

Статья поступила в редакцию: 10.09.2026

Статья принята к публикации: 16.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 628.3+544.77

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23404

Доочистка нефтесодержащих сточных вод древесными активированными углями, содержащими соединения железа и цинка

Умматов Обиджон Олимжон угли
соискатель

Кокандский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Коканд

Очилов Голиб Мамаюнович
д-р хим. наук, проф.

Кокандский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Коканд
E-mail: golibjon.ochilov@mail.ru

Матмусаев Абдумуталиб Каххоржон угли
докторант

Кокандский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Коканд
E-mail: Abdumutalib07091997@gmail.com

Эшметов Иzzат Дусимбатович
д-р тех. наук, проф.

Институт общей и неорганической химии АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: izzat.dusimbatovich@gmail.com

Библиографическое описание: Доочистка нефтесодержащих сточных вод древесными активированными углями, содержащими соединения железа и цинка // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Умматов О.О.У. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23404>

Polishing of oil-containing wastewater with wood-derived activated carbons containing iron and zinc compounds

Ummatov Obidjon

*Applicant, Kokand State University
Republic of Uzbekistan, Kokand*

Ochilov Golib

*Dr. Sci. (Chem.), Professor
Kokand State University
Republic of Uzbekistan, Kokand*

Matmusaev Abdumutalib

*Doctoral student
Kokand State University
Republic of Uzbekistan, Kokand*

Eshmetov Izzat

*doctor of Technical Sciences
professor Institute of General and Inorganic Chemistry
Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

Аннотация

Целью работы являлось сравнение эффективности промышленного угля БАУ, железосодержащего древесного угля AU–Fe и цинксодержащего угля Zn-1,0 при адсорбционной доочистке реальной нефтесодержащей сточной воды. Оценена пригодность древесных активированных углей, модифицированных соединениями железа и цинка, для решения этой задачи. Адсорбенты получены из отходов мебельного производства карбонизацией с последующей совместной химической активацией и модификацией хлоридами металлов. Испытания проводили на воде Ферганского нефтеперерабатывающего завода после механической очистки в статических условиях: 25 ± 2 °C, доза 5 г/л, контакт 60 мин, перемешивание 200 об/мин. Контролировали семь показателей: нефтепродукты, фенольные соединения, ароматические углеводороды, ионы меди и свинца, химическое потребление кислорода и мутность. Установлено, что при использовании цинксодержащего угля Zn-1,0 содержание нефтепродуктов снижается со 142,0 до 8,4 мг/л, фенольных соединений – с 14,60 до 0,58 мг/л, меди – с 2,80 до 0,09 мг/л, свинца – с 1,90 до 0,05 мг/л, а химическое потребление кислорода – с 1260 до 72 мг O_2 /л. Степень удаления составила 93,2–97,4 %, расчётная нагрузка по нефтепродуктам – 26,72 мг/г. Для всех показателей остаточное значение было наименьшим при использовании Zn-1,0 и наибольшим для БАУ. Практическая значимость работы состоит в обосновании применения адсорбентов из местного древесного сырья на стадии доочистки нефтесодержащих стоков.

Abstract

The aim of the study was to compare the efficiency of commercial BAU activated carbon, iron-containing wood-derived carbon AU–Fe, and zinc-containing carbon Zn-1.0 for the adsorption polishing of actual oil-containing wastewater. The study evaluates the suitability of wood-derived activated carbons modified with iron and zinc compounds for the adsorption polishing of actual oil-containing wastewater and compares them with commercial BAU activated carbon. The adsorbents were obtained from furniture-production waste by carbonisation followed by simultaneous chemical

activation and modification with metal chlorides. Tests were carried out on water from the Fergana oil refinery after mechanical treatment under batch conditions: 25 ± 2 °C, dosage 5 g/L, contact time 60 min, agitation 200 rpm. Seven indicators were monitored: petroleum products, phenolic compounds, aromatic hydrocarbons, copper and lead ions, chemical oxygen demand, and turbidity. It was established that with the zinc-containing carbon Zn-1.0 the content of petroleum products decreases from 142.0 to 8.4 mg/L, phenolic compounds from 14.60 to 0.58 mg/L, copper from 2.80 to 0.09 mg/L, lead from 1.90 to 0.05 mg/L, and chemical oxygen demand from 1260 to 72 mg O₂/L. Removal efficiencies ranged from 93.2 to 97.4 %, and the calculated petroleum-product loading was 26.72 mg/g. For all indicators the residual value was lowest with Zn-1.0 and highest with BAU. The practical value of the work lies in substantiating the use of adsorbents made from local wood raw materials at the polishing stage of oil-containing effluent treatment.

Ключевые слова: нефтесодержащие сточные воды, адсорбционная доочистка, активированный уголь, древесные отходы, модификация металлами, химическое потребление кислорода, тяжёлые металлы.

Keywords: oil-containing wastewater, adsorption polishing, activated carbon, wood waste, metal modification, chemical oxygen demand, heavy metals.

Введение

Реальная нефтесодержащая сточная вода представляет многокомпонентную среду, для которой необходимо оценивать одновременно несколько показателей очистки. Снижение концентрации одной органической примеси не означает соответствующего уменьшения химического потребления кислорода (ХПК), содержания металлов или мутности, поэтому сравнение сорбентов должно проводиться на одной водной матрице при одинаковых условиях контактирования [1]. Активированные угли из растительных отходов рассматриваются как экономически доступная альтернатива промышленным сорбентам [10]; для Узбекистана такой подход дополнительно решает задачу утилизации отходов деревообработки.

Исследования реальных нефтепромышленных стоков показывают различие вклада отдельных стадий обработки и необходимость отдельного учёта загрязнителей [7, 9]. Дополнительную сложность создаёт дисперсное состояние нефтяных компонентов: их сорбция зависит от условий диспергирования и присутствия диспергаторов [4], поэтому результаты, полученные на растворах индивидуальных веществ, не заменяют испытания реальной смеси.

Цель работы – сравнить промышленный уголь БАУ, железосодержащий древесный уголь AU–Fe и цинксодержащий Zn-1,0 при доочистке воды Ферганского нефтеперерабатывающего завода после механической ступени. Задачи: определить степень снижения каждого контролируемого показателя, рассчитать нагрузку на сорбент по удалённым веществам и установить границы переноса статических результатов на технологический процесс.

Материалы и методы

Адсорбенты получены из отходов мебельного производства (опилки и мелкая стружка без покрытий и химической обработки). Сырьё очищали от посторонних включений, сушили при 105 ± 2 °С до постоянной массы, измельчали и просеивали. Карбонизацию проводили в токе аргона при скорости нагревания 10 °С/мин и выдержке 60 мин. Карбонизат подвергали совместной химической активации и модификации водными растворами хлоридов железа и цинка с последующей термообработкой в инертной среде, промывкой до отсутствия хлорид-ионов в фильтрате и сушкой при 105 ± 2 °С.

Испытания проведены 1–15 апреля 2026 г. на воде ООО «Ферганский нефтеперерабатывающий завод», отобранной после механической очистки. Контрольным сорбентом служил промышленный уголь марки БАУ. Статическое контактирование осуществляли при 25 ± 2 °С, дозе сухого сорбента 5 г/л, перемешивании 200 об/мин и продолжительности 60 мин. После отделения твёрдой фазы определяли остаточные нефтепродукты, фенольные соединения, ароматические углеводороды, Cu^{2+} , Pb^{2+} , ХПК и мутность.

Степень снижения показателя рассчитывали как $R = 100(C_0 - C_{60})/C_0$, где C_0 – исходное значение, C_{60} – значение после 60 мин обработки. Нагрузку по удалённому компоненту определяли выражением $q_{60} = (C_0 - C_{60})/D$ при дозе $D = 5$ г/л; при концентрациях в мг/л результат выражается в мг/г и характеризует количество вещества, перешедшее из жидкой фазы на сорбент в условиях опыта, а не предельную равновесную ёмкость. Показатели «нефтепродукты», «ароматические углеводороды» и «фенольные соединения» определяли отдельно и не суммировали, поскольку учитываемые группы веществ могут частично пересекаться.

Результаты и их обсуждение

Все три угля уменьшали значения контролируемых показателей относительно воды после механической обработки (таблица 1). Для каждого показателя порядок остаточных значений сохранялся: БАУ > АУ–Fe > Zn-1,0.

Таблица 1.

Показатели сточной воды до и после контактирования с активированными углями

Показатель	До обработки	БАУ	АУ–Fe	Zn-1,0
Нефтепродукты, мг/л	142,0	24,6	12,8	8,4
Фенольные соединения, мг/л	14,60	2,45	0,95	0,58
Ароматические углеводороды, мг/л	24,8	5,2	2,4	1,6
Cu^{2+} , мг/л	2,80	0,92	0,46	0,09
Pb^{2+} , мг/л	1,90	0,64	0,34	0,05
ХПК, мг O_2 /л	1260	285	118	72
Мутность, NTU	118	32	14	8

Условия опыта: доза 5 г/л, время контакта 60 мин, температура 25 ± 2 °С.

При использовании Zn-1,0 содержание нефтепродуктов уменьшалось на 133,6 мг/л, фенольных соединений – на 14,02 мг/л, ароматических углеводородов – на 23,2 мг/л. По сравнению с БАУ остаточная концентрация нефтепродуктов была меньше в 2,93 раза, фенольных соединений – в 4,22 раза.

Таблица 2.

Относительное снижение контролируемых показателей, %

Показатель	БАУ	AU-Fe	Zn-1,0
Нефтепродукты	82,7	91,0	94,1
Фенольные соединения	83,2	93,5	96,0
Ароматические углеводороды	79,0	90,3	93,5
Cu^{2+}	67,1	83,6	96,8
Pb^{2+}	66,3	82,1	97,4
ХПК	77,4	90,6	94,3
Мутность	72,9	88,1	93,2

Расчёт по данным таблицы 1. Для ХПК и мутности приведено снижение показателя, а не массовая степень удаления отдельного вещества.

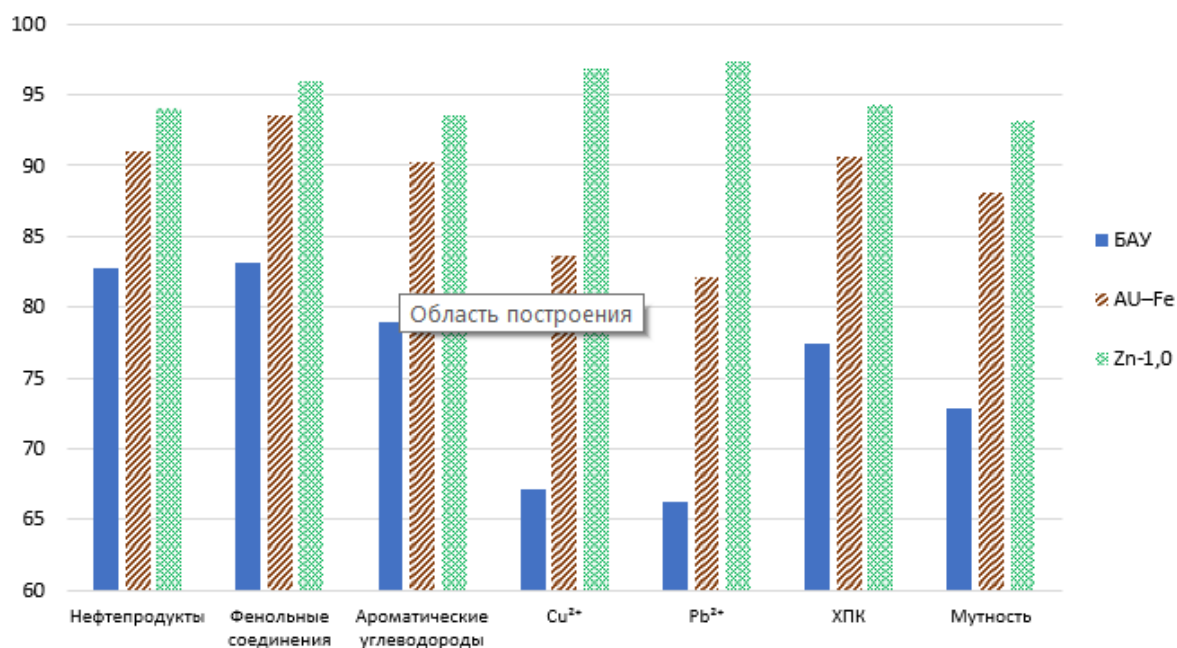


Рисунок 1. Степень снижения контролируемых показателей сточной воды при обработке углями БАУ, AU-Fe и Zn-1,0

Различие между Zn-1,0 и БАУ по степени удаления меди составляло 29,6 процентного пункта, свинца – 31,1, тогда как для нефтепродуктов разрыв был меньше – 11,4. Таким образом, относительное преимущество материала зависело от контролируемого компонента, несмотря на единый порядок ранжирования.

Расчёт q_{60} позволяет выразить снижение концентрации относительно дозы угля (таблица 3). Для нефтепродуктов нагрузка составляла 23,48 мг/г на БАУ, 25,84 мг/г на АУ–Fe и 26,72 мг/г на Zn-1,0. Преимущество Zn-1,0 по этой величине относительно БАУ равно 13,8 %, хотя остаточная концентрация различалась почти втрое: при высокой общей степени удаления небольшое дополнительное поглощение существенно уменьшает остаток.

Таблица 3.**Нагрузка по компонентам, удалённым из жидкой фазы за 60 мин, мг/г**

Компонент	БАУ	АУ–Fe	Zn-1,0
Нефтепродукты	23,480	25,840	26,720
Фенольные соединения	2,430	2,730	2,804
Ароматические углеводороды	3,920	4,480	4,640
Cu^{2+}	0,376	0,468	0,542
Pb^{2+}	0,252	0,312	0,370

Расчёт по данным таблицы 1 при $D = 5$ г/л. Значения не суммируются и не являются предельными равновесными ёмкостями.

Падение ХПК на 1188 мг O_2 /л при использовании Zn-1,0 отражает уменьшение кислородного эквивалента окисляемых веществ и не равно массе удалённых нефтепродуктов; снижение мутности характеризует оптическое свойство воды и не пересчитывается в мг/г.

Преимущество металлсодержащих образцов совместимо с более развитой поверхностью этих материалов, однако сравнение с БАУ не изолирует эффект модификатора: материалы различаются сырьём, размером частиц и пористостью. Обработка поверхности не даёт универсального улучшения всех показателей: введение железооксидной составляющей снижало ёмкость по природному органическому веществу [6], а азотнокислотная модификация давала разнонаправленные изменения удаления свинца и фенола [5]. Из разности концентраций нельзя выделить вклад собственно адсорбции, удержания дисперсной фазы и соосаждения; возможным фактором остаётся и конкуренция фоновой органики [11]. Остаточные концентрации фенольных соединений сопоставимы с результатами для углей из растительного сырья [3].

Испытанный режим отвечает расходу 5 кг угля на кубометр воды; это пересчёт лабораторной дозы, а не норма непрерывной установки. Для оценки повторного применения необходимы данные об отделении угля, вымывании модификатора и регенерации [2], причём оптимальная обработка материала для удаления органики может отличаться от оптимальной для минерального компонента [8].

Заключение

При дозе 5 г/л и контактировании 60 мин цинксодержащий древесный уголь Zn-1,0 обеспечивал наименьшие остаточные значения всех семи контролируемых показателей реальной нефтесодержащей сточной воды после механической очистки. Степень удаления нефтепродуктов составила 94,1 %, фенольных соединений – 96,0 %, меди – 96,8 %, свинца – 97,4 %; ХПК снизилось с 1260 до 72 мг O_2 /л. Железосодержащий АУ–Fe занимал

промежуточное положение между Zn-1,0 и промышленным углём БАУ. Расчётная нагрузка по нефтепродуктам достигала 26,72 мг/г и относится к выбранной дозе и продолжительности опыта.

Результаты обосновывают применение активированных углей из местных древесных отходов на стадии адсорбционной доочистки нефтесодержащих стоков. Дальнейшая разработка требует динамических испытаний в колонном режиме, контроля pH, оценки вымывания модификатора и регенерации загрузки.

Список литературы

1. Ateia M., Helbling D.E., Dichtel W.R. Best practices for evaluating new materials as adsorbents for water treatment // ACS Materials Letters. – 2020. – Т. 2, № 11. – DOI: 10.1021/acsmaterialslett.0c00414.
2. Drenkova-Tuhtan A., Inskeep C.S., Luthardt L. [et al.] Reusable and inductively regenerable magnetic activated carbon for removal of organic micropollutants from secondary wastewater effluents // Water Research. – 2024. – Т. 255. – Art. 121525. – DOI: 10.1016/j.watres.2024.121525.
3. Franco D.S.P., Georgin J., Netto M.S. [et al.] Highly effective adsorption of synthetic phenol effluent by a novel activated carbon prepared from fruit wastes of the Ceiba speciosa forest species // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Т. 9, № 5. – Art. 105927. – DOI: 10.1016/j.jece.2021.105927.
4. Ji H., Xie W., Liu W., Liu X., Zhao D. Sorption of dispersed petroleum hydrocarbons by activated charcoals: Effects of oil dispersants // Environmental Pollution. – 2020. – Т. 256. – Art. 113416. – DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113416.
5. Kim H.-K., Kim S.-J., Kim H.-R., Park J.-W. Nitric acid modified powdered activated carbon for simultaneous adsorption of lead and phenol in aqueous solution // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. – Т. 12, № 6. – Art. 114889. – DOI: 10.1016/j.jece.2024.114889.
6. Lompe K.M., Menard D., Barbeau B. The influence of iron oxide nanoparticles upon the adsorption of organic matter on magnetic powdered activated carbon // Water Research. – 2017. – Т. 123. – DOI: 10.1016/j.watres.2017.06.045.
7. Madi N.E., Chabani M., Bouafia-Chergui S., Touil A. Removal of chemical oxygen demand from real petroleum refinery wastewater through a hybrid approach: Electrocoagulation and adsorption // Chemical Engineering and Processing. – 2024. – Т. 196. – Art. 109680. – DOI: 10.1016/j.cep.2024.109680.
8. Nigri E.M., Santos A.L.A., Mesquita P.L., Viana P.R.M., Rocha S.D.F. Simultaneous removal of strontium and refractory organic compounds from electrodialysis effluents by modified bovine bone char // Desalination and Water Treatment. – 2019. – Т. 145. – DOI: 10.5004/dwt.2019.23655.
9. Nigri E.M., Santos A.L.A., Rocha S.D.F. Removal of organic compounds, calcium and strontium from petroleum industry effluent by simultaneous electrocoagulation and adsorption // Journal of Water Process Engineering. – 2020. – Т. 37. – Art. 101442. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101442.

-
10. Pereira L., Castillo V., Calero M. [et al.] Insights into using plastic waste to produce activated carbons for wastewater treatment applications: A review // Journal of Water Process Engineering. – 2024. – Т. 62. – Art. 105386. – DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105386.
 11. Yilmaz E., Altiparmak E., Dadaser-Celik F., Ates N. Impact of natural organic matter competition on the adsorptive removal of acetochlor and metolachlor from low-specific UV absorbance surface waters // ACS Omega. – 2023. – Т. 8, № 35. – DOI: 10.1021/acsomega.3c02588.