

СХЕМА КОМБИНИРОВАННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ AOPS-ТЕХНОЛОГИЙ

SCHEME COMBINED WASTEWATER TREATMENT OF THE TEXTILE PRODUCTIONS USING AOPS-TECHNOLOGIES

УДК 675.04:677.027:677.057

В.Н. Штепа^{1*}, В.И. Дунай¹, С.Ю. Киреев²,
А.Б. Шикунец¹, А.В. Козырь¹

¹Полесский государственный университет²Пензенский государственный университет<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2023-1-114-124>

V. Shtepa^{1*}, V. Dunai¹, S. Kireev²,
A. Shikunets¹, A. Kozyr¹

¹Polesky State University²Penza State University

РЕФЕРАТ

КОМБИНИРОВАННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД, ТЕКСТИЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ОКИСЛЕНИЕ ЗАГРЯЗИТЕЛЕЙ, ЭЛЕКТРОЛИЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

Объект исследований – экологическая безопасность текстильных производств. Цель работы – обоснование схем комбинированной очистки многокомпонентных сточных вод (СВ) текстильных производств, отводимых в коммунальные канализационные сети, с учётом нормативных требований предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязнителей в водных растворах и минимизации финансовых затрат на создание локальных очистных сооружений (ЛОС). Разработана методика и пилотная установка для проведения экспериментальных исследований обработки общезаводских и отделочного цеха сточных вод с использованием коагулирования $FeCl_3$, озонирования (производительность по озону 10 г/час), ферратного воздействия на основе использования электрохимического реактора; при интенсификации процессов ультрафиолетовым облучением (длина волны 254 нм) и ультразвуковым воздействием (частота 30 кГц). Анализ полученных результатов показал, что во всех обработанных пробах СВ, кроме отходов агрегата «Оптима», удаётся эффективно снизить pH до ПДК внесением кислотосодержащего коагулянта $FeCl_3$. При этом необходимого качества окисления органических загрязнителей сточных вод текстильного производства уда-

ABSTRACT

COMBINED WASTEWATER TREATMENT, TEXTILE INDUSTRY, POLLUTANT OXIDATION, ELECTROLYSIS PROCESSES, ENVIRONMENTAL MANAGEMENT

The object of the research is the environmental safety of textile industries. The purpose of the work is to substantiate schemes for the combined treatment of multicomponent wastewater from textile industries discharged into public sewer networks, taking into account the regulatory requirements for maximum permissible concentrations of pollutants in aqueous solutions and minimizing financial costs for the creation of local treatment facilities (LTF). On the basis of the audit of real production, it was found that the indicators of wastewater changed non-stationary and non-linearly in terms of time depending on the range products: in terms of volume; on the quality of wastewater. Methodology and the pilot plant have been developed for conducting research on the treatment general plant and wastewater treatment using $FeCl_3$ coagulation, ozonation, ferrate exposure based on the use of electrochemical reactor; during intensification processes by ultraviolet irradiation and ultrasonic exposure. Analysis of the experimental results showed that in all treated wastewater samples, except for the wastes of the Optima unit, it is possible to effectively reduce pH by introducing acid-containing $FeCl_3$ coagulant. However, the required quality of oxidation organic pollutants in textile production wastewater was achieved only with the use of electrolysis plant by synthesizing ferrate compounds (reduction chem-

* E-mail: shtepa.v@polessu.by (V. Shtepa)

лось достигнуть только с использованием электролизной установки (снижение значения химического потребления кислорода (ХПК) почти в 7 раз), которая обеспечивает синтез ферратных соединений.

Полученные результаты позволили впервые обосновать схему комбинированной очистки СВ текстильных производств с использованием AOPs-технологий и минимизацией использования классических химических реагентов при уменьшении общих затрат на локальные очистные сооружения. Акцентировано, что перспективным является создание системы сбора информации об водоотведении, использование которой позволит в адаптивном режиме формировать техническое задание на создание (модернизацию, реконструкцию) ЛОС с дальнейшей её интеграцией в блок управления.

ical oxygen demand by almost 7 times). The results made it possible for the first time to substantiate the scheme for the combined treatment of wastewater from textile industries using AOPs technologies and minimizing the use of chemical reagents while reducing the total cost of LTF. It is emphasized that it is promising to create system for collecting information on wastewater disposal.

ВВЕДЕНИЕ

Объем образующихся сточных вод (СВ) текстильных производств зависит от целого ряда технологических показателей: исходного сырья, применяемых технологий отделки, повторного и оборотного водоснабжения. Так, при производстве акриловых тканей образуется порядка 35 м³ загрязнённых водных растворов на 1 тонну тканей, шерстяных тканей – 70 м³ на 1 тонну тканей, хлопковых – 100 м³ на 1 тонну тканей [1]. Технологические процессы на предприятиях текстильной промышленности весьма разнообразны, в связи с чем концентрации примесей, содержащиеся в производственных СВ, и их качественный состав могут изменяться в широких пределах, в том числе, на основе вероятностных законов [1, 2]. Сточные воды текстильных производств содержат остатки волокон, грязевые частицы, реагенты, поверхностно-активные вещества (ПАВ), красители [1–3].

При этом по объёму потребления технологической воды и отведении сточных вод одно из ведущих мест на текстильных предприятиях занимают красильные и отделочные цеха. Удельный расход водопотребления и, соответственно, расход СВ в них составляет примерно от 70–400 м³ на тонну продукции [2, 4]. Также установлено, что в сточных водах красильно-

отделочных цехов присутствуют более 50 видов органических и минеральных экологически опасных соединений [3].

В основе комплексной технологии производства текстиля лежат многочисленные физикохимические явления и химические превращения. Из общего числа поллютантов, которые попадают в окружающую среду со СВ, значительная доля приходится на химико-текстильные процессы [3]. Основные экологические проблемы в отделочном производстве связаны с необходимостью их эффективной очистки. Также отведение в канализацию жидких отходов красильно-отделочных производств достигает значительных размеров. Загустители, глауберова соль, крахмал, поверхностно-активные вещества могут поступать в СВ в количестве до 90 % от исходного содержания в отделочном растворе, гидроксид натрия – до 50 %, бихромат калия – до 25 %, сернистые красители – до 30 %, дисперсные и катионные красители – до 40 %, прямые и активные красители – 10–25 %, кислотные, кубовые красители и кубозоли – 5–10 % при периодическом крашении [5].

В случае текстильных производств целесообразно рассматривать удаление примесей физико-химическими методами [1]. Отдельной проблемой, связанной с отведением сточных

вод предприятий текстильного производства, является их токсичность и цветность. В настоящее время на мировом рынке представлено более 100 тысяч видов синтетических красителей при общем производстве порядка 700 000 тонн, значительная часть которых используется и в текстильном производстве [5]. Многие из красителей не подвержены биологической деструкции, и для снижения цветности сточных вод может также потребоваться применение методов физико-химической очистки [6, 7]. Их можно разделить на две группы [1]: первая группа включает технологии, которые предусматривают выделение находящихся в сточных водах красителей путем удаления их в виде осадка, флотошлама, поглощения сорбентами, задержания при мембранном разделении; вторая группа методов обработки основана на разрушении (деструкции) молекул красителей. Деструкция красителей осуществляется за счет реакций окисления и восстановления, которые могут производиться как дозированием реагентов, так и электрохимическими способами.

Целесообразно при очистке сточных вод текстильных производств применить так называемые передовые процессы окисления (Advanced Oxidation Process (AOPs)) [1, 8–10]. Указанная выше группа методов окисления основана на получении гидроксильных свободных радикалов ($\text{HO}\cdot$), которые являются сильными реагентами и способны к деструкции красителей, которые не могут быть разрушены традиционными подходами. Гидроксильные свободные радикалы получают сочетанием применения различных окислителей: «озон + пероксид водорода»; «озон + ультрафиолетовое излучение»; «пероксид водорода + ультрафиолетовое излучение»; «озон + ультразвук». Или других передовых подходов деструкции поллютантов в водных растворах, например, с внедрением процессов синтеза ферратов и/или Фэнтон-реакций.

Следует отметить, что в Республике Беларусь сточные воды текстильных предприятий, как правило, отводятся в системы канализации населенных пунктов и доочищаются совместно с коммунальными СВ. При этом непосредственно на ЛОС таких объектов целесообразно объектно-ориентировано использовать сочетание различных способов физико-химической об-

работки: коагуляцию, флокуляцию, окисление, сорбцию, разделения на мембранах, которые позволяют удалять примеси, не поддающиеся биохимическому разложению. Таким образом, минимизация рисков для коммунальных очистных сооружений при учёте финансовых возможностей предприятий является актуальной научно-прикладной задачей.

Цель и задачи

Цель работы – обоснование схем комбинированной очистки многокомпонентных сточных вод текстильных производств, отводимых в коммунальные канализационные сети, с учётом нормативных требований предельно допустимых концентраций загрязнителей в водных растворах и минимизации финансовых затрат на создание локальных очистных сооружений.

Задачи исследований:

- создание методики экспериментальных исследований комбинированной очистки сточных вод текстильных производств на основе анализа результатов аудита водоотведения соответствующих производств;
- разработка пилотной электролизной установки обработки СВ с использованием AOPs-технологий;
- обоснование схемы комбинированной очистки сточных вод текстильного производства с использованием AOPs-технологий на основе анализе экспериментальной обработки водных растворов, отводимых исследуемыми производствами в коммунальную канализационную сеть.

Методика проведенных исследований

В качестве рабочих растворов для исследований использованы реальные сточные воды текстильного производства Брестской области. Показатели СВ такого предприятия нестационарно и нелинейно изменяются в зависимости от ассортимента производимой продукции:

- по объёму (с амплитудой на протяжении недели порядка 30 %, в отдельные периоды может быть и до 40 %);
- по качеству сточных вод (касательно значения pH и общей минерализации такие колебания могут составлять более 50 % на протяжении недели).

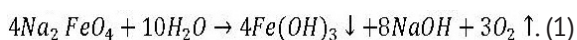
Ключевым загрязнителем сточных вод является линия отведения водных растворов от техно-

логических агрегатов «Оптима» и «Комплекса» (отделочный цех) – раствор с данной ветки выполняет защелачивание выше ПДК всего объема отведения производства, при расходе через такую ветку 1:10 по отношению с общезаводскими СВ. Именно поэтому для дальнейших исследований экспериментальной обработки использовали воду с вышеуказанных технологических узлов и обзаводские СВ.

При экспериментальных исследованиях использовали следующие методы водообработки:

- коагуляцию $FeCl_3$ (раствор 40 %);
- ультразвуковую (УЗ) интенсификацию процесса коагулирования (частота 30 кГц);
- комбинацию озонирования (производительность по озону 10 г/час) и ультрафиолетового излучения (длина волны 254 нм);
- окисление с помощью ферратных процессов (с использованием электролизной установки) (рисунок 1) [11].

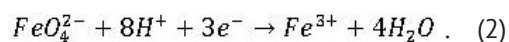
Прикатодные и прианодные области электролита в электролизере (рисунок 1) разделены неселективной мембраной, что позволяет предотвратить восстановление на катоде образовавшегося феррата натрия. Феррат натрия является нестабильным соединением, в присутствии воды он со временем разлагается с выделением кислорода [7]:



Период полураспада раствора феррата натрия в 40 % щелочи ($NaOH$) составляет 7 суток. Будучи сильным окислителем, феррат натрия легко окисляет комплексные соединения тяжелых металлов, что должно способствовать повышению эффективности процесса реагентной очистки сточных вод. Продуктом ферратной обработки является гидроксид железа (III), выступающий в роли коагулянта – таким образом, имеет место синергетический эффект водообработки. Такое воздействие позволит увеличить гидравлическую крупность образующегося осадка и существенно интенсифицировать работу сооружений, предназначенных для осветления сточных вод.

Окислительно-восстановительный потенциал феррат-ионов зависит от pH среды. В кислой

среде уровень окислительно-восстановительного потенциала феррат-ионов достигает крайне высокой величины +2,2 В:



В нейтральной и щелочной среде значение окислительно-восстановительного потенциала феррат-ионов +0,72 В:

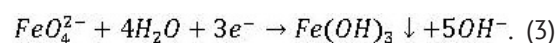


Рисунок 1 – Внешний вид электролизной установки с комбинацией ультразвуковой обработки сточных вод

В процессе взаимодействия с водой одна молекула феррата натрия образует 5 ионов, что обуславливает повышенный уровень щелочности обработанных сточных вод, вследствие чего можно ожидать существенного сокращения расхода щелочных реагентов на локальных очистных сооружениях.

Структурная схема экспериментальной системы представлена на рисунке 2.

Режимы экспериментальной обработки СВ:

- вариант № 1: коагуляция $FeCl_3$ (3,5 мл/л) сточной воды линии «Комплекса» (pH – 11,16 *ед. pH*; общая минерализация – 3736,6 мг/л);
- вариант № 2: коагуляция $FeCl_3$ (5 мл/дм³) общезаводской сточной воды (pH – 11,84 *ед. pH*; минерализация – 816,3 мг/л);
- вариант № 3: обработка полученного раствора варианта № 1 озоном на протяжении 20 минут;
- вариант № 4: одновременная (комплексная) обработка полученного раствора варианта № 1 озоном и ультрафиолетовым облучением на протяжении 20 минут;
- вариант № 5: обработка полученного раствора варианта № 1 ультразвуковым воздействием на протяжении 5 минут;

– вариант № 6: обработка полученного раствора варианта № 2 в электролизной установке;

– вариант № 7: обработка полученного раствора варианта № 6 в электролизной установке;

– вариант № 8: обработка полученного раствора варианта № 7 в электролизной установке.

Оценивали следующие показатели качества водных растворов после обработок: активная реакция раствора (*ед. pH*); общая минерализация, *ppm*; химическое потребление кислорода (ХПК), мг O_2 /л – такой показатель взят, как интегральный демонстрирующий наличие (отсутствие) органических загрязнителей сточных вод.

Показатели качества сточных вод определялись в аккредитованной лаборатории КПУП «Пинскводоканал».

Анализ полученных результатов

Зафиксированные результаты лабораторной обработки реальных СВ согласно вариантам, описанным в методике экспериментальных исследований, представлены на рисунках 3–5.

Для предварительной оценки эффективности нейтрализации (подкисления раствора)

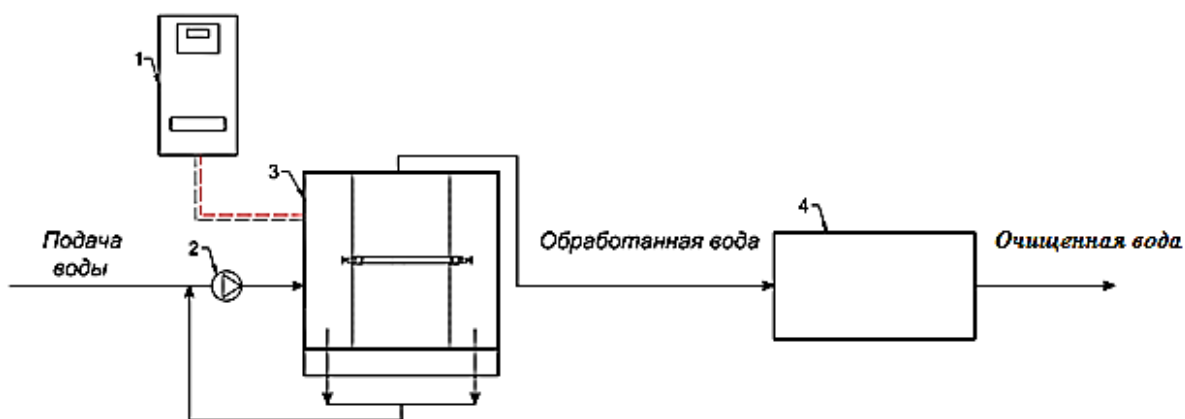


Рисунок 2 – Структурная схема системы для экспериментальных исследований очистки сточных вод текстильных производств с использованием AOPs-технологий: 1 – источник постоянного тока; 2 – электронасосный агрегат; 3 – электролизная установка с УЗ-интенсификацией; 4 – блок разделения полученных после деструкции взвешенных частиц (фильтр, отстойник) с возможностью подачи озона и подключения УФ-ламп

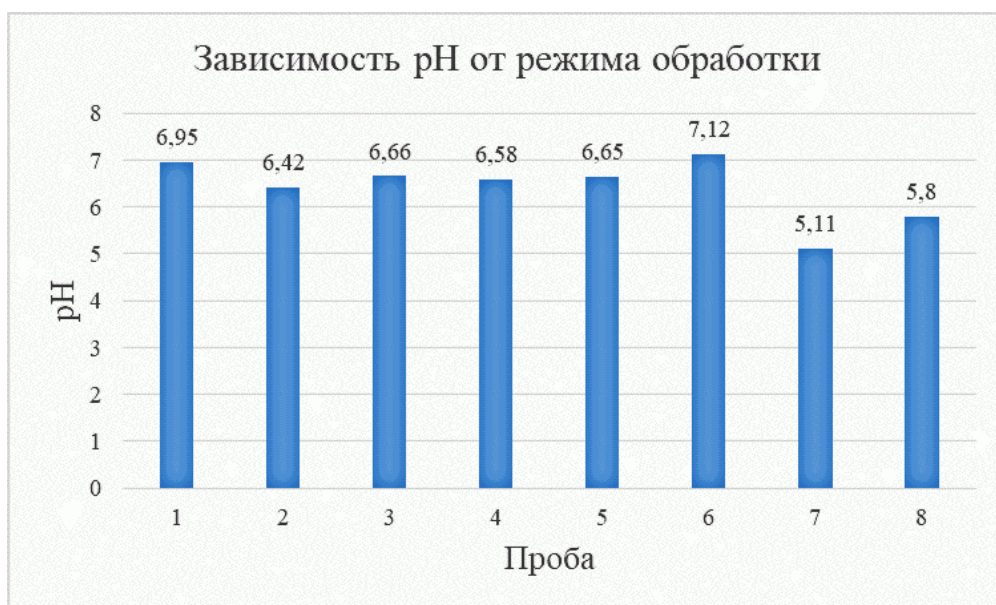


Рисунок 3 – Графические зависимости значения показателя качества сточных вод текстильного производства «рН» от режимов обработки (ПДК = 6,5–9,0): 1–8 – варианты воздействия на СВ, описанные в методике экспериментальных исследований



Рисунок 4 – Графические зависимости значения показателя качества сточных вод текстильного производства «Минерализация» (ПДК = 1000 рртп) от режимов обработки: 1–8 – варианты воздействия на СВ, описанные в методике экспериментальных исследований



Рисунок 5 – Графические зависимости значения показателя качества сточных вод текстильного производства «ХПК» (ПДК = 1200 мгО₂/л) от режимов обработки: 1–8 – варианты воздействия на СВ, описанные в методике экспериментальных исследований

выполнили обработку сточной воды агрегата «Оптима» (pH – 12,43 ед. pH ; минерализация – 1450,9 ppm) соляной кислотой HCl (15 %) – необходимый результат (pH = 8,8) был достигнут при внесении её в значительных концентрациях 12 $мл/л$.

Анализ результатов экспериментальных исследований комбинированной очистки сточных вод текстильного производства:

- общезаводские и агрегата «Комплекса» сточные воды поддаются качественной нейтрализации (подкислению) на основе использования только «кислого» коагулянта – хлорида железа $FeCl_3$;

- сточные воды технологического агрегата «Оптима» сложно поддаются нейтрализации (подкислению) в силу высокой концентрации каустика, который применяется в производственном процессе;

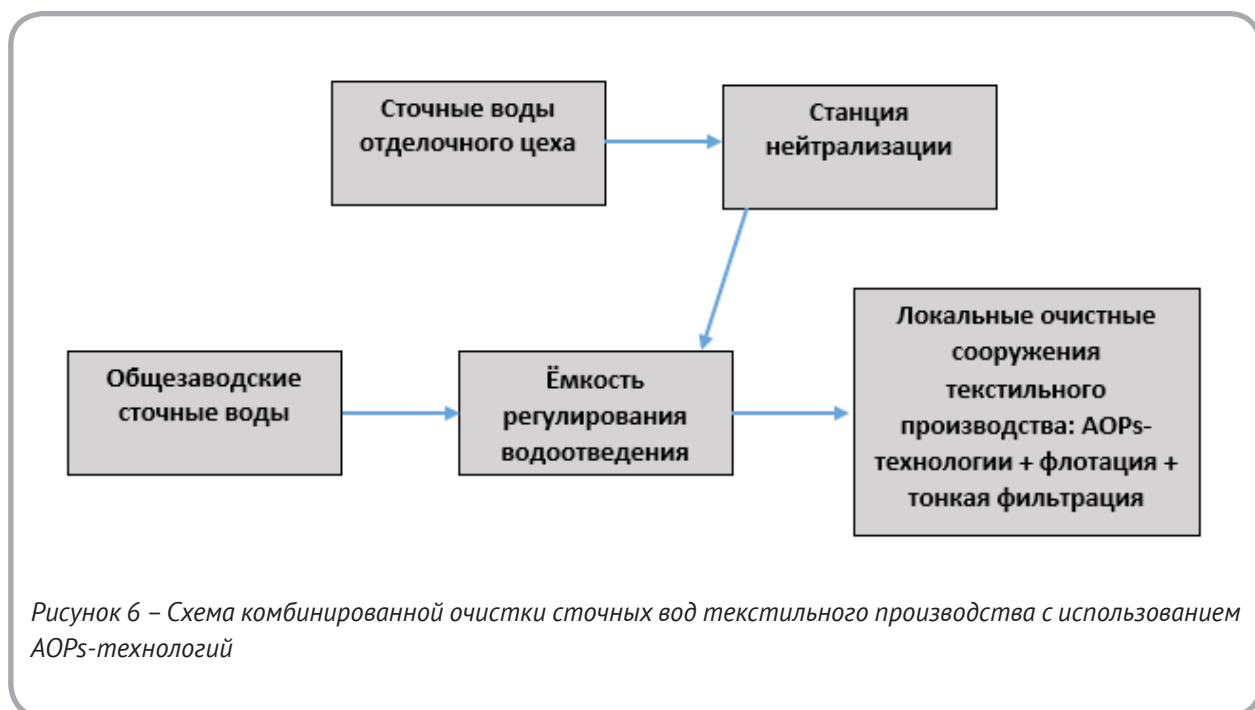
- минерализация общезаводских сточных вод при использовании реагентных способов будет значительной и периодически превышать предельно-допустимые концентрации;

- применённые процессы (в режимах приближённых к тем, которые можно минимально затратно реализовать на производстве), а именно: «коагуляция», «коагуляция + ультразвук», «озонирования», «озонирование + ультрафиолет», не значительно воздействуют на органические загрязнители сточных вод, которые имеют сложно окисляемую природу;

- процесс «Ферратное окисление» потенциально обеспечит ПДК по показателям содержания органических загрязнителей сточных вод.

Таким образом, можно предложить схему очистки сточных вод текстильного производства с комбинацией разных подходов (рисунок 6), которая будет обеспечивать отдельную нейтрализацию СВ отделочного цеха.

Обоснованная структура комплексной обработки СВ (рисунок 6) дополнительно включает ёмкость регулирования водоотведения, технологическая задача которой сглаживать пиковые амплитудные колебания показателя качества «Минерализация». При этом задача комбинированной системы удаления поллютантов обеспечивать ПДК, которые определяются с исполь-



зованием отечественных методик на основе действующей нормативной базы [12].

Заключение

На выходе системы водоотведения текстильного производства ключевыми показателями, которые превышают установленные ПДК являются:

- активная реакция водных растворов (pH) – превышение может составлять более 30 % от установленных нормативных требований;
- общая минерализация (сухой остаток) – пиковые превышения могут составлять в определённые периоды более 100 %.

Вместе с тем такие превышения не являются стационарными (стабильными), а возникают нестационарно и периодически на протяжении рабочей смены (суток, недели) зависимо от производимого ассортимента продукции, что создаёт объективные предпосылки для сглаживания превышений ПДК по показателю «Общая минерализация» путём установки ёмкости регулирования отведения в городскую канализацию сточных вод с соответствующей системой автоматического управления. Таким образом может быть достигнуто стабилизирование данного показателя качества водных растворов.

Анализ результатов показал, что во всех отобранных пробах, кроме агрегата «Оптима»,

удаётся эффективно снизить pH до ПДК внесением кислотосодержащего коагулянта $FeCl_3$. При этом фиксируется рост «общей минерализации», порядка 30 % от исходного, при превышении ПДК по данному показателю уже до начала водообработки.

Нормативно требуемого окисления органических загрязнителей сточных вод удалось достигнуть только с использованием электролизной установки на основе ферратной технологии (снижение значения ХПК почти в 7 раз); озонирование с УФ облучением значительного воздействия не оказало, что вызвано многокомпонентностью и сложно-окисляемостью поллютантов СВ предприятия.

Полученные результаты позволили впервые обосновать комбинированную схему очистки СВ с использованием AOPs-технологий, фактически с минимизацией использования классических химических реагентов и отдельной нейтрализацией загрязнённых водных растворов отделочного цеха.

Дальнейшие исследования для значительного улучшения экологического менеджмента и системного мониторинга качества отводимых сточных вод предприятий текстильной промышленности, необходимо нацелить на создание методики и информационно-аналитической си-

стемы сбора информации о параметрах водоотведения в режиме реального времени [13]. При этом, с учётом наличия измерительных средств, способных работать в режиме реального времени в агрессивных средах, целесообразно выполнять контроль именно таких показателей качества сточных вод, как: **pH**, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), температура, электропроводность (для контроля показателя «общая минерализация»). Потенциально в точке ёмкости регулирования обосновано выполнить контроль показателя СВ «Мутность». При этом разрабатываемое измерительно-аналитическое решение должно иметь открытую

архитектуру: во-первых, обеспечивая возможность подключения других средств определения значений показателей сточных вод, во-вторых, давая возможность заполнять базу данных с использованием результатов лабораторных анализов.

Важным аспектом продолжения научных изысканий станет промышленное определение эколого-экономической эффективности созданной схемы ЛОС, поскольку лабораторные результаты, по мнению авторов, требуют значительной корректировки в промышленных условиях в контексте ресурсозатрат.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ануфриев, В. Н. (2015), Очистка сточных вод предприятий текстильной промышленности, *Экология на предприятии*, 2015, № 1, С. 87–96.
2. Белопухов, С. Л., Яшин, М. А., Слюсарев, В. И., Нефедьева, Е. Э., Шайхиев, И. Г. (2015), Технологии очистки сточных вод текстильных производств для снижения поступления токсикантов в природные поверхностные воды, *Вестник Казанского технологического университета*, 2015, Т. 18, № 5, С. 199–204.
3. Шуткова, М. А. (2006), Очистка высококонцентрированных сточных вод предприятий текстильной промышленности физико-химическими методами, *Сборник статей международной научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Молодежь – производству»*, УО «ВГТУ», Витебск, 2006, С. 227–229.
4. Ефимов, А. Я., Таварткиладзе, И. М., Ткаченко, Л. И. (1985), *Очистка сточных вод предприятий лёгкой промышленности*, Киев, 230 с.
5. Абдуллин, И. Ш., Нефедьев, Е. С., Ибрагимов, Р. Г., Парошин, В. В., Зайцева, О. В. (2013), Очистка сточных вод предприятий текстильной про-

REFERENCES

1. Anufriev, V. N. (2015), Wastewater treatment of textile industry enterprises [Ochistka stochnyh vod predpriyatij tekstil'noj promyshlennosti], *Jekologija na predpriyatii – Ecology at the enterprise*, 2015, № 1, pp. 87–96.
2. Belopuhov, S. L., Jashin, M. A., Sljusarev, V. I., Nefed'eva, E. Je., Shajhiev, I. G. (2015), Technologies for wastewater treatment of textile industries to reduce the intake of toxicants in natural surface waters [Tehnologii ochistki stochnyh vod tekstil'nyh proizvodstv dlja snizhenija postuplenija toksikantov v prirodnye poverhnostnye vody], *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta – Bulletin of the Kazan Technological University*, 2015, № 5, pp. 199–204.
3. Shutkova, M. A. (2006), Purification of highly concentrated wastewater of textile industry enterprises by physico-chemical methods [Ochistka vysoko koncentrirovannyh stochnyh vod predpriyatij tekstil'noj promyshlennosti fiziko-himicheskimi metodami], *Collection of articles of the international scientific and technical conference of students, undergraduates and postgraduates "Youth – production"*, 2006, pp.

- мышленности на основе модифицированных композиционных мембран, *Вестник Казанского технологического университета*, 2013, Т. 16, № 3, С. 22–27.
6. Mir-Tutusaus, J. A., Jaén-Gil, A., Barceló, D., Buttiglieri, G., Gonzalez-Olmos, R., Rodriguez-Mozaz, S., Caminal, G., Sarrà, M. (2021), Prospects on coupling UV/H₂O₂ with activated sludge or a fungal treatment for the removal of pharmaceutically active compounds in real hospital wastewater, *Science of The Total Environment*, 2021, Vol. 773, Article 145374.
 7. Homonnay, Z., Perfilief, Yu. D., Sharma, V. K. (2020), Characterization of FeVI and Other Oxidation States of Iron by Spectroscopic Methods, *Proceedings of International Symposium*, 2020, pp. 55–63.
 8. Stasinakis, A. S. (2019), Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment – A mini review, *Global NEST Journal*, 2019, Vol. 10 (3), pp. 376–385.
 9. Costa, E. P., Roccamante, M., Amorim, C. C., Oller, I., Sánchez Pérez, J. A., Malato, S. (2020), New trend on open solar photoreactors to treat micropollutants by photo-Fenton at circumneutral pH: Increasing optical pathway, *Chemical Engineering Journal*, 2020, Vol. 385, Article 123982.
 10. Shtepa, V., Balintova, M., Chernysh, Ye., Chubur, V., Demcak, S., Gautier, M. (2021), Rationale for the Combined Use of Biological Processes and AOPs in Wastewater Treatment Tasks, *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11, Iss. 16, 7551.
 11. Штепа, В. Н., Киреев, С. Ю., Козырь, А. В., Шикунец, А. Б., Наумов, Л. В., Киреева, С. Н. (2022), Оценка эффективности параметров безреагентной электролизной очистки сточных вод от азотсодержащих соединений, *Гальванотехника и обработка поверхности: научный журнал*, 2022, Т. 30, № 4, С. 48–56.
 - 227–229.
 4. Efimov, A. Ja. (1985), *Ochistka stochnyh vod predpriyatij ljogkoj promyshlennosti* [Wastewater treatment of light industry enterprises], Kiev, 230 p.
 5. Abdullin, I. Sh., Nefed'ev, E. S., Ibragimov, R. G., Paroshin, V. V., Zajceva, O. V. (2013), Wastewater treatment of textile industry enterprises based on modified composite membranes [Ochistka stochnyh vod predpriyatij tekstil'noj promyshlennosti na osnove modifitsirovannyh kompozitsionnyh membran], *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta – Bulletin of Kazan Technological University*, 2013, № 3, pp. 22–27.
 6. Mir-Tutusaus, J. A., Jaén-Gil, A., Barceló, D., Buttiglieri, G., Gonzalez-Olmos, R., Rodriguez-Mozaz, S., Caminal, G., Sarrà, M. (2021), Prospects on coupling UV/H₂O₂ with activated sludge or a fungal treatment for the removal of pharmaceutically active compounds in real hospital wastewater, *Science of The Total Environment*, 2021, Vol. 773, Article 145374.
 7. Homonnay, Z., Perfilief, Yu. D., Sharma, V. K. (2020), Characterization of FeVI and Other Oxidation States of Iron by Spectroscopic Methods, *Proceedings of International Symposium*, 2020, pp. 55–63.
 8. Stasinakis, A. S. (2019), Use of selected advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater treatment – A mini review, *Global NEST Journal*, 2019, Vol. 10 (3), pp. 376–385
 9. Costa, E. P., Roccamante, M., Amorim, C. C., Oller, I., Sánchez Pérez, J. A., Malato, S. (2020), New trend on open solar photoreactors to treat micropollutants by photo-Fenton at circumneutral pH: Increasing optical pathway, *Chemical Engineering Journal*, 2020, Vol. 385, Article 123982.
 10. Shtepa, V., Balintova, M., Chernysh, Ye., Chubur, V., Demcak, S., Gautier, M. (2021), Rationale

12. Дубенок, С. А. (2017), *Расчет нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ со сточными водами в водные объекты: пособие*, Минск, 37 с.
13. Штепа, В. Н. (2014), Энергетические критерии производственного внедрения экологически безопасных технологий (канал управления – очистка сточных вод (водоподготовка)), *Инновации в сельском хозяйстве: теоретический и научно-практический журнал*, 2014, № 4 (9), С. 167–171.
11. Shtepa, V. N., Kireev, S. Ju., Kozyr', A. V., Shikunec, A. B., Naumov, L. V., Kireeva, S. N. (2022), Evaluation of the effectiveness of the parameters of reagent-free electrolysis wastewater treatment from nitrogen-containing compounds [Ocenka jeffektivnosti parametrov bezreagentnoj jelektroliznoj ochistki stochnyh vod ot azotso-derzhashhih soedinenij], *Gal'vanotehnika i obrabotka poverhnosti: nauchnyj zhurnal – Electroplating and surface treatment: scientific journal*, 2022, № 4, pp. 48–56.
12. Dubenok, S. A. (2017), *Raschet normativov dopustimyh sbrosov zagryaznyayushchih veshchestv so stochnymi vodami v vodnye obyekty: posobie*, Minsk, 37 s.
13. Shtepa, V. N. (2014), Energy criteria for the industrial implementation of environmentally friendly technologies (control channel – wastewater treatment (water treatment)) [Jenergeticheskie kriterii proizvodstvennogo vnedrenija jekologicheski bezopasnyh tehnologij (kanal upravlenija – ochistka stochnyh vod (vodopodgotovka))], *Innovacii v sel'skom hozjajstve: teoreticheskij i nauchno-prakticheskij zhurnal – Innovations in agriculture: theoretical and scientific-practical journal*, 2014, № 4 (9), pp. 167–171.

Статья поступила в редакцию 03. 04. 2023 г.