

Синтез и исследование SiO_2/C в качестве адсорбента, полученного из рисовой шелухи, для очистки воды

М.А. Бисенова^{1,2,4*}, Н.В. Идрисов^{1,2}, А.С. Серік^{1,2}, М.А. Елеуов^{1,3}, К. Аскарулы^{1,3},
К.А. Кутербеков⁵, К.Ж. Бекмырза⁵, А.М. Кабышев⁵, М.М. Кубенова⁵, Г.Д. Кабдрахимова⁵

¹Satbayev University, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан

²Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова, 1, Алматы, Казахстан

³Bes Saiman Group, ул. Жарокова, 171а, Алматы, Казахстан

⁴Физико-технический институт, ул. Ибрагимова, 11, Алматы, Казахстан

⁵Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Сатбаева, 2, Астана, Казахстан

АННОТАЦИЯ

В настоящее время существует острая необходимость в очистке сточных вод для их повторного использования. В этом контексте наибольший интерес вызывают адсорбенты, которые не только экономически выгодны, но и экологически безопасны, изготовлены из биоразлагаемых материалов и могут быть использованы повторно. В данной работе предложен экологически безопасный метод переработки рисовой шелухи в пористый оксид кремния для эффективного удаления органических загрязнителей. Морфология синтезированных образцов SiO_2 и SiO_2/C была исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), а кристаллическая структура – методом рентгеновской дифракции (XRD). Результаты показали, что адсорбент SiO_2/C , полученный при 650 °С и массовой загрузке 200 мг/л, демонстрирует высокую эффективность по отношению к удалению органического красителя метиленового синего (МС), достигая процента удаления в 94,56% после 90 минут адсорбции. Максимальная адсорбционная емкость (q_s) составила 49,27 мг/г при концентрации метиленового синего 5 мг/л. Кроме того, было исследовано влияние pH раствора на эффективность адсорбции МС и установлено, что оптимальный диапазон pH для адсорбции находится в пределах от 7 до 9. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования данного композита в качестве потенциального и экономически доступного адсорбента для очистки воды.

Ключевые слова: SiO_2/C , адсорбция органических красителей, метиленовый синий, очистка воды

1. Введение

Вода является важнейшим элементом для жизнедеятельности и ее растущий дефицит становится одной из наиболее значимых глобальных проблем. Загрязнение водных ресурсов обусловлено ростом промышленной активности, увеличением численности населения и неконтролируемым использованием различных химикатов, таких как пестициды, удобрения, фунгициды, дезинфицирующие средства, моющие средства и инсектициды [1]. Сельское хозяйство, бытовая деятельность и текстильная промышленность вносят значительный вклад в загрязнение окружающей среды по всему миру. Сброс сточных вод текстильной промышленности, содержащих различные загрязняющие вещества, включая красители, представляет серьезную экологическую проблему [2].

На сегодняшний день известно около 40 000 красителей и пигментов, состоящих из более чем 7000 различных химических структур [3]. Метиленовый синий (МС) является одним из наиболее распространенных водных загрязнителей, оказывающих серьезное воздействие на здоровье человека и вызывающих расстройства пищеварения, респираторный дистресс, повышенную чувствительность кожи и даже слепоту [4]. Помимо этого, насыщенный синий цвет метиленового синего снижает проникновение света в водную среду, что отрицательно сказывается на водных организмах и нарушает экосистемный баланс. Это приводит к серьезным экологическим проблемам и ставит под угрозу существование различных форм жизни [5]. Следовательно, крайне важно удалять этот краситель из воды для предотвращения его негативного воздействия на окружающую среду, осо-

*Ответственный автор
E-mail: m-bisenova@list.ru

бенно на водные биосистемы. Устранение таких загрязнителей имеет исключительное значение в условиях дефицита воды, с которым сталкиваются многие страны [6].

Для очистки воды от таких вредных веществ были исследованы и разработаны различные методы, включая фотокаталитическое разложение, экстракцию растворителем, коагуляцию, биоразложение, окисление, зонирование и адсорбцию [7]. Среди множества методов, применяемых для удаления красителей, адсорбция является общепризнанным способом равновесного разделения. Этот метод имеет несколько значительных преимуществ по сравнению с традиционными способами очистки: 1) адсорбция позволяет эффективно удалять как органические, так и неорганические загрязнители; 2) она широко доступна; 3) метод отличается простой и легкой эксплуатацией; 4) не приводит к образованию осадка; 5) адсорбенты могут быть легко регенерированы и использованы повторно [8]. Кроме того, процесс адсорбции экономичен, так как требует низких капитальных затрат благодаря доступности недорогих материалов для использования в качестве адсорбентов [9]. Общий механизм адсорбции включает три этапа: адсорбция молекул адсорбата на активных порах адсорбента, внутренний массоперенос от внешней поверхности к внутренним порам адсорбента и перенос загрязняющего вещества из объема раствора на внешнюю поверхность адсорбента [10]. Подходящие адсорбенты для удаления загрязнений должны обладать высокой адсорбционной способностью, большой площадью поверхности, коротким временем адсорбции и способностью удалять широкий спектр загрязняющих веществ [11].

Различные типы материалов, такие как активированный уголь [12], графен [11], оксид графена [12], углеродные нанотрубки [13], кремнеземные мезопористые материалы [14], глина [15], использовались в качестве адсорбентов. Среди неорганических оксидов SiO_2 является привлекательным выбором для создания органо-неорганического композита в качестве адсорбента для очистки воды. Кремнезем представляет собой оксид металла IV группы с превосходной стойкостью, электроизоляцией и термической стабильностью [15]. SiO_2 обычно встречается в природе в виде песчаника, кварцита или кварца, а также может быть получен из распространенного и недорогого природного материала – рисовой шелухи [16]. В данной статье предлагается расширить подход применения класса универсальных материалов за счет недорогого и эффективного компо-

зита SiO_2/C [17], который может быть использован для адсорбции органических загрязнителей. В статье представлены результаты экспериментальной оценки адсорбционных свойств полученных материалов, включая их способность эффективно адсорбировать органические загрязнители [18].

2. Экспериментальная часть

2.1 Материалы

Рисовая шелуха (Кызылординская область, Казахстан), сахароза (тростниковый сахар, Восточно-Казахстанская область), аргон газ (Ar с чистотой 99,9 %, ТОО Ихсан Техногаз), метиленовый синий (с содержанием красителя не менее 85%, Sigma-Aldrich, Германия). Во всех экспериментах в качестве растворителя применялась дистиллированная вода.

2.2 Синтез SiO_2

Процесс очистки рисовой шелухи (РШ) включал несколько этапов, в том числе первоначальное отделение крупных частиц из РШ. Затем для удаления пыли и грязи РШ промывали несколько раз водой. Очищенную РШ сушили при температуре 120 °С в течение 12 часов. Высушенную РШ взвешивали порциями по 50 г и сжигали в муфельной печи при температурах 550 °С, 650 °С и 750 °С в течение 1 ч, продолжая нагревать еще 4 ч для полного сгорания органических веществ. После этого полученный образец SiO_2 измельчали в агатовой ступке.

2.3 Синтез SiO_2/C

Для синтеза композитного материала SiO_2/C использовали сахар (кристаллы сахарозы) в качестве источника углерода и синтезированные образцы SiO_2 при температурах 550 °С, 650 °С и 750 °С, которые были обозначены как SiO_2/C -550 °С, SiO_2/C -650 °С и SiO_2/C -750 °С, соответственно. 0,5 г сахарозы добавляли в 50 мл дистиллированной воды и нагревали на магнитной мешалке с постоянным перемешиванием. После полного растворения сахарозы добавляли 5 г синтезированного образца SiO_2 . Полученную смесь перемешивали на магнитной мешалке при температуре 100 °С и частоте вращения 500 об/мин. После полного испарения воды массу выдерживали в сушильном шкафу при температуре 80 °С в течение 10 ч. Затем покрытый сахарозой образец SiO_2 измельчали в агатовой ступке. Полученный

порошок подвергали процессу карбонизации, который проходил в два этапа. На первом этапе проводили термостабилизацию при температуре 200 °С в течение 60 мин. На втором этапе осуществляли кальцинацию при температуре 800 °С в инертной атмосфере аргона в течение 180 мин. В результате получали черный композитный материал SiO₂/C, в который (5 г SiO₂/C) для активации добавляли 10 мл серной кислоты (H₂SO₄) и выдерживали при комнатной температуре в течение 30 мин. Образец сушили в сушильном шкафу при температуре 120 °С. Для всех образцов (SiO₂/C-550 °С, SiO₂/C-650 °С и SiO₂/C-750 °С) применяли одинаковые режимы карбонизации.

2.4. Характеристика полученных образцов

Для анализа структурной морфологии и элементного состава указанных материалов использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) (Zeiss Crossbeam 540, Германия), оснащенный детектором обратно рассеянных электронов и соединенный с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (EDX), работающий при напряжениях 5-20 кВ. Для точечного анализа и картирования элементного состава материалов использовали энергодисперсионный рентгеновский спектрометр (EDS) (INCA X-Sight, Oxford Instruments). Спектры комбинационного рассеяния полученных образцов были сняты на рамановском спектрометре (NT-MDT Spectrum Instruments), где источником света является синий лазер с длиной волны 473 нм.

2.5 Адсорбция метиленового синего

Для исследования адсорбционного поведения образца SiO₂/C в качестве модельного красителя-индикатора был использован МС. В 50 мл водного раствора МС с различными концентрациями (5, 10 и 15 мг/л) добавляли 10 мг SiO₂/C и постоянно перемешивали на орбитальной мешалке. Для наблюдения изменения концентрации МС каждые 15 мин в течение 90 мин отбирали пробы объемом 1 мл, которые затем фильтровали через фильтр с поровым размером 0,22 мкм и разбавляли дистиллированной водой в соотношении 1:2. Измерения адсорбции проводились с использованием UV-VIS спектрофотометра i5 (Nanon, Китай) при длине волны 664 нм. Показатели процента удаления (% R) и адсорбционной емкости (q_t) МС были рассчитаны с помощью уравнений (1) и (2), соответственно [19].

$$\%R = \left(\frac{c_0 - c_t}{c_0} \right) \times 100, \quad (1)$$

$$q_t = \left(\frac{c_0 - c_t}{m} \right) \times V, \quad (2)$$

где: c₀ – начальная концентрация МС (мг/л); c_t – концентрация МС после адсорбции (мг/л); V – объем раствора МС (л); m – масса SiO₂/C (мг).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Характеристика образцов SiO₂ и SiO₂/C

Полученные образцы были изучены с использованием сканирующей электронной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии (СЭМ и ПЭМ) (рис. 1). СЭМ-изображения чистого SiO₂ после обработки 2М гидроксидом натрия показывают наличие мелких неоднородных агломератов размером от 200 до 500 микрометров, тогда как при увеличении можно заметить более мелкие наноразмерные частицы с относительно однородной морфологией (рис. 1(а)). После отжига SiO₂ с сахарозой при 750 °С частицы превращаются в порошок более округлой формы с различным диаметром (рис. 1(б, в)). Представленные ПЭМ-изображения (рис. 1(г-е)) композита SiO₂ в графитовой оболочке свидетельствуют о наличии углеродной оболочки вокруг темных точек, представляющих собой наночастицы SiO₂. Хотя частицы внутри оболочки распределены неравномерно, они прочно связаны в структуре углеродной матрицы, что, вероятно, позволит снизить объемный эффект наночастиц SiO₂.

Полученные образцы также были исследованы с использованием рентгеноструктурного анализа, результаты которого представлены на рис. 2. Порошок диоксида кремния до модификации сахарозой является аморфным, что подтверждается рентгенограммой. После прокаливании рисовой шелухи при 600 °С и химической обработки был получен чистый SiO₂. Широкий пик между 18° и 30° с центром при 24° характеризует аморфное состояние SiO₂. Дифракционный пик около 26°, принадлежащий графитовому углероду, не наблюдается из-за широкого пика аморфного SiO₂. Графитовый углерод является результатом пиролиза. Рентгенограмма (XRD) композита SiO₂/C показывает явный сдвиг пика аморфного SiO₂ с 24° до 22°. На рентгенограмме композита SiO₂/C отсутствуют пики Si и SiC, что свидетельствует

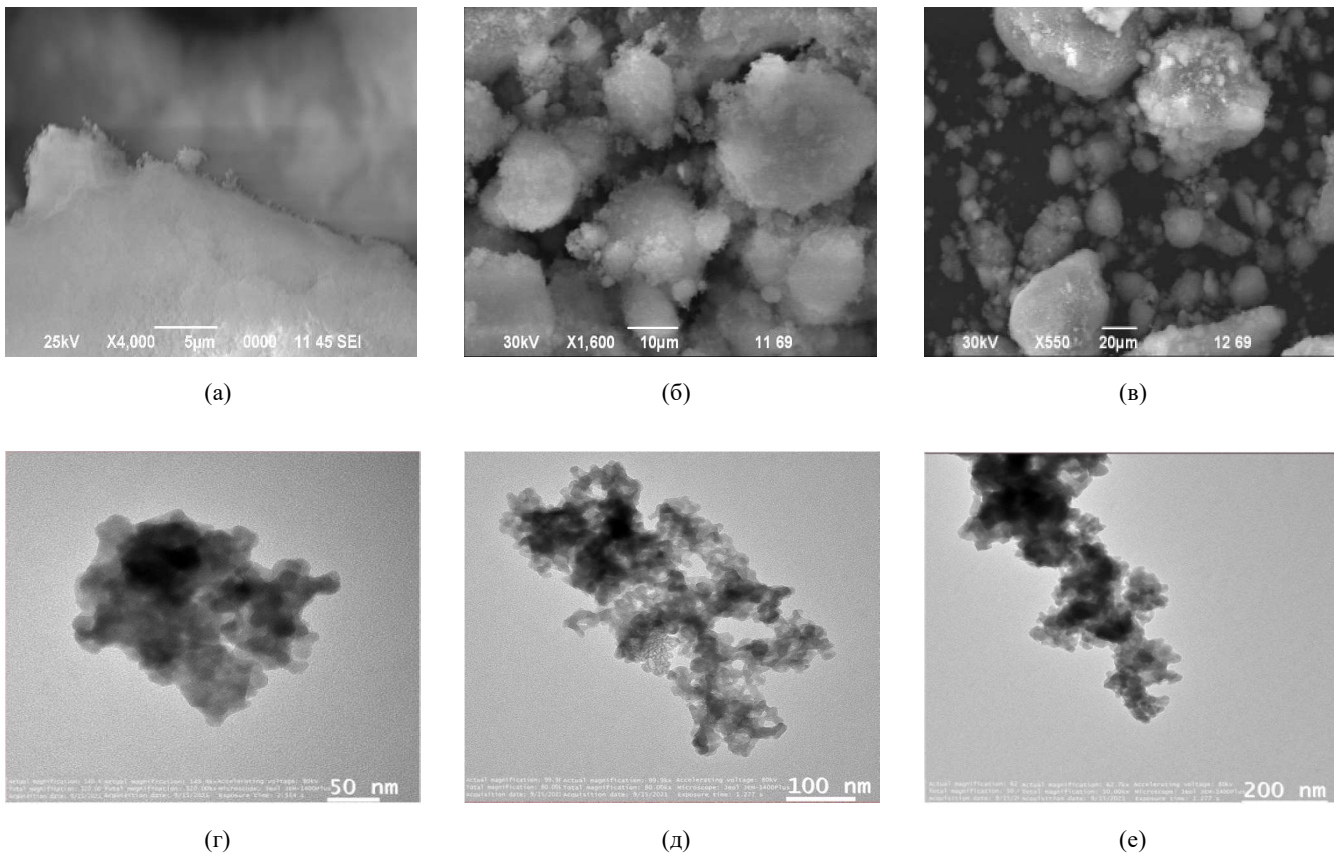


Рис. 1. СЭМ-изображения (а, б, в) и ПЭМ-изображения (г, д, е) при различных увеличениях SiO_2/C .

об успешной модификации без образования этих фаз.

Проведен спектроскопический анализ образцов SiO_2 и SiO_2/C методом комбинационного рассеяния света (рис. 3). На спектрах комбинационного рассеяния SiO_2 наблюдаются несколько пиков в диапазоне частот от 200 до 1000 cm^{-1} , которые нормированы на амплитуды полос при 300, 380 и 800 cm^{-1} , соответствующие валентным колебаниям Si-O-Si. При анализе образца, как пока-

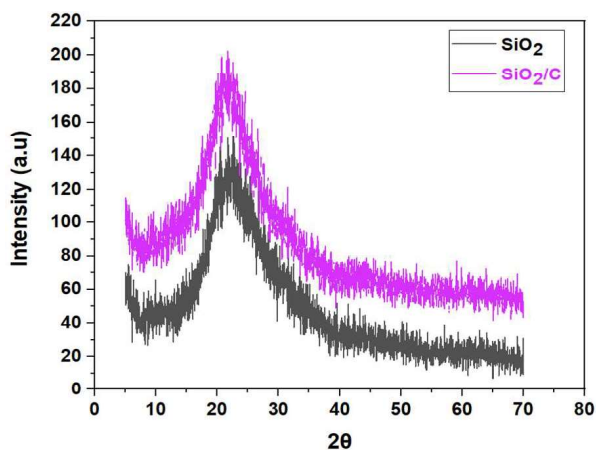


Рис. 2. Рентгеноструктурный анализ SiO_2 и SiO_2/C .

зано на рис. 3 (б), на спектрах комбинационного рассеяния SiO_2/C были обнаружены характерные пики D и G при 1340 cm^{-1} и 1590 cm^{-1} , соответствующие типичному листу графита с дефектами. Полученные данные сопоставимы с данными, приведенными в статье [20]. Пик G, который связан с sp^2 -гибридизацией углерода, указывает на формирование плоских ароматических областей. Пик D указывает на наличие дефектов и дислокаций в структуре материала, которые увеличиваются при уменьшении размера кристаллитов графита. Для количественной оценки степени графитизации материала SiO_2/C использовали отношение интенсивностей пиков D и G, известное как интенсивность отношения (ID/IG). Значение этого отношения для образца SiO_2/C составило приблизительно $\sim 0,84$.

3.2. Характеристики адсорбции метиленового синего полученными образцами

Так как МС представляет собой катионный краситель, содержащийся в водном растворе в виде заряженных ионов, то на эффективность его удаления, в первую очередь, влияют поверхностные заряды адсорбента, которые, в свою очередь,

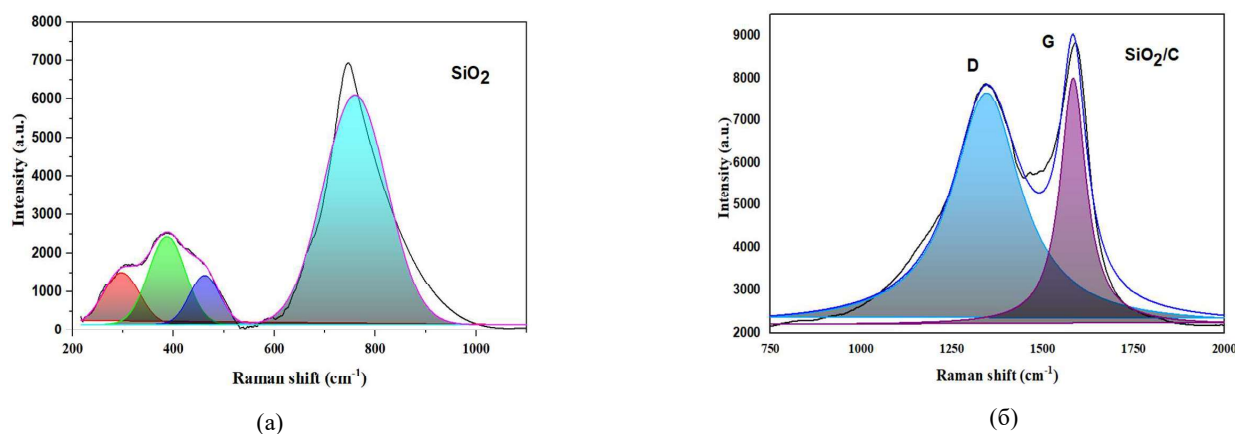


Рис. 3. Спектроскопический анализ образцов SiO₂ (а) и SiO₂/C (б).

зависят от pH исходного раствора. Для изучения роли pH исходного раствора были проведены исследования адсорбции при pH в диапазоне от 1 до 9. Полученные данные указывают на то, что с увеличением значения pH возрастает эффективность удаления и максимальные значения наблюдаются при pH 7 и 9. Подобная тенденция просматривается и для многих других адсорбентов [21], однако примечательно, что в случае с SiO₂/C удаление высокое как при pH 9, так и при pH 7, что нехарактерно для других аналогичных материалов [22]. Так, например, при pH 7 эффективность удаления

МС с использованием SiO₂/C-650 °C составила 94,56 %, тогда как при pH 1, 3, 5, и 9 были получены следующие значения: 38,46, 33,08, 34,91 и 93,32 %, соответственно (рис. 4 (а)). Повышение эффективности с увеличением pH связано с тем, что происходит уменьшение электростатического отталкивания и конкурентных взаимодействий с H⁺. Предположительно, при pH 7 и 9 поверхность материала становится депротонированной, что приводит к возникновению сильной связи между отрицательно заряженными местами адсорбции и катионным МС [23]. Все даль-

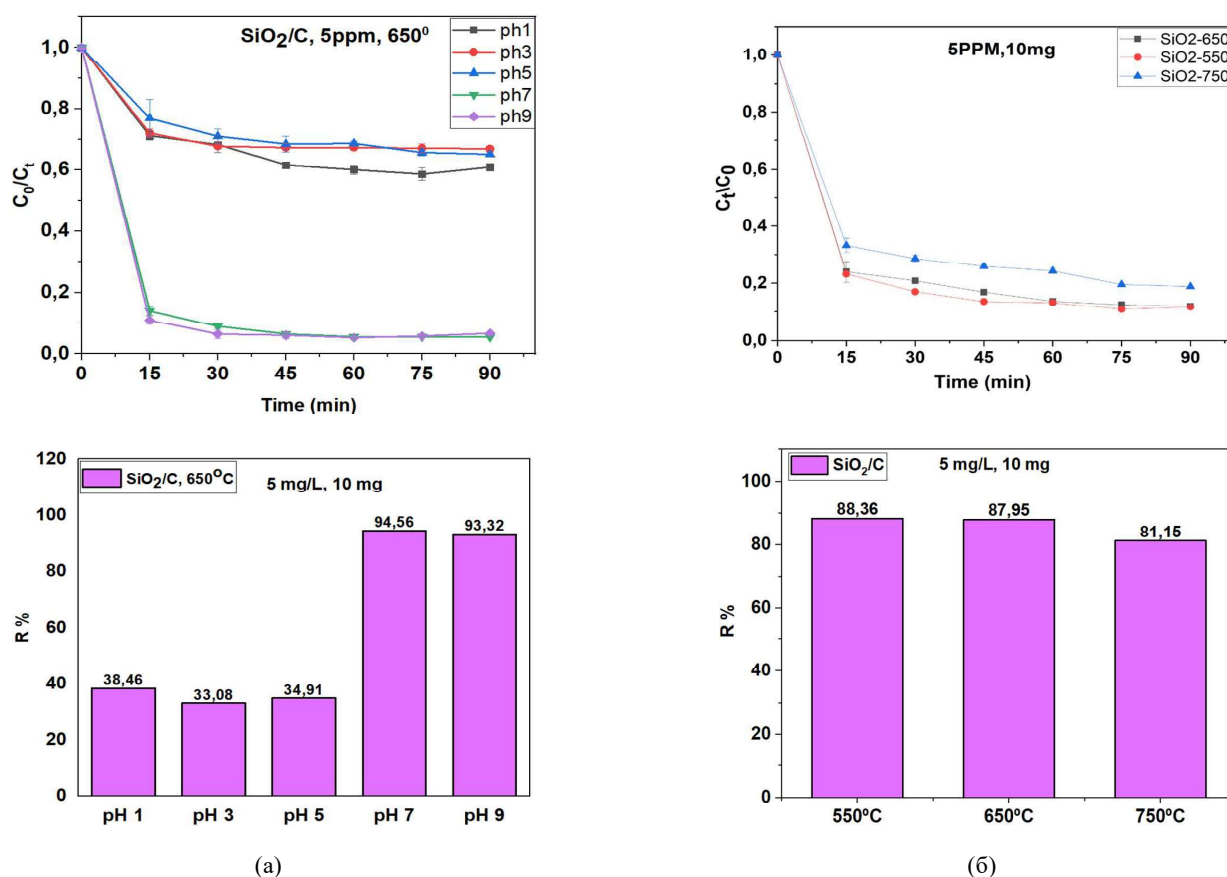


Рис. 4. Влияние pH среды на: а) концентрацию МС; б) удаление (%) красителя МС конц. (5 мг/л), дозировку адсорбента (10 мг).

Таблица 1. Приведенные в литературе показатели эффективности SiO_2/C и различных адсорбентов для адсорбционного удаления органических загрязнителей

Год	Органический загрязнитель	Адсорбент	Исходная концентрация, мг/л	Q, мг/г	Ссылка
2019	Метиленовый синий	$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	20	6,36	[24]
2022	Метиленовый синий	P@SiO_2	100	37,9	[27]
2024	Метиленовый синий и основной фиолетовый	PU/AC/CNW- нанокompозитная пленка	10	34,35	[25]
2021	Диклофенак натрия	Пленки с активированным углем	50	29,9	[19]
2024	Дибутилфталат	Fe/AC	150	18,25	[26]
2024	Метиленовый синий	SiO_2/C	5	49,27	Данная работа

нейшие эксперименты проводили при pH 7. Для сравнения также проведены контрольные эксперименты, в которых в качестве адсорбентов использовали композиты, полученные при различных температурах (рис. 4 (б)). Примечательно, что максимальная адсорбционная способность наблюдается для образца SiO_2/C -550 °C и составляет более 88,36 % при концентрации МС 5 мг/л и загрузке образца 10 мг. Для всех трех образцов характерно резкое снижение концентрации МС за первые 15 мин, что может быть связано с наличием большого количества адсорбционных центров на поверхности SiO_2/C , а после их насыщения наблюдается заметное снижение эффективности.

Также был проведен сравнительный анализ характеристик аналогичных углеродных адсорбентов для оценки эффективности синтезированного SiO_2/C в удалении органических красителей (таблица 1). По сравнению с другими исследованиями, приведенными в таблице 1, полученный из рисовой шелухи композит SiO_2/C демонстрирует лучшие показатели адсорбционной способности. В частности, адсорбенты $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ [24], PU/AC/CNW-нанокompозитная пленка [25], Fe/AC [26] имеют адсорбционную емкость по отношению к удалению МС, равную 6,36 мг/г, 34,35 мг/г, 18,25 мг/г, соответственно, тогда как адсорбционная способность полученного AC составляет 49,27 мг/г. Кроме того, массовая загрузка этих образцов достигала 3330 мг/л, 4000 мг/л и 6000 мг/л, соответственно, в то время как в проведенном исследовании массовая загрузка составляла 200 мг/л. Такое малое количество загрузки по сравнению с другими адсорбентами делает полученный образец более экономичным без потери эффективности.

4. Заключение

В данной работе проведено исследование композитного материала SiO_2/C в качестве эффективного адсорбента для удаления красителя метиленового синего из водного раствора. Для характеристики полученного наноматериала были использованы методы СЭМ, ПЭМ, XRD и спектроскопия Raman. По результатам адсорбционных испытаний установлено, что максимальная эффективность удаления была достигнута при pH=7, количестве адсорбента 10 мг и времени контакта 90 минут. Адсорбент SiO_2/C эффективно удаляет краситель МС, обеспечивая 94,56 % извлечения, при этом максимальная адсорбционная емкость составила 49,27 мг/г. Сравнительное исследование показало, что композит SiO_2/C обладает перспективными свойствами и высокой эффективностью адсорбции по сравнению с другими адсорбирующими материалами. Таким образом, адсорбент SiO_2/C является отличным кандидатом в качестве экологически чистого адсорбирующего материала для очистки воды от различных органических загрязнителей, демонстрируя значительную эффективность в будущих исследованиях.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программы целевого финансирования № BR21882359.

Список литературы

- [1]. Gupta K., Khatri P.O. Fast and efficient adsorptive removal of organic dyes and active pharmaceutical

- ingredient by microporous carbon: Effect of molecular size and charge // *Chemical Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 378. – P.122218.
- [2]. Wang Y., Zhou Y., Jiang G., Chen P., and Chen Z. One-step fabrication of carbonaceous adsorbent from corncob for enhancing adsorption capability of methylene blue removal // *Sci Rep.* – 2020. – Vol. 10. – no. 1, Art. no. 1.
- [3]. Sarkar N., Sahoo G., and K. Swain S. Reduced graphene oxide decorated superporous polyacrylamide based interpenetrating network hydrogel as dye adsorbent // *Materials Chemistry and Physics*. – 2020. – Vol. 250. – P.123022.
- [4]. Chinoune K. et al. Adsorption behavior of MB dye on alginate-sepiolite biocomposite beads: Adsorption, kinetics, and modeling // *Inorganic Chemistry Communications*. – 2024. – Vol. 165. – P.112558.
- [5]. Speight J.G. 5 - Sources of water pollution // *Natural Water Remediation*. – 2020. – P.165–198.
- [6]. Abouzeid R.E., Khiari R., El-Wakil N., Dufresne A. Current State and New Trends in the Use of Cellulose Nanomaterials for Wastewater Treatment // *Biomacromolecules*. – 2019. – Vol. 20. – P.573-597.
- [7]. Yaqoob A.A., Parveen T., Umar K., Mohamad Ibrahim M. N. Role of Nanomaterials in the Treatment of Wastewater: A Review // *Water*. – 2020. – Vol. 12. – Art. no. 2.
- [8]. Liu X., et al. Enhanced dyes adsorption from wastewater via Fe₃O₄ nanoparticles functionalized activated carbon // *Journal of Hazardous Materials*. – 2019. – Vol. 373. – P.397-407.
- [9]. Kazeem T.S., et al. Aluminium-modified activated carbon as efficient adsorbent for cleaning of cationic dye in wastewater // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 205. – P.303-312.
- [10]. Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S., Ang H.M. Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2014. – Vol. 209. – P.172-184.
- [11]. Kyzas G.Z., Deliyanni E.A., Bikiaris D.N. Graphene composites as dye adsorbents: Review // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2018. – Vol. 129. – P.75-88.
- [12]. Vahdati-Khajeh S., Zirak M., Tejrag R. Z., Fathi A., Lamei K. Biocompatible magnetic N-rich activated carbon from egg white biomass and sucrose: Preparation, characterization, and investigation of dye adsorption capacity from aqueous solution // *Surfaces and Interfaces*. – 2019. – Vol. 15. – P.157-165.
- [13]. Banerjee S., Dubey S., Gautam R.K., Chattopadhyaya M.C., Sharma Y.C. Adsorption characteristics of alumina nanoparticles for the removal of hazardous dye, Orange G from aqueous solutions // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2019. – Vol. 12, no. 8. – P.5339-5354.
- [14]. Al-Shehri B.M., Khder R.S., Ashour S.S., Hamdy M.S. A review: the utilization of mesoporous materials in wastewater treatment // *Mater. Res. Express*. – 2019. – Vol. 6(12). – P.122002.
- [15]. Liu F., et al. Improved hydrophobicity, antibacterial and mechanical properties of polyvinyl alcohol/quaternary chitosan composite films for antibacterial packaging // *Carbohydrate Polymers*. – 2023. – Vol. 312. – P.120755.
- [16]. Rahmadhani D., Zulkifli, Yuliani K. D., E. Frida, Taufiq A. Hydrophobic and antibacterial properties of textiles using nanocomposite chitosan and SiO₂ from rice husk ash as-coating // *South African Journal of Chemical Engineering*. – 2024. – Vol. 48. – P.366-374.
- [17]. Satayeva A.R. et al. Investigation of rice husk derived activated carbon for removal of nitrate contamination from water // *Science of The Total Environment* – 2018. – Vol. 630. – P.1237–1245.
- [18]. Seitzhanova M.A., Mansurov Z.A., Yeleuov M., Roviello V. and Capua R.D. The Characteristics of Graphene Obtained from Rice Husk and Graphite // *Eurasian Chemico-Technological Journal*. – 2019. – Vol. 21(2). – Art. no. 2.
- [19]. Shamsudin M.S., Azha S.F., Sellaoui L., Badawi M., Bonilla-Petriciolet A., Ismail S. Performance and interactions of diclofenac adsorption using Alginate/Carbon-based Films: Experimental investigation and statistical physics modelling // *Chem. Eng. J.* – 2022. – Vol.428. – P.131929.
- [20]. Bîru E.I., Iovu H., Bîru E.I., Iovu H. Graphene Nanocomposites Studied by Raman Spectroscopy // *in Raman Spectroscopy, IntechOpen*. – 2018.
- [21]. Valentini F., Cerza E., Campana F., Marrocchi A., Vaccaro L. Efficient synthesis and investigation of waste-derived adsorbent for water purification. Exploring the impact of surface functionalization on methylene blue dye removal // *Bioresource Technology*. – 2023. – Vol. 390. – P.129847.
- [22]. Rajesh Y., Boricha H., Suryavanshi A., Gajare A., Jain S., Suresh K. Synthesis, characterization and adsorption studies on activated carbon adsorbent synthesized from *Kigelia africana* for removal of acid blue 113 dye from synthetic solution // *Materials Today: Proceedings*. – 2023.
- [23]. Gatica J.M., Gómez D. M., Harti S., Vidal H. Clay honeycomb monoliths for water purification: Modulating methylene blue adsorption through controlled activation via natural coal templating // *Appl. Surf. Sci.* – 2013. – Vol. 277. – P.242-248.
- [24]. Wang J., et al. Mesoporous structure TiO₂/SiO₂ composite for methylene blue adsorption and photodegradation // *Micro & Nano Letters*. – 2019. – Vol. 14. – P.323-328.
- [25]. Eyni Gavabari S., Goudarzi A., Shahrousvand M., Asfaram A. Preparation of novel polyurethane/activated carbon/cellulose nano-whisker nanocomposite film as an efficient adsorbent for the removal of methylene blue and basic violet 16 dyes from wastewater // *Sep. Purif. Technol.* – 2023. – Vol. 330. – P.125285.

- [26]. Qian Y., et al. Efficient removal of dibutyl phthalate from transformer oils by iron/activated carbon adsorbent // *Journal of Cleaner Production*. – 2024. – Vol. 447. – P.141476.
- [27]. Nayl A.A., et al. A Novel P@SiO₂ Nanocomposite as Effective Adsorbent to Remove Methylene Blue Dye from Aqueous Media // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – Art. no. 2.

Reference

- [1]. Gupta K, Khatri PO (2019) *Chemical Engineering Journal* 378:122218. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122218>
- [2]. Wang Y, Zhou Y, Jiang G, Chen P, and Chen Z (2020) *Sci Rep* 10 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68591-1>
- [3]. Sarkar N, Sahoo G, Swain SK (2020) *Materials Chemistry and Physics* 250:123022. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123022>
- [4]. Chinoune K. et al (2024) *Inorganic Chemistry Communications* 165:112558. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112558>.
- [5]. Speight JG (2020) *Natural Water Remediation*: 165-198. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803810-9.00005-X>.
- [6]. Abouzeid RE, Khiari R, El-Wakil N, Dufresne A (2019) *Biomacromolecules* 20:573-597. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.8b00839>
- [7]. Yaqoob AA, Parveen T, Umar K, Mohamad Ibrahim MN (2020) *Water* 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020495>
- [8]. Liu X, et al. (2019) *Journal of Hazardous Materials* 373:397-407. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.103>
- [9]. Kazeem TS, et al. (2018) *Journal of Cleaner Production* 205:303-312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.114>
- [10]. Yagub MT, Sen TK, Afroze S, Ang HM (2014) *Advances in Colloid and Interface Science* 209:172-184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
- [11]. Kyzas GZ, Deliyanni EA, Bikiaris DN (2018) *Chemical Engineering Research and Design*. 129:75-88. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.11.006>
- [12]. Vahdati-Khajeh S, Zirak M, Tejrag RZ, Fathi A, Lamei K (2019) *Surfaces and Interfaces* 15 :157-165. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.03.003>
- [13]. Banerjee S, Dubey S, Gautam R K, Chattopadhyaya MC, Sharma YC (2019) *Arabian Journal of Chemistry* 12 (8):5339-5354. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2016.12.016>
- [14]. Al-Shehri BM, Khder RS, Ashour SS, Hamdy MS (2019) *Mater. Res. Express* 6 (12):122002. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab52af>
- [15]. Liu F, et al. (2023) *Carbohydrate Polymers* 312:120755. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120755>
- [16]. Rahmadhani D, Zulkifli, Yuliani KD, Frida E, Taufiq A (2024) *South African Journal of Chemical Engineering* 48:366-374. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.03.010>
- [17]. Satayeva AR. et al (2018) *Science of The Total Environment* 630:1237-1245. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.329>.
- [18]. Seitzhanova MA, Mansurov ZA, Yeleuov M, Roviello V and Capua RD (2019) *Eurasian Chemico-Technological Journal* 21(2):Art. no. 2. <https://doi.org/10.18321/ectj825>.
- [19]. Shamsudin MS, Azha SF, Sellaoui L, Badawi M, Bonilla-Petriciolet A, Ismail S (2022) *Chemical Engineering Journal* 428:131929. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131929>
- [20]. Bîru EI, Iovu H, Bîru EI, Iovu H (2018) in *Raman Spectroscopy*, IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73487>
- [21]. Valentini F, Cerza E, Campana F, Marrocchi A, Vaccaro L (2023) *Bioresource Technology* 390:129847. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129847>
- [22]. Rajesh Y, Boricha H, Suryavanshi A, Gajare A, Jain S, Suresh K (2023) *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.046>
- [23]. Gatica JM, Gómez DM, Harti S, Vidal H (2013) *Applied Surface Science* 277:242-248. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.04.034>
- [24]. Wang J, et al (2019) *Micro & Nano Letters* 14(1):323-328. <https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5300>
- [25]. Eyni Gavabari S, Goudarzi A, Shahrousvand M, Asfaram A (2023) *Separation and Purification Technology* 330:125285. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125285>
- [26]. Qian Y, et al. (2024) *Journal of Cleaner Production* 447:141476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141476>
- [27]. Nayl A. A, et al. (2023) *Materials* 16(2). <https://doi.org/10.3390/ma16020514>

Суды тазарту үшін күріш қауызынан алына- тын SiO₂/C адсорбентін синтездеу және зерттеу

М.А. Бисенова^{1,2,4*}, Н.В. Идрисов^{1,2}, А.С. Серік^{1,2},
М.А. Елеуов^{1,3}, Қ. Асқарұлы^{1,3}, К.А. Кутербеков⁵,
К.Ж. Бекмырза⁵, А.М. Кабышев⁵, М.М. Кубенова⁵,
Г.Д. Кабдрахимова⁵

¹Satbayev University, Алматы, Қазақстан

²Ядролық физика институты, Ибрагимов к-сі, 1, Алматы, Қазақстан

³Bes Saiman Group, Жароков к-сі, 171а, Алматы, Қазақстан

⁴Физика-техникалық институт, Ибрагимов к-сі, 11, Алматы, Қазақстан

⁵Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев к-сі, 2, Астана, Қазақстан

АНДАТПА

Қазіргі уақытта ағынды суларды қайта пайдалану үшін оларды тазартудың қажеттілігі артып келеді. Бұл тұрғыда биологиялық ыдырайтын материалдардан алынған, сонымен қатар экономикалық тұрғыдан тиімді ғана емес, экологиялық зиянсыз және оларды әрі қарай пайдалану үшін қалпына келтіруге болатын адсорбенттер үлкен қызығушылық тудырып отыр. Бұл зерттеу органикалық ластаушы заттарды тиімді жоюға бағытталған күріш қабығын кеуекті кремний оксидіне өңдеудің экологиялық таза әдісін ұсынады. SiO_2 және SiO_2/C синтезделген үлгілерінің морфологиясы сканерлеуші электронды микроскоп (СЭМ) арқылы, ал үлгілердің кристалдық құрылымы XRD көмегімен зерттелді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, 90 минуттық адсорбциядан кейін 200 мг/л концентрациясы бар, 650 °C температурада алынған SiO_2/C адсорбенті метилен көк (МК) органикалық бояуын 94,56% тиімділікпен жояды. Метилен көктің максималды адсорбция сыйымдылығы (q_t) 5 мг/л концентрациясында 49,27 мг/г құрады. Сонымен қатар, ерітіндінің рН мәнінің МК адсорбция тиімділігіне әсері зерттеліп, адсорбция процесі үшін идеалды рН диапазоны 7-ден 9-ға дейін екені анықталды. Алынған нәтижелер SiO_2/C композитін суды тазарту үшін әлеуетті және қолжетімді адсорбент ретінде пайдаланудың тиімділігін көрсетеді.

Түйін сөздер: SiO_2/C , органикалық бояғыштардың адсорбциясы, метилен көк, суды тазарту.

Synthesis and study of SiO_2/C as an adsorbent derived from rice husk for water purification

M.A. Bissenova^{1,2,4*}, N.V. Idrissov^{1,2}, A.S. Serik^{1,2}, M.A. Yeleuov^{1,3}, K. Askaruly^{1,3}, K.A. Kuterbekov⁵, K.Zh. Bekmyrza⁵, A.M. Kabyshev⁵, M.M. Kubenova⁵, G.D. Kabdrakhimova⁵

¹Satbayev University, 22a Satpayev str., Almaty, Kazakhstan

²Institute of Nuclear Physics, I Ibragimov str., Almaty, Kazakhstan

³Bes Saiman Group, 171a Zharokova str., Almaty, Kazakhstan

⁴Institute of Physics and Technology, 11 Ibragimov str., Almaty, Kazakhstan

⁵L.N. Gumilyov Eurasian national university, Satpayev str., 2, Astana, Kazakhstan

ABSTRACT

Today there is an urgent need for wastewater treatment for reuse. In this context, adsorbents that are not only cost-effective but also environmentally friendly, derived from biodegradable materials and can be recovered for further use are of greatest interest. This paper presents an environmentally friendly method for processing rice husk into porous silicon oxide for efficient removal of organic pollutants. The morphology of the synthesized SiO_2 and SiO_2/C samples was investigated using scanning electron microscope (SEM), and the crystal structure of the samples was studied using XRD. The results showed that after 90 min of adsorption, the SiO_2/C adsorbent prepared at 650 °C with a mass loading of 200 mg/L exhibited remarkable efficiency in removing the organic dye methylene blue (MB) with a removal percentage of nearly 94.56%, with a maximum adsorption capacity (q_t) of 49.27 mg/g at a methylene blue concentration of 5 mg/L. In addition, the effect of solution pH on the adsorption efficiency of MB was investigated and it was found that the ideal pH range for the adsorption process is between 7 and 9. The results obtained indicate the feasibility of using the composite as a potential and affordable adsorbent for water treatment.

Keywords: SiO_2/C , adsorption of organic dyes, methylene blue, water purification