

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОДООЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF MEASURES TO OPTIMIZE WASTEWATER DISINFECTION USING ULTRAVIOLET RADIATION AT WATER TREATMENT PLANTS

**S. Uldiyarov
N. Nazarova
M. Golovko**

Summary. The study addresses the environmental risks associated with the use of chlorine-containing reagents (formation of toxic organochlorine compounds — OCs) for wastewater disinfection at the treatment plant (WWTP) in Almet'yevsk. The aim is to develop an engineering and technological solution to replace chlorination with ultraviolet (UV) disinfection. A comprehensive analysis of wastewater quality at various treatment stages (determination of suspended solids (SS), BOD₅, petroleum products, nitrates, ammonium ions) was performed using standardized methods (gravimetry, titrimetry, chromatography, photometry). The existing technological scheme of the WWTP with a capacity of 40 thousand m³/day is described. Based on the analysis, the integration of UV units as a final disinfection stage is proposed. This will eliminate the formation of OCs, increase the environmental safety of treated effluent discharge into the receiving water body, and ensure compliance with modern environmental regulations.

Keywords: Wastewater disinfection, ultraviolet radiation, organochlorine compounds (OCs), environmental risk, wastewater treatment plant (WWTP), sodium hypochlorite.

Ульдияров Станислав Владимирович

мастер очистных сооружений
АО «Альметьевск-Водоканал»
wnl_08@mail.ru

Назарова Надежда Петровна

канд. биол. наук, доцент, Альметьевский филиал
Казанского национального исследовательского
технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ
wnl_08@mail.ru

Головки Марина Викторовна

канд. пед. наук, доцент, Альметьевский филиал
Казанского национального исследовательского
технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ
mvgolovko@kai.ru

Аннотация. Исследование посвящено проблеме экологических рисков, связанных с применением хлорсодержащих реагентов (образование токсичных хлорорганических соединений — ХОС) при обеззараживании сточных вод (СВ) на очистных сооружениях (ОС) г. Альметьевск. Целью работы является разработка инженерно-технологического решения по замене хлорирования на метод ультрафиолетового (УФ) обеззараживания. Проведен комплексный анализ качества СВ на различных стадиях очистки (определение взвешенных веществ (ВВ), БПК₅, нефтепродуктов, нитратов, ионов аммония) с использованием стандартизированных методов (гравиметрия, титриметрия, хроматография, фотометрия). Описана существующая технологическая схема ОС производительностью 40 тыс. м³/сутки. На основе анализа предложена интеграция УФ-установок в качестве финишной ступени обеззараживания, что позволит исключить образование ХОС, повысить экологическую безопасность сброса очищенных вод в водный объект и обеспечить соответствие современным природоохранным требованиям.

Ключевые слова: обеззараживание сточных вод, ультрафиолетовое излучение, хлорорганические соединения (ХОС), экологический риск, очистные сооружения, гипохлорит натрия.

Введение

Проблема безопасного обеззараживания сточных вод (СВ) перед сбросом в водные объекты остается актуальной. Традиционное хлорирование, широко применяемое на очистных сооружениях (ОС), в том числе и на ОС г. Альметьевск, сопряжено с существенным экологическим риском. Присутствие в сточной жидкости и воде водоема-приемника разнообразных органических соединений приводит к их взаимодействию

с активным хлором (гипохлоритом натрия, NaClO) с образованием токсичных хлорорганических соединений (ХОС). Поступление стойких ХОС в водную экосистему вызывает дисбаланс в развитии гидробионтов (планктона, бентоса, рыб) и нарушает сложившиеся трофические связи [12]. Данный фактор, наряду с потенциальным образованием других хлорсодержащих токсикантов (например, тригалометанов), является ключевым аргументом для поиска и внедрения альтернативных, более безопасных методов обеззараживания.

Одним из наиболее перспективных и экологически чистых методов является обеззараживание ультрафиолетовым (УФ) излучением [2, 11]. Принцип действия основан на бактерицидном эффекте УФ-лучей с длиной волны 200–300 нм (оптимум ~254 нм), которые повреждают ДНК и РНК микроорганизмов, приводя к их инактивации. К преимуществам УФ-метода относятся: отсутствие образования токсичных побочных продуктов дезинфекции, высокая эффективность против широкого спектра патогенов (бактерии, вирусы, простейшие), компактность установок, простота эксплуатации и безопасность для персонала [3, 11].

Цель исследования — разработка инженерно-технологического решения, направленного на оптимизацию процессов водоподготовки с интеграцией УФ установок в систему обеззараживания, обеспечивающих повышение эффективности и экологической безопасности водочистных комплексов.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в 2024–2025 гг. на базе лаборатории АО «Альметьевск-Водоканал». Организацию и проведение режимных наблюдений за состоянием воды в реке Мурат осуществляли в соответствии с [18]. Для выявления морфологических аномалий у особей *Carassius carassius*, используемых в качестве тест-объектов при биоиндикации, применяли стандартизированные методы исследования возраста и роста рыб, изложенные в руководстве Н.И. Чугуновой (1959) [10]. Объектом исследования являлись сточные воды, поступающие на очистные сооружения г. Альметьевск производительностью 40 тыс. м³/сутки. Для оценки качества СВ на различных стадиях очистки и обоснования внедрения УФ-обеззараживания применялся комплекс стандартизированных физико-химических методов:

1. Определение концентрации взвешенных веществ (ВВ) в пробах СВ определялась гравиметрическим методом. Принцип метода: Отделение взвешенных частиц фильтрованием пробы СВ через предварительно подготовленный мембранный фильтр с известной массой. Количественное определение основано на измерении прироста массы фильтра после высушивания осадка до постоянной массы при температуре 105±2°C.

Оборудование и материалы: мембранные фильтры (диаметр пор 0,45 мкм, диаметр 47 мм), аналитические весы (точность ±0,0001 г), сушильный шкаф (термостатируемый, 105±2°C), эксикатор, вакуумный насос и фильтровальная установка, мерный цилиндр (емкость 100–1000 мл).

Процедура:

1. Подготовка фильтра: мембранный фильтр помещался в сушильный шкаф на 60 минут при тем-

пературе 105±2°C. После высушивания фильтр охлаждался в эксикаторе до комнатной температуры и взвешивался на аналитических весах (масса *b*).

2. Отбор пробы: измерялся объем пробы сточной воды (*V*, мл). Для проб с высокой мутностью использовался объем 1000 мл.
3. Фильтрование: отмеренный объем пробы фильтровался через подготовленный фильтр под вакуумом.
4. Сушка осадка: фильтр с осадком помещался в сушильный шкаф на 60 минут при 105±2°C, затем охлаждался в эксикаторе до комнатной температуры.
5. Взвешивание: фильтр с осадком взвешивался на аналитических весах (масса *a*).

Полученную концентрацию ВВ рассчитывали по формуле (1):

$$C = \frac{(a - b) \times 1000 \times 1000}{V}, \quad (1)$$

где: *a* — вес фильтра с осадком, 20 г;
b — вес фильтра без осадка, 8,8 г;
V — объем сточной воды, взятой для анализа, мл;
 1000 — пересчет на л;
 1000 — пересчет на мг.

2. Определение показателя биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК₅). Концентрация БПК определялась стандартным титриметрическим (или манометрическим) методом [13, 17] в модификации Винклера. Измерялся дефицит растворенного кислорода (РК) до и после 5-суточной (120±0,5 ч) инкубации проб в темноте при 20±1°C. Концентрация РК определялась йодометрическим титрованием. БПК₅ рассчитывалось как разность по формуле 2:

$$\text{БПК}_5 = X_{\text{н}} - X_{\text{к}}, \quad (2)$$

*X*_н — массовая концентрация РК в анализируемой пробе (начальная концентрация), мг/л;

*X*_к — массовая концентрация РК в инкубированной в течение 5 суток пробе, мг/л.

3. Определение содержания нефтепродуктов: выполнялось методом жидкостно-адсорбционной хроматографии на оксиде алюминия (активность Brockmann I) с гравиметрическим окончанием согласно [14, 16]. Нефтепродукты экстрагировались из пробы гексаном (3×50 мл), экстракт очищался на хроматографической колонке с Al₂O₃. После отгонки растворителя на водяной бане (~80°C) и досушивания при 80±2°C, масса нефтепродуктов определялась взвешиванием.

Массу нефтепродуктов (A) вычисляли по формуле (3) по разности массы стаканчика с остатком (A_{T1}) и пустого стаканчика (A_{2T1}):

$$A = A_{T1} - A_{2T1}, \quad (3)$$

Содержание нефтепродуктов (X_{T1} , млн^{-1}) вычисляли по формуле (4):

$$X_{T1} = \frac{A_{T1}}{B_{T1}} \times 1000, \quad (4)$$

A_{T1} — найденное количество нефтепродуктов (для $T1$), мг;

B_{T1} — навеска образца, взятая для анализа (для $T1$), г.

- Определение нитрат-анионов (NO_3^-): осуществлялось экспресс-колориметрическим методом с использованием коммерческих тест-полосок, основанным на реакции диазотирования [15]. Фильтрованная проба (мембранный фильтр 0,45 мкм) анализировалась путем погружения тест-полоски, инкубации 5 мин и сравнения развившейся окраски со стандартной шкалой визуально или с помощью рефлектометра.
- Определение ионов аммония (NH_4^+): проводилось стандартным фотометрическим методом с реактивом Несслера ($\text{K}_2[\text{HgI}_4]$) [5]. После фильтрации про-

бы (0,45 мкм) и при необходимости предварительной обработки (удаление сульфидов, коррекция мутности), к 50 мл пробы добавлялись буферный раствор (ЭДТА или цитрат Na/KOH , pH 9,5–10,0) и реактив Несслера. Через 10 мин оптическая плотность раствора измерялась на спектрофотометре при $\lambda=425$ нм. Концентрация NH_4^+ определялась по калибровочному графику, построенному для стандартных растворов (0,0–2,0 мг/л).

Расчет концентрации ионов аммония производили по формуле (5):

$$X = \frac{A \times 1000}{V}, \quad (5)$$

X — содержание ионов аммония, мг/л;

A — содержание ионов аммония, найденное по калибровочному графику или шкале стандартных растворов, мг;

V — объем пробы, взятой для анализа, мл

Результаты и обсуждение

Характеристика объекта исследования. Ключевым источником хозяйственно-питьевого водоснабжения региона является поверхностный водозабор из реки Кама, что подчеркивает важность минимизации антропогенной нагрузки, в том числе от сброса очищенных СВ ОС г. Альметьевск. Существующая схема ОС канализации

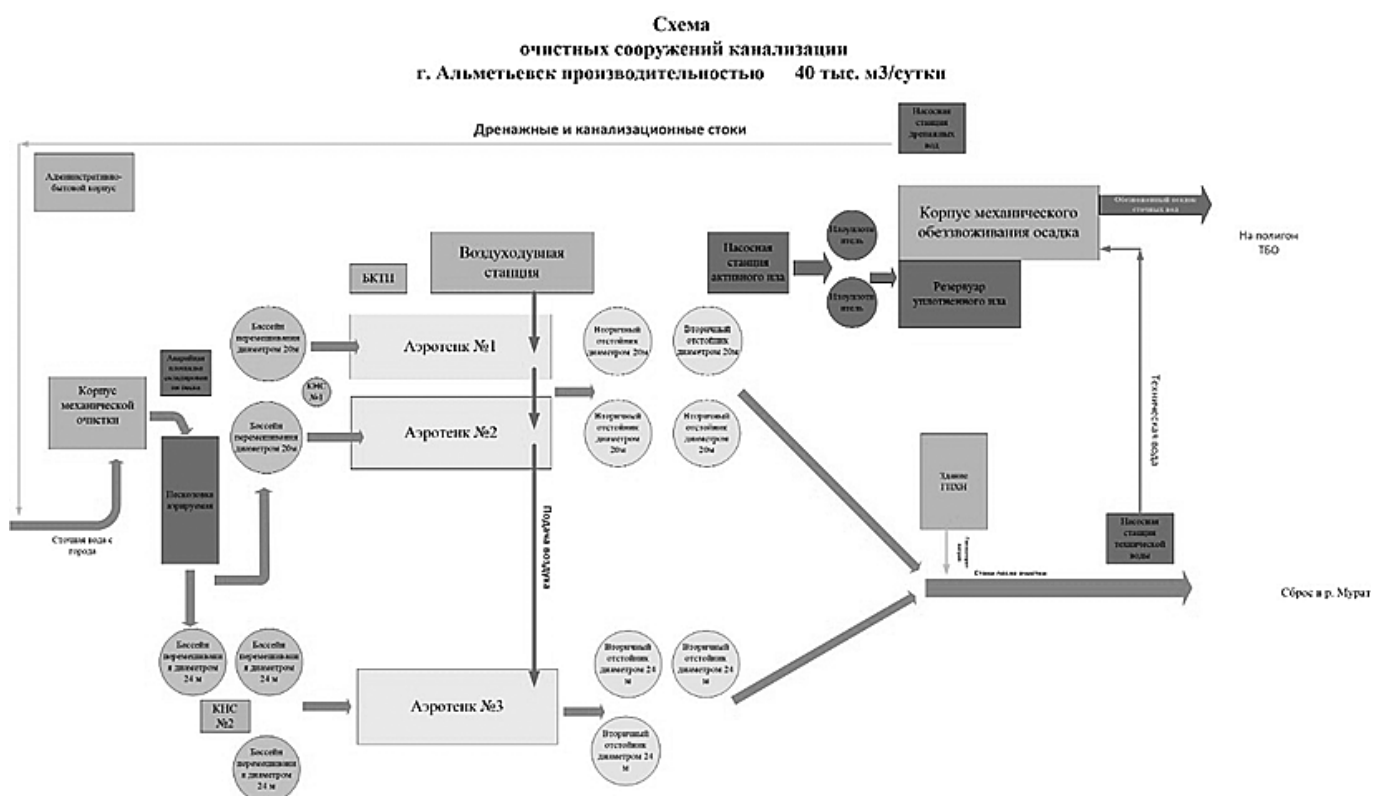


Рис. 1. Схема очистных сооружений канализации г. Альметьевск производительностью 40 тыс. м³/сутки

производительностью 40 тыс. м³/сутки включает следующие основные стадии (Рис. 1):

1. Прием и механическая очистка: СВ поступают по двум коллекторам в приемную камеру. Крупные отбросы задерживаются механическими решетками, прессуются и вывозятся на полигон ТКО. Предварительно очищенный сток направляется в аэрируемые песколовки для удаления минеральных включений (песок, шлак) путем седиментации в винтовом потоке. Обессоленный песок промывается и обеззараживается.
2. Первичное отстаивание: Осветленные в песколовках СВ поступают в распределительную чашу первичных отстойников.
3. Биологическая очистка: Сток из первичных отстойников направляется в бассейны перемешивания, функционирующие как зона денитрификации за счет рециркуляции нитратсодержащей смеси из аэротенков. Далее смесь СВ, активного ила и рецикла подается в систему аэротенков (два аэротенка по четыре коридора, один — по три коридора), где происходит основное окисление органических загрязнений и нитрификация.
4. Вторичное отстаивание: Иловая смесь из аэротенков разделяется во вторичных отстойниках. Осветленная вода — очищенные СВ — направляется на стадию обеззараживания.
5. Обеззараживание: В существующей схеме применяется химическая дезинфекция гипохлоритом натрия (NaClO) для инактивации патогенной микрофлоры перед сбросом в водный объект. Контролируемый параметр остаточного хлора составляет $\leq 0,3$ мг/л [19].

4. Характеристика точки сброса. Сброс очищенных и обеззараженных сточных вод (СВ) осуществляется через береговой выпускной узел в акватории реки Мурат (координаты: 54°55'41" с.ш., 52°14'40" в.д.). Локализация в 1,3 км выше зоны бифуркации с рекой Степной Зай минимизирует антропогенное воздействие на устьевые экосистемы.

5. Оценка эффективности очистки СВ

В Таблице 1 представлены результаты мониторинга ключевых физико-химических и микробиологических показателей: концентрации загрязняющих веществ во входной СВ (сырьевая смесь), концентрации загрязняющих веществ в очищенных и обеззараженных СВ на выходе с ОСК и установленные нормативы предельно допустимых концентраций (ПДК) для сброса очищенных СВ в водные объекты рыбохозяйственного значения (ПДС).

Эффективность элиминации взвешенных веществ из СВ достигла 90 %, при этом концентрация на выходе (9,8 мг/дм³) соответствовала предельно допустимому значению (ПДС = 10,0 мг/дм³). Данный результат подтверждает высокую производительность механических (фильтрация, отстаивание) и биологических (биопленки, активный ил) этапов очистки, обеспечивающих седиментацию и биodeградацию частиц. Концентрация нитратов возросла на 45 % (с 0,84 до 1,22 мг/дм³), что обусловлено процессами нитрификации — окисления аммония (NH₄⁺) до нитратов под действием нитрифицирующих бактерий (род *Nitrobacter*, *Nitrosomonas*) в аэробных условиях. Полученное значение не превышало ПДС (7,24 мг/дм³), что исключает риск эвтрофикации водоёмов. Концентрация нитритов на выходе (0,25 мг/дм³) соответствовала верх-

Таблица 1.

Качественный состав сточных вод на входе на ОСК, на выходе с ОСК и нормативы ПДС

Наименование показателей	Единицы измерения	Концентрация на входе	Концентрация на выходе	ПДС в сточных водах	Эффективность (%)
Взвешенные вещества	мг/дм ³	98,5	9,8	10,0	90
Азот нитратов (NO ₃ ⁻ -N)	мг/дм ³	0,84	1,22	7,24	-45,2**
Азот нитритов (NO ₂ ⁻ -N)	мг/дм ³	0,19	0,25	0,25	-31,6**
БПК полн	мг/дм ³	103,5	27,1	24,00	73,8*
Нефтепродукты	мг/дм ³	2,35	1,03	1,42	56,2
Фосфаты (PO ₄ ³⁻)	мг/дм ³	2,31	0,88	1,22	61,9
Хлориды (Cl ⁻)	мг/дм ³	75,22	73,17	75,63	2,7
Ион аммония (NH ₄ ⁺ -N)	мг/дм ³	20,4	15,2	18,165	25,5
Коли-индекс (общие колиформные)	Ед/л		<1000	1000	—**

Примечание: *Превышение ПДС на 12,9 %; **Рост концентрации из-за нитрификации

ней границе ПДС, что свидетельствовало о частичной нитрификации или кратковременной перегрузке системы. Учитывая токсичность NO_2^- для гидробионтов, требуется коррекция режима аэрации для завершения окисления нитритов до нитратов. Снижение БПК₅ на 73,8 % (со 103,5 мг $\text{O}_2/\text{л}$ до 27,1 мг $\text{O}_2/\text{л}$) указывало на недостаточную эффективность биодеградации органического субстрата, так как выходное значение превышало ПДС (24,0 мг $\text{O}_2/\text{л}$) на 12,9 %. Вероятными причинами таких значений являются гипоксия в аэротенках (дефицит растворенного кислорода), сниженная метаболическая активность микрофлоры активного ила или высокая органическая нагрузка. Для оптимизации рекомендовано увеличение времени гидравлического удержания и интенсификация аэрации. Эффективность деструкции нефтепродуктов составила 56,2 % (с 2,35 до 1,03 мг/дм³), что соответствовало ПДС (1,42 мг/дм³). Основные механизмы очистки СВ на очистных сооружениях включают флотацию и микробное разложение углеводов. Для предотвращения вторичного загрязнения необходима регулярная ревизия нефтеуловителей. Концентрация фосфатов снижена на 61,9 % (с 2,31 до 0,88 мг/дм³), что близко к значению ПДС (1,22 мг/дм³). Осаждение фосфора солями $\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+}$ требует строгого контроля дозировки коагулянтов для минимизации остаточных концентраций. Минимальное снижение хлоридов (2,7 %, с 75,22 до 73,17 мг/дм³) подтверждает неэффективность традиционных методов очистки для ионов Cl^- . Накопление хлоридов в водоёмах может индуцировать рост минерализации, что диктует необходимость внедрения мембранных технологий (обратный осмос).

Эффективность удаления ионов аммония составляла 25,5 % (с 20,4 до 15,2 мг/дм³), при этом выходная концентрация приближалась к значению ПДС (18,165 мг/дм³). Низкая степень нитрификации связана с дефицитом растворённого кислорода или субоптимальными температурными условиями. В связи с этим нами рекомендована модернизация аэрационных систем и терморегуляция. Показатель коли-индекса (<1000 ед./л) соответствовал нормативам (ПДС = 1000 ед./л), что подтверждает эффективность дезинфекции (гипохлорирование). Для предотвращения резистентности микрофлоры необходим периодический мониторинг и ротация дезинфектантов.

Таким образом, в ходе анализа нами было установлено, что наибольшая эффективность в очистке СВ на очистных сооружениях достигнута для взвешенных веществ (90 %) и нефтепродуктов (56,2 %). Проблемными параметрами СВ стали БПК (превышение ПДС) и ион аммония (низкая эффективность очистки). Высокое значение БПК может вызывать дефицит кислорода в водоемах. Пограничные значения нитритов и аммония требуют постоянного контроля, так как превышение их концентраций может спровоцировать ухудшение санитарного состояния водного объекта. В качестве рекомен-

дательных мер были предложены оптимизация аэрации в биологических реакторах, внедрение дополнительных ступеней очистки для фосфатов (химическое осаждение) и БПК (анаэробные процессы), модернизация для удаления хлоридов.

6. Проектирование УФ-установки. Проектирование УФ установок для обеззараживания воды основывалась на корреляции между дозой бактерицидного облучения (мДж/см²) и микробиологической нагрузкой (КОЕ/мл). Согласно [2–4], минимальная эффективная доза составляет 16 мДж/см², обеспечивающая 99,9 % инактивацию вегетативных форм бактерий. Для устойчивых патогенов (споры, вирусы) требуются повышенные дозы: кишечная палочка (*E. coli*): 10–20 мДж/см²; энтеровирусы: 25–40 мДж/см²; *Cryptosporidium parvum*: ≥40 мДж/см².

Расчет дозы (D) учитывает интенсивность излучения (I , Вт/м²), время экспозиции (t , с) и УФ-трансмиссию воды (T , %) и рассчитывался по формуле (6):

$$D = I \times t \times T \times 10^{-3}, [\text{мДж/см}^2], \quad (6)$$

Производительность установки (Q) зависит от количества ламп (n), их мощности (P , Вт) и КПД системы (η), согласно выражению (7):

$$Q = \frac{n \times P \times \eta}{D}, [\text{м}^3/\text{ч}], \quad (7)$$

Проектирования УФ-системы проводили в несколько этапов: определяли целевую степень обеззараживания на основе эпидемиологических рисков, производили расчет требуемой дозы с учетом оптической плотности воды, осуществляли подбор типа ламп (низкого давления (ЛНД, 254 нм) для малых расходов; амальгамные (200–350 Вт) для производительности до 3000 м³/ч).

Расчет количество необходимых ламп для объекта с $Q=1300 \text{ м}^3/\text{ч}$, $D=100 \text{ мДж/см}^2$, ЛНД (60 Вт, $\eta = 35 \%$), ЛВД (200 Вт, $\eta = 45 \%$) проводили посредством преобразования формулы (3):

$$n = \frac{Q \times D}{P \times \eta} = \frac{1300 \times 100}{60 \times 0,35} \approx 6000 \text{ шт ЛНД}$$

$$n = \frac{Q \times D}{P \times \eta} = \frac{1300 \times 100}{200 \times 0,45} \approx 1400 \text{ шт ЛВД}$$

ЛВД демонстрируют на 15 % меньшее удельное энергопотребление (кВт·ч/м³) по сравнению с ЛНД, что связано с высокой плотностью мощности излучения и уменьшением количества ламп на единицу производительности.

Проектирование УФ установок для обеззараживания воды требует соблюдения баланса между техни-

ко-экономической эффективностью и бактерицидной мощностью. Ключевым аспектом является оптимизация количества и мощности УФ-ламп для минимизации капитальных затрат при обеспечении заданной производительности. Качество исходной воды, включая параметры биохимического (БПК) (до 10 мг O_2 /л) и химического (ХПК) потребления кислорода (до 50 мг O_2 /л), концентрацию взвешенных веществ (до 10 мг/л), железа (до 1 мг/л) и нефтепродуктов (до 0,2 мг/л), напрямую влияет на целесообразность применения УФ-технологий. Коллоидные и взвешенные частицы (>30 мг/л) снижают эффективность обеззараживания за счет рассеивания УФ-излучения, что требует предварительной механической или коагуляционной обработки. Следовательно, максимальный предел содержания взвешенных веществ, при котором расчет имеет технико-экономическую целесообразность, не должен превышать 30 мг/л.

Определение общей требуемой бактерицидной мощности излучателей (F_B) производили по выражению (8):

$$F_B = - \frac{Q_{\text{час}} \times \alpha \times k \times \lg(P / P_0)}{1563,4 \times n_{\cdot} \times n_0}, [\text{Вт}] \quad (8)$$

где $Q_{\text{час}}$ — требуемая производительность, $\text{м}^3/\text{час}$;

α — коэффициент поглощения обрабатываемой воды (поверхностные и подземные источники), $\alpha = 0,2-0,6$ для поверхностных источников.

k — коэффициент безопасности, $k = 2500$.

P_0 — исходная концентрация микроорганизмов на 1 м^3 , $P_0 = 1000 \text{ КОЕ}/\text{м}^3$.

P — конечная концентрация микроорганизмов (после обработки), $P = 1 \text{ КОЕ}/\text{м}^3$.

n_0 — коэффициент облучения, зависящий от показателей воды и толщины ее слоя, $n_0 = 0,9$.

$n_{\cdot}$ — коэффициент бактерицидного потока для погружного излучателя, $n_{\cdot} = 0,9$.

$$F_B = - \frac{1300 \times 0,3 \times 2500 \times \lg\left(\frac{1}{1000}\right)}{1563,4 \times 0,9 \times 0,9} = 2310 \text{ Вт}$$

Следовательно, для $Q = 1300 \text{ м}^3/\text{ч}$ требуемая бактерицидная мощность излучателей составит 2310 Вт.

В проектировании УФ систем обеззараживания ключевым параметром является доза бактерицидного облучения (D , $\text{мДж}/\text{см}^2$), рассчитываемая по формуле (1). Механизм действия предлагаемой установки сводится к тому, что Среднее время пребывания воды в обеззараживающей камере рассчитывалось нами по формуле (9) [4]:

$$t = \frac{S \times L}{278 \times Q}, \quad (9)$$

где S — поперечное сечение камеры обеззараживания в см, $S = 950 \text{ см}$;

L — длина камеры обеззараживания в см, $L = 10 \text{ м}$;

Q — расход воды в $\text{м}^3/\text{ч}$;

278 — коэффициент пересчета размерности единиц.

Следовательно, получили результаты расчета времени экспозиции t (с):

$$t = \frac{950 \text{ см} \times 1000 \text{ см}}{278 \times 1300} = \frac{950000}{361400} \approx 3 \text{ сек}$$

Доза облучения, согласно выражению (1), составила:

$$D = 80 \times 3 = 240 \text{ мДж}/\text{см}^2.$$

Для установок доза в $240 \text{ мДж}/\text{см}^2$ является максимальной дозой облучения для суточного объема $31500 \text{ м}^3/\text{сут}$ воды. Следовательно, доза $240 \text{ мДж}/\text{см}^2$ обеспечивает инактивацию устойчивых патогенов (например, вирусов гепатита А, требующих $\geq 100 \text{ мДж}/\text{см}^2$). Суточный объем 31500 м^3 соответствовал производительности установки при времени контакта $t = 3 \text{ с}$ и площади сечения камеры $S = 15 \text{ м}^2$ (расчет по формуле $Q = S \times v$, где v — скорость потока).

8. Система биомониторинга

Разработан биокомплекс с использованием *Carassius carassius* (рис. 2). Принцип работы системы основывался на том, что пробы из вторичного отстойника проходили доочистку (войлочный фильтр + УФ) перед подачей в аквариум (Вторичный отстойник → Вибрационный насос → Войлочный фильтр → УФ-модуль → Аквариум с *C. carassius* → Аэратор + Термостат). В качестве критериев, согласно [1, 6, 7, 9, 10] оценки выбраны поведенческие реакции (двигательная активность, ориентация), выживаемость (>95 % за 24 ч) и морфологические аномалии (чешуя, плавники). При возникновении угрожающих реакций инициировался химико-аналитический контроль.

Следовательно, при регистрации аномальных поведенческих реакций (снижение активности, дезориентация) [9] инициируется отбор проб для углубленного химико-аналитического контроля. Отсутствие негативных реакций у тест-организмов в течение экспозиции свидетельствует о достижении нормативных показателей безопасности, разрешающих сброс воды в природные водоемы.

В рамках исследования проведен сравнительный анализ эффективности УФ обеззараживания и химической дезинфекции гипохлоритом натрия (NaClO). Методология исследования включала оценку степени элиминации микробиологических (колиформные бактерии, энтерококки) и химических (БПК₅, нефтепродукты) загрязнителей. Данные систематизированы в Таблице 2, отражающей динамику снижения концентраций загрязняющих веществ на различных этапах очистки.



а)



б)

Рис. 2. Очистка сточных вод

(а) — система биомониторинга качества сточных вод, б) — УФ-лампа для доочистки в биокомплексе

Таблица 2.

Сравнительная эффективность гипохлорита натрия и УФ-облучения

Параметр	NaClO, мг/л	УФ, мг/л	Норматив, мг/л	Преимущество метода
Взвешенные вещества	11,2	9,0	12,5	УФ ($\Delta = 20\%$)
БПК ₅	1,8	1,3	2,9	УФ ($\Delta = 28\%$)
Нефтепродукты	0,025	0,008	0,05	УФ ($\Delta = 68\%$)
Нитрат-анион	0,072	0,051	0,087	УФ ($\Delta = 29\%$)
Фторид-анион	<0,1	0,03	0,05	УФ (в рамках ПДК)
Аммоний-ион	1,02	0,91	1,05	УФ ($\Delta = 11\%$)

Примечание:

Δ — разница в эффективности между методами.

Для фторид-аниона значение NaClO (<0,1 мг/л) приближено к нормативу,

УФ — значительно ниже.

Таблица 2 демонстрирует значимые различия в эффективности двух методов обеззараживания СВ. При УФ-обработке снижала концентрацию взвешенных веществ до 9 мг/л (норматив: 12,5 мг/л), гипохлорит — до 11,2 мг/л. Следовательно, УФ обработка на 20% эффективнее в удалении взвешенных частиц. По показателю БПК₅ значение УФ обработки было на 28 % эффективнее, чем гипохлорит и составило 1,3 мг/л (при нормативе

= 2,9 мг/л), гипохлорит: 1,8 мг/л. «Степень разрушения нефтепродуктов при УФ-облучении зависит от состава и молярной массы веществ и снижается с ростом их начальной концентрации. Предварительная фильтрация техногенной воды не только снижает начальное содержание в ней нефтепродуктов, но и повышает эффективность УФ деструкции до 80 % [8]. Согласно, нашим исследованиям, эффективность очистки с помощью УФ при содержании нефтепродуктов выше в 3 раза за счет фотоокисления углеводородов, чем при применении гипохлорита. Также прослеживалась эффективность на 29 % УФ обработки в контроле нитратов, по сравнению с гипохлоритом. Лучшая нитрификация за счет активации аэробных бактерий была также отмечена при обработке УФ по сравнению с применением гипохлорита натрия.

Заключение

Проведенное компаративное исследование продемонстрировало, что УФ облучение (длина волны 254 нм) оказывает статистически значимое влияние ($p < 0,05$) на эффективность деструкции микробиологических и органических загрязнителей в СВ. Установлено, что фотохимические реакции, индуцированные УФ-излучением, приводят к дозозависимому снижению коли-индекса (на 99,9 %) и окислению устойчивых ксенобиотиков за счет генерации реактивных форм кислорода ($\text{OH}^\cdot$, O_3). Полученные данные, верифицированные в соответствии с методиками ГОСТ Р 56237–2014, подтверждают целесообразность внедрения УФ-дезинфекции в качестве третичной ступени очистки для обеспечения

соответствия требованиям СанПиН 1.2.3685–21 и минимизации экотоксикологических рисков.

1. Существующая система очистки обеспечивает соответствие ПДС по большинству параметров, но требует оптимизации:
 - Превышение БПК₅ (27,1 мг/л) и пограничные значения NH₄⁺ (15,2 мг/л).
 - Риск образования токсичных NO₂⁻ при сбоях нитрификации.

2. УФ-обеззараживание демонстрирует преимущества перед хлорированием:

- На 20–68 % выше эффективность по ключевым загрязнителям.
- Доза 240 мДж/см² гарантирует инактивацию устойчивых патогенов.
- Отсутствие экологических рисков от ХОС.

3. Внедрение биомониторинга с *Carassius carassius* позволяет оперативно детектировать токсикологические угрозы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горлачева Е.П., Афонин А.В. Серебряный карась *Carassius auratus gibelio* (Bloch, 1782) как индикатор состояния экосистемы озера Кенон // Ученые записки ЗабГУ. Сер. Биологические науки. 2017. Т. 12, № 1. С. 6–12.
2. Матафонова Г.Г., Батоев В.Б. Применение ультразвука и ультрафиолетового излучения в гибридных методах обеззараживания воды. Электронная обработка материалов, 2019. № 55(4). с. 20–25. DOI: 10.5281/zenodo.3369702
3. Медведева И.В., Медведева О.М., Студенок А.Г., Студенок Г.А., Цейтлин Е.М. Новые композитные материалы и процессы для химических, физико-химических и биохимических технологий водоочистки. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 1. С. 6–27.
4. МУ 2.1.5.732–99. Санитарно-эпидемиологический надзор за обеззараживанием сточных вод ультрафиолетовым излучением: Методические указания. — М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. — 16 с.
5. ПНДФ 14.1:2:3.1–95. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации ионов аммония в природных водах фотометрическим методом с реактивом Нesslera: дата введения 2015-05–12 // Центр метрологии и сертификации «СЕРТИМЕНТ» Уральского отделения РАН — Москва. 2017 г. — 26 с.
6. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных). М., из-во «Пищевая промышленность», 1939.
7. Соломонов Н.М., Ньюканов А.М. Патоморфологические изменения у рыб на участке бассейна реки Вилюй // Проблемы региональной экологии. 2019. №4. С. 25–29.
8. Соснина Н.А., Штарева А.В. Фотолитическая деструкция как способ очистки сточных вод от органических соединений. Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2011. №3(22). С. 75–84.
9. Чеснокова С.М. Биологические методы оценки качества объектов окружающей среды: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2. Методы биотестирования / С.М. Чеснокова, Н.В. Чугай; Владим. гос. ун-т. — Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. — 92 с.
10. Чугунова Н.И. Руководство по изучению возраста и роста рыб. М., 1959. 164 с
11. Tara E. Randall T.E., Linden Y.S., Gamboa J., Real B. and others. Bacterial repair and recovery after UV LED disinfection: implications for water reuse. Environmental Science Water Research & Technology. The Royal Society of Chemistry. 2022. file:///C:/Users/HUAWEI/Downloads/RandallRepairUVLEDReuseESWRT2022.pdf
12. Richardson S.D., Plewa M.J. (Eds.). Disinfection By-Products in Drinking Water, Recycled Water and Wastewater: Formation, Detection, Toxicity and Health Effects: Preface. Journal of Environmental Sciences. V.58. 2017. DOI: 10.1016/j.jes.2017.07.017 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074217320806?via%3Dihub>
13. ГОСТ 31957–2012 (ISO 5815:2003). Вода. Методы определения биохимического потребления кислорода. <https://docs.cntd.ru/document/1200096960>
14. ГОСТ 31953–2012 (ISO 9377–2:2000) Вода. Определение нефтепродуктов методом газовой хроматографии.
15. ГОСТ ISO 10304–1–2016. Качество воды. Определение содержания растворенных анионов методом жидкостной ионообменной хроматографии. Часть 1. Определение содержания бромидов, хлоридов, фторидов, нитратов, нитритов, фосфатов и сульфатов. <https://www.akvilon.ru/methodology/kachestvo-vody-opredelenie-soderzaniya-rastvorenykh-anionov-metodom-zhidkostnoi-ionoobmennoi-xromatografii-cast-1-opredelenie-soderzaniya-bromidov-xloridov-ftoridov-nitratov-nitritov-fosfatov-i-sulfatov>
16. МУ 2.1.4.719–98 Питьевая вода и водоснабжение населенных мест <https://docs.cntd.ru/document/1200030958>
17. РД 52.24.476–95. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации хлоридов в поверхностных водах суши газохроматографическим методом. / Росгидромет. — Ростов-на-Дону: ГУ ГХИ, 1995.
18. РД 52.24.309–2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. <https://docs.cntd.ru/document/495872993>.
19. СанПиН 2.1.5.980–00. 2.1.5. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. <https://docs.cntd.ru/document/1200006938>.

© Ульдияров Станислав Владимирович (wnl_08@mail.ru); Назарова Надежда Петровна (wnl_08@mail.ru);

Головки Марина Викторовна (mvgolovko@kai.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»