

МРНТИ 61.29.39

И. Казаринов | ©



Д-р хим. наук

ORCID

<https://orcid.org/0000-0002-4858-9614>



Саратовский государственный университет,



Саратов, Россия



i.kazarinov@internet.ru

<https://doi.org/10.55956/MWGN3252>

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕХАНИЗМЫ АДСОРБЦИИ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ БЕНТОНИТА И УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК

Аннотация. Композиты на основе бентонита и углеродных материалов, полученных из древесных опилок, представляют собой перспективный класс адсорбентов для очистки воды благодаря сочетанию высокой удельной поверхности, развитой пористой структуры и значительной катионообменной емкости. В данной работе рассмотрены современные подходы к получению бентонит-углеродных композитов, включая пиролиз древесных отходов, процессы карбонизации и активации, а также методы введения бентонита в углеродную матрицу. Проанализированы основные физико-химические характеристики материалов, включая пористую структуру, функциональные группы поверхности, фазовый состав и морфологические особенности. Особое внимание уделено влиянию состава композитов на их адсорбционные свойства и механизмам взаимодействия с загрязняющими веществами. Показано, что эффективность удаления тяжелых металлов, органических красителей и фармацевтических соединений обусловлена сочетанием механизмов ионного обмена, электростатического взаимодействия, образования водородных связей, π - π -взаимодействий и физической адсорбции в порах материала. Рассмотрены основные факторы, влияющие на процесс адсорбции, включая pH среды, температуру, концентрацию загрязнителей и структурные характеристики адсорбента. Проведенный анализ показывает, что композиты на основе бентонита и углерода из древесных опилок обладают значительным потенциалом для создания эффективных, доступных и экологически безопасных технологий очистки водных ресурсов.

Ключевые слова: бентонит, древесные опилки, биоуголь, композиты, адсорбция, очистка воды, тяжелые металлы, красители, фармацевтические загрязнители.



Казаринов, И. Физико-химические свойства и механизмы адсорбции композитов на основе бентонита и углерода, полученного из древесных опилок // Механика и технологии / Научный журнал. – 2026. – №2(92). – С.439-447.
<https://doi.org/10.55956/MWGN3252>

Введение. Загрязнение водных ресурсов тяжелыми металлами, органическими красителями, фармацевтическими препаратами и другими загрязнителями является одной из наиболее серьезных экологических проблем современности. Увеличение объемов промышленного производства,

урбанизация и интенсивное сельское хозяйство приводят к постоянному поступлению загрязняющих веществ в поверхностные и подземные воды, что негативно влияет на состояние экосистем и здоровье населения [1,2]. В связи с этим особое внимание уделяется разработке эффективных, экологически безопасных и экономически доступных материалов для очистки воды.

Среди существующих технологий водоочистки адсорбция считается одним из наиболее перспективных методов благодаря высокой эффективности удаления широкого спектра загрязнителей, простоте эксплуатации и возможности регенерации адсорбентов [3]. В последние годы значительный интерес исследователей вызывают композитные материалы, сочетающие преимущества природных минералов и углеродных сорбентов, полученных из возобновляемого сырья [4].

Бентонит является одним из наиболее распространенных природных алюмосиликатных минералов, обладающих высокой катионообменной емкостью, развитой слоистой структурой и хорошей химической стабильностью [5]. Однако его сорбционная способность по отношению к некоторым органическим соединениям ограничена сравнительно небольшой удельной поверхностью и недостаточным количеством активных центров. Для повышения эффективности адсорбции бентонит часто комбинируют с углеродными материалами, обладающими развитой пористой структурой и высокой удельной поверхностью [6].

Особый интерес представляют углеродные материалы, полученные из древесных опилок — доступного и дешевого отхода деревообрабатывающей промышленности. Термическая обработка и активация древесных отходов позволяют получать углеродистые материалы с развитой системой микро- и мезопор, а также большим количеством функциональных групп на поверхности [7]. Использование древесных опилок в качестве сырья соответствует принципам циркулярной экономики и способствует рациональной переработке биомассы, снижая антропогенную нагрузку на окружающую среду [8].

Комбинирование бентонита и углерода, полученного из древесных опилок, позволяет создавать композитные материалы с улучшенными физико-химическими характеристиками. Благодаря синергетическому эффекту таких компонентов достигается увеличение удельной поверхности, оптимизация пористой структуры, повышение механической прочности и адсорбционной активности по отношению к различным загрязняющим веществам [9]. Механизмы адсорбции в данных композитах включают электростатическое взаимодействие, ионный обмен, водородные связи, π - π -взаимодействия, а также заполнение микро- и мезопор адсорбируемыми молекулами [10].

Таким образом, композиты на основе бентонита и углерода, полученного из древесных опилок, представляют собой перспективный класс функциональных адсорбентов для очистки воды от различных загрязнителей. Исследование их физико-химических свойств и механизмов адсорбции имеет важное значение для разработки новых эффективных и устойчивых технологий водоочистки [9,10].

2. Физико-химические свойства композитов на основе бентонита и углерода из древесных опилок

2.1 Получение композитов

Композиты на основе бентонита и углеродных материалов, полученных из древесных опилок, привлекают значительное внимание благодаря доступности сырья, низкой стоимости и высоким адсорбционным

характеристикам. Основным этапом получения углеродной составляющей является термическое разложение древесных опилок в условиях ограниченного доступа кислорода. В процессе пиролиза происходит удаление летучих компонентов и формирование пористой углеродной структуры [1,2].

Для повышения удельной поверхности и объема пор часто применяют физическую или химическую активацию. Физическая активация обычно проводится с использованием водяного пара или диоксида углерода при высоких температурах, тогда как химическая активация осуществляется с помощью KOH, H₃PO₄, ZnCl₂ или других активирующих агентов [3,4]. Химическая активация способствует формированию развитой микропористой структуры и увеличению числа поверхностных функциональных групп.

Бентонит вводят в углеродную матрицу различными способами, включая механическое смешивание, совместную карбонизацию, пропитку углеродного материала суспензией глины и методы осаждения из растворов [5,6]. Выбор метода синтеза оказывает существенное влияние на распределение минеральной и углеродной фаз, а также на последующие адсорбционные свойства композитов.

2.2 Структурные и поверхностные характеристики

Физико-химические свойства композитов определяются сочетанием характеристик бентонита и углеродной матрицы. Одним из важнейших параметров является удельная поверхность, которая определяется методом Брунауэра–Эммета–Теллера (BET). Согласно литературным данным, удельная поверхность таких материалов может варьировать от нескольких десятков до нескольких сотен квадратных метров на грамм в зависимости от условий активации и состава композита [3,7].

Исследования методом инфракрасной спектроскопии (FTIR) показывают наличие гидроксильных, карбоксильных, карбонильных и силикатных групп, которые участвуют в связывании загрязняющих веществ [8]. Рентгенофазовый анализ (XRD) позволяет идентифицировать основные минералогические компоненты бентонита, включая монтмориллонит, кварц и полевые шпаты, а также оценить степень аморфизации углеродной фазы после карбонизации [5,9].

Морфология поверхности, исследуемая методом сканирующей электронной микроскопии (SEM), демонстрирует развитую пористую структуру углеродного материала и относительно равномерное распределение частиц бентонита по поверхности композита. Такая структура способствует повышению доступности активных центров адсорбции и улучшению массопереноса загрязняющих веществ [10].

2.3 Влияние состава на свойства композитов

Бентонит играет важную роль в формировании адсорбционных свойств композитов благодаря высокой катионообменной емкости и наличию слоистой структуры. Минеральная составляющая обеспечивает эффективное связывание ионов тяжелых металлов посредством механизмов ионного обмена и комплексообразования [5,11].

Углеродная фаза, полученная из древесных опилок, отвечает преимущественно за развитие пористой структуры и увеличение площади поверхности. Кроме того, кислородсодержащие функциональные группы углеродного материала способствуют адсорбции органических загрязнителей за счет электростатических взаимодействий и образования водородных связей [2,8].

Совместное использование бентонита и углеродного материала приводит к синергетическому эффекту, при котором объединяются преимущества обеих фаз. В результате композиты демонстрируют более высокую адсорбционную способность по сравнению с исходными компонентами, обеспечивая эффективное удаление как неорганических, так и органических загрязняющих веществ из водных сред [6,12].

Таким образом, бентонит и углеродная фаза выполняют различные, но взаимодополняющие функции в составе композита. Бентонит обеспечивает высокую катионообменную способность и способствует удалению ионов тяжелых металлов, тогда как углеродный материал формирует развитую пористую структуру и отвечает за адсорбцию органических загрязнителей. Совместное присутствие обеих фаз приводит к возникновению синергетического эффекта и повышению эффективности очистки воды. Основные характеристики компонентов композита и их влияние на адсорбционные свойства представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние компонентов композита на его физико-химические свойства и адсорбционные характеристики

Компонент	Основные характеристики	Вклад в адсорбционные свойства	Основные механизмы взаимодействия
Бентонит	Слоистая структура, высокая катионообменная емкость, наличие гидроксильных групп	Повышает извлечение ионов тяжелых металлов, увеличивает количество активных центров	Ионный обмен, комплексообразование, электростатическое притяжение
Углерод из древесных опилок	Развитая пористая структура, высокая удельная поверхность, наличие кислородсодержащих функциональных групп	Обеспечивает адсорбцию органических загрязнителей и увеличивает адсорбционную емкость	Физическая адсорбция, водородные связи, π - π взаимодействия
Бентонит-углеродный композит	Комбинация минеральной и углеродной фаз, развитая микро- и мезопористость	Повышенная эффективность удаления как органических, так и неорганических загрязнителей	Ионный обмен, электростатические взаимодействия, водородные связи, π - π взаимодействия, заполнение пор

3. Механизмы адсорбции и применение композитов для очистки воды

3.1 Основные механизмы адсорбции

Высокая эффективность композитов на основе бентонита и углерода из древесных опилок обусловлена сочетанием нескольких механизмов адсорбции. В отличие от традиционных адсорбентов, данные материалы содержат как минеральные активные центры бентонита, так и развитую пористую углеродную структуру, что обеспечивает удаление широкого спектра загрязнителей из водных растворов [13,14].

Одним из основных механизмов является ионный обмен, характерный для минералов группы смектитов. Благодаря отрицательному заряду кристаллической решетки бентонит способен эффективно связывать катионы тяжелых металлов, включая Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} и Zn^{2+} [15]. Существенную роль также играют электростатические взаимодействия между поверхностью адсорбента и заряженными загрязняющими веществами, эффективность которых зависит от pH среды и поверхностного заряда материала [16].

Для органических соединений важное значение имеют водородные связи между функциональными группами адсорбента и молекулами загрязнителей. Карбоксильные, гидроксильные и фенольные группы углеродной фазы способствуют образованию устойчивых межмолекулярных взаимодействий, повышая степень извлечения красителей и фармацевтических соединений [17].

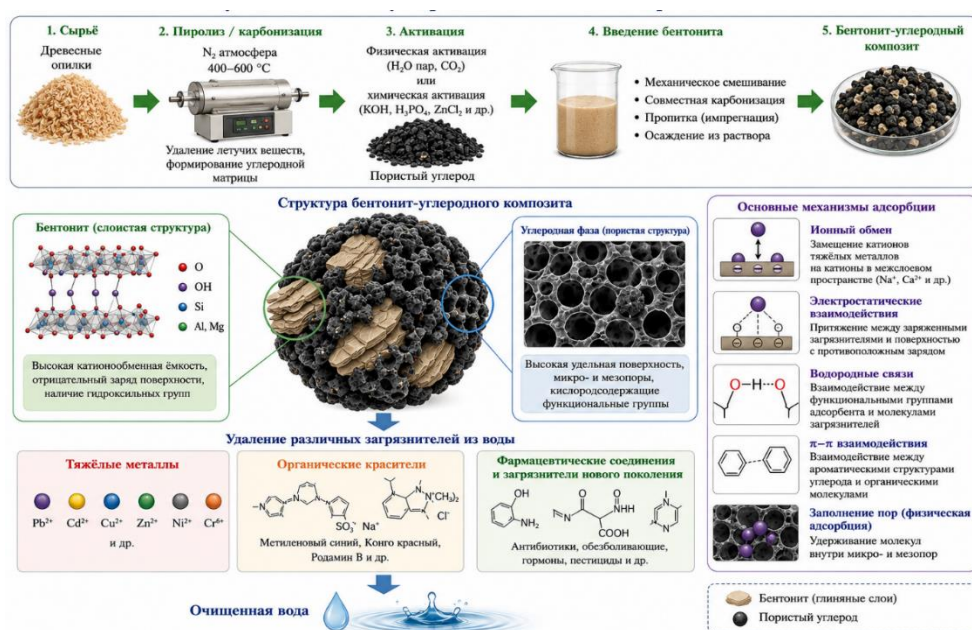


Рис. 1. Получение бентонит-углеродного композита из древесных опилок и механизмы удаления загрязнителей из воды

Дополнительный вклад вносят π - π взаимодействия между ароматическими структурами углеродного материала и органическими молекулами, содержащими бензольные кольца. Такой механизм особенно важен при адсорбции красителей, фенолов и фармацевтических препаратов [18]. Кроме того, развитая система микро- и мезопор обеспечивает физическую адсорбцию за счет заполнения пор и удерживания молекул внутри пористой структуры [19]. Основные этапы получения бентонит-углеродных композитов и механизмы взаимодействия с загрязняющими веществами представлены на рисунке 1.

3.2 Удаление различных загрязнителей

Композиты на основе бентонита и углеродных материалов демонстрируют высокую эффективность при удалении тяжелых металлов из сточных вод. Исследования показывают, что такие материалы способны эффективно извлекать ионы свинца, кадмия, меди, никеля и хрома благодаря

сочетанию ионного обмена, комплексообразования и поверхностной адсорбции [15,20].

Значительное внимание также уделяется удалению органических красителей, которые широко используются в текстильной, пищевой и химической промышленности. Метиленовый синий, конго красный, родамин В и другие красители успешно адсорбируются на поверхности композитов благодаря развитой пористой структуре и наличию кислородсодержащих функциональных групп [21].

В последние годы особый интерес вызывает применение композитов для удаления фармацевтических загрязнителей и других загрязняющих веществ нового поколения (contaminants of emerging concern). К таким соединениям относятся антибиотики, обезболивающие препараты, гормоны и пестициды. Благодаря высокой площади поверхности и разнообразию активных центров композиты способны эффективно удерживать подобные вещества даже при низких концентрациях [22,23].

3.3 Факторы, влияющие на эффективность адсорбции

На процесс адсорбции существенное влияние оказывает кислотность раствора. Изменение рН приводит к изменению заряда поверхности адсорбента и степени ионизации загрязняющих веществ, что непосредственно отражается на эффективности их удаления [24].

Температура также является важным параметром, определяющим кинетику и термодинамику процесса. В большинстве случаев повышение температуры способствует увеличению скорости массопереноса и проникновению загрязняющих веществ в поры адсорбента, однако характер влияния зависит от природы системы и механизма взаимодействия [25].

Концентрация загрязняющих веществ определяет степень заполнения активных центров адсорбента. При увеличении исходной концентрации возрастает движущая сила массопереноса, что может приводить к увеличению адсорбционной емкости до достижения состояния насыщения [26].

Кроме того, эффективность удаления загрязнителей тесно связана с текстурными характеристиками материала. Удельная поверхность, объем пор и распределение пор по размерам оказывают непосредственное влияние на доступность активных центров и скорость диффузии молекул в структуру адсорбента [19,27].

Заключение. Композиты на основе бентонита и углеродных материалов, полученных из древесных опилок, являются перспективными адсорбентами для очистки загрязненных вод благодаря сочетанию развитой пористой структуры углеродной фазы и высокой катионообменной способности бентонита. Использование доступного природного сырья и древесных отходов позволяет получать эффективные материалы с низкой себестоимостью и минимальным воздействием на окружающую среду.

Проведенный анализ показал, что свойства композитов в значительной степени определяются условиями карбонизации и активации, а также соотношением минеральной и углеродной фаз. Развитая поверхность, наличие функциональных групп и оптимальная пористая структура обеспечивают высокую адсорбционную способность по отношению к тяжелым металлам, органическим красителям и фармацевтическим загрязнителям.

Установлено, что механизмы удаления загрязняющих веществ включают ионный обмен, электростатические взаимодействия, образование водородных связей, π - π -взаимодействия и физическую адсорбцию в порах материала. Синергетическое сочетание свойств бентонита и углеродной фазы

способствует повышению эффективности очистки по сравнению с использованием отдельных компонентов.

Несмотря на достигнутые успехи, дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию методов синтеза, повышение регенерационной способности материалов, изучение их долговременной стабильности и расширение возможностей практического применения в системах очистки природных и сточных вод. Перспективным направлением является разработка многофункциональных композитов, способных одновременно удалять различные классы загрязнителей и обеспечивать устойчивую работу в реальных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Ioannidou O., Zabaniotou A. Agricultural residues as precursors for activated carbon production: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2007. – Vol. 11, No. 9. – P. 1966–2005.
2. Ahmed M.J. Preparation of activated carbons from date stones and agricultural wastes: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – Vol. 65. – P. 483–493.
3. Tan X., Liu Y., Zeng G., Wang X., Hu X., Gu Y., Yang Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions // *Chemosphere*. – 2015. – Vol. 125. – P. 70–85.
4. Toor M., Jin B., Dai S., Vimonses V. Activating agents in the preparation of activated carbon from biomass // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 44. – P. 1–25.
5. Murray H.H. Traditional and new applications for kaolin, smectite and palygorskite: A general overview // *Applied Clay Science*. – 2000. – Vol. 17. – P. 207–221.
6. Kudaibergenova R.M., Aitekova R.A., et al. Physicochemical Properties and Adsorption Mechanisms of Bentonite–Sawdust-Derived Carbon Composites // *Water*. – 2026. – Vol. 18, No. 2. – Art. 290.
7. Rout P.R., Bhunia P., Dash R.R. A mechanistic approach to evaluate adsorption performance of activated carbon // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 9. – Art. 105364.
8. Wang J., Guo X. Adsorption kinetic models: Physical meanings and applications // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 390. – Art. 122156.
9. Crini G., Lichtfouse E., Wilson L.D., Morin-Crini N. Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment // *Environmental Chemistry Letters*. – 2019. – Vol. 17. – P. 195–213.
10. Khan T.A., Nazir M., Ali I., Kumar A. Removal of heavy metal ions from wastewater using adsorbents // *Journal of Molecular Liquids*. – 2022. – Vol. 348. – Art. 118148.
11. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorption of heavy metals on clay minerals: A review // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2008. – Vol. 140. – P. 114–131.
12. Gupta V.K., Suhas. Application of low-cost adsorbents for dye removal—A review // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – Vol. 90. – P. 2313–2342.
13. Foo K.Y., Hameed B.H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems // *Chemical Engineering Journal*. – 2010. – Vol. 156. – P. 2–10.
14. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment // *Environmental Chemistry Letters*. – 2019. – Vol. 17. – P. 145–155.
15. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorption of heavy metals on clay minerals: A review // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2008. – Vol. 140. – P. 114–131.
16. Babel S., Kurniawan T.A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water // *Journal of Hazardous Materials*. – 2003. – Vol. 97. – P. 219–243.

17. Wang J., Guo X. Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications and solving methods // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 390. – Art. 122156.
18. Ahmad M., Rajapaksha A.U., Lim J.E., et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water // *Chemosphere*. – 2014. – Vol. 99. – P. 19–33.
19. Tan X., Liu Y., Zeng G., Wang X., Hu X., Gu Y., Yang Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions // *Chemosphere*. – 2015. – Vol. 125. – P. 70–85.
20. 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.
21. Gupta V.K., Suhas. Application of low-cost adsorbents for dye removal—A review // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – Vol. 90. – P. 2313–2342.
22. Ahmed M.B., Zhou J.L., Ngo H.H., Guo W. Adsorptive removal of antibiotics from water and wastewater // *Science of the Total Environment*. – 2015. – Vol. 532. – P. 112–126.
23. Crini G., Lichtfouse E., Wilson L.D., Morin-Crini N. Emerging contaminants in wastewater and adsorption technologies // *Environmental Chemistry Letters*. – 2019. – Vol. 17. – P. 195–213.
24. Tran H.N., You S.J., Chao H.P. Fast and efficient adsorption of contaminants by biochar // *Environmental Technology & Innovation*. – 2017. – Vol. 8. – P. 322–349.
25. Ayawei N., Ebelegi A.N., Wankasi D. Modelling and interpretation of adsorption isotherms // *Journal of Chemistry*. – 2017. – Vol. 2017. – Art. 3039817.
26. Ho Y.S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // *Process Biochemistry*. – 1999. – Vol. 34. – P. 451–465.
27. Rout P.R., Bhunia P., Dash R.R. Adsorption performance of activated carbon and porous adsorbents // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 9. – Art. 105364.

Материал поступил в редакцию 23.06.26, принят 29.06.26.

И. Казаринов

Саратов мемлекеттік университеті, Саратов, Ресей

**АҒАШ ҮГІНДІСІНЕН АЛЫНҒАН КӨМІРТЕК ЖӘНЕ БЕНТОНИТ НЕГІЗІНДЕГІ
КОМПОЗИТТЕРДІҢ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ МЕН
АДСОРБЦИЯ МЕХАНИЗМДЕРІ**

Аңдатпа. Ағаш үгінділерінен алынған көміртекті материалдар мен бентонит негізіндегі композиттер жоғары меншікті бетінің ауданының, дамыған кеуекті құрылымының және жоғары катионалмасу сыйымдылығының үйлесуі арқасында суды тазартуға арналған перспективалы адсорбенттер класына жатады. Бұл жұмыста ағаш қалдықтарының пиролизі, карбонизация және активтендіру процестері, сондай-ақ көміртекті матрицаға бентонитті енгізу әдістерін қамтитын бентонит–көміртекті композиттерін алудың заманауи тәсілдері қарастырылған. Материалдардың негізгі физика-химиялық сипаттамалары, соның ішінде кеуекті құрылымы, беткі функционалдық топтары, фазалық құрамы және морфологиялық ерекшеліктері талданды. Композиттердің құрамы мен олардың адсорбциялық қасиеттері арасындағы байланысқа және ластаушы заттармен өзара әрекеттесу механизмдеріне ерекше назар аударылды. Ауыр металдарды, органикалық бояғыштарды және фармацевтикалық қосылыстарды тиімді жою материал кеуектеріндегі физикалық адсорбциямен қатар ионалмасу, электростатикалық әрекеттесу, сүтектік байланыстардың түзілуі және π–π өзара әрекеттесулерінің үйлесуімен қамтамасыз етілетіні көрсетілді. Адсорбция процесіне әсер ететін негізгі факторлар, соның ішінде

ортаның рН мәні, температура, ластаушы заттардың концентрациясы және адсорбенттің құрылымдық сипаттамалары қарастырылды. Жүргізілген талдау ағаш үгінділерінен алынған көміртек пен бентонит негізіндегі композиттердің су ресурстарын тазартудың тиімді, қолжетімді және экологиялық қауіпсіз технологияларын жасау үшін зор әлеуетке ие екенін көрсетті.

Тірек сөздер: бентонит, ағаш үгінділері, биокөмір, композиттер, адсорбция, суды тазарту, ауыр металдар, бояғыштар, фармацевтикалық ластағыштар.

I. Kazarinov

Saratov State University, Saratov, Russia

PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND ADSORPTION MECHANISMS OF BENTONITE- AND WOOD SAWDUST-DERIVED CARBON-BASED COMPOSITES

Abstract. Bentonite- and wood sawdust-derived carbon-based composites represent a promising class of adsorbents for water purification due to the combination of high specific surface area, well-developed porous structure, and high cation exchange capacity. This paper reviews current approaches to the preparation of bentonite-carbon composites, including the pyrolysis of wood waste, carbonization and activation processes, as well as methods for incorporating bentonite into the carbon matrix. The main physicochemical characteristics of these materials, including porous structure, surface functional groups, phase composition, and morphological features, are analyzed. Particular attention is paid to the influence of composite composition on adsorption performance and the mechanisms of interaction with various contaminants. It is shown that the efficient removal of heavy metals, organic dyes, and pharmaceutical compounds is achieved through the combined effects of ion exchange, electrostatic interactions, hydrogen bonding, π - π interactions, and physical adsorption within the pores of the material. The principal factors affecting the adsorption process, including solution pH, temperature, pollutant concentration, and structural characteristics of the adsorbent, are also discussed. The analysis demonstrates that bentonite- and wood sawdust-derived carbon composites possess considerable potential for the development of efficient, cost-effective, and environmentally friendly technologies for water purification.

Keywords: bentonite, wood sawdust, biochar, composites, adsorption, water purification, heavy metals, dyes, pharmaceutical contaminants.