

Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 5 (145). С. 165-177. ISSN 1998-8443 (print)
Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2023. Issue 5 (145). P. 165-177. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья

УДК 628.349.094.3

doi: 10.17122/ntj-oil-2023-5-165-177

EDN: QSEBSI

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗЕЛЕННЫХ РАСТЕНИЙ И ПЕРЕДОВОГО ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ

Энже Султановна Аминева¹, Наталья Сергеевна Баязитова²

^{1, 2}ООО «РН-БашНИПИнефть» (ОГ ПАО «НК «Роснефть»), Уфа, Россия

¹ ES_Amineva@bnipi.rosneft.ru

² BayazitovaNS@bnipi.rosneft.ru

Автор, ответственный за переписку: Аминева Энже Султановна,
ES_Amineva@bnipi.rosneft.ru

Аннотация. Эффективная очистка сточных вод является одним из ключевых аспектов защиты окружающей среды как с точки зрения их растущего количества, так и из-за биологических рисков, связанных со сточными водами. Процесс очистки сточных вод является сложным и трудоемким процессом, но, несмотря на значительное количество исследований в этой области, задача по максимальной очистке сточных вод полностью так и не решена.

Для наилучшей очистки сточных вод часто экспериментируют с совместным применением различных методов очистки, но высокоэффективная очистка нефтесодержащих сточных вод до сих пор остается актуальной задачей.

Одним из эффективных и безопасных способов очистки сточных вод является фиторемедиация, предполагающая использование зеленых растений для поглощения различных загрязняющих веществ. Окисление при помощи гидроксильных радикалов, которые участвуют в естественных процессах самоочищения воды, является перспективным решением для очистки сточных вод с высоким содержанием органических соединений, к которым также относятся нефтесодержащие стоки.

В данной работе предложена двухстадийная технология очистки сточных вод с высоким содержанием органических соединений с применением зеленых растений и окислительного процесса.

Для первой стадии проанализирован метод фиторемедиации и подобраны растения, наиболее эффективные при очистке исследуемой сточной воды. Для второй стадии проанализирован процесс Фентона, в результате которого подобраны оптимальное

соотношение и концентрации окислителя и катализатора. Оценена эффективность очистки сточных вод предлагаемой двухступенчатой технологией очистки по показателю «химическое потребление кислорода» (ХПК), которая составила 83,9 %.

Ключевые слова: органические соединения, метод очистки, фиторемедиация, Фентон-окисление, эффективность очистки, ХПК

Для цитирования: Аминева Э. С., Баязитова Н. С. Оценка эффективности очистки сточных вод с высоким содержанием органических соединений с применением зеленых растений и передового процесса окисления // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 5 (145). С. 165-177. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-5-165-177>.

Original article

TREATMENT EFFICIENCY ASSESSMENT FOR WASTEWATER WITH A HIGH CONTENT OF ORGANIC COMPOUNDS USING GREEN PLANTS AND AN ADVANCED OXIDATION PROCESS

Enzhe S. Amineva¹, Natalia S. Bayazitova²

^{1, 2}RN-BashNIPIneft LLC (Company of Rosneft Group), Ufa, Russia

¹ ES_Amineva@bnipi.rosneft.ru

² BayazitovaNS@bnipi.rosneft.ru

Corresponding author: Enzhe S. Amineva, ES_Amineva@bnipi.rosneft.ru

Abstract. An efficient wastewater treatment is one of the key points in the environmental protection both due to growing amounts of wastewater and associated biological risks.

Wastewater treatment is a complex and time-consuming process; however, despite a significant number of studies in this area, the problem of maximizing wastewater treatment

has not been fully resolved yet.

For the best wastewater treatment, researchers often experiment with the combined use of different treatment methods, but a highly efficient treatment of petroleum-containing wastewater is still an urgent task.

One of the most efficient and safe ways to treat wastewater is phytoremediation involving the use of green plants to absorb various pollutants. Oxidation using hydroxyl radicals, which are involved in the natural processes of water self-purification, is a promising solution for treatment of wastewater with a high content of organic compounds, including petroleum-containing effluents.

In this paper, we suggest a two-stage technology for treatment of wastewater with a high content of organic compounds using green plants and oxidation process. For the first stage, we have analyzed the phytoremediation method and selected the most effective plants in the treatment of wastewater under consideration. For the second stage, we have analyzed the Fenton's process, based on which we have selected the optimal ratio and concentration of oxidizer and catalyst. We have assessed the wastewater treatment efficiency using the suggested two-stage treatment technology in terms of the chemical oxygen demand (COD), which was 83.9 %.

Keywords: organic compounds, treatment method, phytoremediation, Fenton's oxidation, treatment efficiency, COD

For citation: Amineva E. S., Bayazitova N. S. Otsenka effektivnosti ochistki stochnykh vod s vysokim soderzhanie organicheskikh soedinenii s primeneniem zelenykh rastenii i peredovogo protsessa okisleniya [Treatment Efficiency Assessment for Wastewater with a High Content of Organic Compounds Using Green Plants and an Advanced Oxidation Process]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2023, Issue 5 (145), pp. 165-177. [in Russian]. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-5-165-177>.

Введение

Во всем мире неуклонно растет потребность в экономической и экологичной обработке сточных вод от загрязняющих веществ. Сточные воды предприятий нефтяной отрасли характеризуются содержанием различных загрязняющих веществ, подавляющее большинство из которых это органические соединения.

Технология очистки сточных вод и применяемое оборудование могут быть разные, каждая технология имеет свои достоинства и недостатки. При сравнении технологий очистки сточных вод каждый фактор необходимо

принять во внимание, рассмотрев возможность применения новых и модернизации известных технологий [1, 2]. Необходимость поиска экономически выгодных и экологически эффективных технологий очистки сточных вод представляет собой одну из актуальных задач.

В рекомендациях № 2018/1147/ЕС, предоставленных Европейской комиссией (август 2018 г.), определен список наилучших доступных технологий (НДТ), подходящих для очистки сточных вод с высоким содержанием органических соединений. Исходя из биоразлагаемости органических веществ, наиболее часто используемыми являются биологиче-

ское окисление с активным илом, расширенное химическое окисление (например процессы Фентона и озонирование) и мембранный биореактор. Эти методы можно использовать по отдельности или в комбинации для удаления органических и неорганических соединений, но в то же время они требуют тщательного управления и технического обслуживания [3, 4].

Сочетание усовершенствованных процессов окисления и биологических процессов очень эффективно для этой цели, но это зависит от характеристик сточной воды и не всегда осуществимо в полном масштабе. Ис-

ходя из вышеизложенного, целью работы является исследование эффективности системы очистки сточных вод с высоким содержанием органических соединений с использованием зеленых растений (метод фитореимедиаии) и окислительного процесса (окисление реагентом Фентона).

Материалы и методы

Процесс очистки исследуемой воды методом фитореимедиаии смоделирован на многоуровневой пилотной установке, включающей различные субстраты (рисунок 1).

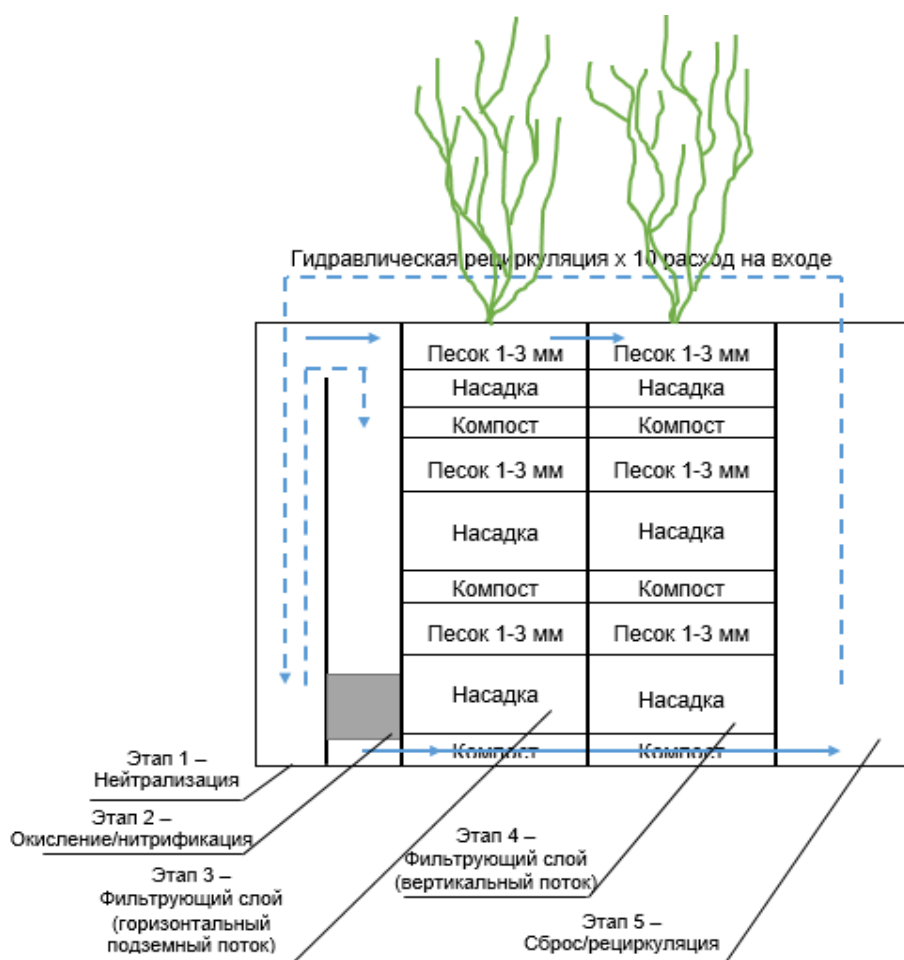


Рисунок 1. Установка для фитореимедиаии

Figure 1. Plant for phytoremediation

Пилотная установка для фиторемедиации включает несколько этапов обработки:

- 1) нейтрализация
(0,10 x 0,40 x 0,50 м, объем 20 л, минимальное время удерживания 20 мин);
- 2) окисление-нитрификация
(0,06 x 0,40 x 0,50 м, объем 12 л, время удерживания 2,5 ч);
- 3-4) фильтрующий слой, включающий горизонтальный подземный поток и вертикальный поток, соединенные последовательно
(0,20 x 0,40 x 0,5 и 0,15 x 0,4 x 0,50 м соответственно, время выдержки 20 ч);
- 5) сброс-рециркуляция
(0,74 x 0,40 x 0,50 м).

Воздух нагнетался специальным воздушным насосом, чтобы обеспечить кислородом аэробные бактерии.

Установка содержит три слоя, повторяющиеся три раза: слой компоста толщиной 2,0 см; несущий слой 2,0 см (удельная поверхность 650 м²/м³); слой песка 10 см (размерами 1-3 мм).

На верхнем слое посажено девять растений на 1 м².

Для исследования эффективности окисления реагентом Фентона смоделирован процесс очистки сточных вод на лабораторной установке - реакторе с водосточной трубой (рисунок 2).

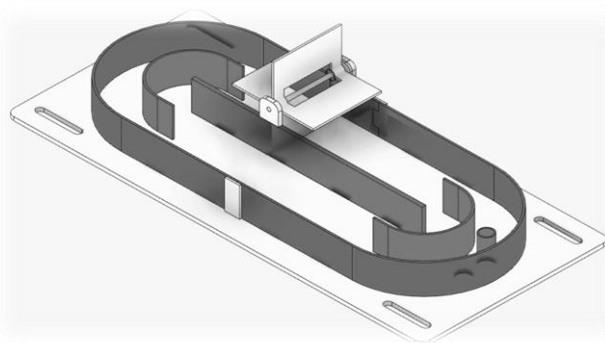


Рисунок 2. Реактор с водосточной трубой

Figure 2. Raceway pond reactor

Таблица 1. Кюветные тесты, использованные для определения концентраций загрязняющих веществ

Table 1. Cuvette tests used to determine pollutant concentrations

Кюветный тест на:	Артикул	Диапазон измерений
ХПК	LCK114	150-1000 мг/л O ₂
	LCK314	15-150 мг/л O ₂
Аммоний	LCK502	100-1800 мг/л NH ₄ -N
	LCK302	47-130 мг/л NH ₄ -N
	LCK303	2,0-47,0 мг/л NH ₄ -N
Нитриты	LCK342	0,6-6,0 мг/л NO ₂ -N
	LCK341	0,015-0,6 мг/л NO ₂ -N
Нитраты	LCK340	5-35 мг/л NO ₃ -N
Хлорид	LCK311	1-1000 мг/л Cl ⁻

Концентрации общего железа и пероксида водорода контролировались с помощью спектрофотометра PerkinElmer UV-vis:

1) колориметрическое определение концентрации растворенного железа проводилось с использованием 1,10-фенантролина (510 нм) в соответствии с методом ISO 6332;

2) концентрация пероксида водорода измерялась с использованием оксид-сульфат титана (IV) (метод DIN 38 402H15) при 410 нм.

Объектом исследования в настоящей работе является сточная вода с высоким содержанием органических соединений, в том числе нефтепродуктов, и неорганических соединений. Среди подходящих технологий для обработки таких вод фиторемедиация пред-

ставляет собой альтернативную, экологичную и визуально благоприятную технологию [5].

Фиторемедиация (от греч. «фитон» - растение и лат. «ремедиум» - восстанавливать) - технология очистки окружающей среды с помощью растений и ассоциированных с ними микроорганизмов. Данная технология предполагает использование природных процессов, с помощью которых растения и ризосферные микроорганизмы деградируют и накапливают различные поллютанты. В процессе фиторемедиации используются только природные компоненты - солнечная энергия и растительная масса, поэтому данная технология значительно дешевле технологий очистки с применением техники.

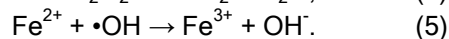
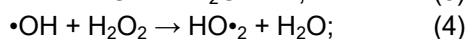
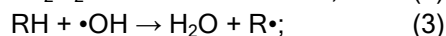
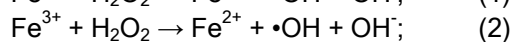
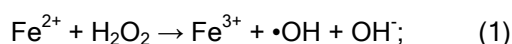
Фиторемедиация основана на использовании основных физиологических механизмов, происходящих в высших растениях и микроорганизмах, сопутствующих им, таких как транспирация, фотосинтез, метаболизм и нитрификация. Растения, произрастающие на почвах, осадках и сточных водах, могут накапливать из них неорганические и органические соединения, стабилизировать и метаболизировать вещества с участием как собственных ферментов, так и микроорганизмов, содержащихся в ризосфере. Извлекаемые вещества могут накапливаться, транспортироваться и аккумулироваться в различных клетках и тканях растений [6].

Потенциал фиторемедиации можно усилить с помощью генной инженерии, естественной микробной стимуляции, химических и натуральных добавок. Фиторемедиация может быть надежным и доступным вариантом очистки воды от органических и неорганических загрязнителей из-за ее низкой стоимости, устойчивости, связанной с растениями, и использования возобновляемых источников энергии [7].

Среди физико-химических процессов, обычно применяемых для очистки сточных вод с высоким содержанием органических соединений, усовершенствованное окисление методом Фентона является одним из наиболее распространенных вариантов очистки за рубежом. Эффективность очистки по показа-

телю химического потребления кислорода (ХПК) до 85 % наблюдается при сочетании с биологической очисткой [8-10]. Окисление реагентом Фентона основано на реакции между пероксидом водорода (H_2O_2) и ионами железа (Fe^{2+}) с образованием высокореактивных частиц (а именно гидроксильных радикалов $\bullet OH$), которые могут эффективно окислять органические и неорганические соединения.

Основными реакциями, участвующими в окислении реагентом Фентона, являются:



Эффективность окисления органических субстратов, содержащихся в сточных водах, под действием реагента Фентона существенно повышается при воздействии на реакционную систему ультрафиолетового либо солнечного света. Наблюдаемый при действии света эффект обусловлен процессами фотовосстановления комплексов трехвалентного железа с аква- и органическими лигандами, в результате чего в системе создается относительно высокая концентрация активного катализатора Fe^{2+} , генерирующего вторичные гидроксильные радикалы [11, 12].

С целью определения наилучших фиторемедиантов выполнен подбор растений по эффективности очистки исследуемого объекта от взвешенных веществ, нефтепродуктов, фосфатов, нитратов и тяжелых металлов (рисунк 3).

Согласно проведенному исследованию, наилучшими фиторемедиантами оказались тростник обыкновенный и гигантский тростник. Данные растения являются укореняющимися макрофитами, способными аккумулировать химические вещества, в том числе тяжелые металлы. Они проявляют стойкость к высокой концентрации токсикантов, а также дополнительно обладают свойством очищать воду от взвешенных частиц.

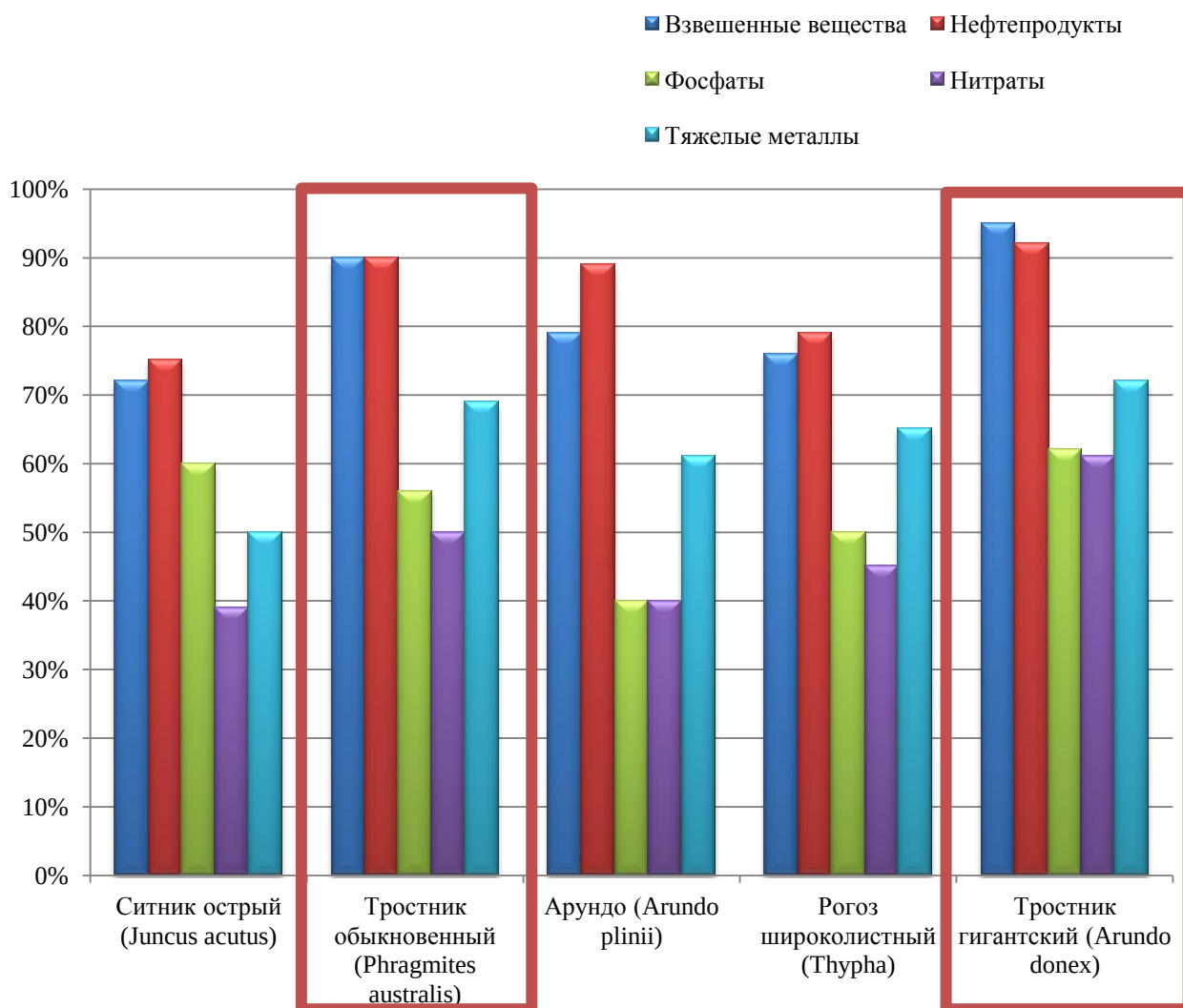


Рисунок 3. Определение наилучших фиторемигрантов по эффективности очистки

Figure 3. Determination of the best phytoremediants by purification efficiency

Широкое распространение тростника обыкновенного на территории Российской Федерации (за исключением регионов Крайнего Севера) позволяет использовать совокупность предлагаемых методов повсеместно.

Рабочие условия процесса Фентона оптимизированы с помощью лабораторных испытаний.

Эксперименты проводились в стаканах, заполненных 0,5 л 72-часовой пробой после фиторемигранции, которая перемешивалась с помощью магнитной мешалки и подвергалась воздействию солнечного света. Водородный показатель поддерживался в кислых условиях (pH 2,9-3).

Чтобы найти оптимальные рабочие условия, исследованы различные концентрации

реагентов Фентона (H_2O_2 , Fe^{2+}). Для этого сначала оценивалась эффективность очистки по ХПК при трех концентрациях пероксида водорода и фиксированной концентрации ионов железа. Затем, используя оптимальную концентрацию пероксида водорода, определялась наилучшая концентрация ионов железа.

Процедура эксперимента включает следующие этапы:

а) подкисление: проба подкисляется (до значений водородного показателя (pH) 2,5-3) добавлением серной кислоты. Значение pH контролируется с помощью универсального прибора в комплекте с датчиком для измерения pH - HI2020-02 edge.

б) темная фаза Фентон: первая часть реакции проводится в темноте, чтобы впоследствии оценить влияние солнечного излучения.

Для проведения эксперимента в темноте реактор накрывается алюминиевой фольгой. Гептагидрат сульфата железа ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) используется как источник ионов двухвалентного железа (Fe^{2+}). После полного растворения соли железа медленно добавляется пероксид водорода (30 %-ый раствор H_2O_2).

в) фото-Фентон: после темной фазы реакции Фентона фольга снимается, чтобы запустить фото-Фентон.

г) нейтрализация и флокуляция: в конце опыта водородный показатель повышается до 9 путем добавления гидроксида натрия (99 %-ый концентрированный раствор) для стимулирования образования гидроксидов железа (и облегчения их удаления за счет седиментации) и коагуляции ила, а также для разложения остатков пероксида водорода.

д) разделение твердой и жидкой фаз: для выпадения осадка после корректировки pH перемешивание прекращается.

После 24 ч отстаивания оценивается осадок (в процентах по объему очищенной воды), измеряется показатель ХПК надосадочной жидкости и определяется эффективность очистки.

Результаты исследований

Во время фитореимедиаии через каждые 24 ч проводился отбор проб. Результаты анализа проб приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты анализа проб, отобранных в течение фитореимедиаии

Table 2. Results of analysis of samples taken during phytoremediation

Параметр	Концентрация загрязняющих веществ (мг/л) спустя				Эффективность очистки, %
	исходное значение	24 ч	48 ч	72 ч	
ХПК	839,0	647,0	480,7	304,0	63,77
NO_3^-	19,5	17,1	15,3	13,3	31,79
NO_2^-	0,75	0,63	0,51	0,4	46,67
NH_4^+	250,0	176,5	94,6	34,3	86,28
Cl^-	1140,0	897,3	754,1	561,0	50,79

Нефть и нефтепродукты являются органическими загрязнителями. Одним из важнейших критериев загрязнения сточных вод органическими веществами является ХПК. Поэтому вклад в эффективность очистки сточных вод от нефти и нефтепродуктов оценен по величине ХПК. Эффективность очистки, которая определялась отношением показателя ХПК в стоках после очистки к значению этого показателя до очистки, после фитореимедиаии составила 63,77 %.

Результаты оптимизации рабочих условий процесса Фентона приведены на рисунке 3.

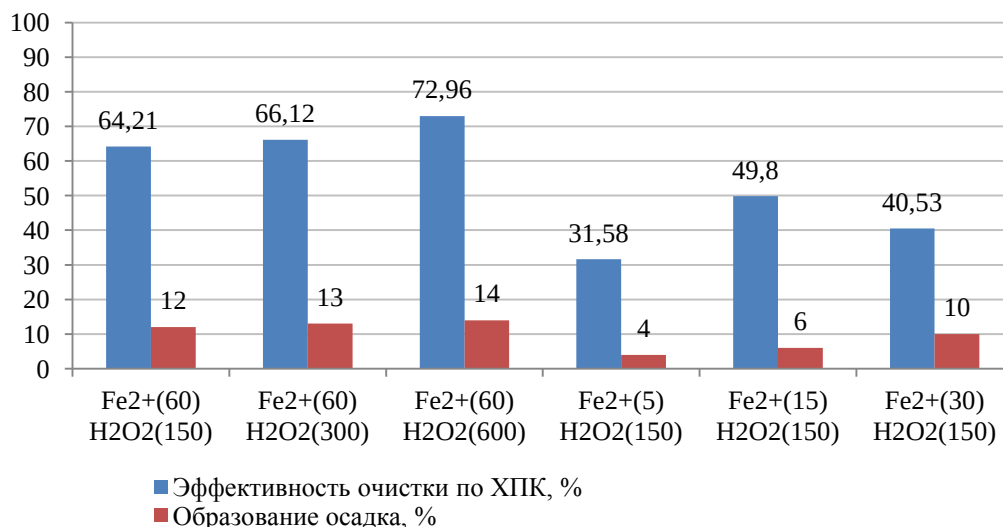


Рисунок 3. Эффективность очистки по ХПК при разных концентрациях пероксида водорода и ионов железа (ХПК₀ = 304 мг/л, pH = 3)

Figure 3. Treatment efficiency by COD at different concentrations of hydrogen peroxide and iron ions (COD₀ = 304 mg/l, pH = 3)

Высокую эффективность очистки показали образцы при фиксированной концентрации ионов железа (60 мг/л). При этом образование осадка, который оценивался в процентах по объему очищенной воды, для этих образцов наибольшее.

Сложность утилизации осадка, содержащего различные загрязняющие вещества, в том числе гидроксид железа, а также количество необходимого реагента (H₂O₂) определяют выбор оптимальных концентраций – 150 мг/л для пероксида водорода и 60 мг/л для ионов железа.

При моделировании окислительного процесса на реакторе с водосточной трубой использованы подобранные оптимальные концентрации окислителя и катализатора. Объем пробы составил 12,5 л.

Количество реагентов, затраченных для очистки этого объема сточных вод, приведено в таблице 3.

Таблица 3. Количество реагентов, затраченных в ходе эксперимента

Table 3. Amount of reagents consumed during the experiment

Реагенты	Количество
H ₂ SO ₄ , мл	8,5
Fe ²⁺ , мл	50
H ₂ O ₂ , мкл	5631+3523(доп.)*
NaOH, мл	8
Примечание: * - в ходе реакции при времени 60 и 90 мин добавлен H ₂ O ₂	

Результаты эксперимента, проведенного на лабораторной установке, приведены в таблице 4. Величина ХПК (304 мг/л) после фиторемедиации стала исходным значением для процесса окисления реагентом Фентона.

Таблица 4 интерпретирована на рисунке 5.

Таблица 4. Результаты эксперимента, проведенного на лабораторной установке

Table 4. Results of the experiment carried out on a laboratory installation

t, мин	ХПК, мг/л	ХПК (C/C ₀)	H ₂ O ₂ , мг/л	Fe ^{2+/3+} , мг/л	pH
-30*	304	1	150	59,7	2,81
-15*	242	0,7961	70,1	58,5	2,7
0	172	0,5658	42	57,4	2,39
15	156	0,5132	17,7	60,4	2,6
30	156	0,5132	11,4	60,4	2,65
60	159	0,523	10,1	62,5	2,64
90	132	0,4342	9,4	60,2	2,67
120	126	0,4145	9,6	62,9	2,67
120+	135	0,4441	0	0,1	8,36

Примечание:
* - темная фаза процесса Фентона

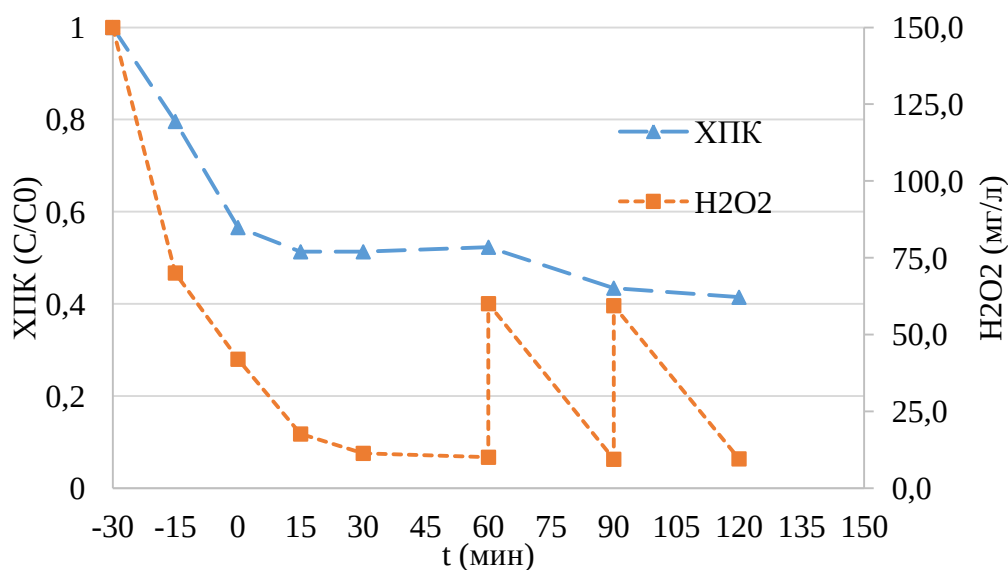


Рисунок 5. Эффективность очистки сточных вод по показателю ХПК и концентрация пероксида водорода (pH = 3; Fe²⁺ = 60 мг/л; H₂O₂ = 150 мг/л)

Figure 5. Wastewater treatment efficiency in terms of COD and hydrogen peroxide concentration (pH = 3; Fe²⁺ = 60 mg/l; H₂O₂ = 150 mg/l)

Таким образом, эффективность очистки сточных вод по показателю ХПК после Фентон-окисления составила 55,6 %. Пероксид водорода к концу эксперимента израсходовался полностью. Концентрация раство-

ренного железа в надосадочной жидкости составила 0,1 мг/л.

Итоговые результаты очистки исследуемой воды предлагаемыми методами приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты очистки исследуемой воды предлагаемыми методами

Table 5. Results of purification of the test water using the proposed methods

Показатель	Исходное значение	Значение после фиторемедиации	Значение после фентон-окисления	Итоговое значение
Величина ХПК, мг/л	839,0	304,0	135	135
Эффективность очистки, %	-	63,77	55,6	83,9

Таким образом, двухстадийная технология очистки сточных вод позволила с исходной величиной ХПК 839 мг/л очистить до величины 135 мг/л. Общая эффективность очистки сточных вод по ХПК составила 83,9 %.

Выводы

Подобраны методы и исследована предложенная технология очистки сточной воды с высоким содержанием органических соединений. Оптимальной, с точки зрения проведенных исследований, является технология, предполагающая сочетание фиторемедиации с процессом Фентона.

Для очистки исследуемой воды подобраны наиболее эффективные фиторемедианты - тростник обыкновенный и гигантский тростник. На пилотной установке смоделирован процесс очистки сточной воды методом «фиторемедиация».

Определены оптимальные концентрации окислителя и катализатора для очистки Фентон-окислением. Согласно результатам экспериментов, наилучшая концентрация пероксида водорода - 150 мг/л, ионов железа - 60 мг/л. На основе полученных данных смоделирован процесс очистки сточной воды Фентон-окислением на лабораторной установке.

Оценена эффективность очистки исследуемой сточной воды предлагаемыми методами по показателю ХПК. Эффективность очистки после фиторемедиации на основе тростника обыкновенного составила 63,8 %, после доочистки окислением реагента Фентона - 55,6 %.

Произрастание тростника обыкновенного во многих регионах РФ позволяет широко тиражировать предложенную методику с эффективностью очистки сточных вод до 84 %.

Список источников

1. Воробьева Е.В. Исследование коллоидных свойств нефтезагрязненных сточных вод и разработка способов их очистки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24, № 4. С. 165-176. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-165-176. EDN: OIRFOO.
2. Борисова О.Н., Волкова Е.С. Очистка нефтесодержащих сточных вод: обзор традиционных и современных методов // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2022): матер. XVIII международ. науч.-технич. конф. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2022. С. 240-245. EDN: XNCPGK.
3. Ганиев Т.М. Фентон-окисление как альтернатива биологической очистке // Природопользование и охрана природы: охрана памятников природы, биологического и ландшафтного разнообразия Томского Приобья и других регионов России: матер. IX Всеросс. науч.-практ. конф. / Отв. ред. Н.М. Семенов. Томск: Изд-во ТГУ, 2020. С. 280-285. DOI: 10.17223/978-5-94621-954-9-2020-67. EDN: NRQEYK.
4. Скулкина А.В., Иванцова М.Н. Новые технологии в очистке сточных вод // Актуальные вопросы органической химии и биотехнологии: матер. науч.-практ. конф. Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2020. С. 666-668.
5. Podhajska E., Drzeniecka-Osiadacz A., Halarewicz A., Grech D., Podhajski B., Zienowicz M., Bąbelewski P., Liszewski M. Phytoremediation as an Urban Paradigm in Promoting the Health-Potential of Small Green Areas // Sustainable Cities and Society. 2023. Vol. 96. Article No. 104684. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104684.
6. Мельников В.А. Использование фиторемидации для очищения воды // История, современное состояние и перспективы инновационного развития науки: сб. ст. по итогам международного науч.-практ. конф. / Отв. ред. А.А. Сукиасян. Уфа: АМИ, 2021. С. 8-13. EDN: DGKJIF.
7. Risky Kristanti A., Hadibarata T. Phytoremediation of Contaminated Water Using Aquatic Plants, its Mechanism and Enhancement // Current Opinion in Environmental Science and Health. 2023. Vol. 32. Article No. 100451. DOI: 10.1016/j.coesh.2023.100451.
8. Sanarya K. Kamal, Ammar S. Abbas Fenton Oxidation Reaction for Removing Organic Contaminants in Synesthetic Refinery Wastewater Using Heterogeneous Fe-Zeolite: An Experimental Study, Optimization, and Simulation // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2023. Vol. 8. Article No. 100458. DOI: 10.1016/j.csee.2023.100458.
9. Alomar T.S., Hameed B.H., Usman M., Almomani F.A., Ba-Abbad M.M., Khraisheh M. Recent Advances on the Treatment of Oil Fields Produced Water by Adsorption and Advanced Oxidation Processes // Journal of Water Process Engineering. 2022. Vol. 49. Article No. 103034. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103034.
10. Yuqin Ni, Chuxiang Zhou, Mingyang Xing, Yi Zhou Oxidation of Emerging Organic Contaminants by In-Situ H₂O₂ Fenton System // Green Energy and

References

1. Vorobeva E.V. Issledovanie kolloidnykh svoystv neftezagryaznennykh stochnykh vod i razrabotka sposobov ikh ochistki [Colloidal Properties of Oil-Contaminated Sewage and its Treatment]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta - Journal of Construction and Architecture*, 2022, Vol. 24, No. 4, pp. 165-176. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-165-176. EDN: OIRFOO. [in Russian].
2. Borisova O.N., Volkova E.S. Ochistka neftesoderzhashchikh stochnykh vod: obzor traditsionnykh i sovremennykh metodov [Oil-Containing Wastewater Treatment: Overview of Traditional and Modern Methods]. *Materialy XVIII mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Nauka, obrazovanie, proizvodstvo v reshenii ekologicheskikh problem (Ekologiya-2022)»* [Materials of the XVIII International Scientific and Technical Conference «Science, Education, Production in Solving Environmental Problems (Ecology-2022)»]. Ufa, UGATU Publ., 2022, pp. 240-245. EDN: XNCPGK. [in Russian].
3. Ganiev T.M. Fenton-okislenie kak al'ternativa biologicheskoi ochistke [Fenton Oxidation as an Alternative to Biological Wastewater Treatment]. *Materialy IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Prirodopol'zovanie i okhrana prirody: okhrana pamyatnikov prirody, biologicheskogo i landshaftnogo raznoobraziya Tomskogo Priob'ya i drugikh regionov Rossii»* [Materials of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference «Nature Management and Nature Conservation: Protection of Natural Monuments, Biological and Landscape Diversity of the Tomsk Ob Region and other Regions of Russia»]. Res. Ed. N.M. Semenovoi. Tomsk, TGU Publ., 2020, pp. 280-285. DOI: 10.17223/978-5-94621-954-9-2020-67. EDN: NRQEYK. [in Russian].
4. Skulkina A.V., Ivantsova M.N. Novye tekhnologii v ochistke stochnykh vod [New Technologies in Wastewater Treatment]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye voprosy organicheskoi khimii i biotekhnologii»* [Materials of the scientific-Practical Conference «Current Issues of Organic Chemistry and Biotechnology»]. Ekaterinburg, AMB Publ., 2020, pp. 666-668. [in Russian].
5. Podhajska E., Drzeniecka-Osiadacz A., Halarewicz A., Grech D., Podhajski B., Zienowicz M., Bąbelewski P., Liszewski M. Phytoremediation as an Urban Paradigm in Promoting the Health-Potential of Small Green Areas. *Sustainable Cities and Society*, 2023, Vol. 96, Article No. 104684. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104684.
6. Melnikov V.A. Ispol'zovanie fitoremediatsii dlya ochishcheniya vody [Using Phytoremediation to Purify Water]. *Sbornik statei po itogam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Istoriya, sovremennoe sostoyanie i perspektivy innovatsionnogo razvitiya nauki»* [Collection of Articles Based on the Results of the International Scientific and Practical Conference «History, Current State and Prospects for Innovative Development of Science»]. Res. Ed. A.A. Sukiasyan. Ufa, AMI Publ., 2021, pp. 8-13. EDN: DGKJIF. [in Russian].

Environment. 2023. DOI: 10.1016/j.gee.2023.01.003.

11. Кабанов М.А., Иванцова Н.А., Коваль К.А., Балакина Е.С. Фотоокислительные методы в очистке органических соединений. Обзор // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34, № 12 (235). С. 24-27. EDN: FCVUIH.

12. de Carluccio M., Fiorentino A., Rizzo L. Multi-Barrier Treatment of Mature Landfill Leachate: Effect of Fenton Oxidation and Air Stripping on Activated Sludge Process and Cost Analysis // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2020. Vol. 8, Issue 5. Article No. 104444. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104444.

7. Risky Kristanti A., Hadibarata T. Phytoremediation of Contaminated Water Using Aquatic Plants, its Mechanism and Enhancement. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 2023, Vol. 32, Article No. 100451. DOI: 10.1016/j.coesh.2023.100451.

8. Sanarya K. Kamal, Ammar S. Abbas Fenton Oxidation Reaction for Removing Organic Contaminants in Synesthetic Refinery Wastewater Using Heterogeneous Fe-Zeolite: An Experimental Study, Optimization, and Simulation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023, Vol. 8, Article No. 100458. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100458.

9. Alomar T.S., Hameed B.H., Usman M., Almomani F.A., Ba-Abbad M.M., Khraisheh M. Recent Advances on the Treatment of Oil Fields Produced Water by Adsorption and Advanced Oxidation Processes. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, Vol. 49, Article No. 103034. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103034.

10. Yuqin Ni, Chuxiang Zhou, Mingyang Xing, Yi Zhou Oxidation of Emerging Organic Contaminants by In-Situ H₂O₂ Fenton System. *Green Energy and Environment*, 2023. DOI: 10.1016/j.gee.2023.01.003.

11. Kabanov M.A., Ivantsova N.A., Koval K.A., Balakina E.S. Fotookislitel'nye metody v oчитске organicheskikh soedinenii. Obzor [Photo-Oxidative Methods in the Purification of Organic Compounds. Review]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii - Success in Chemistry and Chemical Technology*, 2020, Vol. 34, No. 12 (235), pp. 24-27. EDN: FCVUIH. [in Russian].

12. de Carluccio M., Fiorentino A., Rizzo L. Multi-Barrier Treatment of Mature Landfill Leachate: Effect of Fenton Oxidation and Air Stripping on Activated Sludge Process and Cost Analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, Vol. 8, Issue 5, Article No. 104444. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104444.

Информация об авторах

• Аминева Энже Султановна
ООО «РН-БашНИПИнефть»
(ОГ ПАО «НК «Роснефть»)
Старший инженер отдела проектирования
промышленной безопасности
Россия, 450006, Уфа, ул. Цюрупы, 126
e-mail: ES_Amineva@bnipi.rosneft.ru

• Баязитова Наталья Сергеевна
ООО «РН-БашНИПИнефть»
(ОГ ПАО «НК «Роснефть»)
Начальник управления проектирования систем
промышленной и экологической безопасности
Россия, 450006, Уфа, ул. Цюрупы, 126
e-mail: BayazitovaNS@bnipi.rosneft.ru

Information about the authors

• Amineva Enzhe S.
RN-BashNIPIneft LLC
(Company of Rosneft Group)
Senior Engineer of Industrial Safety Design
Department
126, Tsyurupy str., Ufa, 450006, Russia
e-mail: ES_Amineva@bnipi.rosneft.ru

• Bayazitova Natalia S.
RN-BashNIPIneft LLC
(Company of Rosneft Group)
Head of Industrial and Environmental Safety Systems
Design Department
126, Tsyurupy str., Ufa, 450006, Russia
e-mail: BayazitovaNS@bnipi.rosneft.ru

Статья поступила в редакцию 28.08.2023; одобрена после рецензирования 05.09.2023; принята к публикации 10.09.2023.

The article was submitted 28.08.2023; approved after reviewing 05.09.2023; accepted for publication 10.09.2023.