

**ОБЗОР УГЛЕРОДНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ С ОКСИДАМИ
МЕТАЛЛОВ ДЛЯ АДСОРБЦИИ ГАЗООБРАЗНЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ**

Ражабова Зарина Амруллоевна

Институт общей и неорганической химии АН РУз., Ташкент, Узбекистан

zayka3400@gmail.com

Адизов Бобиржон Замирович

Институт общей и неорганической химии Академии наук Республики

Узбекистан, доктор технических наук, проф.

bobirjon_adizov@mail.ru

Болтаева Мафтуна Омонкуловна

Институт общей и неорганической химии АН РУз., Ташкент, Узбекистан

boltayevamaftuna1605@gmail.com

Аннотация. В работе представлен обзор углеродных нанокomпозитов с оксидами металлов как перспективных материалов для адсорбции газообразных загрязнителей. Рассмотрены особенности активированного угля и углеродных наноматериалов, а также роль оксидов металлов в формировании дополнительных активных центров. Показано, что сочетание пористой углеродной основы с оксидными компонентами позволяет объединить развитую поверхность и пористость углеродного материала с химической активностью оксидов металлов. Рассмотрены возможности применения таких композитов для удаления CO_2 и H_2S . Отмечена перспективность оптимизации состава и структуры углерод-оксидных нанокomпозитов для повышения их адсорбционных свойств.

Ключевые слова: нанокomпозиты, активированный уголь, оксиды металлов, адсорбция, газообразные загрязнители, CO_2 , H_2S .

**GAZSIMON IFLOSLANTIRUVCHI MODDALARNI ADSORBSIYA QILISH
UCHUN METALL OKSIDLI UGLEROD NANOKOMPOZITLARI SHARHI**

Rajabova Zarina Amrulloevna

O‘zR FA Umumiy va noorganik kimyo instituti, Toshkent, O‘zbekiston

zayka3400@gmail.com

Adizov Bobirjon Zamirovich

*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti,
texnika fanlari doktori, prof.*

bobirjon_adizov@mail.ru

Annotatsiya. Ushbu ishda metall oksidlarini o‘z ichiga olgan uglerod nanokompozitlarining gazsimon ifloslantiruvchilarni adsorbsiyalash uchun istiqbolli materiallar sifatidagi adabiyot ma‘lumotlari sharhlangan. Faollashtirilgan uglerod va uglerod nanomateriallarining xususiyatlari, shuningdek, metall oksidlarining qo‘shimcha

faol markazlarni shakllantirishdagi roli ko‘rib chiqilgan. G‘ovak uglerod asosini oksid komponentlari bilan birlashtirish uglerod materiallarining rivojlangan sirt maydoni va g‘ovakligini metall oksidlarining kimyoviy faolligi bilan uyg‘unlashtirish imkonini berishi ko‘rsatilgan. Bunday kompozitlarning CO₂ va H₂S ni chiqarib tashlashdagi qo‘llanish imkoniyatlari ko‘rib chiqilgan. Adsorbsion xususiyatlarni yaxshilash maqsadida uglerod–metall oksidi nanokompozitlarining tarkibi va tuzilishini optimallashtirish istiqbollari qayd etilgan.

Kalit so‘zlar: *nanokompozitlar, faollashtirilgan uglerod, metall oksidlari, adsorbsiya, gazsimon ifloslantiruvchilar, CO₂, H₂S.*

REVIEW OF CARBON NANOCOMPOSITES WITH METAL OXIDES FOR THE ADSORPTION OF GASEOUS POLLUTANTS

Rajabova Zarina Amrulloevna

Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent

zayka3400@gmail.com

Adizov Bobirjon Zamirovich

Dr. Tech. Sc., Professor, Head of the Laboratory of Petrochemistry, Institute of General and Inorganic Chemistry, AS RUz

bobirjon_adizov@mail.ru

Abstract: *This paper presents a review of carbon nanocomposites containing metal oxides as promising materials for the adsorption of gaseous pollutants. The characteristics of activated carbon and carbon nanomaterials, as well as the role of metal oxides in the formation of additional active sites, are considered. It is shown that combining a porous carbon matrix with oxide components makes it possible to integrate the high surface area and porosity of carbon materials with the chemical activity of metal oxides. The potential application of such composites for the removal of CO₂ and H₂S is discussed. The prospects of optimizing the composition and structure of carbon–metal oxide nanocomposites to improve their adsorption properties are highlighted.*

Keywords: *nanocomposites, activated carbon, metal oxides, adsorption, gaseous pollutants, CO₂, H₂S.*

ВВЕДЕНИЕ

Удаление газообразных загрязнителей является важной задачей современной экологической технологии. В промышленных газовых потоках могут присутствовать углекислый газ (CO₂) и сероводород (H₂S), удаление которых требует разработки эффективных и устойчивых материалов. Среди различных методов очистки газов адсорбционные процессы представляют интерес благодаря возможности применения пористых твёрдых материалов.

Активированный уголь является одним из наиболее распространённых углеродных адсорбентов. Его адсорбционные свойства определяются развитой пористой структурой, высокой удельной поверхностью и наличием функциональных групп на поверхности. Эффективность адсорбции зависит от совокупности характеристик материала, включая размер и распределение пор, химический состав поверхности и природу адсорбируемого вещества.

Одним из направлений повышения адсорбционных характеристик углеродных материалов является их модификация оксидами металлов. Введение оксидного компонента позволяет изменять химические свойства поверхности и формировать дополнительные активные центры. Углеродные материалы, модифицированные оксидами металлов, исследуются в качестве адсорбентов для удаления H_2S и CO_2 , в том числе из биогаза [1].

Таким образом, композиты на основе углеродных материалов и оксидов металлов представляют интерес благодаря сочетанию развитой пористой структуры углеродной основы и химической активности оксидной фазы.

Целью настоящей работы является обзор литературных данных о углеродных нанокompозитах с оксидами металлов, применяемых для адсорбции CO_2 и H_2S , а также рассмотрение основных факторов, влияющих на их адсорбционные свойства.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Углеродные материалы и оксиды металлов в процессах адсорбции газов. Активированный уголь характеризуется развитой системой микро- и мезопор, обеспечивающей высокую площадь контакта между твёрдой поверхностью и газовой фазой. Существенное значение имеют также поверхностные функциональные группы, определяющие химические свойства углеродного материала и его взаимодействие с адсорбируемыми молекулами.

Адсорбционные свойства углеродных материалов обусловлены физическим взаимодействием молекул газа с поверхностью, а после соответствующей модификации могут дополнительно определяться специфическими химическими взаимодействиями. Для регулирования свойств углеродной основы применяются различные модифицирующие компоненты, в том числе оксиды металлов. В исследовании композитов на основе активированных углеродных нановолокон с оксидами металлов изучалось влияние природы оксидного компонента на адсорбцию CO_2 и CH_4 [2]. Полученные результаты показывают, что изменение состава и химии поверхности материала может влиять на его взаимодействие с компонентами газовой смеси.

Оксиды металлов представляют интерес как компоненты углеродных нанокompозитов благодаря способности взаимодействовать с газовыми молекулами и изменять химические свойства поверхности. В составе таких материалов могут использоваться оксиды меди, цинка, железа, марганца и титана. Выбор оксидного компонента определяется природой адсорбируемого газа и особенностями его взаимодействия с поверхностью.

Особый интерес представляют композиты на основе активированного угля и оксидов металлов для удаления H_2S . Для системы $CuO-ZnO$ /активированный уголь показано, что присутствие O_2 и H_2O влияет на процесс реакционной адсорбции H_2S и образование серосодержащих продуктов [3].

Таким образом, в углеродных композитах с оксидами металлов удаление газообразных загрязнителей может осуществляться за счёт сочетания физической адсорбции в пористой структуре и химического взаимодействия с активными центрами поверхности. Сочетание этих механизмов определяет функциональные свойства композитов и представляет интерес для разработки материалов для очистки газовых потоков.

Применение углерод–оксидных композитов для удаления газов. На основании рассмотренных литературных данных углерод–оксидные композиты представляют интерес для удаления CO_2 и H_2S благодаря сочетанию развитой пористой структуры углеродной основы и химически активных центров оксидной фазы. В зависимости от природы углеродного компонента и используемого оксида металла характер взаимодействия материала с газовой фазой может различаться. Для CO_2 преимущественно рассматривается адсорбционное взаимодействие с поверхностью композита, тогда как при удалении H_2S возможно сочетание адсорбции с реакционным взаимодействием с оксидной фазой.

В таблице 1 представлены основные примеры углерод–оксидных композитов, рассмотренных в литературе для удаления CO_2 и H_2S , с указанием состава углеродной основы, оксидной фазы и основного механизма взаимодействия с газом.

Таблица 1.

Характеристика углерод–оксидных композитов, применяемых для удаления CO_2 и H_2S

<i>Газообразный загрязнитель</i>	<i>Углеродный компонент</i>	<i>Оксидная фаза</i>	<i>Основной процесс</i>
CO_2	активированные углеродные нановолокна	Fe_2O_3 , Co_3O_4	физическая адсорбция
H_2S	активированный уголь	$CuO-$ ZnO	реакционная адсорбция
H_2S	активированный уголь	$CuFe_2O_4$	адсорбция и каталитическое окисление

Для CO_2 исследовались композиты на основе активированных углеродных нановолокон и оксидов металлов, при этом природа оксидного компонента влияла на адсорбционные характеристики материала [2]. Для удаления H_2S исследованы композиты $CuO-ZnO$ /активированный уголь, в которых присутствие O_2 и H_2O влияло на процесс реакционной адсорбции и образование серосодержащих продуктов [3]. Для системы $CuFe_2O_4$ /активированный уголь также сообщалось о сочетании реакционной

адсорбции и каталитического окисления H_2S , при этом характеристики материала зависели от структуры пористой углеродной основы [4].

Таким образом, выбор углеродной основы и оксидной фазы позволяет регулировать взаимодействие композита с определёнными компонентами газовой смеси. Основное значение при этом имеют пористость материала, природа и распределение оксидной фазы, а также химические свойства поверхности.

Факторы, влияющие на эффективность. Эффективность углерод–оксидных композитов определяется совокупностью структурных и химических характеристик материала, а также условиями процесса адсорбции. К основным факторам относятся пористость углеродной основы, природа и распределение оксидной фазы, химия поверхности, температура и влажность.

– *Пористость.* Развитая микропористая структура обеспечивает доступ молекул газа к внутренней поверхности материала. При этом чрезмерная загрузка оксидной фазы может частично блокировать поры и уменьшать доступную поверхность.

– *Природа оксида металла.* Различные оксиды характеризуются неодинаковой химической активностью и способны по-разному взаимодействовать с молекулами газов, что влияет на характер и эффективность процесса удаления.

– *Распределение оксидной фазы.* Равномерное распределение оксидных частиц по поверхности углеродной основы способствует формированию доступных активных центров и эффективному контакту газовой фазы с композитом.

– *Химия поверхности.* Наличие кислородсодержащих и других функциональных групп может изменять поверхностные свойства материала и характер его взаимодействия с адсорбируемыми молекулами.

– *Температура и влажность.* Данные параметры имеют существенное значение при очистке реальных газовых потоков. В частности, для H_2S присутствие H_2O и O_2 может изменять механизм реакционной адсорбции на поверхности CuO – ZnO /активированного угля [3].

Таким образом, рассмотренные в таблице примеры показывают, что адсорбционные характеристики углерод–оксидных композитов зависят не только от состава материала, но и от его пористой структуры, состояния поверхности и условий эксплуатации.

Перспективность углеродных нанокompозитов с оксидами металлов связана с возможностью целенаправленного регулирования их состава, структуры и поверхностных свойств. Для дальнейшего развития данного направления важное значение имеют оптимизация содержания оксидной фазы при сохранении развитой пористости углеродной основы, повышение селективности по отношению к определённым газам, изучение влияния влажности и разработка эффективных способов регенерации.

Особый интерес представляет создание multifункциональных композитов, в которых углеродная матрица обеспечивает развитую поверхность и пористую структуру, а оксидная фаза формирует дополнительные химически активные центры.

Такой подход создаёт возможность целенаправленного регулирования адсорбционных свойств материалов в зависимости от состава газовой среды.

В дальнейшем важной задачей остаётся установление взаимосвязи «состав – структура – поверхностные свойства – адсорбционная способность», что может служить основой для направленной разработки углерод–оксидных материалов для очистки газовых потоков.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Углеродные нанокompозиты с оксидами металлов представляют перспективное направление развития материалов для удаления газообразных загрязнителей. Сочетание пористой углеродной основы с оксидной фазой позволяет объединить физические и химические механизмы взаимодействия с газовой средой.

Литературные данные показывают возможность применения таких материалов для удаления CO_2 и H_2S . Эффективность композитов определяется совокупностью факторов, включая природу оксида металла, характеристики пористой структуры, распределение оксидной фазы и химические свойства поверхности, а также условия проведения процесса.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на установление взаимосвязи «состав – структура – поверхностные свойства – адсорбционная способность», повышение стабильности и регенерируемости материалов, а также оптимизацию состава углерод–оксидных композитов. Это создаёт научную основу для последующей разработки multifunctional материалов на основе оксидов металлов и активированного угля для очистки газовых потоков.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Cesar R., Marques P. J. L., Tavares J. R. A. Biogas Refining: A Review on Advances in Metal-Oxide-Modified Activated Carbon for H_2S and CO_2 Removal. *Energy Fuels* 9 January 2025; 39 (1): 39–71. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c03493>
2. Kırbıyık Kurukavak Ç., Büyükbekar B. Z., Ersöz M. PAN-based activated carbon nanofiber/metal oxide composites for CO_2 and CH_4 adsorption: influence of metal oxide. *Turkish Journal of Chemistry*, 2021, 45(3), 914–926. DOI: 10.3906/kim-2012-37.
3. S. Cimino, L. Lisi, A. Erto, F.A. Deorsola, G. de Falco, F. Montagnaro, M. Balsamo, Role of H_2O and O_2 during the reactive adsorption of H_2S on CuO-ZnO /activated carbon at low temperature. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, 294, <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109949>
4. Shanshan Chen, Yiyue Guo, Jianan Zhang, Yingchun Guo, Xiaoyi Liang, CuFe_2O_4 /activated carbon adsorbents enhance H_2S adsorption and catalytic oxidation from humidified air at room temperature. *Chemical Engineering Journal*, Volume 431, Part 2, 2022, 134097, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134097>