

**Технологии ликвидации источников химической опасности**

УДК 628.349.094.3/ 628.316.12

DOI: 10.25514/CHS.2025.2.29012

Очистка сернисто-щелочных сточных вод с помощью озонирования*Н. А. Иванцова¹, А. Ю. Шлыкова^{1✉}, А. И. Заричный²*

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Москва, Россия, e-mail: 211559@muctr.ru

²ООО «СИБУР», Москва, Россия

Поступила в редакцию: 16.10.2025 г.; после доработки: 26.11.2025 г.; принята в печать: 27.11.2025 г.

Аннотация – Сернисто-щелочной сток (СЩС), образующийся на нефтегазохимических предприятиях, представляет экологическую проблему для окружающей среды ввиду своего сложного состава, включающего трудноокисляемые органические соединения и токсичные неорганические соединения, что обуславливает потребность в поиске новых эффективных и экологически безопасных решений для его утилизации. В данной работе рассматривается применение озонирования, усиленного добавлением пероксида водорода (процесс «пероксон»), в качестве перспективного метода для глубокой очистки таких сточных вод. В этом исследовании были тщательно определены входные и конечные характеристики реального разбавленного СЩС. Эффективность очистки оценивалась по ключевым параметрам: химическому потреблению кислорода (ХПК) и динамике изменения концентраций сульфид- и сульфат-ионов. Установлено, что применение озонирования в присутствии пероксида водорода приводит к значительному снижению ХПК практически в 4 раза, что указывает на глубокую минерализацию органических веществ. Кроме того, отмечен эффективный перевод токсичных сульфидов в значительно менее опасные сульфат-ионы. Полученные результаты наглядно подтверждены с помощью сравнительного анализа электронных УФ-спектров исходного и обработанного СЩС, демонстрирующих исчезновение основных полос поглощения. Эти данные доказывают высокий потенциал озонирования для устойчивой и эффективной очистки СЩС.

Ключевые слова: сернисто-щелочной сток (СЩС), озонирование, очистка, «пероксон» процесс.

Technologies for elimination of chemical hazards

UDC 628.349.094.3/ 628.316.12

DOI: 10.25514/CHS.2025.2.29012

Treatment of sulfur-alkaline wastewater using ozonation*Natalya A. Ivantsova¹, Anastasia Yu. Shlykova^{1✉}, and Alexey I. Zarichny²*

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia, e-mail: 211559@muctr.ru

²LLC “Sibur”, Moscow, Russia

Abstract – Sulfur-alkaline wastewater (SAW) generated by petrochemical plants poses an environmental challenge due to its complex composition, which includes difficult-to-oxidize organic compounds and toxic inorganic compounds, necessitating the search for new effective and environmentally friendly solutions for its disposal. This study explores the use of ozonation enhanced by the addition of hydrogen peroxide («peroxon» process) as a promising method for the deep treatment of such wastewater. The input and output characteristics of a real diluted SAW were carefully determined. The purification efficiency was evaluated based on key parameters: chemical oxygen demand (COD) and the dynamics of changes in the concentrations of sulfide and sulfate ions. It has been established that the use of ozonation in the presence of hydrogen peroxide leads to a significant reduction in COD by almost 4 times, which indicates a deep mineralization of organic substances. In addition, the effective conversion of toxic sulfides into significantly less hazardous sulfate ions has been observed. These results are clearly demonstrated by a comparative analysis of the electronic UV spectra of the initial and treated SAW, which show the disappearance of the main absorption bands. These findings highlight the high potential of ozonation for sustainable and efficient treatment of SAW.

Keywords: sulphurous-alkaline runoff, ozonation, purification, «peroxone» process.

ВВЕДЕНИЕ

Вода является одним из важнейших и незаменимых ресурсов для жизнеобеспечения всей планеты. Она необходима как человеку, так и различным отраслям промышленности, например, целлюлозно-бумажной, нефтехимической, текстильной и т.д. Однако в последнее время антропогенная нагрузка на гидросферу увеличивается, что ведет к загрязнению больших объемов поверхностных и подземных вод. Поэтому в связи с дефицитом чистой воды необходим поиск наиболее эффективных методов очистки стоков предприятий.

Объектами негативного воздействия на окружающую среду, в том числе на гидросферу, являются также предприятия нефтегазохимического комплекса. Одним из типов сточных вод при производстве мономеров (этилена и пропилена) являются чрезвычайно токсичные сернисто-щелочные стоки (СЩС). Они возникают в процессе обезвреживания/промывки газов термического разложения (пиролиза) органических веществ при недостатке кислорода от сернистого водорода и углекислого газа в производстве низших алкенов, а также при обработке щелочными растворами сжиженных газов, бензиновых и керосиновых фракций в процессе переработки нефти из рефлюксных емкостей [1]. Такие стоки являются сложносоставными и могут включать такие вещества, как нефтепродукты, различные соединения серы, хлориды и другие [2]. Ввиду высокого содержания серосодержащих компонентов, являющихся высокотоксичными для гидробионтов [3], сброс таких сточных вод в гидросферу и их биологическая очистка запрещены [4], поэтому на предприятиях часто создаются локальные узлы очистки СЩС [5]. К тому же присутствие сульфидов в воде может привести к ряду проблем, например, к коррозии оборудования и ухудшению органолептических свойств

воды (запах) [6, 7]. Все вышеперечисленное говорит о необходимости поиска эффективных методов очистки таких сточных вод.

Технологические сточные воды, содержащие высокие концентрации взвешенных веществ и растворенных органических соединений, требуют предварительной очистки, например, с помощью коагуляции [8]. Однако традиционные методы очистки сернисто-щелочных сточных вод часто оказываются недостаточно эффективными и имеют ряд недостатков, к которым могут относиться забивка и коррозия оборудования, а также высокая стоимость реагентов [1]. Поэтому в настоящее время все больше внимания уделяют усовершенствованным окислительным методам (AOPs – advanced oxidation processes). Эта технология основана на реакции окисления веществ с помощью гидроксил-радикалов, которые играют главную роль в деструкции загрязняющего вещества ввиду высокого окислительного потенциала [9]. К таким методам относят процесс «пероксон» [10], основанный на комбинированном действии озона и пероксида водорода, что приводит к образованию гидроксильных радикалов. Они неселективно действуют на загрязнители, в результате чего образуются менее токсичные соединения [9]. Озонирование способно обеспечить быстрое и полное окисление как неорганических сульфидов, так и сложных органических соединений без образования значительного количества вторичных продуктов. Поэтому целью работы является исследование эффективности очистки сернисто-щелочных сточных вод с помощью озонирования благодаря таким параметрам, как химическое потребление кислорода (ХПК), концентрация сульфатов и сульфидов в сточной воде до и после обработки стока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования выступал реальный разбавленный сернисто-щелочной сток нефтегазохимического предприятия с входными характеристиками:

- pH: 11,4
- ХПК: 820 мг О/дм³
- Концентрация сульфат-ионов: 69 мг/дм³
- Концентрация сульфид-ионов: 469 мг/дм³
- Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП): – 360 мВ

Эксперимент проводили с помощью установки, представленной в работе [11]. Объем стока составил 0,1 дм³; доза пероксида водорода (3%), добавляемая к стоку, – 2 см³ (0,6 г/дм³); время обработки СЩС – 60 минут.

Обезвреживание сточной воды оценивали по значениям ХПК, концентрации сульфат- и сульфид-ионов.

ХПК является одним из широко используемых показателей загрязненности воды, поэтому с его помощью проводилась оценка очистки СЩС. Определение химической потребности в кислороде (ХПК) производили по ГОСТу 31859-2012. Данный стандарт позволяет определять ХПК во всех типах вод фотометрическим методом. Метод основан на окислении органических и неорганических веществ с помощью бихромата калия при

нагревании в присутствии сульфата серебра в качестве катализатора. Для определения ХПК в реакционный сосуд отбирали сток, добавляли вышеуказанные реагенты и нагревали в течение 2-х часов. Далее фотометрировали с помощью прибора КФК-3 при длине волны $\lambda=600$ нм и длине оптического пути $l=10$ мм. По калибровочному уравнению получали значение ХПК в мг О/дм³.

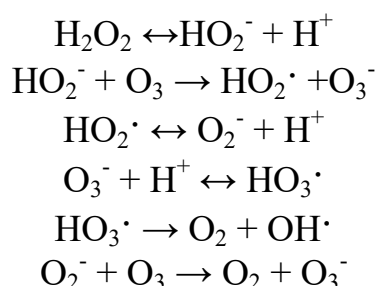
Также в данном исследовании контролировалась концентрация сульфат-ионов. Определение производили по ПНД Ф 14.1:2.159-2000. Этот стандарт позволяет определить массовую концентрацию сульфат-ионов турбидиметрическим методом. Метод основан на образовании суспензии сульфата бария в солянокислой среде. Для определения сульфат-ионов в колбу добавляли осадительную смесь и сточную воду, интенсивно перемешивали в течение 30 с и оставляли на 5 мин. Далее измеряли оптическую плотность с помощью прибора КФК-3 при длине волны $\lambda=670$ нм и длине поглощающего слоя $l=50$ мм. По калибровочному уравнению получали значение концентрации сульфат-ионов в мг/дм³.

Помимо концентрации сульфат-ионов контролировали концентрацию сульфид-ионов. Данный метод основан на образовании осадка – сульфида кадмия и титровании его в растворе йода с помощью тиосульфата натрия (йодометрическом титровании). Для определения концентрации сульфид-ионов в коническую колбу помещали сточную воду, добавляли ацетат кадмия. Далее добавляли соляную кислоту и раствор йода. После оставляли колбу в темном месте на 5 мин и титровали содержимое раствором тиосульфата натрия до обесцвечивания. Содержание сульфид-ионов пересчитывали на H₂S в мг/дм³.

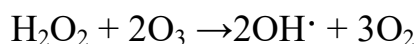
Вместе с вышеперечисленным в работе определяли водородный показатель стока (рН) и ОВП с помощью прибора YIERYL TPN01137.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

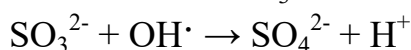
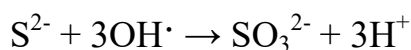
Озонирование сернисто-щелочного стока без пероксида водорода идет по прямой реакции с загрязняющими веществами. При совместном введении H₂O₂ и озона («пероксон» процесс) запускается генерация гидроксильных радикалов (ОН[•]), обладающих высокой неспецифической окислительной активностью. В этом процессе могут протекать следующие реакции [10]:



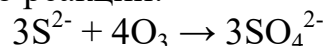
Суммарная реакция:



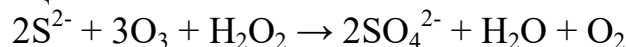
Гидроксильные радикалы, образующиеся в «пероксон» процессе взаимодействуют с сульфид-ионами в сточной воде, окисляя их до сульфат-ионов по реакциям:



Или непосредственно по реакции:



Суммарная реакция:



Данное исследование было проведено, исходя из предположения, что протекают перечисленные выше реакции.

Таким образом, процесс «пероксон» даёт значимые преимущества по скорости и глубине окисления в отношении устойчивых органических и серосодержащих соединений в сернисто-щелочных стоках по сравнению с чистым озоном. Все эксперименты по озонированию были выполнены в присутствии пероксида водорода.

На рисунке 1 представлен график зависимости снижения значений ХПК сернисто-щелочных сточных вод от времени обработки стока. По графику видно, что наибольшее снижение значений ХПК происходит в первые 10 минут. Вероятно, это связано с окислением озоном наиболее легкоокисляемых соединений, максимальной концентрацией гидроксил-радикалов и наибольшей концентрацией самого озона в первые минуты.

По полученным данным видно, что значение ХПК спустя 60 минут обработки стока уменьшилось практически в 4 раза.

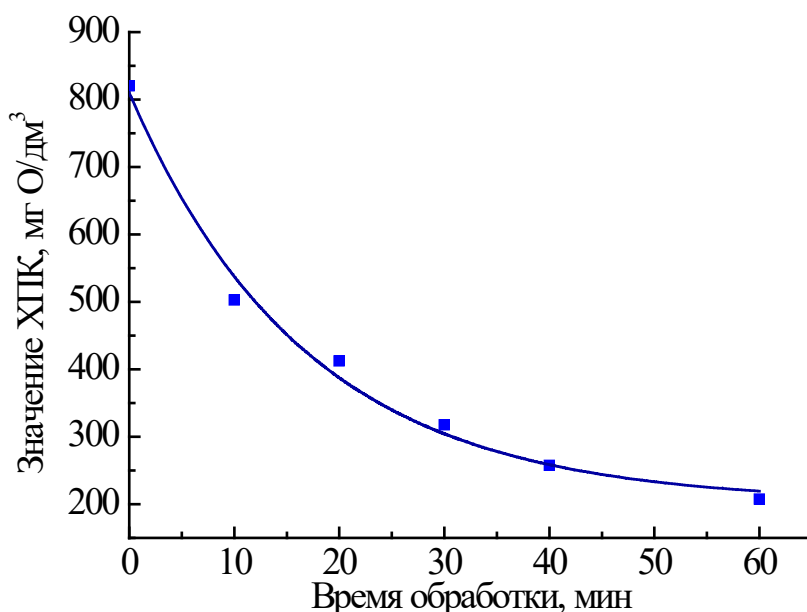


Рис. 1. Зависимость ХПК от времени обработки при озонировании сернисто-щелочного стока.

Fig. 1. The dependence of COD on the treatment time during ozonation of sulfur-alkaline runoff.

Также производилась оценка эффективности метода по изменению концентраций серосодержащих соединений. На рисунке 2 представлена зависимость концентрации сульфид- и сульфат-ионов от времени обработки

стока. По графику, демонстрирующему динамику изменения концентраций сульфид- и сульфат-ионов в зависимости от времени обработки, видно, что выражена тенденция к снижению концентрации сульфид-ионов в течение первых минут озонирования. Начальное значение концентрации сульфид-ионов резко убывает, асимптотически приближаясь к нулевому значению к 30 минуте эксперимента. В то же время, концентрация сульфат-ионов демонстрирует противоположную динамику. Наблюдается интенсивный рост концентрации сульфат-ионов в течение первых 40 минут обработки. После этого времени скорость роста концентрации сульфат-ионов замедляется, приближаясь к состоянию насыщения, однако, без достижения ярко выраженного плато к 60 минуте эксперимента.

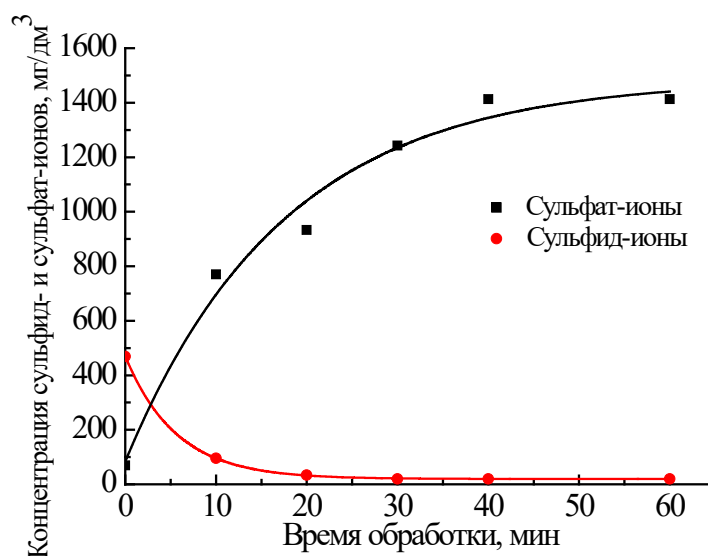


Рис. 2. Зависимость концентрации сульфид- и сульфат-ионов от времени обработки при озонировании сернисто-щелочного стока.

Fig. 2. The dependence of the concentration of sulfide and sulfate ions on the treatment time during ozonation of sulfur-alkaline runoff.

Полученные данные свидетельствуют о протекании окислительного процесса, в результате которого сульфид-ионы преобразуются в сульфат-ионы, а также происходит снижение показателя ХПК. Характер кривых позволяет предположить, что процесс окисления сульфид-ионов протекает по кинетике псевдопервого порядка, а рост концентрации сульфат-ионов обусловлен, в первую очередь, окислением сульфидов, но при этом, возможно, и окислением других сернистых соединений, присутствующих в системе.

Также во время исследования было замечено изменение ОВП обрабатываемого стока. На рисунке 3 представлена зависимость изменения ОВП от времени обработки стока.

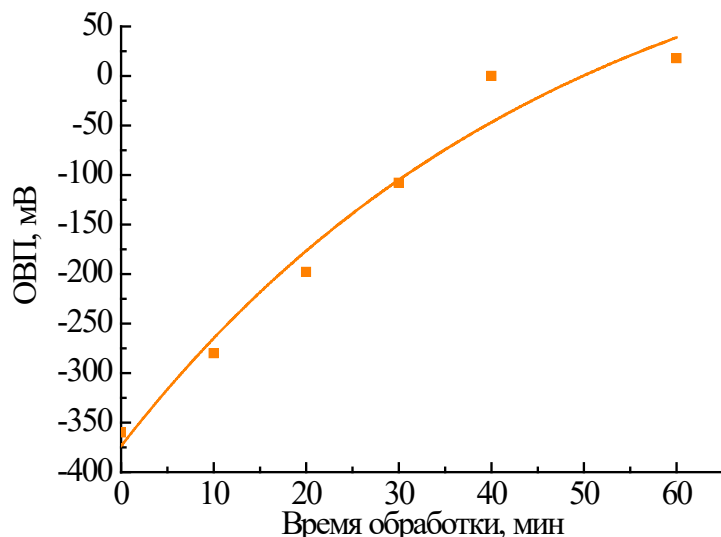


Рис. 3. Зависимость окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) от времени обработки при озонировании стока.

Fig. 3. The dependence of the redox potential (ORP) on the treatment time during runoff ozonation.

Отрицательные значения ОВП в исходном стоке обусловлены восстановленными формами соединения, в частности, серосодержащими соединениями в виде сульфидов, а положительные – окисленными формами – сульфатами. Переход ОВП из отрицательной области в положительную говорит об эффективном окислении.

Для ориентировочного определения состава сточной воды и возможности оценки результативности применяемого метода очистки было проведено спектроскопическое исследование сернисто-щелочных стоков. На рисунке 4 представлен электронный УФ-спектр СЩС до и после обработки.

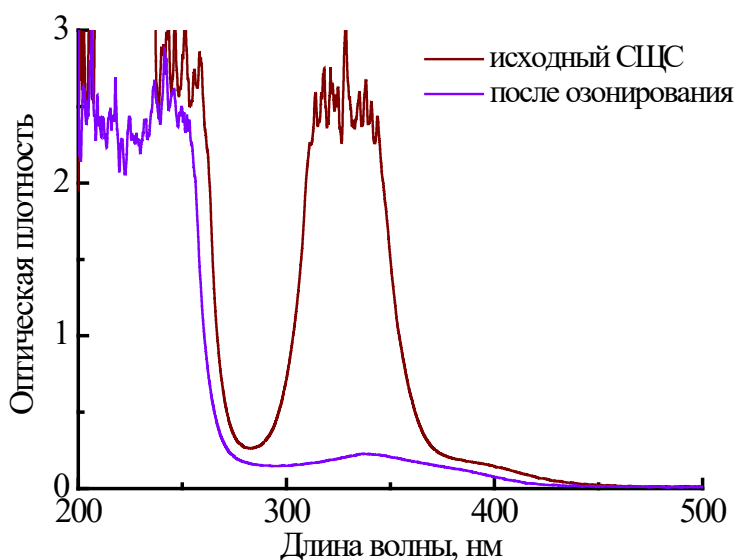


Рис. 4. Электронный спектр исходного и обработанного сернисто-щелочного стока.

Fig. 4. The electronic spectrum of the initial and treated sulfurous-alkaline runoff.

Полученный электронный спектр служит индикатором эффективности очистки сточных вод при использовании озонирования с добавлением пероксида водорода. По форме и положениям полос в спектре вероятно присутствие органических соединений с серосодержащими группами. Например, в диапазоне длин волн 320–330 нм могут наблюдаться тиофены, а в диапазонах 240–260, 280–300 и 370–420 нм – тиазолы [12]. Интенсивность наблюдаемых пиков в диапазоне длин волн 310–360 нм после обработки снижается, что свидетельствует о высокой эффективности выбранной технологии очистки.

После проведения экспериментов аналитически были определены характеристики обработанного СЩС:

- рН: 10,5
- ХПК: 208 мг О/дм³
- Концентрация сульфат-ионов: 1413 мг/дм³
- Концентрация сульфид-ионов: 20 мг/дм³
- ОВП: 18 мВ

Снижение значений рН в обработанной воде также может свидетельствовать о переводе сульфидов в сульфаты.

Последним этапом исследования было составление материального баланса по сере, приведенный в таблице 1.

Таблица 1. Материальный баланс по сере в процессе окисления сернисто-щелочного стока с помощью озонирования

Table 1. The material balance of sulfur in the process of sulfur-alkali runoff oxidation by ozonation

Соединения	Концентрация серы, мг/дм ³	
	До обработки	После обработки
Сульфид-ионы, в пересчете на серу	470	20
Сульфат-ионы, в пересчете на серу	23	466
Итого	493	486

По данным из таблицы видно, что концентрация серы в стоке до и после обработки имеет расхождение в 7 мг/дм³, что может быть связано с погрешностью измерений или потерями серы в процессе окисления, например, в виде сероводорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании проведенных исследований, можно сделать вывод, что технология очистки сернисто-щелочных сточных вод с помощью озонирования в присутствии пероксида водорода является эффективной в отношении органических веществ и окислении сульфидов. Это подтверждается не только данными электронного спектра обработанного стока, но и значительным изменением ключевых показателей качества воды. Значения

ХПК в обработанном стоке снизились практически в 4 раза, что указывает на глубокую деградацию органических соединений. Большая часть высокотоксичных сульфид-ионов была успешно переведена в сульфат-ионы. В очищенной воде концентрация сульфидов составила 20 мг/дм³, а концентрация сульфатов – 1413 мг/дм³. Значение ОВП обработанного стока перешло в положительную область, что является прямым свидетельством превалирования окисленных соединений, подтверждая успешность процесса окисления поллютантов в целом. Можно предположить, что наибольший вклад в этот процесс вносят гидроксил-радикалы, обладающие исключительно высоким окислительным потенциалом. Их генерация в системе озонирования в присутствии пероксида водорода обеспечивает глубокую деградацию органических соединений и эффективную конверсию сульфидов. Однако, согласно [13], максимальное допустимое значение содержания сульфидов в сточных водах составляет до 1,5 мг/дм³. Таким образом, несмотря на значительную конверсию, достигнутый уровень сульфидов (20 мг/дм³) все еще значительно превышает нормативные требования для сброса в водные объекты. Более того, концентрация сульфатов (1413 мг/дм³) также значительно превышает установленный норматив (до 500 мг/дм³), что свидетельствует о чрезмерном накоплении продукта окисления и формировании нового загрязняющего вещества в избыточной концентрации. Для достижения полного соответствия действующим экологическим нормативам требуется дальнейшая оптимизация процесса, направленная не только на максимальное снижение сульфидов, но и на контроль конечной концентрации сульфатов. Это может включать снижение исходной нагрузки по сернистым соединениям, более точный подбор дозировки окислителей, либо применение дополнительных ступеней доочистки, способных удалять избыточные сульфаты, например, с помощью мембранных или сорбционных технологий.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Будник В.А., Бобровский Р.И., Бабкин Д.Е. (2019). Комплексные методы очистки сернисто-щелочных сточных вод нефтеперерабатывающих производств. *Нефтегазовое дело*, 5, 58–85. <https://doi.org/10.17122/ogbus-2019-5-58-85>.
2. Мурзакова А.Р., Бадикова А.Д., Кудашева Ф.Х., Цадкин М.А., Гимаев Р.Н. (2007). Вопрос очистки сернисто-щелочных стоков нефтеперерабатывающих предприятий. *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*, 50(2), 103–104.
3. Фрог Б.Н., Скурлатов Ю.И., Штамм Е.В., Вичутинская Е.В. (2012). Влияние водорастворимых соединений восстановленной серы на токсические свойства природных и сточных вод. *Вестник МГСУ*, 6, 105–113.

4. Бадикова А.Д., Мурзакова А.Р., Кудашева Ф.Х., Цадкин М.А., Гимаев Р.Н. (2005). Поиск путей очистки сернисто-щелочных стоков нефтеперерабатывающих предприятий. *Нефтегазовое дело*, 2, 24. https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Badikova/Badikova_1.pdf.
5. Ксандопуло С.Ю., Шурай С.П., Барко А.В. (2005). Очистка сернисто-щелочных стоков нефтеперерабатывающих заводов. *Экология и промышленность России*, 1, 37–39.
6. Krishnakumar B., Majumdar S., Manilal V.B., & Haridas A. (2005). Treatment of sulphide containing wastewater with sulphur recovery in a novel reverse fluidized loop reactor (RFLR). *Water Research*, 39(4), 639–647. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.015>.
7. Allegue T., Arias A., Linares A., Omil F., & Garrido J.M. (2023) Impact of dissolved sulfide on a hybrid membrane bioreactor treating the effluent of a mainstream up-flow anaerobic sludge blanket. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9(10), 2733–2744. <https://doi.org/10.1039/D3EW00404J>.
8. Kuzin E.N., & Kruchinina N.E. (2020). Titanium-containing coagulants for foundry wastewater treatment. *CIS Iron Steel Rev.*, 20(2), 66. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2020.02.14>.
9. Иванцова Н.А., Кузин Е.Н., Костылева Е.В. (2020). *Специальные технологии очистки воды от органических экотоксикантов*. М: РХТУ им. Д.И. Менделеева.
10. Merenyi G., Lind J., Naumov S., & Sonntag C. (2010). Reaction of ozone with hydrogen peroxide (peroxone process): a revision of current mechanistic concepts based on thermokinetic and quantum-chemical considerations. *Environmental science & technology*, 44(9), 3505–3507. https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es100277d?casa_token=-KAdH3OVVxMAAAAA%3AP6mCby6CWAMtjJOF2S2hr8MKp7uDrmi9l3sEYFihFZ11P1k7Yfv9MiYQXJ8BeDOwzrBtVdlSHPqDJFA.
11. Ivantsova N.A., & Karataeva P.R. (2022). Catalytic ozonation of aqueous solution of paracetamol. *Russian Journal of General Chemistry*, 92(13), 3020–3024. <https://doi.org/10.1134/S1070363222130023>.
12. Луговик К.И. Дисс. ... канд. хим. наук. Екатеринбург: УрФУ, 2018.
13. Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 N 644, ред. от 28.11.2023 (Приложение № 5 к Правилам холодного водоснабжения и водоотведения).

References:

1. Budnik V. A., Bobrovskii R. I., & Babkin D. E. (2019). Complex methods of treatment of sulfur-alkaline wastewater of oil refineries. *Petroleum Engineering*, 5, 58–85 (in Russ.). <https://doi.org/10.17122/ogbus-2019-5-58-85>.
2. Murzakova A. R., Badikova A. D., Kudasheva F. H., Tsadkin M. A., & Gimaev R.N. (2007). Purification of sulfur-alkaline wastewater from oil refiners. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*, 50(2), 103–104 (in Russ.).
3. Frog B. N., Skurlatov Yu. I., Shtamm E. V., & Vichutinskaya E. V. (2012). The effect of water-soluble compounds of reduced sulfur on the toxic properties of natural and wastewater. *Vestnik MGSU*, 6, 105–113 (in Russ.).
4. Badikova A. D., Murzakova A. R., Kudasheva F. H., Tsadkin M. A., & Gimaev R.N. (2005). Search for ways of purification of sulfur-alkaline effluents of oil refineries. *Petroleum Engineering*, 2, 24 (in Russ.). https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Badikova/Badikova_1.pdf.
5. Xandoulo S. Yu., Shuai S. P., & Barko A. V. (2005). Purification of sulfur-alkaline effluents from oil refineries. *Ecology and Industry of Russia*, 1, 37–39 (in Russ.).
6. Krishnakumar B., Majumdar S., Manilal V.B., & Haridas A. (2005). Treatment of sulphide containing wastewater with sulphur recovery in a novel reverse fluidized loop reactor (RFLR). *Water Research*, 39(4), 639–647. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.015>.
7. Allegue T., Arias A., Linares A., Omil F., & Garrido J. M. (2023) Impact of dissolved sulfide on a hybrid membrane bioreactor treating the effluent of a mainstream up-flow anaerobic sludge blanket. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9(10), 2733–2744. <https://doi.org/10.1039/D3EW00404J>.

8. Kuzin E. N., & Kruchinina N. E. (2020). Titanium-containing coagulants for foundry wastewater treatment. *CIS Iron Steel Rev.*, 20(2), 66. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2020.02.14>.
9. Ivantsova N. A., Kuzin E. N., & Kostyleva E. V. (2020). *Special technologies for water purification from organic ecotoxicants*. M: MUCTR (in Russ.).
10. Merenyi G., Lind J., Naumov S., & Sonntag C. (2010). Reaction of ozone with hydrogen peroxide (peroxone process): a revision of current mechanistic concepts based on thermokinetic and quantum-chemical considerations. *Environmental science & technology*, 44(9), 3505-3507. https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es100277d?casa_token=-KAdH3OVVxMAAAAA%3AP6mCby6CWAMtjJOF2S2hr8MKp7uDrmi9l3sEYFihFZ11P1k7Yfv9MiYQXJ8BeDOWzrBtVdlSHPqDJFA.
11. Ivantsova N. A., & Karataeva P. R. (2022). Catalytic ozonation of aqueous solution of paracetamol. *Russian Journal of General Chemistry*, 92(13), 3020–3024. <https://doi.org/10.1134/S1070363222130023>.
12. Lugovik K. I. (2018). *New derivatives of thiophene and thiazole. Synthesis and photophysical properties* (Ph.D. dissertation). Ekaterinburg: Ural Federal University (in Russ.).
13. Resolution of the Government of the Russian Federation of July 29, 2013 No. 644, as amended on November 28, 2023 (Appendix No. 5 to the Rules for Cold Water Supply and Sanitation).