



Адсорбция нефтепродуктов модифицированными и активированными адсорбентами

© А.Д. Чугунов, Е.Г. Филатова

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Целью работы явилось исследование адсорбции нефтепродуктов из водных растворов адсорбентами, модифицированными HCl и активированными СВЧ-излучением. В качестве объектов исследования были использованы углеродные адсорбенты – активные угли: АД-05-2, ИПИ-Т, КАД-йодный, и цеолиты Забайкальского месторождения. Количественный анализ вод (модельных растворов с исходной концентрацией нефтепродуктов не более 10 мг/л) проводили флуориметрическим методом на анализаторе жидкости Флуорат-02. Активирование адсорбентов осуществляли в СВЧ-печи при мощности волн 800 Вт в течение 1 мин. Модифицирование осуществляли по следующей методике: 10 г высушенных до постоянной массы при температуре 120–150 °С адсорбентов перемешивали 24 ч с 200 мл 12%-го раствора HCl в воде. Затем суспензию фильтровали и промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции. В ходе исследования установлено, что величина адсорбции нефтепродуктов адсорбентами, модифицированными HCl, возрастает в 3,8 раза для активного угля КАД-йодный, в 0,5 раза – для ИПИ-Т, и принимает значения 0,71 и 0,80 мг/г соответственно. Эти сорбенты имеют наиболее крупный размер зерен – 3–5 мм, и наибольший объем микропор – 0,28–0,29 см³/г. Установлено, что метод краткосрочной (в течение 1 мин) СВЧ-активации позволяет увеличить адсорбцию нефтепродуктов: в 4,2 раза – для активного угля КАД-йодный, в 0,6 раза – для ИПИ-Т, по сравнению с исходными адсорбентами. Наибольшая величина адсорбции нефтепродуктов соответствует цеолитам и принимает значение 0,99 мг/г. Действие СВЧ-излучения происходит за счет диссоциации и испарения связанной в адсорбентах воды и легковоспламеняющихся органических веществ, что ведет к увеличению пористости адсорбента. Применение метода СВЧ-активации является весьма перспективным по сравнению с классическими методами химического и парогазового активирования, так как позволяет упростить технологическое оформление и снизить расход реагентов на производство эффективных адсорбентов, используемых для извлечения нефтепродуктов из водных растворов. Особенно это становится важным в контексте поддержания экологической безопасности водопользования.

Ключевые слова: активные угли, цеолиты, нефтепродукты, адсорбция, модифицирование HCl, активация СВЧ-излучением, безопасность водопользования

Для цитирования: Чугунов А.Д., Филатова Е.Г. Адсорбция нефтепродуктов модифицированными и активированными адсорбентами. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. N 2. С. 318–325. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-318-325>

Adsorption of petroleum products by modified and activated adsorbents

Alexsandr D. Chugunov, Elena G. Filatova

Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russian Federation

Abstract: This research is aimed at investigating the adsorption of petroleum products from aqueous solutions by adsorbents modified with HCl and those activated by microwave radiation. The research objects were carbon adsorbents: activated coals, such as AD-05-2, IPI-T, KAD-iodine and zeolites of the Trans-Baikal deposit. The quantitative analysis of waters (standardised test solutions with an initial concentration of petroleum products not exceeding 10 mg/l) was carried out by the fluorimetric method using a Fluorat-02 liquid analyser. The adsorbents were activated in a microwave oven at a wave power of 800 W for 1 min. The modification was carried out according to the following procedure: 10 g of the adsorbents dried to a constant weight at a temperature of 120–150 °C were stirred for 24 h with 200 ml of a 12% HCl solution in water.

Next, the suspension was filtered and washed with distilled water until neutral. It was found that the value of adsorption of petroleum products by adsorbents modified with HCl increases by 3.8 times for activated carbon KAD-iodine, 0.5 times for IPI-T, and equals 0.71 mg/g and 0.80 mg/g respectively. Among the studied sorbents, these sorbents have the largest grain size (3–5 mm) and micropore volume (0.28–0.29 cm³/g). It was established that the method of short-term (within 1 min) microwave activation makes it possible to increase the adsorption of petroleum products by: 4.2 times for activated carbon KAD-iodine and 0.6 times for IPI-T in comparison with the original adsorbents. The highest adsorption value of petroleum products corresponds to zeolites and equals 0.99 mg/g. The action of microwave radiation is associated with the dissociation and evaporation of the water bound in the adsorbents and flammable organic substances, which leads to an increase in the porosity of the adsorbent. The application of the microwave activation method is highly promising in comparison with the classic methods of chemical and steam-gas activation. This method simplifies the technological design and reduces the consumption of reagents for the production of effective adsorbents used to extract petroleum products from aqueous solutions, which acquires particular importance in the context of maintaining the environmental safety of water use.

Keywords: active coals, zeolites, petroleum products, adsorption, modification with HCl, activation by microwave radiation, safety of water use

For citation: Chugunov AD, Filatova EG. Adsorption of petroleum products by modified and activated adsorbents. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(2):318–325. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-318-325>

ВВЕДЕНИЕ

На всех стадиях нефтепользования, начиная от добычи нефти и заканчивая утилизацией ее отходов, происходит загрязнение атмосферы, почв и водоемов. Все предприятия по добыче, переработке, хранению и транспортировке нефти и нефтепродуктов являются крупнейшими техногенными и антропогенными загрязнителями. И чем больший объем работ выполняется, тем сильнее их отрицательное влияние на окружающую среду. Аварийные ситуации при этом лишь увеличивают и концентрируют это влияние¹. Поэтому проблема эффективной очистки нефтесодержащих природных и сточных вод является одной из наиболее актуальных, что подтверждают многочисленные исследования [1–8].

В настоящее время очистку сточных вод от нефтепродуктов осуществляют различными углеродными и минеральными адсорбентами, часто используют золу, отходы ТЭЦ и др. Широко используют активные угли – БАУ-А, ДАГ, АГ-З, КАД-йодный, АГ-ОВ, ДАУ и др. Выбор адсорбентов, как правило, определяется рядом факторов: эффективностью очистки, удалением вредных веществ до требуемых норм ПДК, способностью адсорбента к регенерации, его доступностью и стоимостью. Также представляется целесообразным поиск новых эффективных адсорбентов, удовлетворяющих вышеуказанным требованиям. К таковым относятся природные цеолиты, физико-химические свойства которых можно улучшить модифицированием их поверхности органическими или неорганическими соединениями. Огромные запасы природных цеолитов, доступность и низкая себестоимость позволяют прогнозировать их долгосрочное прак-

тическое применение. В связи с этим особое значение имеет соотношение эффективности к затратам на производство применяемых при ликвидации экологических катастроф адсорбентов [9–12], которое во многом определяется сырьем [13–16], методами и конкретной технологией их получения [17–21].

Сегодня существует два основных метода активирования адсорбентов: химический и парогазовый. Однако они имеют ряд принципиальных недостатков. Так, химическое активирование связано с внесением активирующих агентов в продукт, что требует дальнейшей очистки последнего. Парогазовое же активирование отличается высокой температурой процесса – до 800–1000 °С. Все это усложняет технологическое оформление процесса, а также делает необходимым применение специальных материалов для изготовления оборудования. Нивелировать данные недостатки способен метод активации посредством СВЧ-излучения, который уже находит применение при сушке материалов [22].

Целью работы явилось исследование адсорбции нефтепродуктов из водных растворов активными углями и природными цеолитами Забайкальского месторождения, модифицированными HCl и активированными СВЧ-излучением.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования использовали углеродные адсорбенты – активные угли: АД-05-2, ИПИ-Т, КАД-йодный, и цеолиты Забайкальского месторождения. Адсорбционные характеристики углеродных адсорбентов представлены в табл. 1.

¹Экологическими катастрофами последних лет, например, в Сибирском федеральном округе, можно считать аварии на Жилкинской нефтебазе (АО «Иркутскнефтепродукт», 2018 г.), Норильской ТЭЦ (АО «Норильско-Таймырская энергетическая компания», 2020 г.) и др.

Таблица 1. Адсорбционные характеристики углеродных адсорбентов

Table 1. Adsorption characteristics of carbon adsorbents

Углеродные адсорбенты	Объем пор, см ³ /г				Размер зерен, мм	Удельная поверхность, м ² /г	Насыпная плотность, г/дм ³
	V _{суммарный}	V _{макро}	V _{мезо}	V _{микро}			
АД-05-2	0,69	0,34	0,12	0,23	1–2	620	550
ИПИ-Т	0,65	0,31	0,06	0,28	3–5	480	420
КАД-йодный	0,70	0,35	0,06	0,29	3–5	513	450

Как видно из данных, представленных в табл. 1, наибольшее значение удельной поверхности соответствует углеродному адсорбенту АД-05-2, суммарный объем пор у исследуемых образцов различается незначительно.

Для исследования адсорбции нефтепродуктов из водных растворов использовали также цеолиты Забайкальского месторождения, текстурные характеристики которых представлены в табл. 2.

Таблица 2. Текстурные характеристики цеолитов Забайкальского месторождения

Table 2. Characteristics of the zeolite of the Zabaikalsky field

Характеристика	Значение
Цеолитовый модуль (Si/Al)	3,2
Размер зерен, мм	1–2
Механическая прочность (ГОСТ 16188), %	Не менее 90
Влагосодержание, %	20
Удельная поверхность, м ² /г	33
Пористость, %	23
Средний размер пор, нм	1,8
Удельный объем пор, см ³ /г	0,015

Как видно из приведенных в табл. 2 данных, удельная поверхность и суммарный объем пор уступают углеродным адсорбентам более чем в 15 и 40 раз соответственно.

Для улучшения физико-химических характеристик активных углей и цеолитов проводили их модификацию соляной кислотой. Модификацию образцов HCl осуществляли в соответствии с методикой, представленной в диссертационной работе И.Г. Хальченко²: 10 г высушенных до постоянной массы при температуре 120–150 °С адсорбентов перемешивали 24 ч с 200 мл 12%-го раствора HCl в воде. Затем суспензию фильтровали и промывали дистиллированной водой до нейтральной реакции. Полученные модифицированные адсорбенты сушили до постоянной массы и анализировали на содержание основных элементов. При этом увеличение массы образцов составило не менее 20%.

Для увеличения адсорбционных характери-

стик исследуемых адсорбентов проведено их активирование СВЧ-излучением. Активирование адсорбентов осуществляли в СВЧ-печи модели Bosch FEM513MB0 при мощности волн 800 Вт и энергопотреблении 1270 Вт в течение 1 мин.

Изменение концентрации нефтепродуктов в исследуемых пробах модельных растворов осуществляли флуориметрическим методом на анализаторе жидкости Флюорат-02. Погрешность измерения составила не более 0,05%.

Расчет величины адсорбции производили по уравнению:

$$A = \frac{(C_0 - C_p)V}{m},$$

где C_0 и C_p – исходная и равновесная концентрация нефтепродуктов соответственно, мг/л; V – объем раствора, л; m – масса сорбента, г (масса каждого образца составляла 1 г).

Исходная концентрация нефтепродуктов в модельных растворах составляла не более 10 мг/л. Модельные растворы готовили методом разбавления. При приготовлении исходных растворов в качестве нефтепродуктов использовали дизельное масло марки ДТ-Л-К5 ($\rho_{ср} = 0,8325$ г/см³). Масса навески каждого образца адсорбента – 1 г.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По полученным результатам исследований построены гистограммы адсорбции и остаточной концентрации нефтепродуктов. На рис. 1 и 2 приведены данные для исходных образцов адсорбентов.

Как видно из гистограмм, представленных на рис. 1, наибольшая величина адсорбции нефтепродуктов активными углями соответствует углеродному адсорбенту АД-05-2, еще большее значение – 0,92 мг/г – цеолиту. Данный факт можно связать с низкой концентрацией нефтепродуктов в водном растворе. Остаточная концентрация нефтепродуктов в случае цеолитов составила 0,81 мг/л.

На рис. 3 и 4 приведены гистограммы, отражающие величину адсорбции и остаточную концентрацию нефтепродуктов для адсорбентов, модифицированных HCl.

²Хальченко И.Г. Физико-химические методы очистки сточных вод с использованием модифицированных форм природных силикатов: дисс. ... канд. хим. наук: 03.02.08 / Хальченко Ирина Григорьевна. Владивосток, 2015. 125 с.

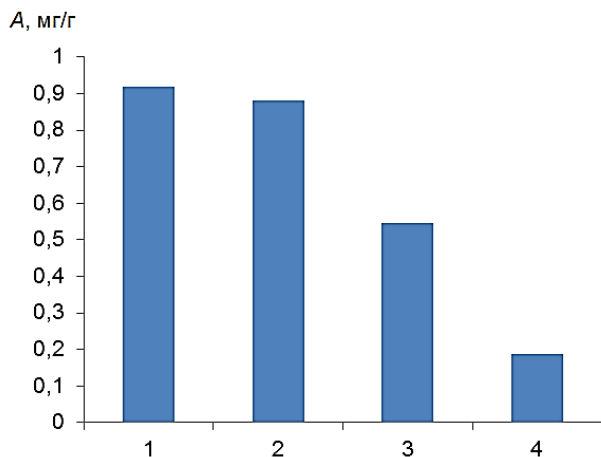


Рис. 1. Адсорбция нефтепродуктов исходными адсорбентами: 1 – цеолитами; 2 – АД-05-2; 3 – ИПИ-Т; 4 – КАД-йодным

Fig. 1. Petroleum products adsorption by initial adsorbents: 1 – zeolites; 2 – AD-05-2; 3 – IPI-T; 4 – CAD-iodine

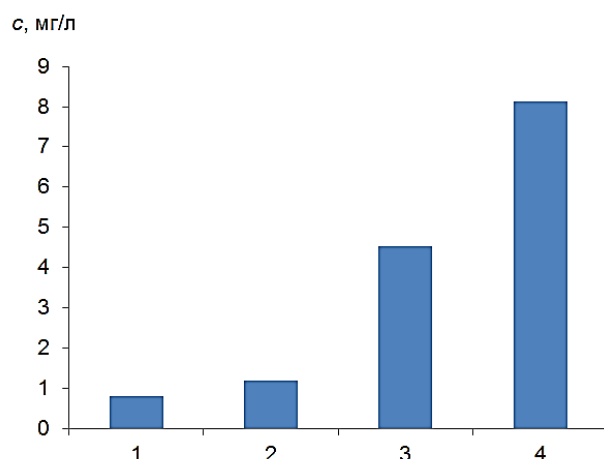


Рис. 2. Остаточная концентрация нефтепродуктов для: 1 – цеолитов; 2 – АД-05-2; 3 – ИПИ-Т; 4 – КАД-йодного

Fig. 2. Residual concentration of petroleum products for: 1 – zeolites; 2 – AD-05-2; 3 – IPI-T; 4 – CAD-iodine

Как видно из данных, представленных на рис. 3, величина адсорбции нефтепродуктов адсорбентами, модифицированными HCl, возрастает в 3,8 раза для активного угля КАД-йодный, в 0,5 раза – для ИПИ-Т, и принимает значения 0,71 и 0,80 мг/г соответственно. Эти сорбенты имеют наиболее крупный размер зерен – 3–5 мм, и наибольший объем микропор – 0,28–0,29 см³/г. Наибольшая величина адсорбции нефтепродуктов соответствует цеолитам и имеет значение 0,95 мг/г. Остаточная концентрация нефтепродуктов в случае цеолитов составила 0,53 мг/л (см. рис. 4). Известно, что при модифицировании алюмосиликатов HCl более чем в два раза увеличивается удельная поверхность адсорбента и удельный объем пор. При этом средний размер

пор сокращается от 1,8 до 1,6 нм [23, 24]. Очевидно, что при модифицировании происходит удаление ионов алюминия из бесконечного тетраэдрического каркаса сорбента, образованного AlO₄ и SiO₄. Это приводит к разрушению основного компонента цеолита и уплотнению силикатного слоя адсорбента.

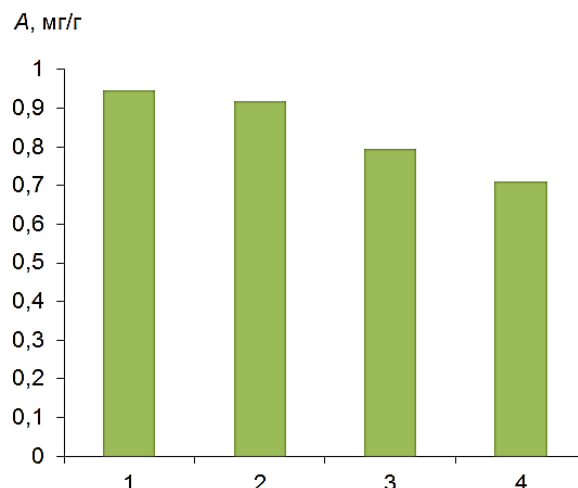


Рис. 3. Адсорбция нефтепродуктов модифицированными адсорбентами: 1 – цеолитами; 2 – АД-05-2; 3 – ИПИ-Т; 4 – КАД-йодным

Fig. 3. Petroleum products adsorption by modified adsorbents: 1 – zeolites; 2 – AD-05-2; 3 – IPI-T; 4 – CAD-iodine

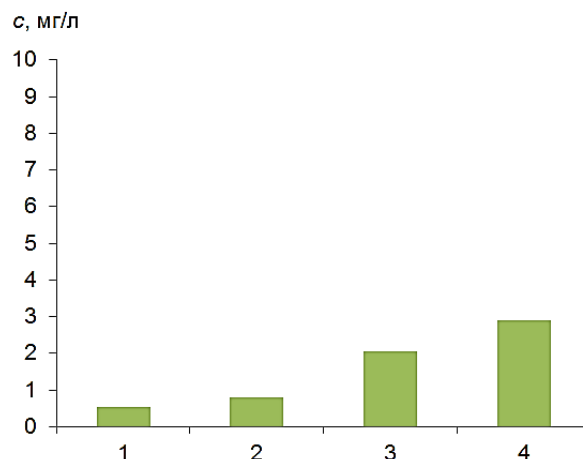


Рис. 4. Остаточная концентрация нефтепродуктов для модифицированных: 1 – цеолитов; 2 – АД-05-2; 3 – ИПИ-Т; 4 – КАД-йодного

Fig. 4. Residual concentration of petroleum products for modified: 1 – zeolites; 2 – AD-05-2; 3 – IPI-T; 4 – CAD-iodine

На рис. 5 и 6 приведены данные для адсорбентов, активированных СВЧ-излучением.

Как видно из данных, представленных на рис. 5, величина адсорбции нефтепродуктов адсорбентами, активированными СВЧ-излучением,

возрастает в 4,2 раза для активного угля КАД-йодный, в 0,6 раза – для ИПИ-Т, по сравнению с исходными адсорбентами и принимает значения 0,80 и 0,87 мг/г соответственно. Наибольшая величина адсорбции нефтепродуктов соответствует цеолитам и принимает значение 0,99 мг/г. Остаточная концентрация нефтепродуктов в случае цеолитов составила 0,02 мг/л (см. рис. 6). При этом предельно допустимая концентрация нефтепродуктов для водоемов рыбохозяйственного назначения составляет 0,05 мг/л. Активирование адсорбентов СВЧ-излучением позволяет добиться требуемых показателей очистки.

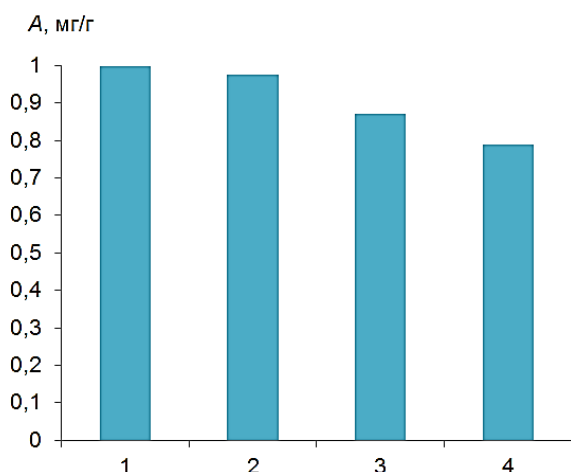


Рис. 5. Адсорбция нефтепродуктов активированными адсорбентами: 1 – цеолитами; 2 – АД-05-2; 3 – ИПИ-Т; 4 – КАД-йодным

Fig. 5. Petroleum products adsorption by activated adsorbents: 1 – zeolites; 2 – AD-05-2; 3 – IPI-T; 4 – CAD-iodine

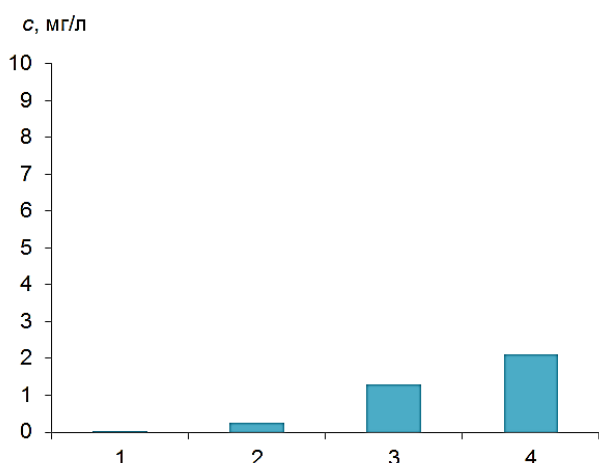


Рис. 6. Остаточная концентрация нефтепродуктов для активированных: 1 – цеолитов; 2 – АД-05-2; 3 – ИПИ-Т; 4 – КАД-йодного

Fig. 6. Residual concentration of petroleum products for activated: 1 – zeolites; 2 – AD-05-2; 3 – IPI-T; 4 – CAD-iodine

Таким образом, активирование адсорбентов СВЧ-излучением позволило повысить величину адсорбции нефтепродуктов активным углем КАД-йодный на 11%, ИПИ-Т – на 9,4%, АД-05-2 – на 5,6%, и цеолитом – на 5,1% по сравнению с образцами, модифицированными HCl.

При активации адсорбентов возможен следующий механизм процесса адсорбции:

- внутренний нагрев СВЧ-излучением до возникновения водно-органической фазы под высоким давлением, частичный разлом на небольшое количество трещин при сбросе внутреннего давления;

- формирование нанокластеров при охлаждении газовых органических составляющих,двигающихся по отдельным каналам, их коагуляционный рост;

- выход аэрозолей из кратеров в окружении органической составляющей и ее воспламенение в зонах контакта с воздухом при достижении соответствующих температур;

- вынос наночастиц минеральных составляющих (окиси алюминия или кремния) с их последующим воспламенением через механизм образования ОН-радикала.

Приведенные результаты по адсорбции нефтепродуктов исследуемыми образцами свидетельствуют об эффективности использования активации адсорбентов посредством СВЧ-излучения. Экспериментальные данные подтверждают, что величина адсорбции нефтепродуктов адсорбентами, модифицированными HCl, имеет меньшие значения в сравнении с образцами, активированными СВЧ-излучением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что наибольшая величина адсорбции нефтепродуктов при модифицировании исследуемых образцов HCl характерна для цеолитов – 0,95 мг/г. При этом остаточная концентрация нефтепродуктов составила 0,53 мг/л.

Показано, что активирование адсорбентов СВЧ-излучением позволило повысить величину адсорбции нефтепродуктов активным углем КАД-йодный на 11%, ИПИ-Т – на 9,4%, АД-05-2 – на 5,6%, и цеолитом – на 5,1% по сравнению с образцами, модифицированными HCl.

Таким образом, в ходе работы были получены результаты, свидетельствующие о целесообразности применения метода активации адсорбентов посредством СВЧ-излучения. Данный метод активации позволяет упростить технологическое оформление и снизить затраты на химические реагенты при производстве адсорбентов. Однако необходимо отметить энергоемкость данного метода.

Дальнейшее изучение влияния СВЧ-активации на физико-химические свойства адсорбентов, в том числе адсорбционные и регенеративные, способно открыть новые сферы их применения и снизить затраты при производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalantarnia M., Khan F., Hawboldt K. Modeling of BP Texas City refinery accident using dynamic risk assessment approach Progress safety and environmental protection // Progress Safety and Environmental Protection. 2010. Vol. 88. Issue 3. P. 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.01.004>
2. Cheevaporn V., Menasveta P. Water pollution and habitat degradation in the Gulf of Thailand // Marine pollution bulletin. 2003. Vol. 47. Issue 1-6. P. 43–51. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00101-2](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00101-2)
3. Schnaak W., Kuchler T., Kujawa M., Henschel K., Sussenbach D., Donau R. Organic contaminants in sewage sludge and their ecotoxicological significance in the agricultural utilization of sewage sludge // Chemosphere. 1997. Vol. 35. Issue 1-2. P. 5–11. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(97\)88285-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)88285-9)
4. Trelu C., Mousset E., Pechaud Y., Huguenot D., van Hullebusch E.D., Esposito G., et al. Removal of hydrophobic organic pollutants from soil washing/flushing solutions: A critical review // Journal of Hazardous Materials. 2016. Vol. 306. P. 149–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.008>
5. Bazrafshan E., Amirian P., Mahvi A.H., Ansari-Moghaddam A. Application of adsorption process for phenolic compounds removal from aqueous environments: a systematic review // Global Nest Journal. 2016. Vol. 18. Issue 1. P. 146–163. <https://doi.org/10.30955/gnj.001709>
6. Краснова Т.А., Аникина А.В., Беляева О.В. Очистка сточных вод от анилина с использованием углеродных адсорбентов // Ползуновский вестник. 2011. N 4-2. С. 152–154.
7. Долгих О.Г., Овчаров С.Н. Использование углеродных адсорбентов на основе растительных отходов для очистки нефтезагрязненных сточных вод // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. 2010. N 1. С. 6–12.
8. Мазлова Е.А., Иса Ж.Д. Исследование процессов очистки нефтезагрязненных сточных вод с использованием адсорбентов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2008. N 12. С. 34–38.
9. Со Вин Мьинт, Си Тху Аунг, Клушин В.Н. К оценке рациональных условий переработки на углеродные адсорбенты шелухи риса и скорлупы коксовых орехов республики Мьянма // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. 28. N 5. С. 8–10.
10. Пат. № 2527221, Российская Федерация. Способ получения активного угля из растительных отходов / В.М. Мухин, Н.Л. Воропаева, В.В. Карпачев, С.А. Харламов, Ю.Я. Спиридонов, В.В. Гурьянов [и др.]; патентообладатель ОАО «Электростальское НПО «Неорганика»; заявл. 09.04.2013; опубл. 27.08.2014. Бюл. № 24.
11. Пат. № 2490207, Российская Федерация. Способ получения активированного угля / И.В. Воскобойников, В.А. Кондратюк, С.А. Константинова, В.М. Щелоков, Э.Ф. Гаврилов, А.О. Шевченко; патентообладатель Министерство промышленности и торговли РФ; заявл. 28.10.2010; опубл. 20.08.2013. Бюл. № 13.
12. Ali I., Asim M., Khan T.A. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater // Journal of Environmental Management. 2012. Vol. 113. P. 170–183. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.028>
13. Hasan D.B., Wan D.W.M.A., Raman A.A.A. Treatment technologies for petroleum refinery effluents: A review // Process Safety and Environmental Protection. 2011. Vol. 89. Issue 2. P. 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.11.003>
14. Zubot W., MacKinnon M.D., Chelme-Ayala P., Smith D.W., El-Din M.G. Petroleum coke adsorption as a water management option for oil sands process-affected water // Science of the Total Environment. 2012. Vol. 427-428. P. 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.024>
15. Shirmardi M., Mahvi A., Hashemzadeh B., Naeimabadi A., Hassani G., Niri M.V. The adsorption of malachite green (MG) as a cationic dye onto functionalized multi walled carbon nanotubes // Korean Journal of Chemical Engineering. 2013. Vol. 30. Issue 8. P. 1603–1608. <https://doi.org/10.1007/s11814-013-0080-1>
16. Hubbe M., Rojas O.J., Fingas M., Gupta B. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: a review. 3. Spilled oil and emulsified organic liquid // Bioresources. 2013. Vol. 8. Issue 2. P. 3038–3097. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.3038-3097>
17. Anirudhan T.S., Sreekumari S.S., Bringle C.D. Removal of phenols from water and petroleum industry refinery effluents by activated carbon obtained from coconut coir pith // Adsorption. 2009. Vol. 15. Issue 5-6. P. 439–451. <https://doi.org/10.1007/s10450-009-9193-6>
18. Текуева К.М., Клушин В.Н., Антипова О.В. Экспериментальная оценка рациональных условий получения активированных углей из фрагментов косточек абрикосов и персиков – отходов пищевых предприятий республики Кабардино-Балкария // Успехи в химии и химической технологии. 2013. Т. 27. N 9 (149). С. 31–34.
19. Солодкова А.Б., Собгайда Н.А., Шайхиев И.Г. Разработка технологии изготовления и использования адсорбента на основе активного ила для очистки сточных вод // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. N 20. С. 179–182.
20. Kravchenko G.V., Domoroshchina E.N., Kuz'micheva G.M., Gaynanova A.A., Amarantov S.V., Pirutko L.V., et al. Zeolite–titanium dioxide nanocomposites: Preparation, characterization, and adsorption properties // Nanotechnologies in Russia.

2016. Vol. 11. Issue 9-10. P. 579–592. <https://doi.org/10.1134/S1995078016050098>

21. Шарифканова Г.Н., Сулейменова М.Ш., Ибрашева Р.К. Получение декатионированных и диалюминированных цеолитов // Вестник Алма-тинского технологического университета. 2015. N 4. С. 105–109.

22. Коновалов Н.П., Коновалов П.Н., Хайдурова А.А. Микроволновое излучение в технологии сушки угля // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2015. N 1 (12). С. 74–79.

23. Филатова Е.Г., Соболева В.Г. Извлечение

нефти и нефтепродуктов из водных растворов природными адсорбентами // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2019. Т. 62. N 6. С. 131–137. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196206.5836>

24. Filatova E.G., Pomazkina O.I., Pozhidaev Y.N. Adsorption of nickel(ii) and copper(ii) ions by modified aluminosilicates // *Protections of Metals and Physical and Chemistry of Surfaces*. 2017. Vol. 53. Issue 6. P. 999–1004. <https://doi.org/10.1134/S2070205117060259>

REFERENCES

1. Kalantarnia M, Khan F, Hawboldt K. Modeling of BP Texas City refinery accident using dynamic risk assessment approach *Progress safety and environmental protection*. 2010;88(3):191–199. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.01.004>

2. Cheevaporn V, Menasveta P. Water pollution and habitat degradation in the Gulf of Thailand. *Marine Pollution Bulletin*. 2003;47(1-6):43–51. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(03\)00101-2](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(03)00101-2)

3. Schnaak W, Kuchler T, Kujawa M, Henschel K, Sussenbach D, Donau R. Organic contaminants in sewage sludge and their ecotoxicological significance in the agricultural utilization of sewage sludge. *Chemosphere*. 1997;35(1-2):5–11. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(97\)88285-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)88285-9)

4. Trelu C, Mousset E, Pechaud Y, Huguenot D, van Hullebusch ED, Esposito G, et al. Removal of hydrophobic organic pollutants from soil washing/flushing solutions: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. 2016;306:149–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.008>

5. Bazrafshan E, Amirian P, Mahvi AH, Ansari-Moghaddam A. Application of adsorption process for phenolic compounds removal from aqueous environments: a systematic review. *Global NEST Journal*. 2016;18(1):146–163. <https://doi.org/10.30955/gnj.001709>

6. Krasnova TA, Anikina AV, Belyaeva OV. Wastewater treatment from aniline using carbon adsorbents. *Polzunovsky vestnik*. 2011;4-2:152-154. (In Russian)

7. Dolgikh OG, Ovcharov SN. The use of carbon adsorbents based on plant waste for the purification of oil-contaminated wastewater. *Vestnik Severo-Kavkazskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the North Caucasus State Technical University*. 2010;1:6–12. (In Russian)

8. Mazlova EA, Isa ZhD. Study of the purification processes of oil-contaminated effluents with use of adsorbents. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoi opyt = Refining and petrochemistry. Scientific and technical achievements and best practices*. 2008;12:34–38. (In Russian)

9. Saw Vin M'int, Si Thu Aung, Klushin VN. To

the assessment of rational processing conditions of rice husk and coconut shells of the republic of Myanmar into carbon adsorbents. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2014;28(5):8–10. (In Russian)

10. Mukhin VM, Voropaeva NL, Karpachev VV, Kharlamov SA, Spiridonov JJ, Gur'janov VV, et al. *Method of producing activated charcoal from plant wastes*. Patent RF, no. 2527221; 2013. (In Russian)

11. Voskoboinikov IV, Kondratyuk VA, Konstantinova SA, Shchelokov VM, Gavrilov EF, Shevchenko AO. *Method of obtaining activated coal*. Patent RF, no. 2490207; 2010. (In Russian)

12. Ali I, Asim M, Khan TA. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. *Journal of Environmental Management*. 2012;113:170–183. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.028>

13. Hasan DB, Wan DWMA, Raman AAA. Treatment technologies for petroleum refinery effluents: A review. *Process Safety and Environmental Protection*. 2011;89(2):95–105. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2010.11.003>

14. Zubot W, MacKinnon MD, Chelme-Ayala P, Smith DW, El-Din MG. Petroleum coke adsorption as a water management option for oil sands process-affected water. *Science of the Total Environment*. 2012;427-428:364–372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.024>

15. Shirmardi M, Mahvi A, Hashemzadeh B, Naeimabadi A, Hassani G, Niri MV. The adsorption of malachite green (MG) as a cationic dye onto functionalized multi walled carbon nanotubes. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2013;30(8):1603–1608. <https://doi.org/10.1007/s11814-013-0080-1>

16. Hubbe M, Rojas OJ, Fingas M, Gupta B. Cellulosic substrates for removal of pollutants from aqueous systems: a review. 3. Spilled oil and emulsified organic liquid. *Bioresources*. 2013;8(2):3038–3097. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.3038-3097>

17. Anirudhan TS, Sreekumari SS, Bringle CD. Removal of phenols from water and petroleum industry refinery effluents by activated carbon obtained from coconut coir pith. *Adsorption*. 2009;15(5-6):439–451. <https://doi.org/10.1007/s10450-009-9193-6>

18. Tekueva KM, Klushin VN, Antipova OV. Ex-

perimental evaluation of rational conditions of obtaining active coal pit fragments of peaches and apricots – waste food enterprises in the republic of Kabardino-Balkaria. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2013;27(9):31–34. (In Russian)

19. Solodkova AB, Sobgaida NA, Shaikhiev IG. Development of technology for the manufacture and use of an adsorbent based on activated sludge for wastewater treatment. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University*. 2012;15(20):179–182. (In Russian)

20. Kravchenko GV, Domoroshchina EN, Kuz'micheva GM, Gaynanova AA, Amarantov SV, Pirutko LV, et al. Zeolite–titanium dioxide nanocomposites: Preparation, characterization, and adsorption properties. *Nanotechnologies in Russia*. 2016;11(9-10):579–592. <https://doi.org/10.1134/S1995078016050098>

21. Sharifkanova GN, Suleimenova MSh, Ibrasheva RK. Obtaining decationized and dialuminized zeolites. *Vestnik Almatinskogo tekhnolo-*

gicheskogo universiteta = The Journal of Almaty Technological University. 2015;4:105–109. (In Russian)

22. Konovalov NP, Konovalov PN, Khaidurova AA. Microwave radiation in coal drying technology. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotehnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2015;1:74–79. (In Russian)

23. Filatova EG, Soboleva VG. Extraction of oil and petroleum products from water solutions by natural adsorbents. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*. 2019;62(6):131–137. (In Russian) <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196206.5836>

24. Filatova EG, Pomazkina OI, Pozhidaev YN. Adsorption of nickel(II) and copper(II) ions by modified aluminosilicates. *Protections of Metals and Physical and Chemistry of Surfaces*. 2017;53(6):999–1004. <https://doi.org/10.1134/S2070205117060259>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чугунов Александр Дмитриевич,

аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: chugunovsasha1996@yandex.ru

Филатова Елена Геннадьевна,

к.т.н., доцент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
✉ e-mail: efila@list.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили оконча-
тельный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 10.11.2020.
Одобрена после рецензирования 12.12.2020.
Принята к публикации 31.05.2021.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexsandr D. Chugunov,

Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
e-mail: chugunovsasha1996@yandex.ru

Elena G. Filatova,

Cand. Sci. ((Engineering),
Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
✉ e-mail: efila@list.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests re-
garding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

*The article was submitted 10.11.2020.
Approved after reviewing 12.12.2020.
Accepted for publication 31.05.2021.*