



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 139–147  
*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 139–147  
<https://ichbe.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-2-139-147>, EDN: CDCLYC

Научная статья  
УДК 544.72



## Применение отходов водоподготовки и деревоперерабатывающей промышленности для получения магнитоуправляемых нефтесорбентов

Е. Л. Усова , К. В. Кусков, Л. Н. Макарова, А. М. Фугаева, А. В. Таргашов

Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38

Усова Елена Леонидовна, кандидат химических наук, доцент кафедры строительных материалов, [usovael@tyuiu.ru](mailto:usovael@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0009-0009-5277-7157>

Кусков Константин Викторович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вибрационного и гидродинамического моделирования, [kuskovkv@tyuiu.ru](mailto:kuskovkv@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0698-8545>

Макарова Людмила Николаевна, старший преподаватель кафедры общей и физической химии, [makarovaln@tyuiu.ru](mailto:makarovaln@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0009-0004-3808-653X>

Фугаева Анастасия Михайловна, ассистент кафедры инженерных систем и сооружений, [fugaevaam@tyuiu.ru](mailto:fugaevaam@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7097-1775>

Таргашов Александр Вадимович, магистр 1-го курса, [stargashov@mail.ru](mailto:stargashov@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0006-8885-1038>

**Аннотация.** Рассматривалась возможность применения железосодержащих отходов станции водоподготовки и сосновых опилок в качестве альтернативного сырьевого источника для получения недорогого нефтепоглощающего сорбента с магнитными свойствами, синтезированного при 500°C. Рентгенофлуоресцентный анализ выявил наличие фаз гематита  $\alpha$  –  $Fe_2O_3$  в полученных образцах, являющегося ферромагнетиком. Результаты гранулометрии показали, что размер частиц распределен в диапазоне от 20 до 70 мкм. Текстуальные характеристики, полученные методом изотерм адсорбции-десорбции азота, свидетельствуют о том, что образцы относятся к мезопористым материалам. На полученном материале изучалось влияние содержания гетита в исходном составе на величины водопоглощения, магнитной восприимчивости, сорбционную емкость по отношению к метиленовому голубому и мазуту с поверхности воды. Увеличение концентрации гетита в исходном составе приводит к возрастанию магнитных свойств материала и возрастанию гидрофобности. Сорбционные характеристики при этом ухудшаются. Образцы, пропитанные 8% суспензией осадка с промывного фильтра, выбраны оптимальным составом, что подтверждается наименьшим остаточным содержанием нефтепродуктов в воде после очистки. Таким образом, совместная утилизация отходов водоподготовки и деревоперерабатывающих предприятий в мягких условиях позволяет получить дешевый магнитоуправляемый сорбент для извлечения нефти и нефтепродуктов с поверхности воды.

**Ключевые слова:** магнитные нефтесорбенты, сосновые опилки, железосодержащий шлам, осадок станции водоподготовки, сорбция, нефть и нефтепродукты, гематит

**Для цитирования:** Усова Е. Л., Кусков К. В., Макарова Л. Н., Фугаева А. М., Таргашов А. В. Применение отходов водоподготовки и деревоперерабатывающей промышленности для получения магнитоуправляемых нефтесорбентов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 139–147. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-2-139-147>, EDN: CDCLYC

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Use of water treatment and wood processing industry waste to produce magnetically controlled oil sorbents

Е. Л. Усова , К. В. Кусков, Л. Н. Макарова, А. М. Фугаева, А. В. Таргашов

Industrial University of Tyumen, 38 Volodarsky St., Tyumen 625000, Russia

Elena L. Usova, [usovael@tyuiu.ru](mailto:usovael@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0009-0009-5277-7157>

Konstantin V. Kuskov, [kuskovkv@tyuiu.ru](mailto:kuskovkv@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0698-8545>

Lyudmila N. Makarova, [makarovaln@tyuiu.ru](mailto:makarovaln@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0009-0004-3808-653X>

Anastasia M. Fugaeva, [fugaevaam@tyuiu.ru](mailto:fugaevaam@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7097-1775>

Aleksandr V. Targashov, [stargashov@mail.ru](mailto:stargashov@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0006-8885-1038>

**Abstract.** This study has examined the potential use of iron-containing waste from a water treatment plant and pine sawdust as an alternative raw material source for producing an inexpensive oil-absorbing sorbent with magnetic properties, synthesized at 500°C. X-ray diffraction analysis



has revealed the presence of ferromagnetic  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hematite phases in the obtained samples. Granulometry results have showed a particle size distribution ranging from 20 to 70  $\mu$ m. Textural characteristics have been obtained using nitrogen adsorption-desorption isotherms, demonstrating that the samples are mesoporous materials. Using the obtained material, the effect of goethite content in the initial composition on water absorption, magnetic susceptibility, and sorption capacity for methylene blue and fuel oil from the water surface has been studied. Increasing the goethite concentration in the initial composition leads to an increase in the magnetic properties of the material and an increase in hydrophobicity, while the sorption characteristics deteriorate. Samples impregnated with an 8% suspension of filter backwash sediment have been selected as the optimal composition, as evidenced by the lowest residual oil product content in the water after purification. Thus, the combined recycling of water treatment and wood processing waste under mild conditions allows for the production of a low-cost magnetically controlled sorbent for the extraction of oil and oil products from water surfaces.

**Keywords:** magnetic oil sorbents, pine sawdust, iron-containing sludge, water treatment plant sludge, sorption, oil and oil products, hematite

**For citation:** Usova E. L., Kuskov K. V., Makarova L. N., Fugaeva A. M., Targashov A. V. Use of water treatment and wood processing industry waste to produce magnetically controlled oil sorbents. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 139–147 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2026-26-2-139-147>, EDN: CDCLYC

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Среди загрязнителей окружающей среды нефть и нефтепродукты представляют особую и наиболее опасную группу. Существует много способов очистки нефтезагрязненных вод, среди которых сорбционный метод занимает особое место как наиболее эффективный и экологически безопасный [1, 2].

К нефтяным сорбентам применяют ряд требований: водопоглощение, нефтеемкость, гидрофобность, а также простота нанесения и последующий сбор сорбента с зоны загрязнения [3, 4].

В связи с этим особый интерес для сорбционных технологий представляют магнитные материалы, применение которых существенно упростит этап отделения от жидкой фазы и сбора насыщенных сорбентов при помощи магнитных ловушек [5–8].

Для придания магнитных свойств в состав материала вводят частицы никеля, кобальта, железа.

Наибольшей развитой площадью поверхности и наибольшей величиной сорбции обладают оксиды железа наноразмерных частиц. Среди всех оксидов железа гетит и гематит являются стабильными соединениями и находят широкое применение в качестве классических адсорбентов [9].

Ввиду низкой стоимости, для получения магнитных нефтесорбентов чаще используют оксиды и соли железа и другие его соединения, включая карбиды, а также отходы производств [10–15].

В работах [16–18] в качестве промышленных отходов предложен железосодержащий шлам водоочистки со станций обезжелезивания при водоподготовке. Осадок, образующийся по-

сле фильтрования подземных вод, содержит до 60% железа от общей массы. Высокодисперсное состояние и однородный химический состав с преобладанием гетита делают привлекательным данный вид техногенных отходов в качестве исходного сырья. Однако предложенные способы требуют затрат на высокие температуры нагрева реакционной смеси и дополнительное использование химических реагентов. Поэтому в качестве углеродного носителя целесообразно применение сосновых опилок. Отходы деревообработки являются дешевым и экологичным при утилизации сырьем [19, 20].

Таким образом, применение промышленных отходов для получения сорбентов позволяет решать одновременно две проблемы: утилизацию накопленных отходов и снижение стоимости получения материалов с заданными свойствами [21].

*Цель работы* – установление принципиальной возможности синтеза нефтепоглощающих сорбентов с магнитными свойствами совместной утилизацией отходов деревоперерабатывающей промышленности и станции обезжелезивания в мягких условиях и определение оптимальных концентраций гетита в исходном составе.

## Материалы и методы

Основу для получения нефтесорбентов составили сосновые опилки деревообработки. Отсутствие предварительной обработки позволяет рассматривать их как исходное чистое сырье, относящееся к биосферно совместимым материалам.

В качестве железосодержащей составляющей использовали осадок, образующийся на фильтровальных сооружениях Тюменской стан-



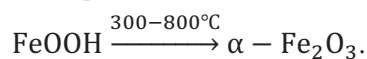
ции водоподготовки Велижанского водозабора. Шлам представляет собой водонасыщенную коллоидную массу темно-коричневого цвета. Как правило, твердая фаза суспензии имеет схожий состав и представлена оксидно-гидроксидными соединениями железа, кроме того, в незначительных количествах присутствуют оксиды кремния, кальция и магния и примеси других нетоксичных элементов [18, 22, 23], что показывает возможность применения шлама как перспективного сырьевого источника.

Исследование фазового состава проводили на дифрактометре ДРОН-7 (НПП «Буревестник», Россия) при 40кВ и 20 мА, излучением  $\text{CuK}\alpha$  с  $\beta$ -фильтром Ni ( $K\alpha_1=1.5406 \text{ \AA}$ ) в диапазоне от 2 до  $85^\circ$  углов  $2\theta$ . Расшифровка дифрактограмм проводилась с использованием базы данных PDF2 (2011). Порошковые образцы были запрессованы в специальные кюветы из органического стекла, не дающего пиков, и зафиксированы цапонлаком, дающим широкие гало, при углах  $2\theta$   $25^\circ$ – $35^\circ$ . Вращение образца не производилось. При расшифровке дифрактограмм учитывалась максимальная погрешность для ДРОН-7  $\pm 0,02^\circ$ , указанная в руководстве по эксплуатации.

Для приготовления нефтесорбента опилки пропитывали в 2, 4, и 6% водной суспензии железосодержащего шлама. Тщательно перемешивали содержимое и высушивали 24 ч при температуре  $90^\circ\text{C}$ .

Синтез сорбентов проводили в муфельной печи СНОЛ-1,6,2,5.1/11–И2М (НПФ ТерМИКС, Россия) при температуре  $500^\circ\text{C}$  в течение 60 мин, в результате протекающей карбонизации  $\text{FeOON}$  переходит в  $\alpha$  –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – гематит, являющийся слабым ферромагнитным материалом при стандартных условиях [9].

Протекающие процессы можно представить следующим образом:



Внешний вид сорбентов в бьюксах после остывания муфельной печи имеет черно-рыжий цвет.

Основные текстурные характеристики сорбентов (удельная поверхность и анализ пористости) устанавливали методом статической газовой волюмометрии на анализаторе 3P sync 420A (3P Instruments, Германия).

Гранулометрический анализ проводили на анализаторе размеров частиц «Analysette 22 NanoTec» (Fritsch GmbH, Германия).

Для определения величины водопоглощения навески сорбентов массой 1 г залили  $50 \text{ см}^3$  воды и оставили на сутки для насыщения. Рассчитали водопоглощение сорбента по формуле (1):

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_1}, \quad (1)$$

где  $W$  – это водопоглощение, г/г,  $m_1$  и  $m_2$  – массы сухого и насыщенного водой сорбента, г.

Сорбционную активность полученных образцов определяли по метиленовому голубому, являющегося классическим загрязнителем при изучении сорбции органических соединений [16]. Для этого 0,1 г сорбента заливали  $50 \text{ см}^3$  раствора метиленового голубого с исходной концентрацией  $10 \text{ мг/дм}^3$ . Образцы оставляли в колбах на 24 ч при температуре  $25^\circ\text{C}$  при постоянном перемешивании до установления сорбционного равновесия. После адсорбции твердую фазу отделяли от жидкой при помощи центрифугирования. Исходную и равновесную концентрацию метиленового голубого в растворе определяли по оптической плотности при характерной длине волны  $645 \text{ нм}$  на спектрофотометре КФК-3-01 (АО ЗОМЗ, Россия) по предварительно построенному градуировочному графику «оптическая плотность – концентрация» ( $R^2 = 0,98$ ).

Адсорбционную активность рассчитывают по формуле (2):

$$\Gamma = \frac{(C_{\text{исх}} - C_n) \cdot V}{m}, \quad (2)$$

где  $\Gamma$  – величина адсорбции, мг/г,  $C_{\text{исх}}$  и  $C_n$  – исходная и равновесная концентрация метиленового голубого,  $\text{мг/дм}^3$ ;  $m$  – масса сорбента, г;  $V$  – объем метиленового голубого,  $\text{дм}^3$ .

Нефтеемкость сорбентов определяли по мазуту марки Ф-5, плотность при температуре  $20^\circ\text{C}$   $955 \text{ кг/м}^3$ . Мазут является одной из тяжелых фракций нефти. В данной работе нефтеемкость определяли на поверхности воды Чашку Петри, заполненную водой, поместили на весы. На поверхность воды при помощи пипетки наносили равный объем мазута, составляющий в пересчете на массу 1 г, толщина пленки составляла 2–3 мм. Затем на поверхность загрязнителя наносили испытуемый сорбент определенной массы небольшими порциями. Неодимовый магнит N52 (Magnet LTD, Россия) размером  $30 \times 10 \text{ мм}$  (остаточная магнитная индукция 1.43–1.48 Т, коэрцитивная сила 11 кЭ) подносили на кальке и поднимали нефтенасыщенный сорбционный материал. Радужных



разводов мазута на поверхности воды не наблюдалось. Определяли нефтеемкость для каждого из образцов как отношение разности массы сорбционного материала до и после очистки к массе сухого сорбента в г/г [4, 24]. За результат принимали среднее арифметическое значение трех параллельных испытаний.

Для качественной оценки магнитных свойств насыщенных сорбентов фиксировали среднюю массу сорбента с мазутом, собранную магнитом за один раз. Все испытания проводили не меньше трех раз.

После сбора мазутного пятна воду исследовали на остаточное содержание нефтепродуктов. Степень очистки от нефтепродуктов определяли по их остаточному содержанию в растворе экстракцией гексаном на «Флюорате 02-3М» (Люмэкс, Россия).

Массовую концентрацию нефтепродуктов в пробе воды вычисляют по формуле (3):

$$X = \frac{C_{\text{изм}} \cdot V_r \cdot K_1}{V_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где  $X$  – это массовая концентрация нефтепродукта в пробе воды, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{изм}}$  – массовая

концентрация нефтепродукта в гексановом экстракте пробы, мг/дм<sup>3</sup>;  $V_r$  – объем гексана, взятый для экстракции, см<sup>3</sup>;  $V_{\text{пр}}$  – объем пробы, см<sup>3</sup>;  $K_1$  – коэффициент разбавления экстракта.

## Результаты и их обсуждение

Полученные после обжига образцы представляют собой мелкодисперсный порошок черно-рыжего цвета. На рис. 1 представлены результаты гранулометрического анализа в зависимости от концентрации железосодержащей суспензии. Из графиков видно, что размер большинства распределен в диапазоне от 20 до 70 мкм.

На рис. 2, а представлена рентгенофазовая диаграмма исходного железосодержащего шлама. Идентификацию кристаллических фаз проводили с использованием базы данных порошковой дифрактометрии PDF (Powder Diffraction File) международного центра дифракционных данных (ICDD). Дифрактограмма показывает, что он преимущественно содержит гетит, включающий железо в оксидно-

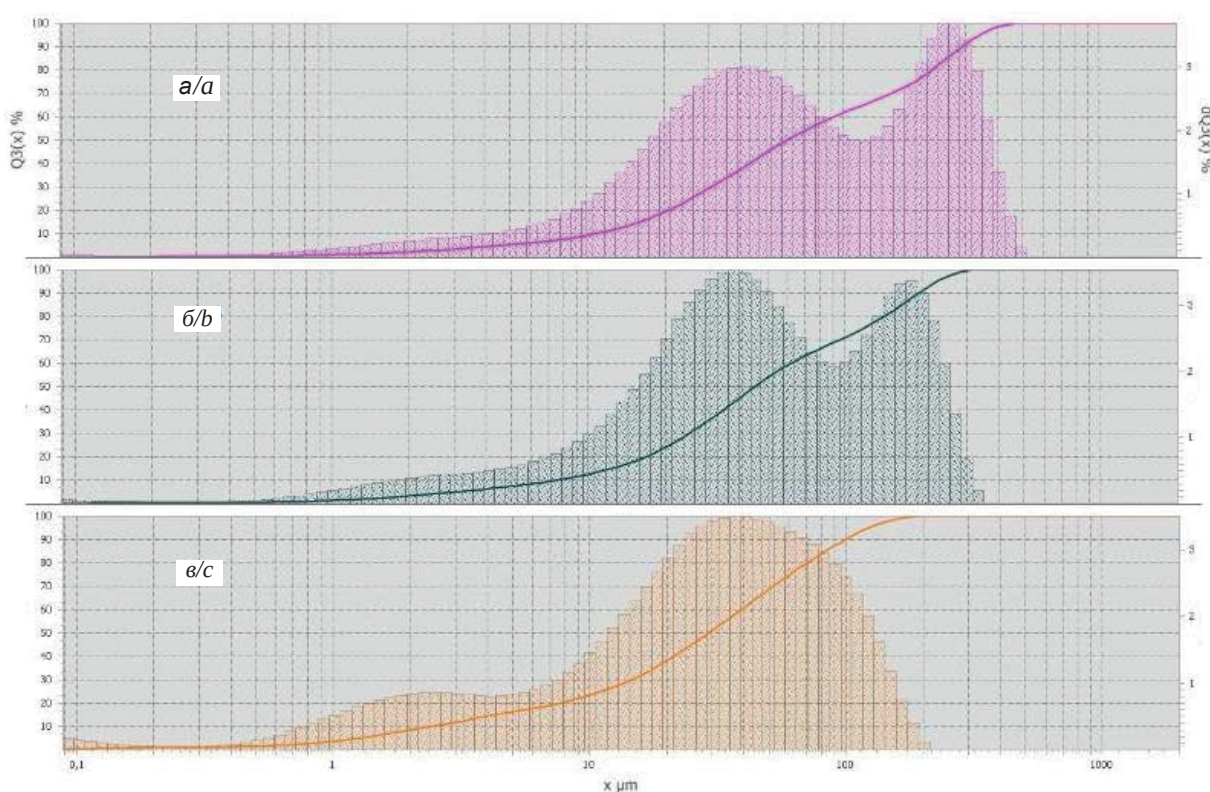


Рис. 1. Результаты гранулометрического анализа продуктов синтеза с концентрацией железосодержащей суспензии в исходном составе, %: а – 4, б – 8, в – 12

Fig. 1. Results of granulometric analysis of synthesis products with a concentration of iron-containing suspension in the initial composition, %: а – 4, б – 8, в – 12



гидроксидной форме FeOOH (PDF 01-076-7169), а также диоксид кремния SiO<sub>2</sub> (PDF 01-083-2467). После термической обработки опилок при 500°C, пропитанных суспензией шлама с разной концентрацией, наблюдается появление новой кристаллической фазы гема-

тита α – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (PDF 01-076-4579), кроме этого есть рефлексы недожжённого углерода (PDF 01-089-8498) (см. рис. 2, б–г). Гематит является слабым ферромагнетиком, поэтому уже в этих условиях сорбенты начинают проявлять магнитные свойства.

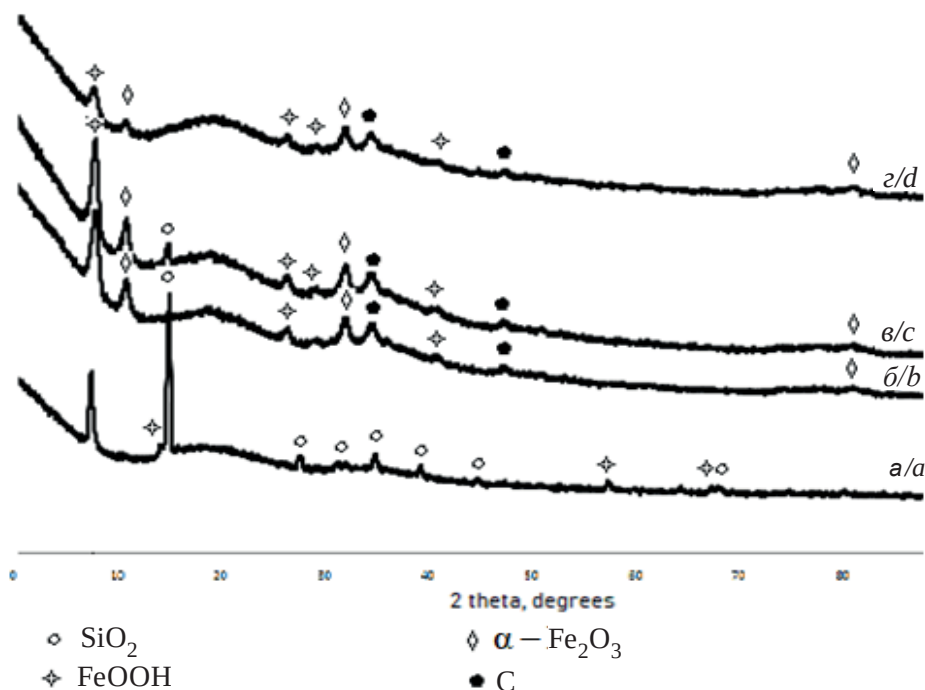


Рис. 2. Дифрактограммы исходного осадка промывных фильтров (а) и продуктов синтеза, полученных при температуре 500°C, с концентрацией железосодержащей суспензии в исходном составе, %: б – 4, в – 8, г – 12

Fig. 2. Diffraction patterns of the initial sediment of wash filters (a) and synthesis products obtained at a temperature of 500°C with a concentration of iron-containing suspension in the initial composition, %: b – 4, c – 8, d – 12

В табл. 1 представлены основные сорбционные характеристики полученных образцов.

Значения площади поверхности и пористости, рассчитанные по уравнению Брунауэра – Эммета – Теллера (БЭТ), являются основной

характеристикой сорбентов. Связывание нефтепродуктов протекает в пористых сорбентах за счет физической сорбции. Наиболее эффективно происходит удаление в порах диаметром от 1,5 до 4,5 нм [25].

Таблица 1 / Table 1

Основные сорбционные характеристики полученных материалов  
Main sorption characteristics of the obtained materials

Содержание шлама, % / Sludge content, %	Площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г / Surface area, m <sup>2</sup> /g	Средний размер пор, нм / Average pore size, nm	Сорбция метиленового голубого, мг/г / Sorption of methylene blue, mg/g	Нефтеемкость сорбента с поверхности воды, г/г / Oil absorption capacity of the sorbent from the water surface, g/g	Водопоглощение, г/г / Water absorption, g/g
4	366	2,20	5,7	3,3	11,2
8	301	2,26	5,7	2,8	9,9
12	177	2,77	5,5	1,7	8,7



Крупные молекулы мазута не способны проникать в микропоры. Изотермы низкотемпературной адсорбции – десорбции азота для полученных образцов относятся к IV типу, что характерно для мезопористых материалов. Средний размер пор 2,20 – 2,70 нм соответствует классификации IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry – Международный союз теоретической и прикладной химии) для сорбентов с переходными порами (мезопорами). Наиболее эффективное использование порового пространства при извлечении крупных молекул будет для более крупных пор.

Уменьшение сорбционной активности с увеличением процентного содержания гетита в исходном составе подтверждается уменьшением величины адсорбции метиленового

голубого. Емкость образцов по отношению к мазуту с поверхности воды уменьшается в той же последовательности.

Также к важнейшим характеристикам нефтяных сорбентов относится величина водопоглощения, отражающая насколько эффективно сорбент впитывает и удерживает в себе воду. Уменьшение величины водопоглощения свидетельствует об увеличении эффективности применения сорбента для ликвидации нефти и нефтепродуктов (см. табл. 1).

При этом об усилении магнитных свойств можно косвенно судить по количеству поднятого за раз связанного с мазутом сорбента с поверхности воды неодимовым магнитом при изменении содержания железосодержащего шлама в исходной суспензии (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Результаты испытаний магнитных свойств  
Magnetic properties test results**

Содержание железосодержащего шлама в исходной суспензии, % / Content of iron-containing sludge in the initial suspension, %	Средняя масса сорбента с мазутом, собранная магнитом, г / Average mass of sorbent with fuel oil collected by magnet, g	Среднее остаточное содержание нефтепродуктов, мг/дм <sup>3</sup> / Average residual content of petroleum products, mg/dm <sup>3</sup>
4	1,2	148,1
8	1,7	59,5
12	2,7	78,5

Для оценки эффективности очистки определяли остаточное содержание нефтепродуктов после удаления мазута с поверхности воды магнитоуправляемым нефтесорбентом. Меньшее среднее количество оставшегося мазута в растворе (59,5 мг/дм<sup>3</sup>) после сорбции получено для образца с 8%-ным содержанием железосодержащего шлама в исходном составе (см. табл. 2).

### Заключение

Совместная утилизация сосновых опилок и осадка промывного фильтра станции водоподготовки при 500°C позволяет получить магнитные сорбенты для сбора нефти и нефтепродуктов с поверхности воды. Увеличение железосодержащего шлама в исходном составе приводит к увеличению магнитных свойств материала и снижению величины водопоглощения, однако это сопровождается уменьшением сорбционных характеристик,

таких как сорбционная емкость по метиленовому голубому и нефтеемкость по мазуту. Оптимальным результатом можно считать нефтеемкость сорбента с содержанием железосодержащего шлама 8%.

### Список литературы

1. Сироткина Е. Е., Новоселова Л. Ю. Материалы для адсорбционной очистки воды от нефти и нефтепродуктов непосредственный // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. № 3. С. 359–377.
2. Русинов Д. А. Новая технология производства гранулированного сорбента на основе природного глауконита // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды : материалы I Национальной науч.-практ. конф. с междунар. участием / отв. ред. А. В. Русинов. Саратов : КУБиК, 2019. С. 209–212.
3. Мерициди И. А., Шлапаков А. В. Критерии выбора нефтяного сорбента для локализации аварийных разливов нефти на поверхности водоемов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2007. № 4. С. 52–57.



4. Каменщиков Ф. А., Богомольный Е. И. Нефтяные сорбенты. М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. 268 с.
5. Новикова Л. А., Томина Е. В., Молчанова О. Н., Жукова Е. А., Дорошенко А. В., Тюпина Е. А. Сорбция ионов меди из водных растворов высокодисперсными ферритами кобальта и цинка // Сорбционные и хроматографические процессы. 2024. Т. 24, № 5. С. 695–710. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12509>
6. Faraji M., Shirani M., Rashidi-Nodeh H. The recent advances in magnetic sorbents and their applications // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2021. Vol. 141. Art. 116302. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116302>
7. Dabagh Sh., Haris S. A., Ertas Y. N. Engineered polyethylene glycol-coated zinc ferrite nanoparticles as a novel magnetic resonance imaging contrast agent // ACS Biomaterials Science & Engineering. 2023. № 9 (7). <https://doi.org/10.1021/acsbio-materials.3c00255>
8. Кулакова И. И., Лисичкин Г. В. Ликвидация аварийных разливов нефти. Сорбционная очистка поверхности акваторий от нефтяных загрязнений : учебное пособие. М. : МГУ, 2022. 82 с.
9. Лубенцова К. И. Получение и исследование физико-химических свойств композитных сорбентов на основе полистирольных матриц с нанодисперсными оксидами железа : дис. ... канд. хим. наук. М., 2016. 145 с.
10. Ali A., Shah T., Ullah R., Zhou P., Guo M., Ovais M., Tan Z., Rui Y. Review on recent progress in magnetic nanoparticles: Synthesis, characterization, and diverse applications // Front. Chem. 2021. Vol. 9. Art. 629054. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.629054>
11. Osman A. I., El-Monaem E. M. A., Elgarahy A. M. Methods to prepare bio sorbents and magnetic sorbents for water treatment: A review // Environ. Chem. Lett. 2023. Vol. 21. P. 2337–2398. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01603-4>
12. Черных Я. Ю., Верещагина Т. А., Мазурова Е. В., Парфенов В. А., Соловьев Л. А., Верещагин С. Н., Шаронова О. М. Магнитные композитные сорбенты для извлечения тяжелых металлов из жидких отходов и их иммобилизации в минералоподобной матрице // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2019. Т. 12, № 3. С. 446–457. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0141>
13. Порожнюк Л. А., Лушиников А. С., Старостина И. В. Использование углеродсодержащего сорбционного материала для извлечения эмульгированных нефтепродуктов из водных сред // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2023. № 1 (310). С. 55–61. [https://doi.org/10.33285/2411-7013-2023-1\(310\)-55-61](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2023-1(310)-55-61)
14. Веденяпина М. Д., Курмышева А. Ю., Кряжев Ю. Г., Ершова В. А. Магнитные железосодержащие углеродные материалы как сорбенты для извлечения загрязнителей из водных сред (обзор) // Химия твердого топлива. 2021. № 5. С. 15–37. <https://doi.org/10.31857/S0023117721050078>, EDN: PXWWVJ
15. Ушакова Е. С., Ушаков А. Г., Шурдова А. Е., Романова А. Е. Разработка магнетитового ядра сорбентов для очистки водных сред от загрязнений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 1 (167). С. 79–86. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2025-1-79-86>, EDN: HBWMYY
16. Горелая О. Н., Романовский В. И. Сорбент для очистки нефтесодержащих сточных вод на основе отходов станций обезжелезивания // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 10. С. 48–54.
17. Калаева С. З., Макаров В. М., Маркелова Н. Л. Получение магнетита восстановлением осадков станций обезжелезивания воды отходами активированного угля // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. Вып. 1. С. 64–71.
18. Максимов Л. И., Миронов В. В. Совершенствование технологии получения высокодисперсных порошков металлического железа из осадка станции обезжелезивания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22, № 2. С. 162–173. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-2-162-173>
19. Коршикова Е. С. Использование модифицированных отходов деревообрабатывающего производства в сорбционной очистке сточных вод // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии : сборник статей 81-й Всерос. науч.-техн. конф. (Самара, 15–19 апреля 2024 г.). Самара : Самарский государственный технический университет, 2024. С. 528–538. EDN: QGJJUK
20. Венрикова Е. В., Цыганова С. И., Терещенко Е. А. Магнитные сорбенты на основе коры сосны для сбора нефти и нефтепродуктов // Химия растительного сырья. 2015. № 2. С. 219–224.
21. Усова Е. Л., Решетова А. А., Полещук И. Н., Пимнева Л. А. Исследование адсорбции ионов меди, никеля и цинка на цеолитсодержащем сорбенте, синтезированном из отходов ТЭС // Сорбционные и хроматографические процессы. 2023. Т. 23, № 6. С. 1034–1041. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11864>
22. Усова Н. Т., Лукашевич О. Д., Герб Л. В., Гончаров О. Ю. Утилизация отходов водоподготовки станций обезжелезивания // Водоочистка. 2012. № 2. С. 33–40.
23. Торопков Н. Е., Кутугин В. А. Возможные пути переработки отходов станции обезжелезивания // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 11 (30). С. 54–55. EDN: ТВТИWZ
24. Искендрова А. К., Курманалиев М. К., Сулейменова М. Ш. Сорбция нефтепродуктов природными



сорбентами // Вестник Алматинского технологического университета. 2020. № 3/1. С. 47–52. <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2020-3/1-47-52>

25. Веприкова Е. В., Терещенко Е. А. Особенности очистки воды и нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей // Журнал Сибирского федерального университета. 2010. № 3. С. 285–303.

## Reference

1. Sirotkina E. E., Novoselova L. Yu. Materials for direct adsorption purification of water from oil and oil products. *Chemistry for Sustainable Development*, 2005, no. 3, pp. 359–377 (in Russian).
2. Rusinov D. A. New technology for the production of granulated sorbent based on natural glauconite. In: Rusinov D. A., ed. *Innovations in Nature Management and Environmental Protection: Proc. I National scientific and practical conf. with intern. participation*. Saratov, KUBiK, 2019, pp. 209–212 (in Russian).
3. Mericidi I. A., Shlapakov A. V. Criteria for selecting an oil sorbent for localizing emergency oil spills on the surface of water bodies. *Bulletin of Quality Management in Oil and Gas Industry*, 2007, no. 4, pp. 52–57 (in Russian).
4. Kamenshchikov F. A., Bogomolny E. I. *Neftyanye sorbenty* [Oil sorbents products]. Moscow, Izhevsk, Institute of Computer Research Publ., 2003. 268 p. (in Russian).
5. Novikova L. A., Tomina E. V., Molchanova O. N., Zhukova E. A., Doroshenko A. V., Tyupina E. A. Sorption of copper ions from aqueous solutions by highly dispersed cobalt and zinc ferrites. *Sorption and Chromatographic Processes*, 2024, vol. 24, no. 5, pp. 695–710 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12509>
6. Faraji M., Shirani M., Rashidi-Nodeh H. The recent advances in magnetic sorbents and their applications. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2021, vol. 141, art. 116302. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116302>.
7. Dabagh Sh., Haris S. A., Ertas Y. N. Engineered polyethylene glycol-coated zinc ferrite nanoparticles as a novel magnetic resonance imaging contrast agent. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2023, no. 9 (7). <https://doi.org/10.1021/acsbio-mater.3c00255>.
8. Kulakova I. I., Lisichkin G. V. *Likvidatsiya avarijnykh razlivov nefi. Sorbcionnaya ochistka poverxnosti akvatorii ot neftyanykh zagryaznenii: uchebnoe posobie* [Liquidation of emergency oil spills. Sorption cleaning of water surfaces from oil pollution: A tutorial]. Moscow, Moscow University Press, 2022. 82 p. (in Russian).
9. Lubentsova K. I. *Production and Study of the Physicochemical Properties of Composite Sorbents Based on Polystyrene Matrices with Nanodispersed Iron Oxides*. Diss. Cand. Sci. (Chem.). Moscow, 2016. 145 p. (in Russian).
10. Ali A., Shah T., Ullah R., Zhou P., Guo M., Ovais M., Tan Z., Rui Y. Review on recent progress in magnetic nanoparticles: Synthesis, characterization, and diverse applications. *Front. Chem.*, 2021, vol. 9, art. 629054. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.629054>
11. Osman A. I., El-Monaem E. M. A., Elgarahy A. M. Methods to prepare bio sorbents and magnetic sorbents for water treatment: A review. *Environ. Chem. Lett.*, 2023, vol. 21, pp. 2337–2398. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01603-4>
12. Chernyh Ya. Yu., Vereshchagina T. A., Mazurova E. V., Parfenov V. A., Solovlev L. A., Vereshchagin S. N., Sharonova O. M. Magnetic composite sorbents for trapping heavy metals from liquid waste and their immobilization in a mineral-like matrix. *J. Sib. Fed. Univer. Chem.*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 446–457 (in Russian). <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0141>
13. Porozhnyuk L. A., Lushnikov A. S., Starostina I. V. Use of carbon-containing sorption material for the extraction of emulsified petroleum products from aqueous media. *Environmental Protection in the Oil and Gas Complex*, 2023, no. 1 (310), pp. 55–61 (in Russian). [https://doi.org/10.33285/2411-7013-2023-1\(310\)-55-61](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2023-1(310)-55-61)
14. Vedenyapina M. D., Kurmysheva A. Yu., Kryazhev Yu. G., Ershova V. A. Magnetic iron-containing carbon materials as sorbents for the extraction of pollutants from aqueous media (review). *Chemistry of Solid Fuel.*, 2021, no. 5, pp. 15–37 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0023117721050078>, EDN: PXWWVJ
15. Ushakova E. S., Ushakov A. G., Shurdova A. E., Romanova A. E. Development of a magnetite core of sorbents for cleaning aquatic environments from pollutants. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2025, no. 1 (167), pp. 79–86 (in Russian). <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2025-1-79-86>, EDN: HBWYY
16. Gorelaya O. N., Romanovsky V. I. Sorbent for cleaning oil-containing wastewater based on waste from iron removal stations. *Water Supply and Sanitary Technique*, 2020, no. 10, pp. 48–54 (in Russian).
17. Kalayeva S. Z., Makarov V. M., Markelova N. L. Obtaining magnetite by reducing sludge from water deironing stations with activated carbon waste. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*, 2019, no. 1, pp. 64–71 (in Russian).
18. Maksimov L. I., Mironov V. V. Improvement of the technology for obtaining highly dispersed metallic iron powders from sludge from an iron removal station. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 162–173 (in Russian). <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-2-162-173>
19. Korshikova E. S. Use of modified woodworking waste in sorption wastewater treatment. *Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Construction*



- and Construction Technologies: Collection of articles of the 81st All-Russian scientific and technical conference (Samara, April 15–19, 2024). Samara, Samara State Technical University Publ., 2024, pp. 528–538 (in Russian). EDN: QGJJUK
20. Veprikova E. V., Tsyganova S. I., Tereshchenko E. A. Magnetic sorbents based on pine bark for the collection of oil and oil products. *Chemistry of Plant Raw Materials*, 2015, no. 2, pp. 219–224 (in Russian).
21. Usova E. L., Reshetova A. A., Poleshchuk I. N., Pimneva L. A. Study of adsorption of copper, nickel and zinc ions on a zeolite-containing sorbent synthesized from thermal power plant waste. *Sorption and Chromatographic Processes*, 2023, vol. 23, no. 6, pp. 1034–1041 (in Russian). <https://doi.org/10.17308/sorp chrom.2023.23/11864>
22. Usova N. T., Lukashevich O. D., Gerb L. V., Goncharov O. Yu. Disposal of waste from water treatment plants. *Water Purification*, 2012, no. 2, pp. 33–40 (in Russian).
23. Toropkov N. E., Kutugin V. A. Possible ways of processing waste from iron removal plants. *International Research Journal*, 2014, no. 11 (30), pp. 54–55 (in Russian). EDN: TBTIWZ
24. Iskenderova A. K., Kurmanaliev M. K., Suleimеноva M. Sh. Sorption of petroleum products with natural sorbents. *Journal of Almaty Technological University*, 2020, no. 3/1, pp. 47–52 (in Russian). <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2020-3/1-47-52>
25. Veprikova E. V., Tereshchenko E. A. Features of water and oil product purification using oil sorbents, filter materials and activated carbons. *Journal of the Siberian Federal University*, 2010, no. 3, pp. 285–303 (in Russian).

Поступила в редакцию 24.11.2025; одобрена после рецензирования 19.02.2026; принята к публикации 28.02.2026  
The article was submitted 24.11.2025; approved after reviewing 19.02.2026; accepted for publication 28.02.2026