УДК 543.544

АДСОРБЦИЯ ХЛОРСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ВОДНОГО РАСТВОРА КОМПОЗИТНЫМ СОРБЕНТОМ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

© 2026 О.Р. Каратаев[1], В.А. Лашков[2], К.С. Александров[1]

[1] Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия
[2] Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Россия

Статья поступила в редакцию 01.04.2026

Хлорирование воды на объектах хозяйственно-бытового и спортивного назначения является основным методом обеззараживания. При химическом взаимодействии хлора с органическими веществами в воде образуются побочные продукты, включая дибромхлорметан, дихлорбромметан, хлороформ и другие соединения, представляющие серьезную опасность для здоровья человека. В работе рассмотрены вопросы адсорбции хлорсодержащих соединений с помощью синтезированного сорбента на основе оксида алюминия. Синтез сорбента осуществлялся пиролитической обработкой пористых гранул гамма-оксида алюминия с использованием в качестве прекурсора фурфурилового спирта, импрегнированного во внутреннюю структуру гранул. Синтезированный композитный сорбент (матрица – оксид алюминия и углеродный слой) обладает синергетическим эффектом, объединяя механическую прочность, термостабильность и химическую устойчивость оксида алюминия с высокой адсорбционной емкостью и развитой пористой структурой активированного угля. Исследование адсорбционных свойств разработанного сорбента проводилось на примере процесса очистки воды от хлороформа при концентрации ~3000 мг/л. Использовали стандартные методы исследований, такие как газовая хроматография, сканирующей электронная микроскопия (СЭМ), анализ изотерм адсорбции-десорбции азота (с расчетом удельной поверхности образцов по методу Брунауэра-Эммета-Теллера). В качестве образцов для сравнения использовали дробленый активированный березовый уголь марки БАУ-ЛВ №3 и гранулы оксида алюминия (ОА). Экспериментально получены изотермы адсорбции-десорбции азота и СЭМ-изображения поперечного скола гранул. Установлено, что изотерма синтезированного композитного сорбента качественно схожа с изотермой исходного оксида алюминия. Основное отличие заключается в увеличении количества адсорбированного азота в области относительных давлений 0,1–0,6 P/P_0 и снижении его количества в области относительных давлений 0,8–0,99 P/P_0, что свидетельствует о частичном заполнении порового пространства комбинированного сорбента углеродом, сопровождающееся с одной стороны уменьшением суммарного порового объема материала, с другой – развитием поверхности пор малого размера.

Ключевые слова: адсорбция, оксид алюминия, фурфуриловый спирт, пиролиз, композитный сорбент.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-278-285
EDN: CYFGIR

ВВЕДЕНИЕ

Обеззараживание воды на объектах хозяйственно-бытового и спортивного назначения обеспечивается преимущественно химическими методами, основным из которых является обработка воды хлорсодержащими реагентами [1, 2]. Этот простой и дешевый метод обеззараживания обеспечивает микробиологическую безопасность воды. Хлор эффективно уничтожает патогены, однако, при взаимодействии с органическими веществами в воде. При хлорировании с растительных остатков и выделений купающихся могут образовываться числе дибромхлорметан, дихлорбромметан, хлороформ и другие хлорсодержащие соединения [3]. Эти соединения при превышении предельно допустимых концентраций (ПДК) представляют серьезную опасность для здоровья человека, обладают канцерогенным эффектом (могут повышать риск развития рака печени, почек и кишечника); гепатотоксичностью и нефротоксичностью (высокие дозы могут оказывать повреждающее действие на печень и почки); влиянием на репродуктивную систему (есть риск для эмбрионального развития); негативным влиянием на работу внутренних органов человека, что приводит к аллергическим реакциям (сыпь, шелушение и раздражение кожи) [4, 5].

Для предотвращения негативного воздействия хлорсодержащих соединений на человека на территории Российской Федерации установлены предельно допустимые концентрации по содержанию этих веществ в воде. Например, согласно санитарным правилам и нормам СанПиН 1.2.3685-21 ПДК для хлороформа в питьевой воде составляет 0,06 мг/л.

Каратаев Оскар Робиндарович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Основы конструирования и прикладная механика». E-mail: oskar_karataev@mail.ru
Лашков Вячеслав Александрович, доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя Института прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан. E-mail: valashkov1959@yandex.ru
Александров Кирилл Сергеевич, аспирант. E-mail: aleksandrov_sm173@mail.ru

В связи с этим разработка эффективных методов очистки водных сред от соединений хлора приобретает первостепенное значение. Одним из наиболее перспективных направлений является адсорбция – процесс концентрирования вещества в объеме пор твердого тела (сорбента). Этот метод отличается высокой эффективностью, относительной простотой реализации и возможностью регенерации сорбентов [6].

Основными промышленными адсорбентами являются активированные угли, сложные оксиды и импрегнированные сорбенты. Традиционно для адсорбционной очистки воды применяют активированные угли, которые по физико-химическим параметрам превосходят другие адсорбенты, обладают высокой удельной поверхностью (700–1500 м^2/г), развитой пористой структурой, отличаются широким спектром адсорбируемых веществ (ароматические соединения, нефтепродукты и т.п.).

Однако, активированные угли имеют и ряд недостатков, таких как относительно высокая стоимость, необходимость сложной регенерации, низкая механическая прочность, широкий разброс полимодального распределения пор по размерам [6]. Данные обстоятельства указывает на то, что структура адсорбента, его химический состав, селективность и механизмы адсорбции-десорбции накладывает ограничения на применение активированного угля, что делает невозможным создание универсального материала для решения всех задач [7].

Таким образом, поиск направлений для получения новых адсорбентов, отличающихся повышенной прочностью и структурной, обеспечивающей эффективную избирательную очистку воды от органических примесей по-прежнему остается актуальной задачей. Альтернативой применяемым в настоящее время сорбентам могут стать природные материалы на основе оксида алюминия, отличающиеся доступностью, механической прочностью и гидролитической устойчивостью [8].

Для повышения адсорбционной активности к определенным адсорбируемым веществам оксид алюминия модифицируют, т.е. изменяют структуру поверхности материала химическими методами, например, силанами, карбоновыми и фосфоновыми кислотами, а также их производными [9–13]. При этом органическое вещество должно содержать как минимум две функциональные группировки: одна из группировок (якорная) будет обеспечивать закрепление модификатора на поверхности, другая – (свободная) определять свойства полученного сорбционного материала.

Целью данной работы является синтез (модификация) адсорбента на основе оксида алюминия термохимическим методом с использованием углеродсодержащих соединений, импрегнированных во внутреннюю структуру адсорбента. Зауглероженный оксид алюминия как новый адсорбент сочетает преимущества традиционного оксида алюминия и активированного угля, устраняя некоторые их недостатки, что позволяет расширить возможности адсорбционных технологий в специфических условиях применения. Таким образом, синтезированный адсорбент обладает синергетическим эффектом, объединяя механическую прочность, термостабильность и химическую устойчивость оксида алюминия с высокой адсорбционной емкостью и развитой пористой структурой активированного угля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Синтез композитного (гибридного) сорбента осуществлялся путем зауглероживания [14] пористых гранул образца коммерческого оксида алюминия марки (ОА) [15] с использованием фурфурилового спирта в качестве прекурсора [16].

Последовательность формирования пористой структуры гибридного сорбента начинается с процесса импрегнации гранул γ-Al_2O_3 25% водным раствором фурфурилового спирта ($C_5H_6O_2$) в условиях вакуума, что обеспечивает максимальное заполнение пор раствором за счет предварительного удаления адсорбированных веществ и снижения энергетического барьера смачивания поверхности.

В дальнейшем при нагреве емкости до температуры 80–85°С с последующей выдержкой в течение 7–8 часов инициируется реакция гомополиконденсация фурфурилового спирта, обусловленная наличием бренстедовских кислотных центров (*ОН*-групп) во внутреннем объеме гранул и на их поверхности.

Протонирование метилольной группы ($-CH_2OH$) в молекуле фурфурилового спирта и образование метиленовых мостиков ($-CH_2-$) между фурановыми циклами протекает по следующей схеме [17]:

$$C_5H_6O_2 + H^+ \rightarrow \left[C_5H_5O_2 + CH_2^+\right]$$

$$\left[C_5H_5O_2 - CH_2^+\right] + C_5H_6O_2 \rightarrow C_5H_5O_2 - CH_2 - C_5H_5O_2 + H^+.$$

При термообработке гранул, наполненных олигомерными продуктами поликонденсации фурфуриллового спирта, в среде инертного газа (аргона) при температуре 150 ^{0}С происходит раскрытие двойных связей и полимеризация олигомеров с образованием трехмерных сшитых полимер-

ных структур. Дальнейший нагрев гранул в атмосфере аргона до температуры 300°С приводит к пиролитической деструкции олигомеров и формированию аморфного углерода на всей доступной поверхности.

Стадия карбонизации проводится при температуре до 800–850°С в течение 2–2,5 ч в среде аргона с образованием фазы микропористого углерода и приводит к модификации пористой структуры гранул оксида алюминия за счет частичного заполнения мезопор, результатом чего является увеличение адсорбционной емкости материала.

Выбранный режим карбонизации обеспечивает формирование дефектной кристаллической фазы углерода без графитизации. При охлаждении гранул композитного адсорбента завершаются окислительные процессы и стабилизируется пористая структура.

В качестве образца для сравнения использовали активированный березовый дробленый уголь БАУ-ЛВ №3 (ТУ 2162-003-38903868-2017).

Сорбцию в статических условиях осуществляли путем выдержки навески водного раствора хлороформа известной концентрации, содержащего навеску адсорбента в течение 72 часов при комнатной температуре при периодическом перемешивании.

Для приготовления исходного раствора хлороформа (с концентрацией ~3000 мг/л) использовали хлороформ марки ХЧ (АО «ЭКОС-1», Москва), стабилизированный этанолом, массовая доля хлороформа согласно спецификации не менее 99,9%), деионизированную воду (18,2 МОм×см), полученную с помощью системы очистки воды PURELAB (ELGA LabWater, UK), мерную колбу 1-500-2 с пришлифованной пробкой, лабораторные весы Ohaus Adventurer RV214 (НПВ 210 г, дискретность 0,0001 г), лабораторную магнитную мешалку (якорь с оболочкой из политетрафторэтилена).

Для проведения экспериментов по сорбции в статических условиях использовали колбы конические стеклянные КН-1-100-29/32, лабораторные весы CAS MWP-3000H (НПВ 3000 г, дискретность 0,05 г) для определения массы водного раствора хлороформа (навеска 100,0 ± 1,0 г), лабораторные весы Ohaus Adventurer RV214 (НПВ 210 г, дискретность 0,0001 г) для определения массы сорбента (~0,2-1,0 г в зависимости от адсорбента).

Для отделения сорбента от раствора перед отбором пробы на хроматографический анализ использовали бумажный фильтр (фильтры обеззоленные, синяя лента, ТУ 2642-001-68085491-2011).

Для количественного определения содержания хлороформа в водных растворах использовали метод газовой хроматографии. Газовый хроматограф «Хроматэк Кристалл 5000.2», ЗАО СКБ «ХРОМАТЭК», Россия; пламенно-ионизационный детектор (ПИД), капиллярная неполярная колонка TR-1, L = 60 м, d = 0,32 мм, толщина фазы – 0,25 мкм. Газ-носитель – гелий; термостат колонки: начальная температура 50°С, нагрев со скоростью 10°С/мин до 250°С, изотерма 250°С; объем пробы 1,0 мкл (микрошприц SGE-Chromatec-01-1 мкл, цена деления 0,02 мкл (ТУ 4321-011-12908609-08)); деление потока 1:26,3; температура испарителя 250°С, детектора 270°С.

Поскольку пламенно-ионизационный детектор не чувствителен к воде, в качестве количественной характеристики содержания хлороформа в анализируемой пробе использовалась абсолютная площадь хроматографического пика хлороформа (среднее арифметическое значение площади пика хлороформа по трем параллельным анализам каждой пробы).

Статическая обменная емкость рассчитывалась по уравнению:

$$\mathrm{СОЕ} = \frac{\mathrm{C}_0 \cdot \rho_{\text{воды}} \cdot m_{\text{раствора}} \cdot (S_0 - S_{\text{равн}})}{m_{\text{сорбента}}},$$

где C_0 – концентрация хлороформа в исходном (стандартном) водном растворе, г/л; $m_{\text{раствора}}$ – масса исходного раствора хлороформа, г; $m_{\text{сорбента}}$ – масса адсорбента, г; $\rho_{\text{воды}}$ – плотность конденсированной воды при комнатной температуре, г/л; S_0 и $S_{\text{равн.}}$ – площадь хроматографического пика хлороформа для пробы исходного и выдержанного в присутствии адсорбента растворов, соответственно, мВ·с.

Исследование структурных характеристик выполнено на основе анализа изотерм адсорбции-десорбции азота при 77,4 К, полученных на автоматическом анализаторе удельной поверхности и размера пор NOVA 2200E («Quantachrome», США). Обработка результатов в программе NovaWin 11.04 (build 02). Расчет удельной поверхности образцов проводили методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ); расчет общего объема пор по методу Гурвича; расчет удельной поверхности и объема микропор по t-методу.

Для исследования образцов методом сканирующей электронной микроскопии использовался микроскоп Carl Zeiss Auriga Crossbeam. Для создания электропроводящего слоя на объекты напылялось углеродное покрытие толщиной 5–15 нм методом термовакуумного испарения графита (установка Quorum Q150T).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изотерма низкотемпературной адсорбции-десорбции азота образца БАУ (рисунок 1) типична для активированных углей, полученных из древесины: тип I с гистерезисом типа H4 (классификация IUPAC [18]). Поровое пространство подобных материалов в основном формируется микропорами, доля мезопор относительно мала.

Изотерма исходного оксида алюминия (рисунок 2) относится к IV типу с петлей гистерезиса типа H2, что свидетельствует о выраженной мезопористой структуре порового пространства, сформированного глобулярными частицами. В отличие от активированных углей, поровое пространство подобных материалов в основном формируется мезопорами, при малом (вплоть до полного отсутствия) содержании микропор.

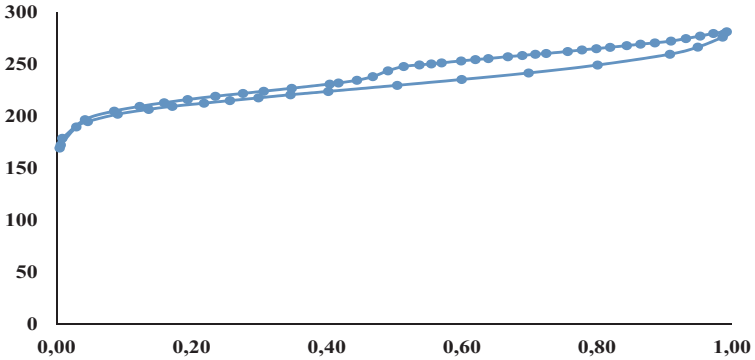

Рис. 1. Изотерма низкотемпературной адсорбции-десорбции азота на образце БАУ

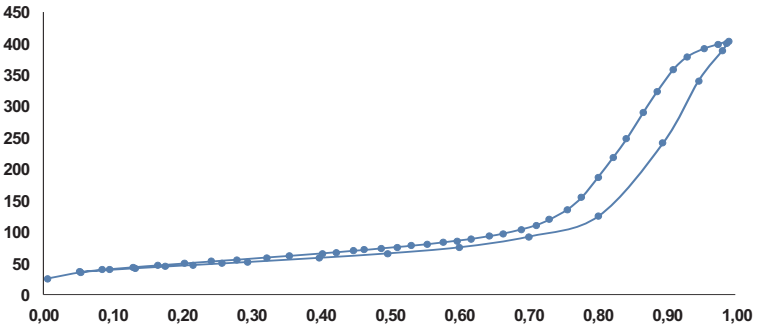

Рис. 2. Изотерма низкотемпературной адсорбции-десорбции азота на образце ОА

По данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) внутренняя структура гранулы БАУ включает плотные углеродные стенки с шероховатой поверхностью, образовавшиеся из клеточных стенок древесины (рисунок 3). В свою очередь, внутренняя структура гранул ОА является иерархической агломератной структурой [19], характерной для синтезированного по золь-гель технологии оксида алюминия (рисунок 4).

Качественно, изотерма синтезированного композитного сорбента (КС) схожа с изотермой ОА. Основное отличие заключается в увеличении количества адсорбированного азота в области относительных давлений 0,1–0,6 P/P_0 и снижении его количества в области относительных давлений 0,8–0,99 P/P_0.

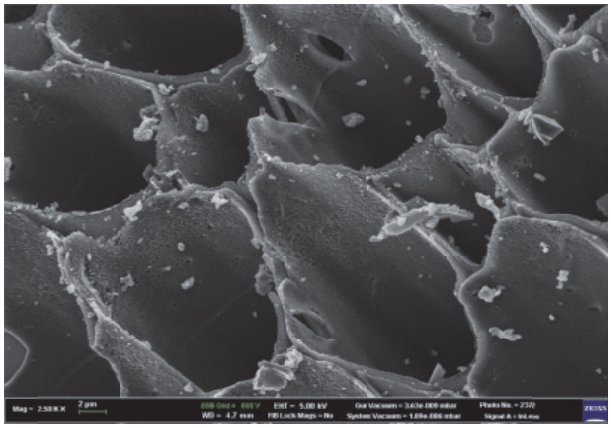

Рис. 3. СЭМ-изображение поперечного скола гранулы БАУ

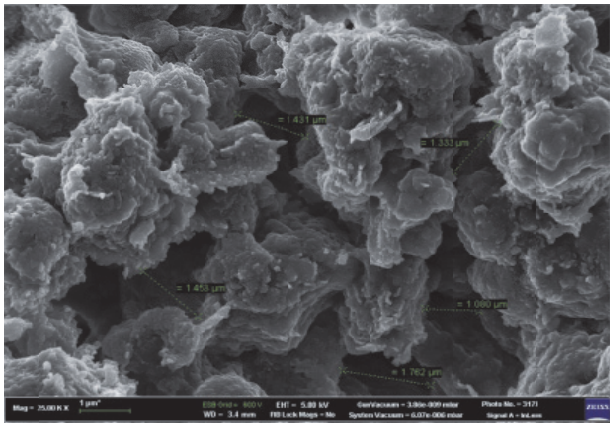

Рис. 4. СЭМ-изображение поперечного скола гранулы ОА

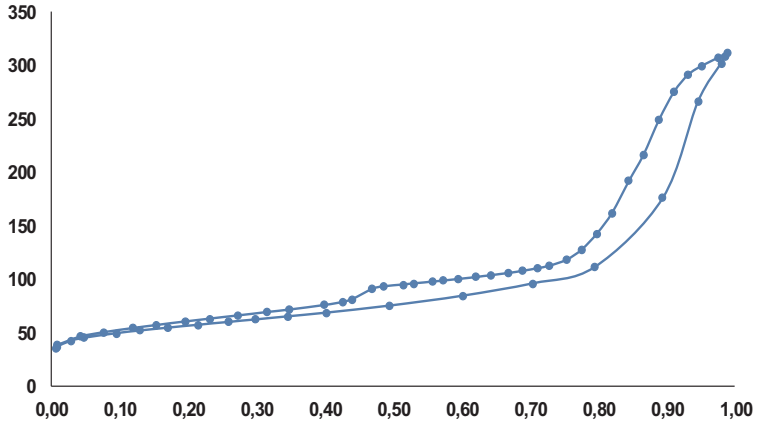

Рис. 5. Изотерма низкотемпературной адсорбции-десорбции азота на образце КС

Такое изменение свидетельствует о частичном заполнении порового пространства КС углеродом, сопровождающееся с одной стороны уменьшением суммарного порового объема материала, с другой, развитием поверхности пор малого размера. Исходя из того, что заметного изменения в морфологии агломератов (третичных кристаллов по классификации Г.Д. Чукина) и заполнения межчастичных пустот между ними (супермакропоры по классификации Г.Д. Чукина) не наблюдается (рисунок 5), углерод локализован в мезопорах вторичных кристаллов ОА.

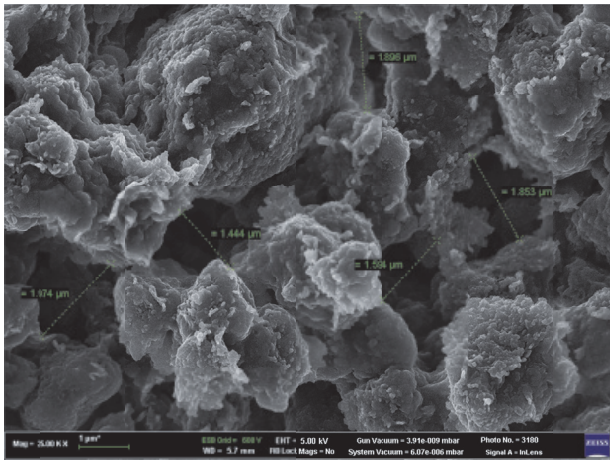

Рис. 6. СЭМ-изображение поперечного скола гранулы КС

Структурные характеристики объектов, приведенные в таблице 1, подтверждают выводы, сделанные из сравнительного анализа изотерм и СЭМ-изображений. По сравнению с исходным ОА композитный сорбент имеет более развитую поверхность, вследствие увеличения микропористой составляющей (увеличение $S_{микро}$ и $V_{микро}$ в ~3,3–3,5 раза), но меньший общий объем пор (уменьшение V_{Σ} в ~1,3 раза).

Таблица 1 – Поверхность, объем и диаметр пор

Параметр	БАУ	ОА	КС
$S_{БЭТ}$, м^2/г	817,3	164,2	199,8
$S_{микро}$, м^2/г (t-метод)	685,5	18,4	58,6
$V_{микро}$, см^3/г (t-метод)	0,2702	0,0072	0,0252
V_{Σ} (по азоту), см^3/г	0,4348	0,6248	0,4819
$D_{ср}$, нм	2,1	15,2	9,6

Результаты оценки сорбционной емкости адсорбентов приведены в таблицах 2, 3.

При допущении одинаковой ориентации молекулы адсорбата и мономолекулярной адсорбции хлороформа на всех исследованных материалах, с учетом высокой концентрации сорбата в равновесном растворе, сорбционная емкость из расчета на единицу поверхности материалов должна быть соизмерима. Как видно, это наблюдается только в случае отнесения количества адсорбата к удельной поверхности отвечающей модели Брунауэра-Эммета-Теллера ($S_{БЭТ}$).

Отметим, что расчет поверхности, занятой адсорбатом ($М_{хлороформа}$ = 119,378 г/моль; площадь адсорбированной молекулы хлороформа составляет 0,52 нм^2), дает величину «активной» поверхности в 1,3–1,6 раза выше чем $S_{БЭТ}$. Такое расхождение может быть обусловлено не только погрешностью хроматографического анализа (см. таблицу 2), но и «разбегом» удельной поверхности использованных в работе коммерческих образцов БАУ и ОА.

Таблица 2 – Результаты хроматографического анализа исходного и равновесных растворов

Объект	Площадь пика хлороформа, мВ·с	СКО	Доверительный интервал (P=0,95; n=3)	Относительная погрешность, %
Стандартный раствор «хлороформ + вода» (2700 мг/л)	518 610 591 среднее 573	49	121	21
БАУ*	390 335 347 среднее 357	29	72	20
ОА*	402 404 352 среднее 386	29	73	19
КС*	371 334 351 среднее 352	19	46	13

Примечание: (*) – масса БАУ 0,2171 г; масса ОА 1,1177 г; масса КС 1,0532 г.

Таблица 3 – Удельная сорбционная емкость по хлороформу (СОЕ)

Сорбент	Сорбционная емкость			
	S, г/г	($S_{БЭТ}$), мг/м^2	($S_{микро}$), мг/м^2	($S_{внешняя}$), мг/м^2
БАУ	0,4980	0,61	0,73	3,78
ОА	0,0839	0,51	4,56	0,58
КС	0,1052	0,53	1,80	0,75

ВЫВОДЫ

Термохимическим методом синтезирован зауглероженный адсорбент на основе оксида алюминия, который сочетает в себе преимущества традиционного оксида алюминия и активированного угля, устраняя некоторые их недостатки, что позволяет расширить возможности адсорбционных технологий в специфических условиях применения.

Результатами проведенных исследований синтезированного адсорбента с помощью стандартных методов: газовой хроматографии, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), анализа изотерм адсорбции-десорбции азота (расчет удельной поверхности образцов по методу Брунауэра-Эммета-Теллера) установлено, что композитный адсорбент по качественным и количественным показателям занимает промежуточное положения между активированным углем и исходным оксидом алюминия. Регулируя параметры процесса получения комбинированного адсорбента, можно получать структуру с требуемым размером пор, а, следовательно, и свойствами.

При этом зауглероженный оксид алюминия не заменяет полностью активированный уголь, а только дополняет его в тех областях, где требуются повышенная механическая прочность, термостабильность и расширенная функциональность. Это особенно актуально для задач, где критические параметры процесса выходят за рамки возможностей активированного угля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Richardson S. D., Thruston A. D., Canghran T. V., Chen P. H., Colletle T. W., Sehenek K. M., Likins B. W., Ravacha C. V.* Identification of new drinking water disinfection byproducts from osone, chlorine dioxide, chloramine and chlorine // Water, Air, and Soil Pollution. 2000. Vol. 123. S. 95-102.
2. *Richardson S. D.* Disinfection byproduct and often emerging contaminants in drinking water // Trends in Analytical Chemistry. – 2003. – Vol. 22. – P. 666-684.
3. *Каратаев, О.Р.* Экологическая оценка загрязнения воды плавательных бассейнов галогенорганическими соединениями // О.Р. Каратаев, В.А. Лашков // Вестник НЦ ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2024. – № 1. – С.93-102.

4. *Гладков, В.Н.* Заболевание пловцов / В.Н. Гладков // Журнал плавания. – 2001. С. 85-88.
5. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России. – 2004. – 143 с.
6. *Кельцев, Н.В.* Основы адсорбционной техники. Изд. 2, перераб. и доп. / Н.В. Кельцев. – М.: Химия, 1984. – 592 с.
7. *Святченко, А.В.* Особенности сорбционного процесса очистки вод от поверхностно-активных веществ с использованием органоминеральных сорбционных материалов / А.В. Святченко, Ж.А. Сапронова, Я.А. Мурзаханов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 27. – № 4. – С. 215-222.
8. *Карандина, О.А.* Сравнение сорбционной способности активированных углей, цеолитов и промышленных образцов оксида алюминия по отношению к оксиду азота (II) в воздухе / О.А. Карандина, И.В. Ошанина, А.Ю. Путин, Л.Г. Брук, О.Н. Темкин // Вестник МИТХТ. – 2011. – Т. 6. – № 6. – С.30-34.
9. *Ливанова, А.В.* Композитный адсорбент на основе оксида алюминия, модифицированный хлоридом кальция / А.В. Ливанова, Ж.Б. Будаев, Е.П. Мещеряков, И.А. Курзина // Вестник Томского государственного университета. – 2020. – № 17. – С. 22-33.
10. *Булучевский, Е.А.* Сорбенты типа «соль в пористой матрице» в процессах переработки углеводородов / Е.А. Булучевский, А.В. Лавренов, В.К. Дуплякин // Российский химический журнал. – 2007. – № 51. – С. 85-92.
11. *Аристов, Ю.И.* Адсорбенты «соль в пористой матрице»: дизайн фазового состава и сорбционных свойств / Ю.И. Аристов, Л.Г. Гордеева // Кинетика и катализ. – 2009. – № 50. – С. 72-79.
12. *Тихомирова, Т.И.* Сорбент на основе оксида алюминия, модифицированного тайроном / Т.И. Тихомирова, С.С. Кубышев, А.В. Иванов, П.Н. Нестеренко //Журнал физической химии. – 2009. – Т. 83. – №7. – С. 1360-1364.
13. *McElwee J., Helmy R., Fadeev V.* Thermal stability of organic monolayers chemically grafted to minerals // J. Coll. Interface Sci. – 2005. – V. 285. – P. 551-556.
14. *Mekki Choura, Naceur M.* Belgacem and Alessandro Gandini The acid-catalyzed polycondensation of furfuryl alcohol: old puzzles unravelled // Macromol. Symp. – 1997. – No 122 – P. 263-268.
15. ГОСТ 8136-85. Оксид алюминия активный. Технические условия. Введен в действие 29.07.1985. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 10 с.
16. *Александров К.С., Лашков В.А., Каратаев О.Р., Каралин Э.А., Вознесенский Э.Ф.* Способ получения углерод-минерального адсорбента: Пат. 2852099 (РФ). 2025.
17. *Алимухамедов, М.Г.* Кинетика гомополиконденсации фурфурилового спирта / М.Г. Алимухамедов, Ф.А. Мугрупов // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2007. – Т. 49. – № 7. С.1287-1292.
18. *Фенелонов, В.Б.* Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов / В.Б. Фенелонов. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – С. 160-161.
19. *Чукин, Г.Д.* Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций / Г.Д. Чукин. – М.: Принт, 2012. – 288 с.

ADSORPTION OF CHLORINECONTAINING COMPOUNDS FROM AQUEOUS SOLUTION USING A COMPOSITE SORBENT BASED ON ALUMINUM OXIDE

© 2026 O. R. Karataev[1], V. A. Lashkov[2], K. S. Aleksandrov[1]

[1] Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
[2] Institute of Applied Research, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia

Water chlorination at domestic, household, and sports facilities is the primary disinfection method. When chlorine chemically reacts with organic substances in water, byproducts are formed, including dibromochloromethane, dichlorobromomethane, chloroform, and other compounds that pose a serious health risk to humans. This study addresses the adsorption of chlorinecontaining compounds using a synthesized sorbent based on aluminum oxide. The sorbent was synthesized via pyrolytic treatment of porous gammaaluminum oxide granules, using furfuryl alcohol as a precursor impregnated into the internal structure of the granules. The synthesized composite sorbent (matrix – aluminum oxide and a carbon layer) exhibits a synergistic effect, combining the mechanical strength, thermal stability, and chemical resistance of aluminum oxide with the high adsorption capacity and developed porous structure of activated carbon. The adsorption properties of the developed sorbent were investigated using the example of water purification from chloroform at a concentration of ~3000 mg/L. Standard research methods were employed, such as gas chromatography, scanning electron microscopy (SEM), and analysis of nitrogen adsorptiondesorption isotherms (with calculation of the specific surface area of samples using the Brunauer-Emmett-Teller method). Crushed activated birch charcoal of the BAU-LV No. 3 grade and-aluminum oxide (AO) granules were used as reference samples. Nitrogen adsorption-desorption isotherms and SEM images of the crosssection of the granules were obtained experimentally. It was found that the isotherm of the synthesized composite sorbent is qualitatively similar to that of the original aluminum oxide. The main difference lies in the increased amount of adsorbed nitrogen in the relative pressure range of 0,1–0,6 P/P_0 and a decrease in its amount in the relative pressure range of 0,8–0,99 P/P_0. This indicates partial filling of the pore space of the composite sorbent with carbon, which, on the one hand, reduces the total pore volume of the material and, on the other hand, enhances the development of small-sized pore surfaces.

Keywords: adsorption, aluminum oxide, furfuryl alcohol, pyrolysis, composite sorbent

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2(2)-278-285
EDN: CYFGIR

REFERENCES

1. Identification of new drinking water disinfection by products from ozone, chlorine dioxide, chloramine and chlorine. S. D. Richardson, A. D. Thruston, T. V. Canghran, P. H. Chen, T. W. Colletle, K. M. Sehenek, B. W. Likins, C. V. Ravacha //Water, Air, and Soil Pollution. – 2000. № 123. S. 95–102.
2. *Richardson S. D.* Disinfection by product and often emerging contaminants in drinking water. //Trends in Analytical Chemistry – 2003. № 22. S. 666–684.
3. *Karataev O. R.* Ecological assessment of water pollution in swimming pools with organohalogen compounds. O. R. Karataev,V. A. Lashkov// Vestnik NC VostNII po promyshlennoi i ekologicheskoi bezopasnosti. 2024. № 1. S. 93–102.
4. *Gladkov V. N.* Diseases in swimmers // Zhurnal plavaniya. 2001. S. 85–88.
5. Rukovodstvo po otsenke riska dlya zdorov'ya naseleniya pri vozdeistvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu //M: Federal Center for State Saniary and Epidemiological Surveillance of the Ministry of Health of Russia. 2004 – 143 s.
6. *Kel'tsev N. V.* Osnovy adsorbtsionnoi tekhniki //Fundamentals of adsorption technology. 2nd ed., revised and expanded. M: Khimiy. 1984. – 592 s.
7. *Svyatchenko, A. V.* Features of the sorption purification of water from surfactants using organomineral sorption materials // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. T. 27. № 4. S. 215–222.
8. Comparison of the sorption capacity of activated carbons, zeolites and industrial aluminum oxide samples with respect to nitrogen oxide (II) in air. O. A. Karandina, I. V. Oshanina, A. Yu. Putin, L. G. Bruk, O. N. Temkin // Vestnik MITKhT. 2011. T. 6, № 6, S. 30–34.
9. Composite adsorbent based on aluminum oxide modified with calcium chloride. A. V. Livanova, Zh. B. Budaev, M. E. Peshcheryakov, I. A. Kurzina // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2020. № 17. S. 22–33.
10. *Buluchevskii, E. A.* Sorbents of the «salt in a porous matrix» type in hydrocarbon processing //Rossiiskii khimicheskii zhurnal. 2007. № 51. S. 85–92.
11. *Aristov, Yu. I.* «Salt in a porous matrix» adsorbents: design of phase composition and sorption properties 11. Yu. I. Aristov, L. G. Gordeeva // Kinetika i kataliz. 2009, № 50, S. 72–79.
12. Sorbent based on aluminum oxide modified with tyron /Tikhomirova, T. I., Kubyshev, S. S., Ivanov, A. V., Nesterenko, P. N. // Zhurnal fizicheskoi khimii. 2009. T. 83, №. 7, S. 1360–1364.
13. Thermal stability of organic monolayers chemically grafted to minerals/ J. McElwee, R. Helmy, V. Fadeev// Journal of Colloid and Interface Science. 2005. T. 285, S. 551–556.
14. The acid-catalyzed polycondensation of furfuryl alcohol: old puzzles unravelled/ Mekki Choura N. M. Belgacem, A. Gandini// Macromolecular Symposia. 1997. № 122. S. 263–268.
15. GOST 8136 85. Aktivnyi okisid aliuminiya. Tekhnicheskie usloviya. Effective from 29.07.1985. Moscow: Izdatel'stvo standartov. 1985. 10 s.
16. *Aleksandrov K. S., Lashkov V. A., Karataev O. R., Karalin E. A., Voznesenskii E. F.* Sposob polucheniya uglerod mineral'nogo adsorbenta : Patent RU 2852099. 2025.
17. *Alimukhamedov M. G., Mugrupov F. A.* Kinetics of homopolycondensation of furfuryl alcohol / M. G. Alimukhamedov, F. A. Mugrupov// Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya B. 2007. T. 49. № 7, S. 1287–1292.
18. *Fenelonov V. B.* Vvedenie v fizicheskuyu khimiyu formirovaniya supramolekulyarnoi struktury adsorbentov i katalizatorov //Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 2004. S. 160–161.
19. *Chukin G. D.* Stroenie oksida aliuminiya i katalizatorov gidroobesserivaniya // Mekhanizmy reaktsii. Moscow: Print. 2012. 288 s.

Oskar Karataev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Fundamentals of Design and Applied Mechanics. E-mail: oskar_karataev@mail.ru
Vyacheslav Lashkov, Doctor of Technical Sciences, Professor Chief Researcher at the Separate Structural Unit «Institute of Applied Research of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan». E-mail: valashkov1959@yandex.ru
Kirill Aleksandrov, Postgraduate Student. E-mail: aleksandrov_sm173@mail.ru