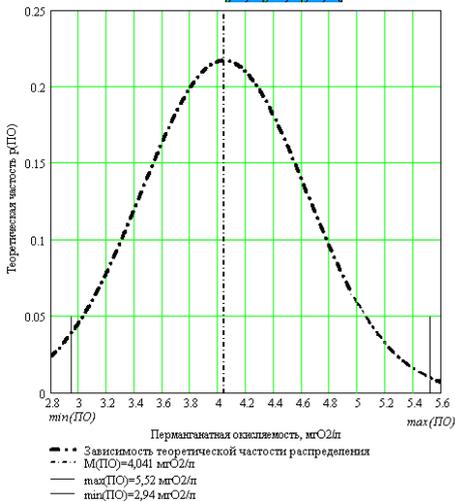


Рисунок 1.3 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из Партизанского водохранилища

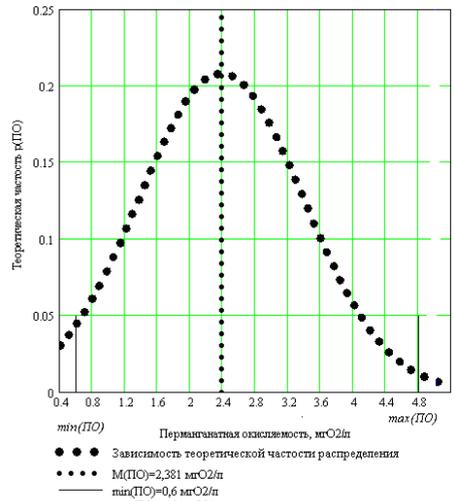


Рисунок 1.4 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из РЧВ Айнского водохранилища

Из расчета по зависимости (1) было 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 (наливного), воды которого были подвергнуты наибольшему антропогенному воздействию. По течению воды на реке Днепр устроен каскад водохранилищ, являющихся ИЦВ и объектом выпуска очищенных сточных вод крупных городов Украины. Математическое ожидание органических загрязнений в данном ИЦВ соответствует значению равному  $6,656 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ .

Аналогичным образом было выполнено определение статистических характеристик показателей качества воды (таблица 2), прошедшей очистку на ВОС по существующей технологической схеме.

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) ( $ПО_{lim}=2 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ ) и СанПиН 2.1.4-1074-01 ( $ПО_{lim}=5 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ ).

Из анализа рисунков 2.1-2.4 следует, что содержание органических загрязнений в воде из РЧВ четырех гидроузлов г. Симферополя превышают предельное значение. Определим вероятности превышения значений органических соединений граничного значения на уровне  $5 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$  по формуле:

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

Таким образом, вероятность превышения содержания органических загрязнений предельного значения по СанПиН 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%. Определим вероятности превышения значений органических соединений граничного значения на уровне  $2 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$  (норм ВОЗ и ЕС) 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%.

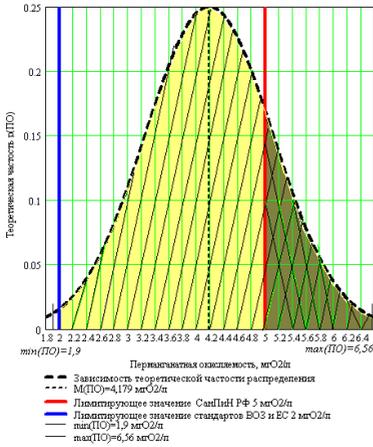


Рисунок 2.1 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из РЧВ Симферопольского гидроузла и предельное значение ПО (стандарты ВОЗ и ЕС и СанПиН)

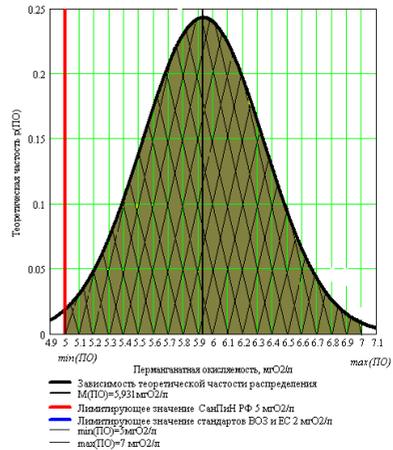
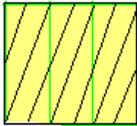
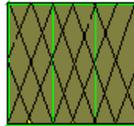


Рисунок 2.2 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из РЧВ Междоного гидроузла и предельное значение ПО (стандарты СанПиН)

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

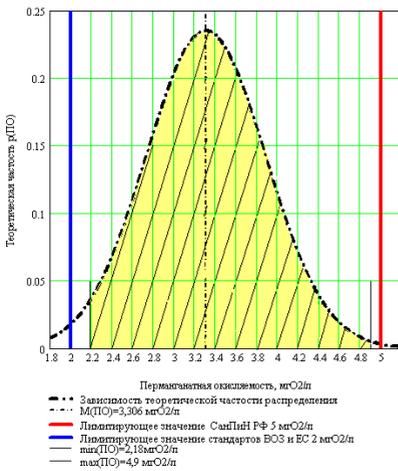


Рисунок 2.3 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из РЧВ Партизанского гидроузла и предельное значение ПО (стандарты ВОЗ и ЕС и СанПиН)

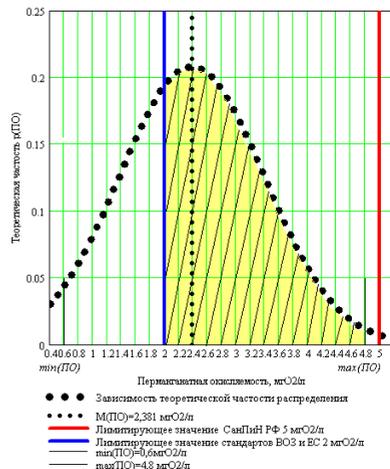


Рисунок 2.4 - Функция плотности распределения значений ПО для воды из Аянского водохранилища и предельное значение ПО (стандарты ВОЗ и ЕС и СанПиН)

Оценку барьерной способности ВОС относительно органических соединений и установления требуемой эффективности очистки выполним 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%.

В соответствии со стандартами ВОЗ и ЕС, при  $M(ПО_{РЧВ})$  - 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 [11].

**В четвертом разделе** представлены технические решения по созданию биопозитивной конструкции для удаления взвешенных веществ и органических соединений с требуемой эффективностью процесса очистки от антропогенных загрязнений. Крупномасштабная фильтровальная установка, состоящая из первой ступени, включающей в себя осветлитель – рециркулятор осадка и слой фильтровальной плавающей пенополистирольной загрузки и второй ступени, фильтровальной колонны, загруженной активированным углем марки АГ-3. Установка для очистки воды (рис. 3) работает следующим образом: очищаемая вода подается в корпус установки 1 через трубопровод подачи воды 2, в который дозируется коагулянт и по потребности – замутнитель (раствор бентонита). При прохождении воды через нижнюю камеру 4 с добавлением коагулянта происходит образование скоагулированных частиц, которые благодаря прохождению через рециркулятор осадка 9 образуют слой взвешенного осадка 5. При прохождении воды сквозь плавающую грубозернистую загрузку 6 происходит окончательное очищение от загрязнений в верхней камере 7. Очищенная вода выходит из верхней камеры 7 через трубопровод отвода очищенной воды 3 при открытии задвижки 11. Излишний осадок 5 из нижней камеры 4 для взвешенного осадка поступает в рециркулятор осадка 9, затем в сгуститель шлама 8 и удаляется из сгустителя шлама 8 при поступлении сигнала от пьезометров 12 и после открытия задвижки 11 на трубопроводе для отвода шлама 10 во время регенерации. Далее вода, очищенная от взвешенных веществ, по трубопроводу 3 поступает в фильтровальную колонну 13 и фильтруется через загрузку 14, затем отводится по трубопроводу 21 в сток. Подачу воды на промывку загрузки осуществляли по трубопроводу 22. Промывку плавающей фильтрующей загрузки осуществляли при открытии задвижки 11 на сифоне 20.

Корпус установки выполнен из трубы круглого сечения  $D=300$  мм и имеет общую высоту 4300 мм. Высота слоя плавающей фильтрующей загрузки составляет 1200 мм, крупность зерен 1,5...3,0 мм.

По высоте фильтрующего слоя в корпус врезаны штуцеры ( $d_{ш}=3$  мм), к которым подключены пьезометры для контроля потерь напора в слоях загрузки.

Для наблюдения за состоянием верхнего слоя загрузки и качеством ее промывки в корпусе предусмотрено окно из прозрачного пластика. Загрузка удерживается от всплытия сеткой. Выше загрузки расположен бак объемом  $0,4 \text{ м}^3$  для сбора осветленной воды. Ниже фильтрующей загрузки в установке находится нижняя камера с осветлителем-рециркулятором осадка высотой 1200 мм.

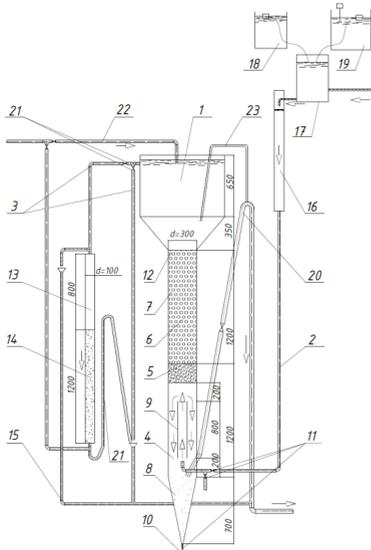


Рисунок 3. - Крупномасштабная фильтровальная установка

- 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 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.

Следует отметить, что в осветлителе – рециркуляторе происходит сложное возвратное течение воды за счет увеличения продолжительности процесса осветления, что способствует повышению степени очистки при ресурсосберегающем процессе.

На установке проведена серия опытов с применением таких коагулянтов, как сернистый алюминий, хлорное железо, «Полвак-40», «ПолиДАДМАХ».

Удаление органических загрязнений происходит как в первой ступени установки (осветлитель-рециркулятор установки и плавающая фильтрующая загрузка), так и во второй ступени (сорбционная колонна) при применении коагулянта «ПолиДАДМАХ» (табл. 3).

Таблица 3 - Технологические показатели очистки воды от органических веществ в КФУ 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 <sup>3</sup> /час	0,08	0,045	0,045	0,045	0,06	0,057	0,046
ПО на входе в КФУ, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	6,4	6,5	6,5	6,7	6,55	6,43	6,57
ПО на входе в сорбционный фильтр, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	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 <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	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 <sup>3</sup>	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

В серии опытов продолжительность фильтроцикла изменялась в диапазоне  $t=4...22$  часов, скорость фильтрования -  $v=4...6,9$  м/ч, доза коагулянта -  $d=0,071...0,162$  мг/дм<sup>3</sup>; исходное содержание органических веществ по показателю перманганатная окисляемость -  $ΠО_0=6,4...6,7$  мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, содержание органических веществ по показателю перманганатная окисляемость после установки (I ступень) -  $ΠО_I=5,2...5,6$  мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>.

Содержание органических веществ по показателю перманганатная окисляемость после сорбционного фильтра (II ступень) -  $ΠО_{II}=3,1...4,35$  мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, эффективность очистки на I-ой ступени -  $Э=13,8...34,3\%$  (в среднем 24,05%), эффективность очистки на II-ой ступени -  $Э=18,6...40,38\%$  (в среднем 24,05%), суммарная эффективность очистки после прохождения воды двух ступеней очистки  $Э=32...54,9\%$  (в среднем 43,45%).

Результаты анализа экспериментальных данных показали необходимость теоретического обобщения и создания критериев процессов очистки воды поверхностных ИЦВ от антропогенных загрязнений.

**В пятом разделе** получены критерии подобия течения в осветлителе-рециркуляторе и уточнены критерии фильтрования через слой ФПЗ и при сорбции.

В подфильтровом пространстве установки происходит частичное осветление воды. Крупные частицы примесей под действием силы тяжести, обладая гидравлической крупностью большей от скорости восходящего потока промывной воды, выпадают в осадок. Более мелкие частички примесей с потоком очищаемой воды проникают в толщу фильтрующего слоя, тем самым, способствуя интенсивному его загрязнению. С целью снижения грязевой нагрузки на зернистый слой в подфильтровом пространстве установки и для увеличения продолжительности фильтроцикла был устроен рециркулятор осадка (рисунок 4). В осветлителе-рециркуляторе смешанная с реагентом вода осветляется восходящим потоком сквозь слой взвешенного осадка, образованного реагентом и загрязнениями на периферии осветлителя. Этот слой периодически удаляется, вместе с ним удаляется значительная часть частиц, выпавших в осадок (шлам). В работе Е.Ф. Кургаева показано, что остаточное содержание загрязнений в воде, проходящей традиционный осветлитель,  $C_p$ , мг/дм<sup>3</sup> определяется безразмерным критерием сепарации  $K_c$ :

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

Выражение для критерия сепарации имеет вид:

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

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

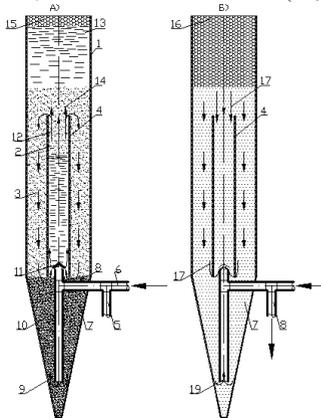


Рисунок 4. - Схема осветлителя-рециркулятора КФУ:

- 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 центрированного осадка рециркулятора,
- 8, 10 - трубопровод подачи исходной воды на фильтр и ее отвода во время регенерации фильтра и рециркулятора,
- 11 - распределитель исходной воды,
- 12 - направление движения циркулирующего осадка;
- 13 - слой воды, поступающий на фильтр;
- 14 - направление движения воды из рециркулятора на фильтр;
- 15 - фильтрующий слой в режиме фильтрования;
- 16 - фильтрующий слой во время его регенерации;
- 17, 19 - направление потока промывной воды;
- 18 - поток промывной воды.

Для расчета значения критерия сепарации  $K_c$  (6) необходимо знать объемную концентрацию  $C_{об}$ , которая определяется из выражения:

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

где  $v$  - расчетная скорость восходящего потока воды,  $v_v$  - скорость свободного осаждения частиц загрязнений. Из соотношения (7) видно, что при  $v_v = v$ , ( $v_v - v = 0$ ), объемная концентрация  $C_{об} = 0$ , следовательно,  $K_c = 0$ ,  $C_p \rightarrow \infty$ , т.е. очистка воды не происходит. При  $v_v > v$ , значение  $C_{об} > 0$  происходит очистка воды. Изложенное очевидно, т.к.  $v_v > v$  частицы загрязнений успевают осесть, поэтому время осаждения будет меньше, чем время пребывания воды в осветлителе. Из математической модели также следует, что остаточное загрязнение  $C_p$  не зависит от концентрации реагента в воде. В работах В.И. Кривоносова, В.А. Клячко, И.Э. Апельцина, Г.А. Романова также нет количественного влияния дозы реагента (коагулянта) на работу осветлителя.

Проведенное сравнение рассчитанных с помощью соотношений (5) - (7) и графической зависимости  $v_v = f(C_0)$  по Е.Ф. Кургаеву остаточных значений загрязнений в КФУ не дало положительных результатов, что связано с более сложным характером процесса в осветлителе - рециркуляторе экспериментальной установки: вода поступает вверх в рециркулятор через трубку - 6 (рисунок 5), затем часть воды отклоняется вниз с последующим движением вверх. Поэтому 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  $v_v > v$  происходит очистка воды, а при  $v_v - v = 0$  очистка не осуществляется, на основании гидродинамики течения получим критерий для отношения  $(v_v - v)/v$  при течении воды в рециркуляторе. Силы, действующие на частицу загрязнения (рис. 5).

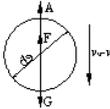


Рисунок 5. - Силы, действующие на частицу загрязнений при ее осаждении:

Из выражения (8) получим:

$$A - F - G = 0, \quad (8)$$

$A$  - сила Архимеда;  $F$  - сила Стокса;  $G$  - сила тяжести.  
При равномерном осаждении силы уравниваются:

$$A + F = G,$$

$$\text{где } A = \rho g \pi d^3 / 6; \quad F = 3\pi \mu (v_v - v) d; \quad G = \rho_c g \pi d^3 / 6.$$

( $\rho$ ,  $\rho_c$  - плотность воды и частицы;  $\mu$  - динамическая вязкость воды).

$$v_v - v = \frac{g d^2 \left( \frac{\rho_c}{\rho} - 1 \right)}{18 \nu}, \quad (9)$$

где  $\nu$  - кинематическая вязкость 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:

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

где  $N$  - количество эквивалентных частиц с диаметром  $d_s$ .

Формула (11) позволяет найти следующую связь:

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

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

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

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

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

Правая часть выражения (14) является безразмерной величиной ( $\nu$ , м/с), которую будем рассматривать в качестве основной части скоростного критерия в осветлителе - рециркуляторе установки:

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

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

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 геометрических подобных систем скоростной комплекс  $K_v$  становится критерием. По экспериментальным данным был построен график зависимости  $C_p$  от  $C_0$  (рисунок 6).

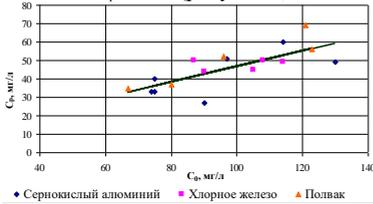


Рисунок 6. - График зависимости  $C_p$  от  $C_0$ .

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  $v_c$  от концентрации механических примесей в воде.

Эта зависимость с погрешностью не более 12% аппроксимируется выражением:

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

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

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

Отсюда следует, что увеличение  $K_v$  с увеличением  $C_0$  подтверждается ростом отношения скоростей с повышением  $C_0$ .

Скоростной критерий  $K_v$  возрастает с увеличением температуры воды, т.к. уменьшается ее вязкость. Такое влияние вязкости обусловлено ее влиянием 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. Это объясняется тем, что принцип работы осветлителя обусловлен соотношением скорости потока воды и скоростью частиц и не связан с коагулянтом. Вместе с тем в осветлителе находится коагулянт, который необходим для очистки воды в плавающем фильтре, поэтому он играет определенную роль, в частности, видимо, в разбросе точек зависимости  $C_p$  от  $K_v$ . Роль коагулянта представляется Е.Ф. Кургаеву следующим образом: говоря о критерии сепарации, он отмечает, что критерий справедлив «при нормальных условиях работы осветлителя: при правильном бесперебойном дозировании коагулянта, при отсутствии разбивания хлопьев коагулированной взвеси и частых, резких колебаний производительности осветлителя и температуры воды».

В осветлителе - рециркуляторе экспериментальной установки, с целью увеличения времени пребывания воды в нем, поток, вышедший из трубы - 6, 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 предыдущему выводу для скорости  $v_v-v$ , получим:

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

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 фиксировались концентрации взвешенных веществ в очищенной воде  $C_0$ . На основании теории размерностей получили безразмерные комплексы для процесса реагентного фильтрования, которые при геометрическом подобии фильтров становятся критериями подобия процесса фильтрования. Характерные параметры и их размерности:

$C_p, \text{кг/м}^3$  – начальная концентрация взвеси в воде на входе в фильтр (выход из рециркулятора);  $C_0, \text{кг/м}^3$  – конечная концентрация взвеси на выходе из фильтра;  $v, \text{м/ч}$  – скорость движения воды в фильтре;  $t, \text{ч}$  – продолжительность фильтрования;  $l_\phi, \text{м}$  – высота слоя загрузки фильтра;  $d, \text{кг/м}^3$  – доза реагента. Тогда из шести параметров получили три безразмерных комплекса:

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

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

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

Сформулированные и уточненные критерии процессов очистки вод поверхностных источников централизованного водоснабжения от антропогенных загрязнений позволили выполнить обобщение экспериментальных данных для математического моделирования процесса удаления антропогенных загрязнений с последующей оптимизацией параметров.

**В шестом разделе** обобщены экспериментальные данные по выбранным критериальным комплексам  $K_v$  и  $d/C_0$  и сформированы математические модели реагентного фильтрования с применением различных видов коагулянтов. При экспериментах скоростной критерий  $K_v$  изменяется в 1,86 раз, скорость потока в 1,67 раз, начальная концентрация загрязнений  $C_p$  – в 1,94 раза. Результаты обобщения экспериментальных данных с применением коагулянта сернокислый алюминий приведены на рисунках 7-8.

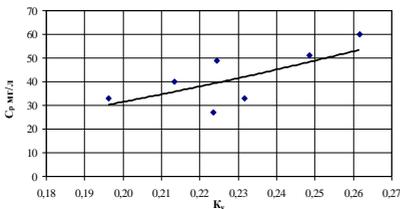


Рисунок 7 - График зависимости  $C_p$  от критерия  $K_v$  при использовании коагулянта сернокислый алюминий

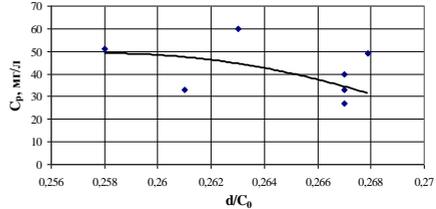


Рисунок 8 - График зависимости  $C_p$  от критерия  $d/C_0$  при использовании коагулянта сернокислый алюминий

Экспериментальные точки (рисунок 7) обобщаются при применении коагулянта сернокислый алюминия следующим соотношением:

$$C_p = 758,53K_v^{1,98}; \quad (22)$$

Экспериментальные точки (рисунок 8) аппроксимируются при применении сернокислого алюминия следующим соотношением.

$$C_p = 49 \cdot \left[ 1 - 3684,807 \cdot \left( \frac{d}{C_0} - 0,258 \right)^2 \right]. \quad (23)$$

Зависимость  $C_p$  от критериев  $K_v$  и  $d/C_0$  при применении коагулянта сернокислый алюминий имеет вид:

$$C_p = 13,2 + 651,6 \cdot K_v^{1,981} \cdot \left[ 1 - 3684,807 \cdot \left( \frac{d}{C_0} - 0,258 \right)^2 \right]. \quad (24)$$

После обобщения зависимости  $C_p$  от критерия  $K_v$  и критерия  $d/C_0$  при применении коагулянта хлорное железо получено выражение:

$$C_p = 57,851 \cdot K_v^{0,138} \cdot \left[ 1 + 3,36 \cdot \left( \frac{d}{C_0} - 0,15 \right)^2 \right]^{0,576}. \quad (25)$$

Зависимость  $C_p$  от критериев  $K_v$  и  $d/C_0$  при применении коагулянта «Полвак-40»:

$$C_p = 157,09K_v^{0,507} \left( 1 - 0,75 \frac{d}{C_0} \right)^{0,528}. \quad (26)$$

Экспериментальные данные по критериям  $d/C_p$  и  $l_\phi/vt$  при очистке воды в фильтрующей части установки обобщены при применении трех коагулянтов. При экспериментах комплекс  $d/C_p$  изменялся в 1,4...2 раза; комплекс  $l_\phi/vt$  - в 3...8 раз; отношение  $C/C_p$  - в 1,5...3,3 раза. Результаты обобщений данных при использовании коагулянта сернокислый алюминий приведены на рисунках 9-10.

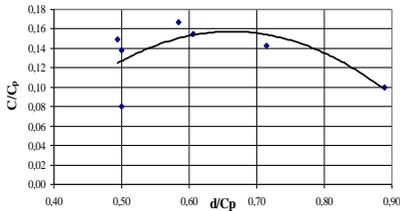


Рисунок 9 - Зависимость  $C/C_p$  от критерия  $d/C_p$  для сернокислого алюминия

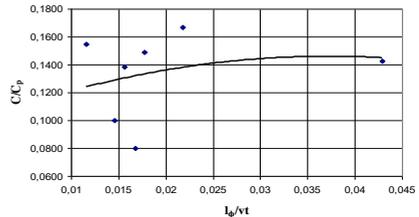


Рисунок 10 - Зависимость  $C/C_p$  от критерия  $l_\phi/vt$  для сернокислого алюминия

Экспериментальные точки обобщены по критерию  $d/C_p$  при использовании сернокислого алюминия (рисунок 9) следующим соотношением:

$$\left( \frac{C}{C_p} \right) = 0,157 - 1,142 \cdot \left( \frac{d}{C_p} - 0,51 \right)^2. \quad (27)$$

Результаты эксперимента (рисунок 10) обобщены по критерию  $l_\phi/vt$  при применении сернокислого алюминия следующим соотношением:

$$\left( \frac{C}{C_p} \right) = 0,146 - 31,14 \cdot \left( \frac{l_\phi}{vt} - 0,031 \right)^2. \quad (28)$$

При выравнивании функции с использованием соотношений (27) и (28) получим:

$$\frac{C}{C_p} = 0,1717 - 0,4 \cdot \left( \frac{d}{C_p} - 0,51 \right)^2 - 3,1 \cdot \left( \frac{l_\phi}{vt} - 0,031 \right)^{1,29}. \quad (29)$$

Аналогичным образом получены зависимости степени очистки в фильтрующей части установки при применении коагулянта хлорное железо.

$$\frac{C}{C_p} = 0,127 + 3,52 \cdot \left( \frac{d}{C_p} - 0,49 \right)^2 - 1763,92 \left( \frac{l_\phi}{vt} - 0,0114 \right)^2. \quad (30)$$

Аналогично получены зависимости степени очистки в фильтрующей части установки при применении коагулянта «Полвак-40»:

$$\frac{C}{C_p} = 0,0088 + 0,061 \cdot \left( \frac{d}{C_p} \right)^{1,4} + 923,11 \cdot \left( \frac{l_\phi}{vt} - 0,00852 \right)^2. \quad (31)$$

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

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_p}{C_0} \times \frac{C}{C_p} = \frac{0,02 + \left\{ 9,46 + 460 \cdot K_v^{0,98} \cdot \left[ 1 - 3685 \cdot \left( \frac{d}{C_0} - 0,258 \right)^2 \right] \right\}}{C_0} \times \left[ 0,1717 - 0,4 \cdot \left( \frac{d}{C_p} - 0,51 \right)^2 - 3,1 \cdot \left( \frac{l_\phi}{vt} - 0,031 \right)^{1,29} \right]. \quad (32)$$

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

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_p}{C_0} \times \frac{C}{C_p} = \left( \frac{57,851 \cdot K_v^{0,138} \cdot \left[ 1 + 3,36 \cdot \left( \frac{d}{C_0} - 0,15 \right)^2 \right]^{0,576}}{C_0} \right) \times \left[ 0,127 + 3,52 \cdot \left( \frac{d}{C_p} - 0,49 \right)^2 - 945,2 \left( \frac{l_\phi}{vt} - 0,0114 \right)^2 \right]. \quad (33)$$

Для процесса очистки с применением коагулянта «Полвак-40» получено следующее выражение, индекс корреляции 0,752 (средняя корреляционная связь):

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_p}{C_0} \times \frac{C}{C_p} = \left( \frac{157,09 K_v^{0,507} \cdot \left( 1 - 0,75 \frac{d}{C_0} \right)^{0,528}}{C_0} \right) \times \left[ 0,093 \cdot \left( \frac{d}{C_p} \right)^{1,4} - 0,075 \cdot \exp \left( 0,005 - 106,9 \cdot \frac{l_\phi}{vt} \right) \right]. \quad (34)$$

Для описания процесса, протекающего в фильтрующей части установки, для коагулянта «ПолиДАДМАХ» получены соотношения (35) и (36). В интервале значений критерия  $d/C_0$  от 0,0001 до 0,0055 получено следующее выражение, при индексе корреляции 0,968.

$$\left( \frac{C}{C_0} \right) = 0,002636 \cdot \left( \frac{d}{C_0} \right)^{-0,623} + 0,000453 \cdot \left( \frac{l_\phi}{vt} \right)^{-0,687} - 0,09581, \quad (35)$$

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

$$\left( \frac{C}{C_0} \right) = 575,47 \cdot \left( \frac{d}{C_0} \right)^{1,71} - 0,0001035 \cdot \left( \frac{l_\phi}{vt} \right)^{-0,687} - 0,0664. \quad (36)$$

Полученные 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 м/с), комплекс  $K_v = 0,21$ , при оптимальных условиях по комплексам  $d/C_p$  ( $d/C_0$ ) и  $l_\phi/vt$  (таблица 4).

Таблица 4 - Оптимальные критерии при использовании различных видов коагулянтов

Коагулянт	$d/C_0$	$d/C_p$	$l_\phi/vt$	$C/C_0$
Сернокислый 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

Наилучший эффект очистки соответствует коагулянту «ПолиДАДМАХ» ( $C/C_0 = 0,011$ ), затем «Полвак-40» - ( $C/C_0 = 0,013$ ), сернокислый 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 экспериментах был использован коагулянт «ПолиДАДМАХ». Очистка от органических соединений происходит в I ступени, а затем во II ступени. В экспериментах комплекс  $d/C_0$  изменяется в 2,27 раз,  $l_\phi/vt$  - 1,73 раза, а  $C/C_0$  - в 1,5 раза. Результаты обобщений приведены на рисунках 12-13.

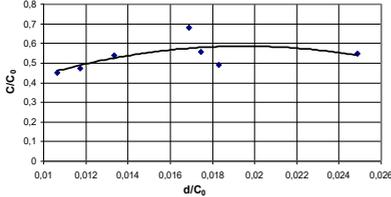


Рисунок 12. - Зависимость  $C/C_0$  от критерия  $d/C_0$  для коагулянта «ПолиДАДМАХ»

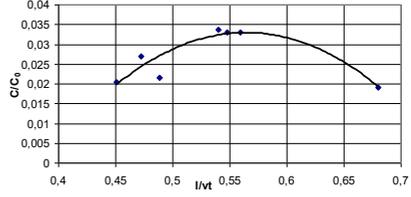


Рисунок 13. - Зависимость  $C/C_0$  от критерия  $l_\phi/vt$  для коагулянта «ПолиДАДМАХ»

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

$$\frac{C}{C_0} = 0,439 - 1764,59 \cdot \left(\frac{d}{C_0} - 0,019\right)^2 + 0,5077 \cdot \left(\frac{l}{vt} - 0,56\right)^2 \quad (37)$$

Математические модели позволяют оптимизировать экономические параметры процесса очистки вод из поверхностных источников от антропогенных загрязнений.

**В седьмом разделе** при помощи полученных математических моделей (32)-(36) для четырех коагулянтов определена эффективность и стоимость применения оптимального коагулянта. При расчетах принято:  $t=72$  ч;  $v=6$  м/ч;  $C_0=15$  мг/дм<sup>3</sup>; (в установке  $l_\phi=1,2$  м;  $W=30$  м<sup>3</sup>). В результате расчетов строится зависимость  $C/C_0=f(d/C_0)$ , рисунки 14 - 18.

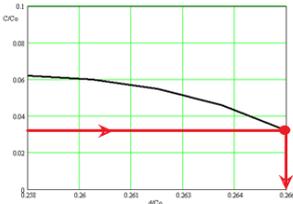


Рисунок 14. - Зависимость  $C/C_0$  от  $d/C_0$  для коагулянта сернокислый алюминий

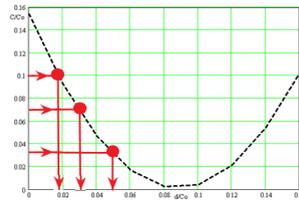


Рисунок 15. - Зависимость отношения  $C/C_0$  от  $d/C_0$  для хлорного железа

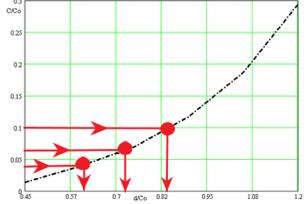


Рисунок 16. - Зависимость отношения  $C/C_0$  от  $d/C_0$  для коагулянта «Полвак-40».

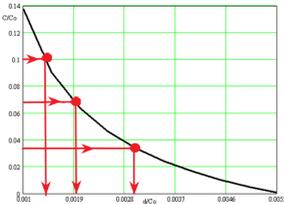


Рисунок 17. - Зависимость отношения  $C/C_0$  от  $d/C_0$  для коагулянта «ПолиДАДМАХ» в диапазоне от 0,001 до 0,0055

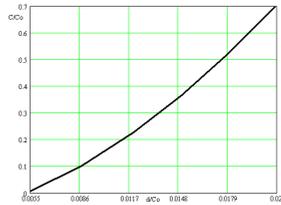


Рисунок 18. - Зависимость отношения  $C/C_0$  от  $d/C_0$  для коагулянта «ПолиДАДМАХ» в диапазоне от 0,0055 до 0,021

Для каждого коагулянта определена необходимая доза  $d$  при трех значениях остаточной концентрации загрязнений  $C=0,5; 1; 1,5$  мг/дм<sup>3</sup> (таблица 5).

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

$C$ , $мг/дм^3$	$d$ , $мг/дм^3$			
	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, представленные в таблице 5, применены для проведения дополнительных расчетов, результаты которых сведены в таблицу 6, при расходе очищаемой воды в течение фильтроцикла  $30 м^3$ . Из анализа таблицы 5 следует, что применение коагулянта серноокислого алюминия не позволяет достичь высокой степени очистки.

Таблица 6 - Результаты экономических расчетов

Реагент	$d/C_0$	$d$ , $мг/дм^3$	$d$ , кг	Стоимость, руб./тонн	Затраты на филь- троцикл, руб.
$C=1,5$ 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
$C=1$ 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
$C=0,5$ 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». При применении коагулянта «ПолиДАДМАХ» скоагулированный осадок имеет большую плотность, соответственно и малый объем, что упрощает регенерацию отстойников или осветлителей. Также для применения традиционных коагулянтов требуется реагентное хозяйство, включающее в себя растворные и расходные баки, систему насосов-дозаторов. А при применении коагулянта «ПолиДАДМАХ» установка по его дозированию занимает  $3 м^2$  и проста в эксплуатации. На основании изложенного, целесообразно использование коагулянта «ПолиДАДМАХ».

Таким образом, в работе выполнены все поставленные задачи, что позволило сформировать основные выводы и рекомендации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, на основе аналитического обзора методов современного состояния получения качественной питьевой воды, выполнено задание по теоретическому обоснованию и разработке технических решений по созданию крупномасштабной фильтровальной установки, воспроизводящей такие технологические процессы очистки питьевых вод, как: осветление в слое взвешенного осадка, фильтрование через пенополистирольную загрузку (восходящим потоком), фильтрование через угольную загрузку (нисходящим потоком). Обобщение результатов экспериментальных исследований по реагентному фильтрованию позволили получить математические модели процессов очистки на каждом этапе работы комбинированного сооружения с применением различных марок и доз коагулянтов, с целью оптимизации выбора дозы и вида реагента при различных условиях эксплуатации.

1. Впервые предложена методика оценки качества вод поверхностных ИЦВ, поступающих на ВОС, и эффективности работы ВОС по удалению органических загрязнений, являющихся показателями антропогенного воздействия на водохозяйственные комплексы городской инфраструктуры. Предложенная методика оценки многолетних данных качественных показателей ИЦВ позволяет оценить динамику изменения антропогенного воздействия на водные объекты с принятием оперативных решений моментальной и пролонгированной защиты водных объектов. Оценка эффективности очистки на ВОС даст возможность определить необходимые технические решения по ее интенсификации.

2. Обосновано формирование критериев процессов ресурсосберегающего осветления при очистке вод поверхностных ИЦВ от антропогенных загрязнений. На основании сформированных критериев разработаны математические модели данных процессов, учитывающие влияние вида и дозы применяемых коагулянтов, скоростного критерия, которые являются основными параметрами проектирования новых и эксплуатируемых водоочистных сооружений.

3. Уточнены критерии процессов фильтрации и сорбции при очистке вод поверхностных ИЦВ от антропогенных загрязнений, позволяющие получить математическую модель, полностью описывающую процессы очистки, протекающие в ней.

4. Определены для поверхностных вод РК функции плотности распределения органических загрязнений в воде поверхностных источников, рассчитаны превышения лимитирующих показателей по действующим стандартам, позволяющие оценить составляющую антропогенного воздействия на водохозяйственные комплексы, а также выявлена барьерная способность ВОС относительно органических загрязнений и установлена требуемая эффективность очистки для обеспечения показателей СанПиН 2.1.4-1074-01, а также норм ВОЗ и ЕС.

5. Разработана и запатентована установка по очистке вод поверхностных ИЦВ от взвешенных веществ и органических соединений. Конструктивные решения по очистке воды позволяют удалять более половины органических загрязнений и большую часть взвешенных веществ.

6. Впервые для условий ИЦВ РК оптимизированы параметры очистки от взвешенных веществ и органических соединений по экономическим критериям, с целью повышения барьерной способности ВОС от антропогенных загрязнений. Экономический анализ показал, что наиболее эффективным коагулянтом является «ПолиДАДМАХ», который обеспечивает высокую эффективность очистки вод от загрязнений поверхностных источников водохозяйственных комплексов, подвергшихся антропогенному воздействию; в результате оптимизации по затратам имеет второе значение среди исследуемых коагулянтов при прочих равных условиях; обладает ресурсосберегающими свойствами при его применении; экономит площадь ВОС (за счет оптимальной площади реагентного хозяйства); не оставляет остаточных соединений, опасных для здоровья человека и окружающей природной среды.

7. Разработанные и запатентованные технические решения по сооружениям очистки природных вод позволяют снижать содержание взвешенных веществ до 90%, а органических загрязнений - до 54,9% от исходного антропогенного загрязнения.

**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 фильтрационного цикла, скорости фильтрации, высоты слоя фильтрующей загрузки для поверхностных вод ИЦВ. Предложенную методику оценки эффективности работы ВОС по органическим загрязнениям также использовать для оценки работы ВОС по другим показателям качественного состава поверхностных вод.

**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, где ощущается значительная потребность в качественной питьевой воде.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации из перечня рецензируемых журналов и изданий:*

1. **Котовская Е. Е.** Оценка качественных показателей источников централизованного питьевого водоснабжения г. Симферополя и их влияния на технологию очистки [Текст] / Е.Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. — Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского – 2017. – №7(59). – С. 73-81.

2. **Котовская Е. Е.** Определение эффективности очистки воды поверхностных источников централизованного водоснабжения от органических загрязнений на примере г. Симферополя [Текст] / А.К. Стрелков, Е.Е. Котовская, С.Ю. Теплых // Градостроительство и архитектура. — Самара: Самарский государственный технический университет – 2017. – №3(28). – С. 35-45.

3. **Котовская Е. Е.** Анализ возможности внедрения системы непрерывной промывки на водопроводных очистных сооружениях Республики Крым [Текст] / И.В. Николенко, Е.Е. Котовская Э.Э. Фетляев, // Строительство и техногенная безопасность. — Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского – 2018. – №11(63). – С. 147-159.

4. **Котовская Е. Е.** Анализ влияния качественного состава питьевых вод в Республике Крым на здоровье населения [Текст] / И.В. Николенко, Е.Е. Котовская Н.В. Луд, // Строительство и техногенная безопасность. — Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского – 2022. – №27(79). – С. 125-143.

### *Публикация в международном издании:*

5. **Котовская Е.** Эффективность работы водопроводных очистных сооружений г. Симферополя по удалению органических загрязнений / Елена Котовская // MOTROL. — Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. — Lublin, 2012. — Vol. 14, № 6. — P. 193—200.

### *Публикации в сборниках трудов конференций:*

6. **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.

7. **Котовская Е. Е.** 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.

8. **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. Зб наук. праць. — Харків, 2012. — Вип. 70. — С. 301—307.

9. **Котовская Е. Е.** Методика оценки степени очистки воды поверхностных источников централизованного водоснабжения от органических загрязнений / Е. Е. Котовская // Науковий вісник будівництва. — Харків, 2013. — Вип. 71. — С. 402—409.

### *Объекты интеллектуальной собственности:*

10. Пат. 7595 Україна, B01D 21/00. Прояснювач для очищення води / М. М. Гіроль, С. Д. Бойчук, В. О. М'якішев, О. С. Котовська. — № u20041210372 ; заявл. 16.12.2004; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6.

11. Пат. 45093 Україна, МПК(2009) C02F 1/00, B01D 25/00. Пристрій для очищення води / О. С. Котовська. — № u2009 05184 ; заявл. 25.05.2009 ; опубл. 26.10.2009, Бюл. № 20.

*Публикации в других изданиях:*

12. **Котовская Е. Е.** Гидрохимическая оценка качества воды водохранилища "Межгорное" и оптимизация технологии водоподготовки / Е. Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов. — Симферополь: НАПКС, 2006. — Вып. 13—14. — С. 186—188.
13. **Котовская Е. Е.** Экспериментальная проверка эффективности современных реагентов при очистке природных вод / Е. Е. Котовская, В. А. Мякишев // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов. — Симферополь: НАПКС, 2006. — Вып. 15—16. — С. 223—226.
14. **Котовская Е. Е.** Определение оптимальных доз коагулянта ПолиДАДМАХ при очистке природных вод в системе централизованного водоснабжения / Е. Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов. — Симферополь: НАПКС, 2009. — Вып. 27. — С. 87—92.
15. **Котовская Е. Е.** Анализ эффективности работы водопроводных очистных сооружений по органическим загрязнениям / Е. Е. Котовская / Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов. — Симферополь: НАПКС, 2011. — Вып. 37. — С. 122—130.
16. **Котовская Е. Е.** 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. Сб. науч. трудов. — Симферополь: НАПКС, 2012. — Вып. 41. — С. 55—59.
17. **Котовская Е. Е.** 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. Сб. науч. трудов. — Симферополь: НАПКС, 2012. — Вып. 44. — С. 100—104.
18. **Котовская Е. Е.** Сравнение экономической эффективности различных коагулянтов при очистке природных вод [Текст] / Е.Е. Котовская // Строительство и техногенная безопасность. — Симферополь: Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского – 2016. — №5(57). — С. 62-66.

## АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 26.05.2023 г.  
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз.

Отпечатано с оригинал-макета в типографии ИП Бражникова Д.А.  
295053, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Оленчука, 63,  
тел. +7 978 71 72 902, e-mail: braznikov@mail.ru

