

DOI: 10.58168/TBiEc2025_219-224

УДК 544.723.212

УГЛЕРОДНЫЕ СОРБЕНТЫ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ТОКСИКАНТОВ

CARBON SORBENTS IN THE PROCESSES OF WASTEWATERS TREATMENT FROM
TOXICANTS SLUDGE FOR PURIFICATION OF WATER FROM COPPER IONS

Молчанова О.Н., студентка лесопромышленного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия.

Новикова Л.А., к.х.н., доцент ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия.

Томина Е.В., д.х.н., доцент, зав. кафедрой химии и биотехнологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия.

Жужукин К.В., к.т.н., ст. преподаватель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия.

Molchanova O.N., student of woodworking faculty FGBOU VO «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Novikova L.A., PhD in Chemical Sciences, associate professor FGBOU VO «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Tomina E.V., doctor of Chemical Sciences, associate professor, chairwoman of chemistry and biotechnology department at FGBOU VO «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Zhuzhukin K.V., PhD in Technical Sciences, senior lecturer at FGBOU VO «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russia.

Аннотация: в работе представлены результаты исследования новых углеродных сорбентов, синтезированных из осадков левобережных очистных сооружений (ЛОС) города Воронеж. Методом пиролиза при различных температурах (400°C, 500°C, 600°C) были получены три модификации биоугля (U400, U500 и U600) с контролируемым размером частиц 200-300 мкм. Комплексный анализ состава материалов выявил преобладание углеродной составляющей (55-59%) и наличие металлосодержащих примесей. Эксперименты по сорбции меди из модельных растворов продемонстрировали прямую зависимость эффективности очистки (7-50%) от температуры синтеза сорбента, при этом максимальная емкость (93,7 мг/г) достигнута для образца U600. Особое внимание уделено кинетическим особенностям процесса, где время установления равновесия варьировалось от 40 до 240 минут в зависимости от типа сорбента.

Abstract: the paper presents the results of a study of new carbon sorbents synthesized from the sediments of left-bank wastewater treatment plants (VOCs) in Voronezh. Three modifications of

biochar (U400, U500, and U600) with a controlled particle size of 200-300 microns were obtained by pyrolysis at different temperatures (400°C, 500°C, 600°C). Compositional analysis revealed predominant carbon content (55-59%) and presence of metal impurities. Copper sorption experiments from model solutions showed direct correlation between treatment efficiency (7-50%) and synthesis temperature, with U600 sample demonstrating maximum capacity (93.7 mg/g). Kinetic analysis highlighted equilibrium time variations (40-240 min) depending on sorbent type, providing insights into the sorption mechanism. The developed materials offer dual environmental benefit by combining waste utilization with effective water purification technology.

Ключевые слова: осадок сточных вод, углеродные сорбенты, сорбция, очистка сточных вод, тяжелые металлы, экология.

Keywords: sewage sludge, carbon sorbents, sorption, wastewaters treatment, heavy metals, ecology.

Осадки сточных вод (ОСВ), образующиеся в процессе очистки городских и промышленных стоков, представляют собой значительную экологическую и экономическую проблему. В России ежегодно накапливается более 100 млн м³ таких отходов, что требует разработки эффективных методов их утилизации и переработки [1]. Традиционные способы обращения с ОСВ, такие как складирование на полигонах или сжигание, не только не решают проблему, но и могут усугублять негативное воздействие на окружающую среду [2].

Одним из перспективных направлений является использование ОСВ в качестве сырья для получения сорбционных материалов, способных удалять из воды тяжелые металлы, органические загрязнители и другие токсичные вещества. Исследования показывают, что углеродные сорбенты, полученные из осадков сточных вод, обладают высокой эффективностью в очистке водных сред благодаря развитой пористой структуре и наличию функциональных групп на поверхности [3, 4]. Например, композитные материалы на основе ферритов металлов, таких как кобальт и цинк, демонстрируют исключительную сорбционную емкость по отношению к ионам меди (до 200 мг/г) [5]. Кроме того, осадки сточных вод могут быть использованы в сельском хозяйстве в качестве удобрений после соответствующей обработки. Добавление 10% ОСВ к почве повышает всхожесть газонной травы на 50%, что делает этот метод экономически выгодным для озеленения городских территорий [6]. Однако применение ОСВ в агросекторе требует строгого контроля содержания тяжелых металлов и патогенных микроорганизмов [7].

Еще одним направлением переработки ОСВ является их термическая конверсия в твердое топливо. Разработаны технологии получения многокомпонентных топливных брикетов с содержанием осадков до 48%, которые могут использоваться в локальных системах отопления [8]. Такие методы позволяют не только утилизировать отходы, но и снижать нагрузку на полигоны.

В последние годы особое внимание уделяется созданию гибридных сорбентов, сочетающих углеродную матрицу с магнитными наночастицами. Например, композиты на

основе ZnFe_2O_4 и цеолитов демонстрируют улучшенные кинетические характеристики и селективность к ионам меди, а также легко отделяются от воды с помощью магнитного поля [9], что делает переработку осадков сточных вод в функциональные сорбенты перспективным направлением, одновременно решающим проблему утилизации отходов и способствующим развитию ресурсосберегающих технологий в рамках циркулярной экономики [10].

Цель данной работы включала оценку сорбционной способности новых углеродных сорбентов на основе осадка сточных вод к ионам тяжелых металлов в водной среде для последующего использования в технологиях очистки воды.

В качестве объектов исследования выбраны образцы новых углеродных сорбентов, полученные пиролизом осадка сточных вод очистных сооружений г. Воронеж при 400, 500 и 600 °C, соответственно (U400, U500, U600). Размер фракции углей составлял 200-300 мкм. Согласно рентгеноспектральному анализу, по химическому составу исходный образец ОСВ и уголь U600 определяются преимущественно содержанием углерода (55-59%) и кислорода (40-30%), а также примесями кремния (1,1-3,7%), кальция (0,8-3,3%), алюминия (0,6-1,2%), фосфора (0,7-0,9%), железа (0,1-0,7%), серы (0,2%), калия (0,1-0,4%) и магния (0,2-0,4%). Для придания образцам углеродных материалов магнитных свойств синтезировали композит U600-F на его основе путем введения в состав 20 масс. % нанопорошка феррита цинка, аналогично [5]. Сорбционную способность образцов определяли в водном растворе 0,01 н CuSO_4 , варьируя время сорбции в интервале 10-240 мин при соотношении сорбент/раствор=1:100 и $t=20$ °C. Количественное определение ионов меди в растворах проводили фотоколориметрическим методом [4, 10].

С повышением температуры синтеза углеродного сорбента из ОСВ сорбционная емкость (мг/г) полученного материала постепенно возрастает в ряду U400(14,3) < U500 (25,1) < U600 (93,7) < U600-F (148,5), что обусловлено более эффективным формированием пористой структуры углей при более высокой температуре пиролиза, а также существенным вкладом фазы феррита в повышение сорбционной емкости композита U600-F к ионам меди. Равновесие сорбции ионов Cu^{2+} из 0,01 н водного раствора устанавливается через 40-80 мин для образцов U400 и U500, и через 210-240 мин для образцов U600 и U600-F, что указывает на отличия в кинетике и механизме сорбции на углеродных и композитных сорбентах.

Эффективность очистки воды от ионов меди (рис. 1) достигает высоких значений с увеличением массы вводимого сорбента (до 85% для U600) и при использовании композитных сорбентов U600-F (73-99%), содержащих фазу феррита цинка в составе. Благодаря приобретению магнитных свойств, композитный сорбент легко отделяется от раствора действием неодимового магнита и направляется на регенерацию и повторное использование.

Таким образом, использование осадка сточных вод для получения композитных сорбентов позволяет решить двоякую проблему - утилизации промышленного отхода и очистку сточных вод от тяжелых металлов.

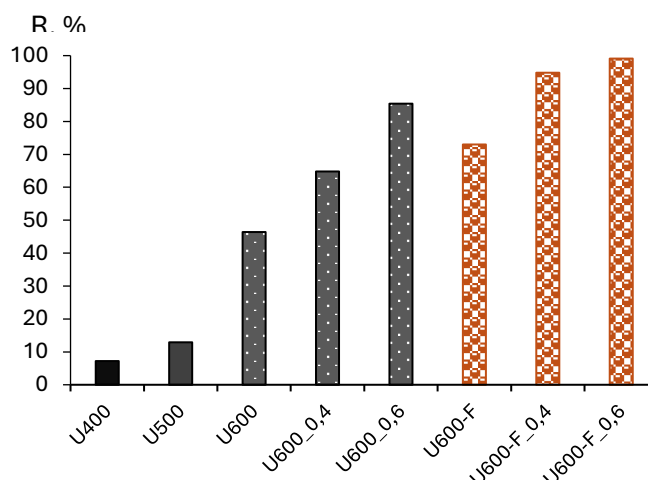


Рисунок 1 - Степень очистки воды от ионов меди в зависимости от температуры синтеза и массы сорбента ($C_{\text{р-ра}}=0,01$ н CuSO_4)

Список литературы

1. Васильева А. В., Харламова М. Д. Современные способы переработки осадков сточных вод и перспективы их использования в России // *Sciences of Europe*. 2016. №9-1 (9). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-sposoby-pererabotki-osadkov-stochnykh-vod-i-perspektivy-ih-ispolzovaniya-v-rossii>.
2. Хрусталева Б. М., Пехота А. Н., Вострова Р. Н. Осадок сточных вод городских очистных сооружений – ресурсная сокровищница для предприятий ЖКХ. – 2023.
3. Masengo J. L., Mulopo J. Synthesis and performance evaluation of adsorbents derived from sewage sludge blended with waste coal for nitrate and methyl red removal // *Scientific Reports*. – 2022. – Т. 12. – № 1. – С. 1670.
4. Новикова Л.А., Томина Е.В., Молчанова О.Н., Жукова Е.А., Дорошенко А.В., Тюпина Е.А. (2024). Сорбция ионов меди из водных растворов высокодисперсными ферритами кобальта и цинка. *Сорбционные и хроматографические процессы*, 24(5), 695-710. – URL: <https://journals.vsu.ru/sorpchrom/article/view/12509>
5. Khodosova, N.; Novikova, L.; Tomina, E.; Belchinskaya, L.; Zhabin, A.; Kurkin, N.; Krupskaya, V.; Zakusina, O.; Koroleva, T.; Tyupina, E.; et al. Magnetic Nanosorbents Based on Bentonite and CoFe_2O_4 Spinel. *Minerals* 2022, 12, 1474. – URL: <https://doi.org/10.3390/min12111474>
6. Зимнухова А. Е., Зимнухов М. А., Белявская О. Ш. Исследование осадка сточных вод очистных сооружений как удобрения для озеленения территорий различного назначения // *Вестник молодежной науки*. 2021. №1 (28). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-osadka-stochnykh-vod-ochistnykh-sooruzheniy-kak-udobreniya-dlya-ozeleneniya-territoriy-razlichnogo-naznacheniya>.

7. Новикова, О. К. Обработка осадков сточных вод : учеб.- метод. пособие / О. К. Новикова ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 96 с.
8. Пехота, А. Н. Многокомпонентное твердое топливо / А. Н. Пехота; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2021. – 243 с.
9. Чайвонг С., Куттатеп Т., Чирасуваннафот Й. и др. (2023) Новые многофункциональные адсорбенты на основе осадка сточных вод для очистки городских сточных вод. *J Appl Sci Eng* 27:3127–3146. – URL: [https://doi.org/10.6180/jase.202409_27\(9\).0010](https://doi.org/10.6180/jase.202409_27(9).0010)
10. Томина Е., Куркин Н., Конкина Д. Наноразмерный катализатор $ZnFe_2O_4$ для очистки сточных вод от красителей окислительной деструкцией. *Экология и промышленность России*. 2022;26(5):17-21. – URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-5-17-21>.

References

1. Vasilyeva A. V., Kharlamova M. D. Modern methods of wastewater sludge processing and prospects for their use in Russia // *SciencesofEurope*. 2016. No. 9-1 (9). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-sposoby-pererabotki-osadkov-stochnyh-vod-i-perspektivy-ih-ispolzovaniya-v-rossii>.
2. Khrustalev B. M., Pekhota A. N., Vostrova R. N. Wastewater sludge from urban treatment facilities is a resource treasury for housing and communal services enterprises. – 2023.
3. Masengo J. L., Mulopo J. Synthesis and performance evaluation of adsorbents derived from sewage sludge blended with waste coal for nitrate and methyl red removal // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – No. 1. – P. 1670.
4. Novikova L. A., Tomina E. V., Molchanova O. N., Zhukova E. A., Doroshenko A. V., Tyupina E. A. (2024). Sorption of copper ions from aqueous solutions by highly dispersed cobalt and zinc ferrites. *Sorption and chromatographic processes*, 24(5), 695-710. – URL: <https://journals.vsu.ru/sorpchrom/article/view/12509>
5. Khodosova, N.; Novikova, L.; Tomina, E.; Belchinskaya, L.; Zhabin, A.; Kurkin, N.; Krupskaya, V.; Zakusina, O.; Koroleva, T.; Tyupina, E.; et al. Magnetic Nanosorbents Based on Bentonite and $CoFe_2O_4$ Spinel. *Minerals* 2022, 12, 1474. – URL: <https://doi.org/10.3390/min12111474>
6. Zimnukhova A. E., Zimnukhov M. A., Belyavskaya O. Sh. Study of wastewater sludge from treatment treatments as a fertilizer for landscaping of territories of various purposes // *Bulletin of Youth Science*. 2021. No. 1 (28). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-osadka-stochnyh-vod-ochistnyh-sooruzheniy-kak-udobreniya-dlya-ozeleneniya-territoriy-razlichnogo-naznacheniya>.

7. Novikova, O. K. Treatment of wastewater sludge: textbook. - method. manual / O. K. Novikova; M-vo transp. and communications of the Republic of Belarus, Belarusian state University of transport - Gomel: BelSUT, 2015. - 96 p.
8. Pekhota, A. N. Multicomponent solid fuel / A. N. Pekhota; M-vo transp. and communications of the Republic of Belarus, Belarusian state. un-t transp. - Gomel: BelGUT, 2021. - 243 p.
9. Chaiwong S., Kuttathep T., Chirasuvannaphot Y. et al. (2023) Novel multifunctional adsorbents based on sewage sludge for municipal wastewater treatment. J Appl Sci Eng 27:3127–3146. – URL: [https://doi.org/10.6180/jase.202409_27\(9\).0010](https://doi.org/10.6180/jase.202409_27(9).0010)
10. Tomina E., Kurkin N., Konkina D. Nanoscale ZnFe₂O₄ Catalyst for Wastewater Treatment from Dyes by Oxidative Degradation. *Ecology and Industry of Russia*. 2022;26(5):17-21. (In Russ.). – URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-5-17-21>.