

*Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 2 (142). С. 205-216.
ISSN 1998-8443 (print)*

*Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2023. Issue 2 (142). P. 205-216.
ISSN 1998-8443 (print)*

Научная статья

УДК 628.316

doi: 10.17122/ntj-oil-2023-2-205-216

EDN: GSISBJ

МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫЙ СОРБЕНТ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Жанна Ануаровна Сапронова¹, Анастасия Владимировна Святченко²,
Юлия Егоровна Токач³, Юрий Константинович Рубанов⁴,
Любовь Николаевна Ольшанская⁵, Дарья Андреевна Шамраева⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6}Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Белгород, Россия

¹sapronova.2016@yandex.ru

²sv.anastasiaa@mail.ru

³tokach@bk.ru

⁴yurbanov@yandex.ru

⁵ecos123@mail.ru

⁶pe@intbel.ru

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Владимировна Святченко,
sv.anastasiaa@mail.ru

Аннотация. Существующая структура промышленности, устаревшие технологии формируют широкий круг природоохранных проблем и резко обостряют экологическую ситуацию. Для очистки водных источников от нефтяных разливов применяются различные методы: механические, термические, физико-химические, биологические. Среди доступных альтернатив нефтяные сорбенты признаны одним из наиболее экономичных, эффективных и экологически чистых материалов, поскольку масла могут должным образом поглощаться нефтяными сорбентами, не вызывая при этом вторичного загрязнения воды.

Цель исследования - изучение возможности получения эффективного магнитоуправляемого сорбционного материала для очистки водной поверхности от нефтяных пятен.

Задачи исследования - проанализировать состав пыли электродуговых сталеплавильных печей (ЭСП); провести исследования по гидрофобизации пыли ЭСП парафином; определить оптимальные пропорции пыли и гидрофобизатора, которые позволяют материалу сохранять плавучесть и магнитовосприимчивость; оценить взаимодействие полученного материала с нефтяным пятном на поверхности воды.

Элементный состав образца пыли был получен с помощью прибора «ARL9900 Intellipower Workstation».

Сорбционный материал изготовлялся следующим образом: пыль ЭСП смешивалась с навеской парафина, затем происходило нагревание до 105 °С в сушильном шкафу, перемешивание, охлаждение до температуры 20 °С.

Истинную плотность определяли пикнометрическим методом. Для определения насыпной плотности использовали метод ASTM D2854-70 «Стандартный метод контроля кажущейся плотности активных углей».

В качестве магнитовосприимчивого компонента использовался отход электро-сталеплавильного производства. Проведены исследования по его гидрофобизации парафином с целью возможного использования в водоочистке. При соотношении отход : парафин 1 : 0,07 получен материал, обладающий высокой гидрофобностью и плавучестью. Испытания по сгущению и извлечению пятна сырой нефти с водной поверхности доказали перспективность использования полученного материала для очистки водных сред от нефтяных загрязнений.

Ключевые слова: сорбционный материал, магнитный сорбент, очистка от нефтяных разливов

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации Федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Сапронова Ж. А., Святченко А. В., Токач Ю. Е., Рубанов Ю. К., Ольшанская Л. Н., Шамраева Д. А. Магнитоуправляемый сорбент для очистки водной поверхности от нефтяных загрязнений // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Вып. 2 (142). С. 205-216. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-2-205-216>.

Original article

MAGNETIC-CONTROLLED SORBENT FOR WATER SURFACE CLEANING FROM OIL POLLUTION

Zhanna A. Sapronova¹, Anastasia V. Svyatchenko², Yulia E. Tokach³, Yuri K. Rubanov⁴, Lyubov N. Olshanskaya⁵, Darya A. Shamraeva⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6}Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

¹sapronova.2016@yandex.ru

²sv.anastasiaa@mail.ru

³tokach@bk.ru

⁴yrubanov@yandex.ru

⁵ecos123@mail.ru

⁶pe@intbel.ru

Corresponding author: **Anastasia V. Svyatchenko**, sv.anastasiaa@mail.ru

Abstract. The modern structure of industry, outdated technologies form a wide range of environmental problems and sharply worsen the ecological situation. Various methods are used to clean water sources from oil spills: mechanical, thermal, physicochemical, biological. Among the available alternatives, oil sorbents are considered as one the most economical, efficient and environmentally friendly materials because oils can be properly absorbed by oil sorbents without causing secondary water pollution.

The purpose of the research is to study the possibility of obtaining an effective magnetically controlled sorption material for cleaning the water surface from oil spills.

Research objectives are to analyze the composition of electric arc steel-smelting furnaces (EASSF) dust; conduct research on the hydrophobization EASSF dust with paraffin; determine the optimal proportions of dust and hydrophobizator, which allow the material to maintain buoyancy and magnetic susceptibility; evaluate the interaction of the obtained material with an oil spills on water surface.

The dust sample elemental composition was obtained using the ARL9900 Intellipower Workstation.

The sorption material was prepared as follows: the EASSF dust was mixed with a sample of paraffin, then it was heated to 105 °C in an oven, mixed, and cooled to a temperature of 20 °C.

The true density was determined by the pycnometric method. The method ASTM D2854-70 «Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbons» was used to determine the bulk density.

Electric steelmaking waste was used as a magnetically susceptible component. Studies have been carried out on its hydrophobization with paraffin for possible use in water treatment. With the waste : paraffin ratio of 1 : 0.07, a material with high hydrophobicity and buoyancy was obtained. Tests for thickening and extracting a crude oil spill from water surface proved the promise of using the obtained material for cleaning water from oil pollution.

Keywords: sorption material, magnetic sorbent, oil spill cleanup

Acknowledgements: The work was carried out as part of the implementation of the Federal program to support universities «Priority 2030» using equipment based in the Center for High Technologies of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

For citation: Sapronova Zh. A., Svyatchenko A. V., Tokach Yu. E., Rubanov Yu. K., Olshanskaya L. N., Shamraeva D. A. Magnitoupravlyaemyi sorbent dlya ochistki vodnoi poverkhnosti ot neftnykh zagryaznenii [Magnetic-Controlled Sorbent for Water Surface Cleaning from Oil Pollution]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2023, Issue 2 (142), pp. 205-216. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2023-2-205-216>.

Адсорбция - это явление, широко применяемое для удаления большинства типов органических/неорганических загрязнителей из водной среды. Загрязненный раствор смешивается с твердым материалом, имеющим большую площадь пористой поверхности; межмолекулярные силы притяжения между жидкостью и твердым телом заставляют часть молекул растворенного вещества из раствора сконцентрироваться на твердой поверхности [1].

Адсорбция является универсальным, недорогим и экологически безопасным методом очистки воды для удаления опасных загрязнителей.

Метод адсорбции играет важную роль в промышленных процессах из-за его более высокой эффективности и чувствительности к токсичным веществам по сравнению с другими традиционными методами [2].

Известно много сорбционных материалов, полученных из промышленных и/или сельскохозяйственных отходов. Так, известны [3] сорбирующие материалы на основе продуктов пиролиза отходов сахарного тростника.

Процесс пиролиза проведен с применением бентонитоподобной глины, используемой для экранирования растительных отходов от контакта с кислородом воздуха. Выявлено преимущество разработанных сорбирующих материалов по сравнению с коммерческим активированным углем, полученным из скорлупы кокоса.

В работе [4] приведены результаты экспериментальных исследований для определения возможности извлечения красителя

марки «метиленовый голубой» из водной среды сорбционным способом с помощью кожуры арахиса.

Исследования по совместному использованию термомодифицированных органоминеральных отходов сахарного и пивоваренного производств для очистки модельных растворов от ионов меди и никеля показали, что более эффективным является сорбционный материал, полученный термообработкой кизельгурового шлама пивоваренного производства (94 % по ионам никеля и 95 % по ионам меди) [5].

Нефть и другие органические растворители служат базовыми химическими веществами для ряда отраслей промышленности и имеют широкое применение в повседневной жизни человека. Однако быстрая индустриализация и повышение уровня жизни увеличили частоту разливов нефти и утечек органических жидкостей. Это привело к серьезным экологическим проблемам и проблемам со здоровьем человека во всем мире [6].

Существующая структура промышленности, устаревшие технологии формируют широкий круг природоохранных проблем и резко обостряют экологическую ситуацию. Для очистки водных источников от нефтяных разливов применяются различные методы: механические, термические, физико-химические, биологические.

Среди доступных альтернатив нефтяные сорбенты (рисунок 1) были признаны одним из наиболее экономичных, эффективных и экологически чистых материалов, поскольку масла могут должным образом поглощаться нефтяными сорбентами, не вызывая при этом

вторичного загрязнения воды. Для определения качества сорбента нефти следует учитывать несколько критериев, включая, помимо прочего, следующие: гидрофобно-олеофильные свойства, высокую нефтепоглощающую способность, быструю кинетику абсорбции, низкую стоимость материала, хорошую селективность по отношению к нефти и воде, а также высокую плавучесть, возможность вторичной переработки, экологичность и биоразлагаемость [7, 8].

Подробная информация о различных видах специальной смачиваемости различных поверхностей и краевых углах смачива-

ния представлена в таблице 1. Краевой угол – это угол, под которым граница раздела «жидкость – пар» соприкасается с границей раздела «жидкость – твердое тело». Как правило, он используется для оценки смачиваемости поверхности жидкостями. Краевой угол объясняет силу контакта между твердыми телами, жидкостями и воздухом. Было проведено множество экспериментальных исследований по смачиваемости и разработке перестраиваемых гидрофобных и гидрофильных материалов, особенно для разделения смесей нефти и воды и предотвращения биологического обрастания [9].



Рисунок 1. Сорбционные материалы для ликвидации разливов нефти

Figure 1. Sorption materials for oil spill response

Таблица 1. Сродство к жидкости и краевые углы смачивания

Table 1. Liquid affinity and contact angles

Смачиваемость	Краевой угол смачивания	Смачиваемость	Краевой угол смачивания
Вода		Масло / нефть	
Гидрофильные	< 90	Олеофильные	< 90
Супергидрофильные	≈ 0	Суперолеофильные	≈ 0
Гидрофобные	> 90	Олеофобные	> 90
Супергидрофобные	> 150	Суперолеофобные	> 150

Концепция использования магнетизма для очистки воды не нова и уже применялась в различных процессах очистки сточных вод. Магнетизм материала обеспечивает легкое отделение отработанных адсорбентов от очищенных стоков, и таким образом материал может быть регенерирован для циклического применения, что делает процесс экономичным. Кроме того, большое количество сточных вод может быть обработано за очень короткое время, что может повысить эффективность процесса адсорбции [2].

Магнитные наноконпозиты привлекли широкое внимание как перспективные материалы для очистки воды, обладающие лучшей диспергируемостью и стабильностью, чем свободные наночастицы, помимо простоты отделения от воды при приложении внешнего магнитного поля, экономичности, высокой емкости, безопасности для окружающей среды и возможности очистки большого объема сточных вод за короткое время без образования вредных побочных продуктов.

Синтез таких материалов включает в себя относительно сложные процедуры, дорогостоящие и опасные химические вещества, так что рентабельное массовое производство в настоящее время невозможно [10, 11].

Это вызывает необходимость разработки менее дорогостоящих сорбционных материалов с магнитными свойствами.

В работе [12] описаны исследования по получению супергидрофобных магнитных опилок путем двухэтапного покрытия погружением частицами Fe_3O_4 и канделильского воска.

Благодаря пористой структуре опилок, магнетизму частиц Fe_3O_4 и гидрофобности воска полученный абсорбент показал хорошую поглощающую способность (3,59-7,83 г/г), дистанционную управляемость (магнитное насыщение, 3,03 етл/г) и высокий краевой угол смачивания водой. В другом исследовании [7] магнитоактивные композиты были синтезированы путем мягкого эпоксидирования натурального каучука в присутствии магнетита.

Сорбент был сделан еще более пористым за счет включения частиц кремнезема во время эпоксидирования, а затем растворения их во фтористом водороде. Полученный материал был способен сорбировать бензин до 7 г/г, и материал можно было использовать до 5 циклов.

Хлопок в основном состоит из целлюлозы, которая представляет собой зеленый природный полимерный материал с высоким выходом, хорошей биосовместимостью и возобновляемыми свойствами. Это идеальное сырье для изготовления абсорбентов нефти из-за его трехмерной структуры, низкой плотности и высокой пористости.

В последнее время широкое внимание привлекает воск из биомассы (биовоск) как зеленый гидрофобный модификатор. Большинство исследований сосредоточено на объединении биовоска с микро/наночастицами (например наночастицами SiO_2) для создания супергидрофобных покрытий с помощью одноэтапного процесса распыления при определенных температурах. Проведено несколько исследований по использованию биовоска для изготовления абсорбентов масла с использованием этанола или гексана в качестве растворителя [6].

В этой связи нами были проведены исследования по получению магнитоуправляемых композиционных материалов. В качестве магнитовосприимчивого материала использовали пыль ЭСП. Это крупнотоннажный отход, в больших объемах образующийся по всему миру.

Известно, что на 1 т стали образуется до 20 кг этого отхода, в переработку уходит менее половины [13, 14].

Пыль ЭСП имеет высокое содержание оксидов железа. Установлено, что в состав пыли входят магнетит, гематит, металлическое железо, а также примеси кварца и других оксидов [14].

Энергодисперсионный спектр образца пыли ЭСП представлен на рисунке 2.

На рисунке 3 представлен гранулометрический состав используемого материала.

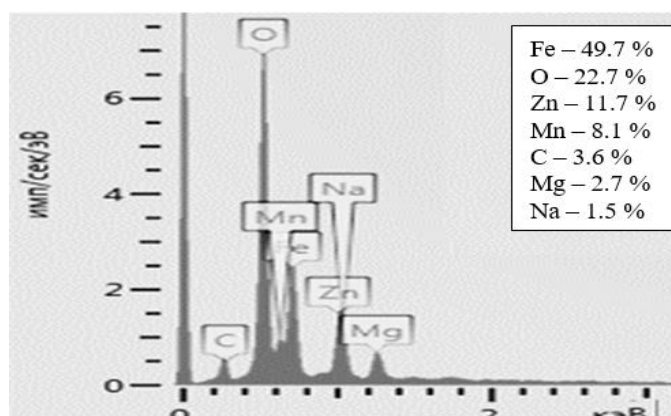


Рисунок 2. Энергодисперсионный спектр образца пыли электродуговых сталеплавильных печей

Figure 2. Energy dispersive spectrum of a dust sample from electric arc steelmaking furnaces

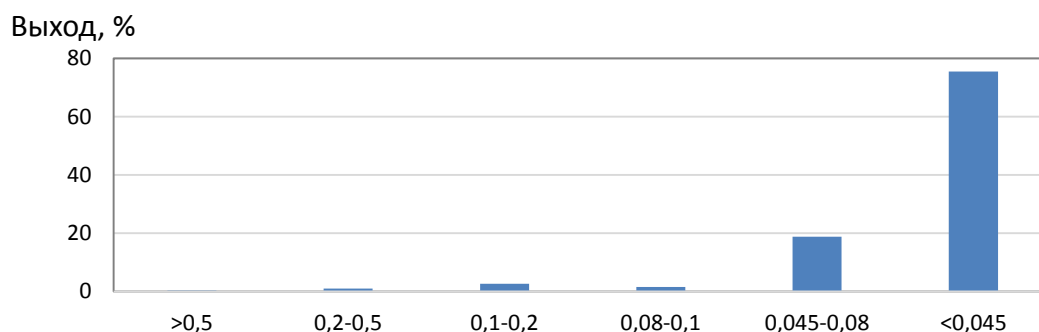


Рисунок 3. Гранулометрический состав пыли

Figure 3. Granulometric composition of dust

Насыпная плотность исследуемого образца пыли составила $0,95 \text{ г/см}^3$, истинная плотность - $3,71 \text{ г/см}^3$.

Были проведены исследования по гидрофобизации пыли ЭСП парафином для ее возможного использования в водоочистке в качестве магнитоуправляемого сорбента. Готовились образцы путем смешивания пыли с парафином в следующих соотношениях: 1 : 1; 1 : 0,7; 1 : 0,5; 1 : 0,1; 1 : 0,7; 1 : 0,05; 1 : 0,03; 1 : 0,01. Из этих образцов граничным по плаваемости материалом оказалось соотношение

1 : 0,07 - полученный сорбент плавал на водной поверхности в течение нескольких суток. На рисунке 4 приведена фотография образцов сорбента, плавающих на поверхности воды, загрязненной машинным маслом. Видно, что на дне всех емкостей, кроме той, что содержит материал, гидрофобизованный в пропорции пыль ЭСП : парафин 1 : 0,07, можно заметить часть осевшего сорбента.

Для получения представления о сродстве материала к полярным и неполярным жидкостям, сорбент впрессовывался в пара-

финизированную пластинку, после чего наносилась капля воды (рисунок 5, *a*) и капля машинного масла (рисунок 5, *b*). Видно, что краевой угол смачивания в первом случае имеет величину, большую 90° , во втором материал демонстрирует явную олеофильность.

Из анализа полученных данных можно заключить, что путем смешения пыли ЭСП с парафином мы получаем материал, обладающий высокой гидрофобностью и плавуче-

стью. Помимо этого, пыль ЭСП обладает таким свойством, как магнитоуправляемость, что делает удобным извлечение такого сорбента из водной среды после его использования.

На рисунке 6 приведены испытания по сгущению и извлечению пятна сырой нефти с водной поверхности при помощи сорбционного материала, гидрофобизованного в пропорции пыль ЭСП : парафин 1 : 0,07.

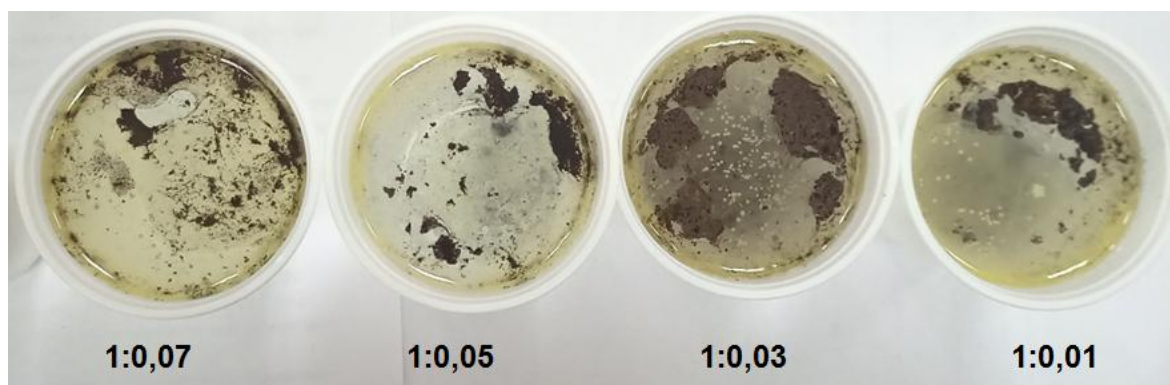


Рисунок 4. Испытания материалов с добавлением различного количества парафина на плавучесть в воде, загрязненной машинным маслом

Figure 4. Testing materials with the addition of various amounts of paraffin for buoyancy in water contaminated with engine oil

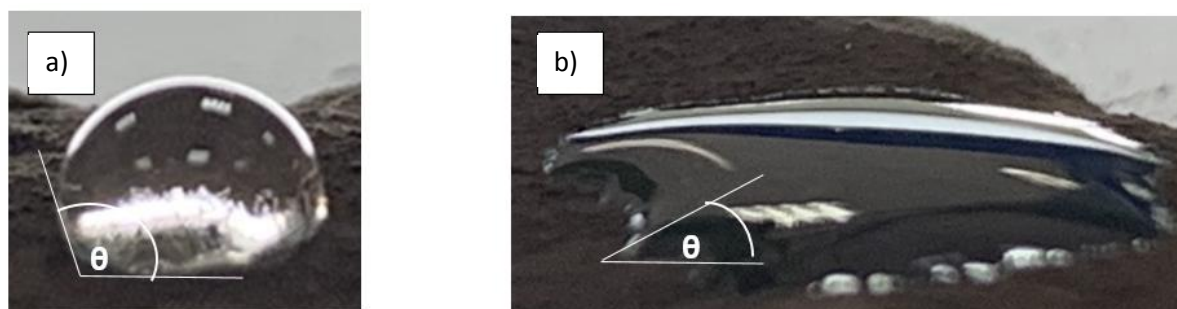


Рисунок 5. Определение сродства материала к полярным и неполярным жидкостям: к воде (а), к машинному маслу (b)

Figure 5. Determination of material affinity for polar and non-polar liquids: to water (a), to engine oil (b)

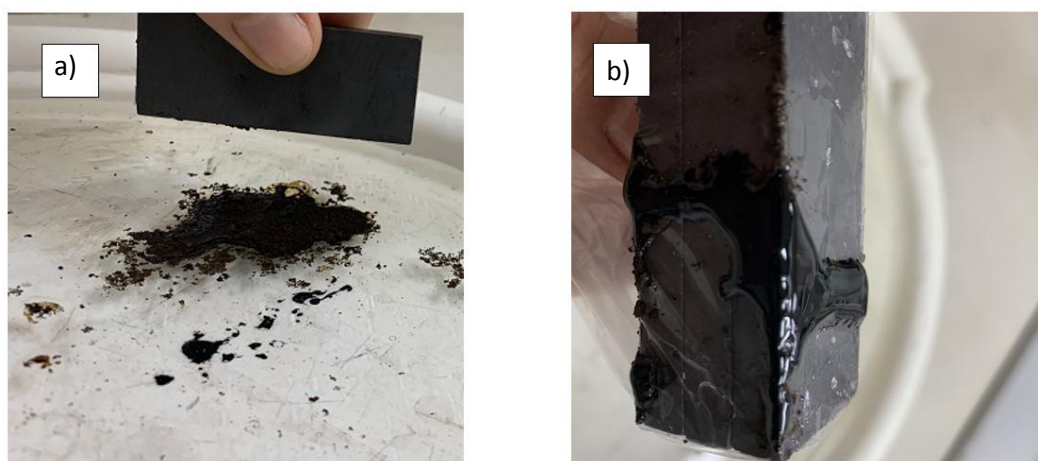


Рисунок 6. Испытания по сгущению (a) и извлечению пятна сырой нефти (b) с водной поверхности

Figure 6. Tests for thickening (a) and removing a slick of crude oil (b) from the water surface

Нефтяное пятно, смешанное с сорбционным материалом, уверенно движется к магниту (рисунок 6, а), при поднесении последнего к водной поверхности энергично с ним взаимодействует (рисунок 6, б).

Таким образом, в условиях модельной системы сорбционный материал продемонстрировал высокую эффективность. В то же время следует учитывать сложность и многообразие факторов окружающей среды, оказывающих влияние на процесс ликвидации нефтяных загрязнений. Необходимы дальнейшие исследования для оптимизации способа получения магнитоуправляемого сорбционного материала и проведения водоочистки в условиях природных и природно-антропогенных систем.

Выводы

Исследования по гидрофобизации пыли ЭСП парафином позволили получить сорбционный материал, обладающий высокой плавлучестью и магнитовосприимчивостью. Соотношение пыль ЭСП : парафин 1 : 0,07 в данном исследовании признано оптимальным, поскольку в данном случае используется минимально необходимое количество парафина, являющегося более дорогостоящим материалом, чем пыль ЭСП - отход производства. При помощи магнита и полученного сорбционного материала удалось добиться сгущения и извлечения большей части нефтяного пятна, что демонстрирует перспективность полученного материала для очистки водных сред от нефтяных загрязнений.

Список источников

1. Sugumari V., Karthikeyan R., Sivarama K. L. Recent Developments in Magnetic Nanoparticles and Nano-Composites for Wastewater Treatment // Jour-

References

1. Sugumari V., Karthikeyan R., Sivarama K. L. Recent Developments in Magnetic Nanoparticles and Nano-Composites for Wastewater Treatment. *Journal*

nal of Environmental Chemical Engineering. 2021. Vol. 9. Article No. 106553. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106553.

2. Atul Sh., Divyanshi M., Shehnaz Dr., Saif A.Ch. Recent Advances in Magnetic Composites as Adsorbents for Wastewater Remediation // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 306. Article No. 114483. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114483.

3. Нгуен Д.Т., Везенцев А.И., Перистый В.А., Перистая Л.Ф. Сорбент на основе продуктов пиролиза отходов сахарного тростника // *Вестник технологического университета*. 2019. Т. 22, № 11. С. 39-44. EDN: KSURDZ.

4. Свергузова С.В., Сапронова Ж.А., Хунди Л., Спесивцева С.Е. Извлечение красителя «метиленовый голубой» из водного раствора сорбционными материалами из скорлупы арахиса // *Вестник технологического университета*. 2020. Т. 23, № 1. С. 79-83. EDN: LDANNJ.

5. Saponova Zh.A., Svyatchenko A.V., Sverguzoza S.V., Gafarov R.R. Wastewater Purification from Copper and Nickel Ions by Means of Thermally Modified Organo-Mineral Wastes and Their Combinations // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 815. Article No. 012034. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012034.

6. Wu D., Wang T., Hu Sh. Solvent-Free Processing of Eco-Friendly Magnetic and Superhydrophobic Absorbent from All-Plant-Based Materials for Efficient Oil and Organic Solvent Sorption // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 800. Article No. 149558. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149558.

7. Bhardwaj N., Bhaskarwar A.N. A Review on Sorbent Devices for Oil-Spill Control // *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 243. P. 1758-1771. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.09.141.

8. Cao E., Xiao W., Duan W. Metallic Nanoparticles Roughened Calotropis Gigantea Fiber Enables Efficient Absorption of Oils and Organic Solvents // *Industrial Crops and Products*. 2018. Vol. 115. P. 272-279. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.02.052.

9. Nisar A., Muhammad B., Adnan K. Dynamics of Oil-Water Interface Demulsification Using Multifunctional Magnetic Hybrid and Assembly Materials // *Journal of Molecular Liquids*. 2020. Vol. 312. Article No. 113434. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113434.

10. Lateefa A.A., Weaam H., Mohamed A.S. Solid Phase-Fabrication of Magnetically Separable Fe₃O₄@Graphene Nanoplatelets Nanocomposite for Efficient Removal of NSAIDs from Wastewater. Perception of Adsorption Kinetics, Thermodynamics, and Extra-Thermodynamics // *Analytica Chimica Acta*. 2022. Vol. 1223. Article No. 340158. DOI: 10.1016/j.aca.2022.340158.

11. Kovummal G.R., Pattayil A.J. Coconut Shell Based Activated Carbon-Iron Oxide Magnetic Nanocomposite for Fast and Efficient Removal of Oil Spills // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015. Vol. 3. P. 2068-2075. DOI: 10.1016/j.jece.2015.04.028.

12. Yin Z., Li Y., Song T. Preparation of

of *Environmental Chemical Engineering*, 2021, Vol. 9, Article No. 106553. DOI: 10.1016/j.jece.2021.106553.

2. Atul Sh., Divyanshi M., Shehnaz Dr., Saif A.Ch. Recent Advances in Magnetic Composites as Adsorbents for Wastewater Remediation. *Journal of Environmental Management*, 2022, Vol. 306, Article No. 114483. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114483.

3. Nguen D.T., Vezentsev A.I., Peristy V.A., Peristaya L.F. Sorbent na osnove produktov piroliza otkhodov sakharnogo trostnika [a Sorbent Based on the Products of Sugarcane Waste Pyrolysis]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta - Herald of Technological University*, 2019, Vol. 22, No. 11, pp. 39-44. EDN: KSURDZ. [in Russian].

4. Sverguzoza S.V., Sapronova Zh.A., Khunadi L., Spesivtseva S.E. Izvlechenie krasitelya «metilenovyi goluboi» iz vodnogo rastvora sorbtionnymi materialami iz skorlupy arakhisa [Evaluation of Peanut Shell as an Inexpensive Sorption Material for Extraction of the Methylene Blue Dye from Aqueous Solution]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta - Herald of Technological University*, 2020, Vol. 23, No. 1, pp. 79-83. EDN: LDANNJ. [in Russian].

5. Saponova Zh.A., Svyatchenko A.V., Sverguzoza S.V., Gafarov R.R. Wastewater Purification from Copper and Nickel Ions by Means of Thermally Modified Organo-Mineral Wastes and Their Combinations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 815, Article No. 012034. DOI: 10.1088/1755-1315/815/1/012034.

6. Wu D., Wang T., Hu Sh. Solvent-Free Processing of Eco-Friendly Magnetic and Superhydrophobic Absorbent from All-Plant-Based Materials for Efficient Oil and Organic Solvent Sorption. *Science of the Total Environment*, 2021, Vol. 800, Article No. 149558. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149558.

7. Bhardwaj N., Bhaskarwar A.N. A Review on Sorbent Devices for Oil-Spill Control. *Environmental Pollution*, 2018, Vol. 243, pp. 1758-1771. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.09.141.

8. Cao E., Xiao W., Duan W. Metallic Nanoparticles Roughened Calotropis Gigantea Fiber Enables Efficient Absorption of Oils and Organic Solvents. *Industrial Crops and Products*, 2018, Vol. 115, pp. 272-279. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.02.052.

9. Nisar A., Muhammad B., Adnan K. Dynamics of Oil-Water Interface Demulsification Using Multifunctional Magnetic Hybrid and Assembly Materials. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, Vol. 312, Article No. 113434. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113434.

10. Lateefa A.A., Weaam H., Mohamed A.S. Solid Phase-Fabrication of Magnetically Separable Fe₃O₄@Graphene Nanoplatelets Nanocomposite for Efficient Removal of NSAIDs from Wastewater. Perception of Adsorption Kinetics, Thermodynamics, and Extra-Thermodynamics. *Analytica Chimica Acta*, 2022, Vol. 1223, Article No. 340158. DOI: 10.1016/j.aca.2022.340158.

11. Kovummal G.R., Pattayil A.J. Coconut Shell

Superhydrophobic Magnetic Sawdust for Effective Oil/Water Separation // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 253. Article No. 120058. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120058.

13. Tang H., Peng Z., Wang L. Facile Synthesis of Zinc Ferrite as Adsorbent from High-Zinc Electric Arc Furnace Dust // *Powder Technology*. 2022. Vol. 405. Article No. 117479. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117479.

14. Суханов Е.В. Коллоидно-химические аспекты получения железосодержащего коагулянта-флокулянта на основе пыли электросталеплавильного производства: дис. ... канд. техн. наук. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. 160 с.

Based Activated Carbon-Iron Oxide Magnetic Nanocomposite for Fast and Efficient Removal of Oil Spills. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015, Vol. 3, pp. 2068-2075. DOI: 10.1016/j.jece.2015.04.028.

12. Yin Z., Li Y., Song T. Preparation of Superhydrophobic Magnetic Sawdust for Effective Oil/Water Separation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 253, Article No. 120058. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120058.

13. Tang H., Peng Z., Wang L. Facile Synthesis of Zinc Ferrite as Adsorbent from High-Zinc Electric Arc Furnace Dust. *Powder Technology*, 2022, Vol. 405, Article No. 117479. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117479.

14. Sukhanov E.V. *Kolloidno-khimicheskie aspekty polucheniya zhelezosoderzhashchego koagulyanta-flokulyanta na osnove pyli elektrostaleplavil'nogo proizvodstva: dis. kand. tekhn. nauk* [Colloidal-Chemical Aspects of Obtaining an Iron-Containing Coagulant-Flocculant Based on Dust from Electric Steelmaking]. Belgorod, BGUTU im. V.G. Shukhova Publ., 2016. 160 p. [in Russian].

Информация об авторах

• Сапронова Жанна Ануаровна, доктор технических наук, доцент
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
И.о. заведующего кафедрой «Промышленная экология»
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46
e-mail: sapronova.2016@yandex.ru

• Святченко Анастасия Владимировна
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Старший преподаватель кафедры «Промышленная экология»
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46
e-mail: sv.anastasiaa@mail.ru

• Токач Юлия Егоровна, кандидат технических наук, доцент
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Доцент кафедры «Промышленная экология»
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46
e-mail: tokach@bk.ru

Information about the authors

• Sapronova Zhanna A., Doctor of Engineering Sciences, Associated Professor
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Acting as Head of Industrial Ecology Department
46, Kostyukov str., Belgorod, 308012, Russia
e-mail: sapronova.2016@yandex.ru

• Svyatchenko Anastasia V.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Senior Lecturer of Industrial Ecology Department
46, Kostyukov str., Belgorod, 308012, Russia
e-mail: sv.anastasiaa@mail.ru

• Tokach Yulia E., Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Assistan Professor of Industrial Ecology Department
46, Kostyukov str., Belgorod, 308012, Russia
e-mail: tokach@bk.ru

• Рубанов Юрий Константинович, кандидат технических наук, доцент
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Доцент кафедры «Промышленная экология»
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46
e-mail: yrubanov@yandex.ru

• Rubanov Yury K., Candidate of Engineering Sciences, Associated Professor
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Assistan Professor of Industrial Ecology Department
46, Kostyukov str., Belgorod, 308012, Russia
e-mail: yrubanov@yandex.ru

• Ольшанская Любовь Николаевна, доктор химических наук, профессор
Саратовский государственный технологический университет имени Гагарина Ю.А.
Профессор кафедры «Экология и техносферная безопасность»
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77
e-mail: ecos123@mail.ru

• Olshanskaya Lyubov N., Doctor of Chemical Sciences, Professor
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
Professor of Ecology and Environmental Management Department
77, Politechnicheskaya str., Saratov, 410054, Russia
e-mail: ecos123@mail.ru

• Шамраева Дарья Андреевна
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Студент кафедры «Промышленная экология»
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46
e-mail: pe@intbel.ru

• Shamraeva Darya A.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
Student of Industrial Ecology Department
46, Kostyukov str., Belgorod, 308012, Russia
e-mail: pe@intbel.ru

Статья поступила в редакцию 15.12.2022; одобрена после рецензирования 23.01.2023; принята к публикации 01.03.2023.

The article was submitted 15.12.2022; approved after reviewing 23.01.2023; accepted for publication 01.03.2023.