

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА КАТАЛИТИЧЕСКИХ ХЕМОСОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ТИТАНА

**Н.В. Сальникова, Е.П. Смирнов, Д.А. Прозоров,
А.В. Афинеевский, Д.В. Смирнов[✉], К.А. Никитин**
Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ),
г. Иваново, Россия
[✉] morgandvs37@gmail.com

Аннотация. В работе были исследованы синтез и свойства каталитических хемосорбентов на основе диоксида титана с добавками ZnO и γ -Al₂O₃. Цель работы заключалась в том, чтобы получить хемосорбенты с заданными эксплуатационными характеристиками и оценить их потенциал в реакциях деструктивного гидрирования сероорганических соединений. Сероёмкость и гидрирующая способность были измерены статическим методом по адсорбции сероуглерода. Текстурные и морфологические характеристики были определены с использованием рентгенофазового анализа, низкотемпературной адсорбции/десорбции азота и растровой электронной микроскопии. Также было установлено, что добавление оксида алюминия не давало дополнительных рефлексов на рентгенограмме, в отличие от введения оксида цинка. Было установлено, что добавление оксида цинка значительно увеличивало значения удельной поверхности, причём в разы больше ожидаемой, согласно закону аддитивности. И напротив, добавление оксида алюминия не давало ожидаемого прироста площади удельной поверхности. И то, и другое было объяснено через активное взаимодействие фаз. Установлены соотношения компонентов для получения хемосорбентов, обладающих оптимальными прочностными свойствами. Обнаружено, что композит, состоящий из оксидов титана и алюминия, более устойчив к осернению, чем с добавками оксида цинка. Методами РЭМ и низкотемпературной адсорбции/десорбции азота была подтверждена мезопористая структура исследованных образцов, при этом образец, содержащий γ -Al₂O₃, показал более выраженную десорбционную ветвь и поверхность, состоящую из сферических образований, расположенных в регулярном порядке. Образец с оксидом цинка имел в своем объеме щелевидные поры. Проведено гидрирование тиофена газообразным водородом на исследуемых композитах. Сделан хроматографический анализ получаемого продукта. Доказано, что композиты на основе оксидов титана, цинка и алюминия обладают не только сорбционными свойствами по отношению к сероорганическим соединениям, но также и катализируют их деструктивное гидрирование. Проведенный эксперимент дает представление о синтезе и свойствах каталитических хемосорбентов на основе диоксида титана, подчеркивая влияние добавок и их потенциал для реакций восстановления сероорганических соединений.

Ключевые слова: хемосорбент, диоксид титана, оксид цинка, оксид алюминия, сероёмкость, деструктивное гидрирование, сорбция

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР (Тема № FZZW-2024-0004). План работ согласован с НИР Научного совета РАН по физической химии на 2024.

Для цитирования: Синтез и свойства каталитических хемосорбентов на основе оксида титана / Н.В. Сальникова, Е.П. Смирнов, Д.А. Прозоров и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2024. Т. 16, № 1. С. 118–127. DOI: 10.14529/chem240109

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF CATALYTIC CHEMISORBENTS BASED ON TITANIUM OXIDE

N.V. Salnikova, E.P. Smirnov, D.A. Prozorov,
A.V. Afineevskiy, D.V. Smirnov[✉], K.A. Nikitin
Ivanovo State University of Chemical Technology (ISUCT), Ivanovo, Russia
[✉] morgandvs37@gmail.com

Abstract. In this work, we studied the synthesis and properties of catalytic chemisorbents based on titanium dioxide with additions of ZnO and γ -Al₂O₃. The goal was to obtain chemisorbents with desired performance characteristics and evaluate their potential in destructive hydrogenation of organosulfur compounds. Their sulfur capacity and hydrogenating capacity were measured by the static method with carbon disulfide absorption. Textural and morphological characteristics were determined with the use of X-ray phase analysis, low-temperature nitrogen adsorption/desorption, and scanning electron microscopy. It was also found that addition of alumina did not give additional reflections on the X-ray pattern, in contrast to introduction of zinc oxide. It was found that addition of zinc oxide significantly increased the values of the specific surface area, many times more than expected, according to additivity principle. Conversely, addition of alumina did not give the expected increase in surface area. The one and the other were explained through active interaction of phases. The ratios of components for obtaining chemisorbents with optimal strength properties were established. It was found that a composite consisting of titanium and aluminum oxides was more resistant to sulfurization than one with additions of zinc oxide. SEM and low-temperature nitrogen adsorption/desorption methods confirmed the mesoporous structure of the studied samples, while the sample containing gamma alumina showed a more pronounced desorption branch together with the surface consisting of spherical formations arranged in a regular order. The sample with zinc oxide had slit-like pores in its volume. Hydrogenation of thiophene with gaseous hydrogen was carried out for the studied composites. Chromatographic analysis of the resulting product was performed. It was proven that composites based on titanium, zinc, and aluminum oxides not only had sorption properties with respect to organosulfur compounds, but also catalyzed their destructive hydrogenation. Thus, it was established that the studied samples were chemisorbents. The study provides insight into synthesis and properties of catalytic titania-based chemisorbents, highlighting the influence of additives and their potential for organosulfur reduction reactions.

Keywords: chemisorbent, titanium dioxide, zinc oxide, aluminum oxide, sulfur capacity

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment for research (Topic No. FZZW-2024-0004). The work plan has been agreed with the Research of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Physical Chemistry for 2024.

For citation: Salnikova N.V., Smirnov E.P., Prozorov D.A., Afineevskiy A.V., Smirnov D.V., Nikitin K.A. Synthesis and properties of catalytic chemisorbents based on titanium oxide. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2024;24(1):118–127. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem240109

Введение

На сегодняшний день наблюдается большой практический и научный интерес к материалам, в состав которых входит оксид титана (TiO₂). Материалы на его основе находят широкое применение при производстве солнечных элементов, просветляющих и самоочищающихся покрытий, в фотокатализе, а также являются активными компонентами в газовых сенсорах. Дополнительно можно отметить, что оксид титана имеет высокую химическую стабильность, термическую стойкость и не является токсичным для человека, что делает его безопасным для использования в различных технологических процессах. Благодаря этим свойствам материалы на основе диоксида титана также применяются в производстве пищевых добавок, косметических средств и медицинских препаратов. Наноструктурированные материалы на основе TiO₂ обладают высокой поверхностной активностью, что приводит к улучшению их каталитических свойств. Благодаря этому такие материалы нашли применение в качестве катализаторов для

различных реакций, включая окисление органических соединений, процессы гидрирования, а также в фотокатализе [1–12].

Одной из наиболее быстро развивающихся сфер применения диоксида титана является очистка природного газа от соединений серы. Об этом свидетельствует большое количество упоминаний в научных публикациях различных авторов [13–16]. В этих работах показана высокая эффективность катализаторов и хемосорбентов на основе TiO_2 в реакции газоочистки от сероводорода и сероорганических соединений. Для данного процесса катализатор должен обладать высокой адсорбционной активностью к соединениям, содержащим в своём составе серу, а также, исходя из условий его эксплуатации, выдерживать высокие механические нагрузки для предотвращения разрушения гранул.

Целью данной работы являлось получение хемосорбентов на основе диоксида титана с необходимыми эксплуатационными характеристиками путём внесения добавок ZnO и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, а также проверка возможности протекания реакций восстановления сероорганических соединений на исследуемых хемосорбентах.

Экспериментальная часть

В данной работе для анализа структуры образованных сорбентов применяли следующие физико-химические методы анализа.

Рентгенофазовый (РФА) анализ проводили на дифрактометре Bruker D8 Advance с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения ($\lambda = 0,15406$ нм, напряжение 40 кВ, 20 мА, углы снятия $2\Theta = 10\text{--}80^\circ$, скорость сканирования $4^\circ/\text{мин}$, дискретность – $0,01^\circ$). Для идентификации данных рентгенофазового анализа использовалась кристаллографическая база данных МИНКРИСТ.

Удельную поверхность определяли с помощью аппаратного комплекса Sorbi MS, с помощью низкотемпературной адсорбции азота, распределение пор рассчитывали по методу БЭТ.

Микрофотографии получали с помощью растрового электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN. По микрофотографиям с помощью режима SE определена морфология частиц катализатора, с помощью режима BSE – дисперсия агломератов оксидов металлов по размеру. Для определения среднего размера агломерата делалось 200 замеров диаметра частицы.

В качестве стационарного лабораторного прибора циклического действия для измерения величины силы разрушения гранулы при определении её статической прочности согласно ГОСТ 21560.2-82 использовали измеритель прочности гранул ИПГ-1М АО «УНИХИМ с ОЗ» (Екатеринбург), диапазон измерения 5–200 Н.

Продукты гидрирования определяли по данным газового хроматографа «Кристаллюкс-4000М» с пламенно-ионизационным детектором. Для разделения экстрагента использовали капиллярную колонку TRB-PETROL 100 м × 0,25 мм × 0,5 мкм (100 % диметилполисилоксан). Параметры программы анализа: время анализа – 120 мин, начальная температура колонок – 35°C 15 мин, программированный нагрев – до 150°C со скоростью нагрева $5^\circ\text{C}/\text{мин}$, далее до 250°C в течение оставшегося времени анализа. Температура детектора – 270°C , температура испарителя – 270°C . Объем пробы, отобранной на анализ, 0,4 мкл.

В данной работе в качестве исходного сырья использовали диоксид титана марки х. ч., поставляемый в виде порошка с плотностью $1,55$ г/см³ и значением величины удельной поверхности 5 м²/г, ZnO и $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ марки х. ч., также поставляемые в виде порошка. Насыпная плотность оксидов соответственно $0,745$ и $1,215$ г/см³, значения величины удельных поверхностей составляли соответственно 45 и 297 м²/г.

Смешивание оксидов осуществили механохимическим способом [17, 18]. Приготовленную массу гранулировали, влажность массы составляла около 16 масс. %, далее производили сушку при 40°C в течение одного часа и прокаливали при 250°C в течение 2 часов [19]. Диаметр сформированных гранул составляет $5,0 \pm 0,5$ мм.

Сероемкость и гидрирующая способность образцов измерялась по поглощению сероуглерода статическим методом, схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Определение статической сероемкости проводили согласно методике [20], которая заключается в следующем. Гранулированный сорбент помещали в реактор 1, находящийся в электропечи 2 с регулируемой температурой. Тиофен перед работой заливали в испаритель 3, помещённый в водяной термостат 6. По достижении заданной температуры в реакторе температура в испарителе

поднималась до 50–62 °С, и пары тиофена проходили через слой поглотителя 4 (образца), где взаимодействуют с ним. Непрореагировавшие пары тиофена конденсируются в холодильнике, откуда с определённой периодичностью отбирали пробы для химического анализа (методом газовой хроматографии).

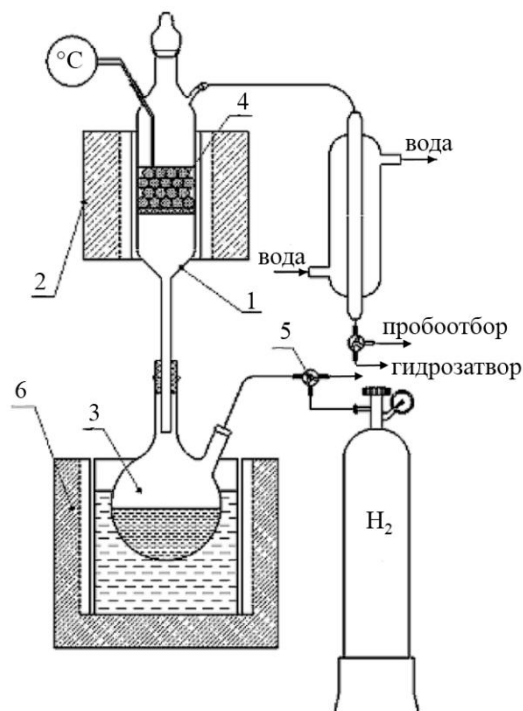


Рис. 1. Принципиальная схема установки для определения статической сероёмкости:
1 – реактор; 2 – электропечь; 3 – испаритель; 4 – образец поглотителя;
5 – ввод смеси водорода и инертного газа; 6 – водяной термостат

В качестве модельного серосодержащего соединения использовали тиофен, поскольку стехиометрические схемы превращения тиофена хорошо известны [21, 22]. На рис. 2 приведена схема превращения тиофена на алюмокобальтмолибденовом катализаторе [23], включающая в себя большинство наиболее часто встречающихся полупродуктов при восстановлении тиофена на переходных металлах и катализаторах на их основе. Для каждой системы такая схема будет иметь свои особенности. Так, при восстановлении тиофена на адсорбционно-каталитических системах, исследуемых в работе, состав продуктов реакции, определённый по данным газовой хроматографии, менялся в широких пределах в зависимости от состава исследуемой системы.

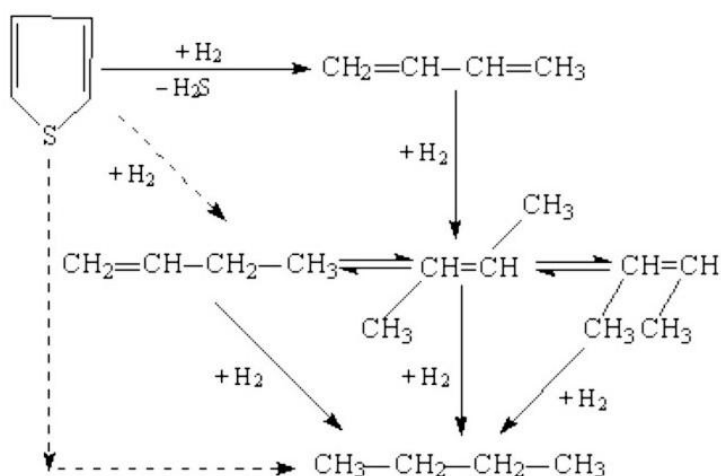


Рис. 2. Стехиометрическая схема превращения тиофена при 288 °С на алюмокобальтмолибденовом катализаторе

Обсуждение результатов

Для определения текстурных характеристик и фазовых составов исследуемых образцов использовали различные методы, в том числе рентгенофазовый анализ (рис. 3).

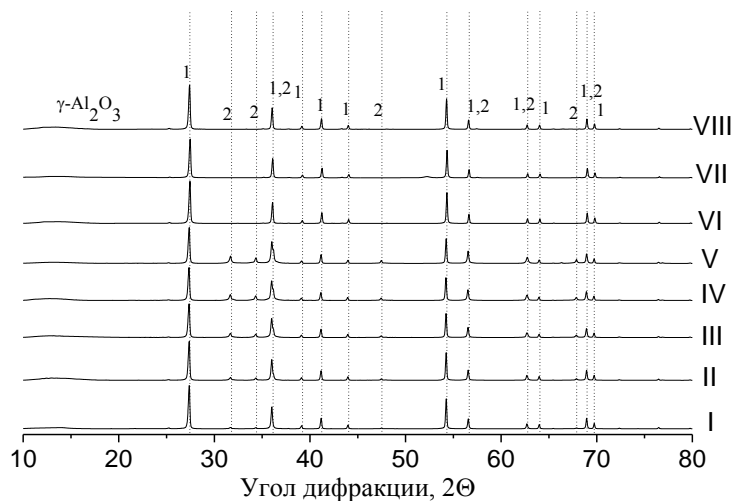


Рис. 3. Рентгенограмма исследуемых адсорбционных систем:
 I – TiO₂ + 10 мас. % ZnO; II – TiO₂ + 20 мас. % ZnO; III – TiO₂ + 30 мас. % ZnO;
 IV – TiO₂ + 40 мас. % ZnO; V – TiO₂ + 50 мас. % ZnO; VI – TiO₂ + 5 мас. % γ-Al₂O₃;
 VII – TiO₂ + 10 мас. % γ-Al₂O₃; VIII – TiO₂ + 15 мас. % γ-Al₂O₃.
 1 – TiO₂ (рутил); 2 – ZnO (цинкит)

Из представленного рисунка хорошо видны рефлексы, отвечающие исходным фазам оксидов титана и цинка, однако за фазу оксида алюминия рефлекс не обнаруживается. По данным рентгенофазового анализа были рассчитаны области когерентного анализа (табл. 1) по главному рефлексу TiO₂ (110).

Вместе с тем методом низкотемпературной адсорбции/десорбции азота было определено, что образцы с добавкой оксида цинка демонстрируют наибольшие значения величины площади удельной поверхности. При этом введение в состав системы оксида алюминия в количествах до 15 % не даёт ожидаемого аддитивного эффекта для значений величины площади удельной поверхности, несмотря на её размер в 297 м²/г у γ-Al₂O₃, рост площади незначительный. Так, ожидаемые значения величины площади удельной поверхности по закону аддитивности для 5, 10, 15 % добавок γ-Al₂O₃ были 19,6 м²/г, 34,2 м²/г, 48,8 м²/г соответственно. Очевидно, что активное взаимодействие оксидов металлов привело к снижению значений на 24 % для малого количества алюминия и на 64 % – для большого. Однако было выявлено, что внесение γ-Al₂O₃ даёт прирост размера кристаллитов на 10–50 % (см. табл. 1).

Таблица 1
Текстурные параметры сформованных каталитических хемосорбентов на основе оксида титана

№ образца	Состав образца	ρ , г/см ³	$S_{уд}$, м ² /г	ОКР, нм
#1	TiO ₂ + 10 % ZnO	0,79	15,4	48,2
#2	TiO ₂ + 20 % ZnO	0,94	17,8	51,3
#3	TiO ₂ + 30 % ZnO	0,78	18,35	48,2
#4	TiO ₂ + 40 % ZnO	0,81	20,46	45,4
#5	TiO ₂ + 50 % ZnO	0,80	19,9	44,1
#6	TiO ₂ + 5 % γ-Al ₂ O ₃	0,85	14,93	58,9
#7	TiO ₂ + 10 % γ-Al ₂ O ₃	0,76	17,25	79,5
#8	TiO ₂ + 15 % γ-Al ₂ O ₃	0,69	17,8	51,3

Измерение прочности гранул выявило увеличение прочности при высоком проценте добавления оксида цинка (табл. 2). Добавление в состав хемосорбента оксида алюминия не принесло ожидаемого результата по показателям прочности гранул.

Таблица 2
Прочность гранул титанового поглотителя
с добавками оксидов цинка и алюминия*

Добавка Ее количество	ZnO	γ -Al ₂ O ₃
5 % масс.	–	5,66
10 % масс.	5,48	9
15 % масс.	–	9,36
20 % масс.	8,7	–
30 % масс.	10,68	–
40 % масс.	14,74	–
50 % масс.	13,88	–

* Прочность измерена в ньютонах.

«–» – не исследовалась.

Образцы хемосорбентов после процесса осернения были исследованы с применением растровой электронной микроскопии. Примеры полученных микрофотографий представлены на рис. 4.

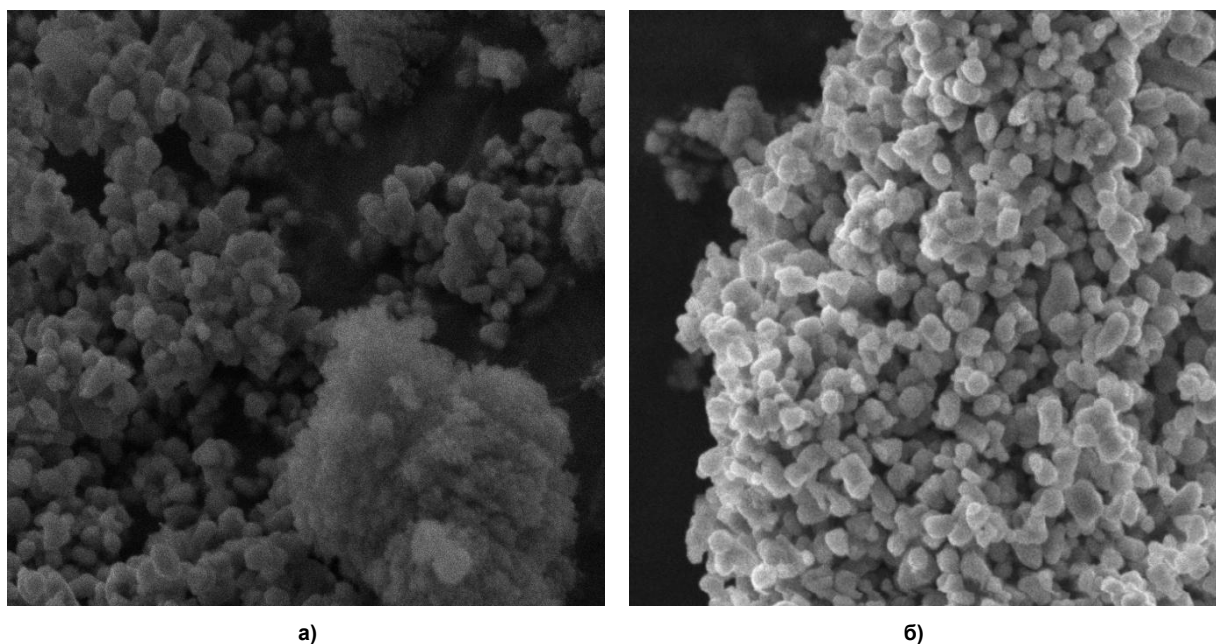


Рис. 4. Микрофотографии исследуемых образцов после осернения (ускоряющее напряжение 5 кВ, детектор SE (режим съемки: контраст по топографии), размер видимого поля 6,28 мкм):
а – образец I (TiO₂ + 10 % ZnO); б – образец II (TiO₂ + 15 % Al₂O₃)

Образец с добавками оксида алюминия (рис. 4б, образец II) представляет собой агломераты, состоящие из отдельных чётко очерченных частиц средним размером 200 нм. Тогда как в случае образца с добавками оксида цинка наблюдается два вида агломератов. Первый вид по морфологии близок к образцу II на рис. 4, с тем лишь отличием, что агломераты больше подвержены распаду на отдельные частицы, из которых они состоят. Второй вид представляет собой аморфные кораллоподобные агломераты размером 2 мкм и больше.

На рис. 5 представлены изотермы адсорбции/десорбции азота и гистограммы распределения пор по радиусу.

Метод низкотемпературной адсорбции/десорбции азота позволил измерить значения величины площади удельной поверхности, а также получить гистограммы распределения пор по радиусу (см. рис. 5).

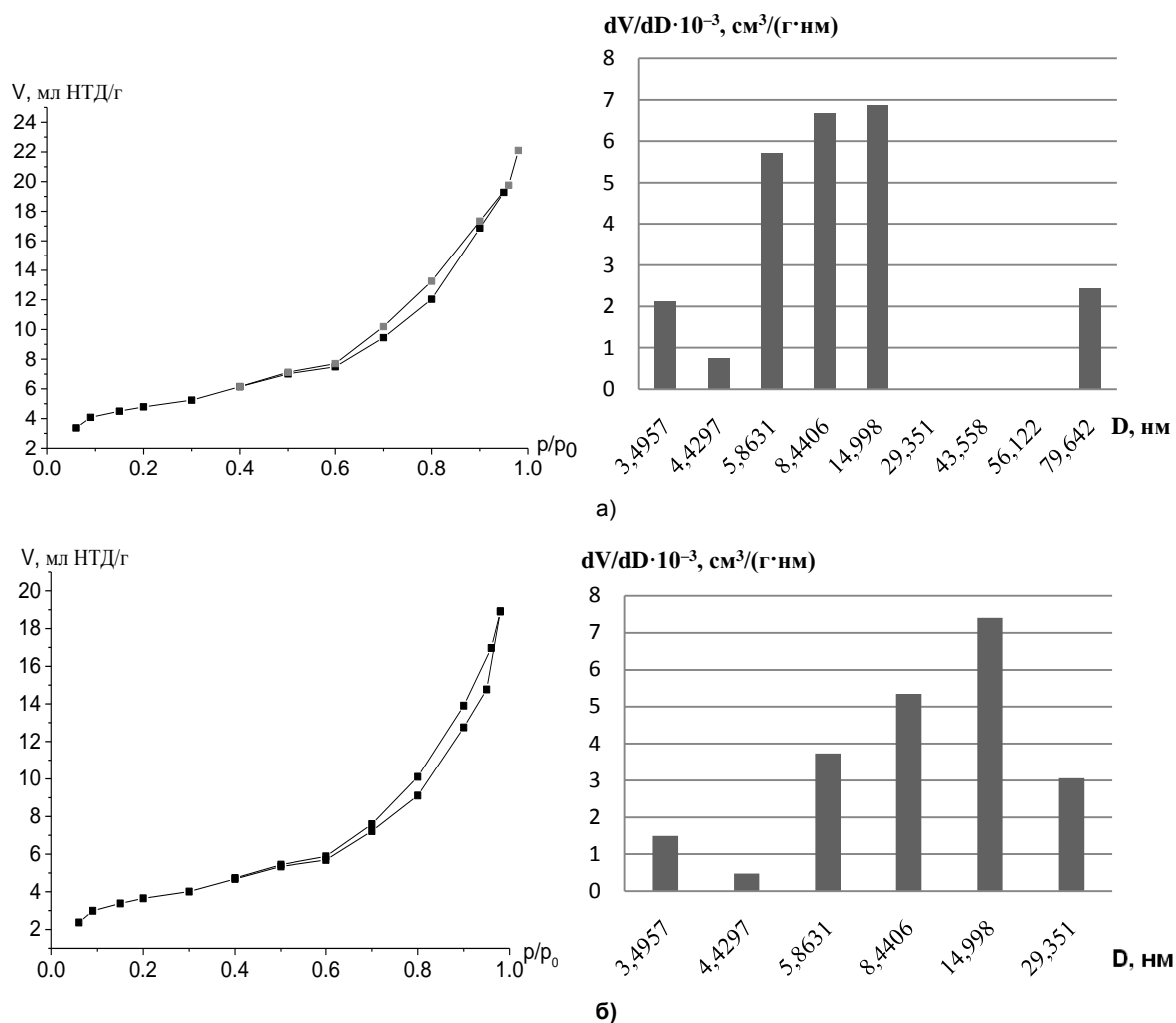


Рис. 5. Изотермы низкотемпературной адсорбции/десорбции азота исследуемых образцов и гистограммы распределения пор по радиусу: а – $\text{TiO}_2 + 30\% \text{ZnO}$; б – $\text{TiO}_2 + 5\% \text{Al}_2\text{O}_3$; V – удельный объем монослоя, мл НТД/г (миллилитры при нормальной температуре десорбции на грамм адсорбента); p/p_0 – парциальное давление (в долях от единицы); D – ширина пор; dV/dD – производная зависимости объема пор от их ширины, отнесенная к массе адсорбента

Полученные изотермы позволяют сделать вывод о мезопористой структуре исследуемых образцов. Также если обратить внимание на процесс формирования петель гистерезиса во время исследования образцов, можно отметить различия. Они заключаются в следующем: образец, в составе которого присутствует $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, отличается более выраженной ветвью десорбции, что соответствует типу петель H1 и говорит об однородности поверхности, состоящей из сферических образований в довольно регулярном массиве. Что касается образца, в состав которого входит оксид цинка, то его изотерму можно отнести к типу H3, что говорит о наличии щелевидных пор в объеме образца. Таким образом это хорошо согласуется с данными, полученными методом растровой электронной микроскопии.

Для образцов, представленных в табл. 1, была измерена каталитическая активность в процессе гидрирования тиофена. В табл. 3 представлены составы продуктов реакции, полученные в результате такого исследования, также для сравнения там указаны и данные литературы для гидрирования тиофена на $\text{CoMo}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ [24] и на $\text{ZnO}/0,32\% \text{CuO}$, 350 °C [25]. Оценка эффективности этих систем при хемосорбционной очистке газов от тиофена заключалась в анализе времени выходов и площади пиков на хроматограммах, соответствующих основным участникам реакции. Основные компоненты включают в себя сульфиды, сульфоксиды и сульфоны, которые образуются в процессе реакции гидрирования тиофена в присутствии катализатора.

Таблица 3

Состав продуктов гидроочистки с использованием различных адсорбционных и каталитических систем

Продукты	CoMo/ γ -Al ₂ O ₃ , 288 °C [17]	ZnO/0,32 % CuO, 350 °C [18]	№ образца*							
			#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Бутен-1	47,5	5,21	–	–	16,87	–	–	–	–	–
Бутадиен	2,2	3,65	–	–	–	–	–	6,19	91,49	–
Бутан	6,2	следы	30,99	34,61	–	–	–	–	–	30,62
<i>цис</i> -Бутен-2	19,8	следы	–	–	–	33,8	43,92	–	–	–
Тиофен	–	84,31	–	–	–	17,16	–	–	–	–
2,3 дигидротиофен	–	2,05	–	22,54	–	–	–	68,08	–	–
2,5 дигидротиофен	–	следы	–	–	–	22,89	–	–	–	–
Другие продукты реакции	нет	нет	да	да	да	да	да	да	да	да

* Номера образцов совпадают с номерами, указанными в табл. 1.

«–» – не обнаружено.

Таким образом, составы продуктов деструктивной гидрогенизации тиофена водородом при атмосферном давлении на системах, содержащих оксид титана, приведенные в табл. 3, доказывают протекание не только адсорбционных, но и гидрирующих процессов.

Заключение

В работе получен ряд гранулированных каталитических хемосорбентов. На основании оценки прочности гранул можно заключить, что оптимальными являются составы композитов с добавкой 10 % ZnO и с добавкой 15 % γ -Al₂O₃. Также было установлено, что с добавкой γ -Al₂O₃ композиты более устойчивы к осернению, чем с добавкой оксида цинка, морфология поверхности практически не претерпевает изменений при многократных повторениях процесса поглощения сероводорода. Образцы состава TiO₂ с добавкой 10 % ZnO и с добавкой 15 % γ -Al₂O₃ показали сероемкость на уровне 24,7 мас. %.

По данным РЭМ и анализа данных низкотемпературной адсорбции газа методом БЭТ было установлено, что частицы, содержащие оксид алюминия, имеет более округлую форму и регулярны в массиве, по сравнению с частицами, содержащими оксид цинка, которые имеют большее количество щелевидных пор.

Составы продуктов реакции восстановления тиофена, представленные в табл. 3, позволяют судить о каталитических и адсорбционных свойствах исследуемых систем. Газохроматографический анализ показал образование сульфидов, сульфоксидов и сульфонов, которые являются ключевыми участниками реакции гидрирования тиофена в присутствии катализатора. Эти результаты подтверждают протекание процессов как адсорбции, так и гидрирования в системах, содержащих оксид титана.

Таким образом, в проведенном авторами исследовании успешно синтезированы и охарактеризованы каталитические хемосорбенты на основе диоксида титана. Полученные данные позволяют судить о текстурных свойствах, характеристиках поверхности и эффективности изученных хемосорбентов при очистке газов от тиофена. Исследование способствует пониманию принципа подбора стадий синтеза хемосорбентов и обеспечивает основу для дальнейшей оптимизации синтеза.

Список источников

1. Afzal A., Habib A., Ulhasan I. et al. // *Frontiers in Materials*. 2021. No. 8. P. 1. DOI: 10.3389/fmats.2021.687059.
2. Gardon M., Guilemany J.M. // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2013. No. 24. P. 1410. DOI: 10.100/s10854-012-0974-4.
3. Toudjine S., Boulkadid M.K., Trache D. et al. // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. P. 1. DOI: 10.100/s1093-023-12185-2.

4. *Skocaj M., Filipic M., Petkovic J. et al.* // Radiology and oncology. 2011. V. 45(4). P. 227. DOI: 10.2478/v10019-011-0037-0.
5. *Tian X., Cui X., Lai T. et al.* // Nano Materials Science. 2021. V. 3(4). P. 390. DOI: 10.1016/j.nanoms.2021.05.011.
6. *Егельский И.В., Пугачевский М.А., Мамонтов В.А. и др.* // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11(4). С. 108. DOI: 10.21869/2223-1528-2021-11-4-108-122.
7. *Егельский И.В., Мартынова Е.А., Пугачевский М.А.* // Сборник научных статей 2-й международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства». 2022. С. 151. EDN: UMWZTS.
8. *Кайдарова А.О., Шмелев А.А., Шафигулин Р.В.* // XLVIII Самарская областная студенческая научная конференция. 2022. Т. 1. С. 257. EDN: MFYEVR.
9. *Гасанов Т.Ш., Готовцев П.М., Гайнанова А.А. и др.* // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36, № 7. С. 46. EDN: CJLWBH.
10. *Коботаева Н.С., Скороходова Т.С.* // Химия в интересах устойчивого развития. 2019. № 27. С. 13. DOI: 10.15372/KhUR20190102.
11. *Адамчук Ю.О., Богуславский Л.З., Ющишина А.Н. и др.* // Электронная обработка материалов. 2023. Т. 59, № 2. С. 48. DOI: 10.52577/eom.2023.59.2.48.
12. *Крысанова В.А., Беликов М.Л., Сафарян С.А.* // Труды Кольского научного центра РАН. Химия и материаловедение. 2021. Т. 11, № 2. С. 131. DOI: 10.37614/2307-5252.2021.2.5.027.
13. *Афанасьев С.В., Садовников А.А., Гартман В.Л. и др.* // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2018. Т. 82, № 10. С. 88. EDN: VMQAUК.
14. Композиция на основе диоксида титана и оксида алюминия, способ ее получения и ее применение: пат. 2574599 С1 Рос. Федерация N 2015102649/04; заявл. 27.01.2015; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4. 24 с.
15. Способ удаления диоксида серы из газовых потоков с применением диоксида титана в качестве катализатора: пат. 2671336 С2 Рос. Федерация N 2015141695; заявл. 03.03.2014; опубл. 30.10.2018, Бюл. № 10. 19 с.
16. *Хайруллин С.Р., Керженцев М.А., Яшник С.А. и др.* // Химия в интересах устойчивого развития. 2015. Т. 23, № 4. С. 469. DOI: 10.15372/KhUR20150417.
17. *Prokof'ev V.Y., Gordina N.E.* // Glass and ceramics. 2012. V. 69(1-2). P. 65. DOI: 10.1007/s10717-012-9416-2.
18. *Прокофьев В.Ю., Гордина Н.Е.* // Стекло и керамика. 2014. Т. 87, № 1. С. 11. EDN: RUAUVV.
19. *Gordina N.E., Prokof'ev V.Y., Il'in A.P.* // Glass and Ceramics. 2005. Т. 62, № 9-10. С. 282. DOI: 10.1007/s10717-005-0092-3.
20. *Афанасьев С.В., Садовников А.А., Гартман В.Л., Обысов А.В., Дульнев А.В.* Промышленный катализ в газохимии: под ред. д.т.н. С.В. Афанасьева: моногр. Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2018. 160 с.
21. *Potapenko O.V., Doronin V.P., Sorokina T.P. et al.* // Applied Catalysis B: Environmental. 2012. No. 117. P. 177. DOI: 10.1016/j.apcatb.2012.01.014.
22. *Ruiz-Martínez J., Buurmans I.L., Knowles W.V. et al.* // Applied Catalysis A: General. 2012. No. 419. P. 84. DOI: 10.1016/j.apcata.2012.01.016.
23. *Апостолов С.А., Бабаи С.Е., Белкина Е.И., Беренц А.Д.* Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Часть I. СПб.: НПО «Профессионал», 2002. 988 с.
24. *Гейтс Б.К.* Химия каталитических процессов: учебник для вузов. М.: Химия, 1981. 550 с.
25. *Афинецкий А.В., Прозоров Д.А., Смирнов Д.В. и др.* // Российский химический журнал. 2022. Т. 66, № 4. С. 55. DOI: 10.6060/rcj.2022664.8.

Информация об авторах:

Сальникова Наталья Владимировна – студент кафедры технологии керамики и электрохимических производств, Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ), Иваново, Россия. E-mail: nata_salnikova@list.ru

Смирнов Егор Павлович – магистрант кафедры технологии керамики и электрохимических производств, Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ), Иваново, Россия. E-mail: smirnov12egor@mail.ru

Прозоров Дмитрий Алексеевич – доктор химических наук, заведующий научно-исследовательской лаборатории синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ), Иваново, Россия. E-mail: prozorovda@mail.ru

Афинеевский Андрей Владимирович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ), Иваново, Россия. E-mail: afineevskiy@mail.ru

Смирнов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ), Иваново, Россия. E-mail: morgandvs37@gmail.com

Никитин Кирилл Андреевич – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ), Иваново, Россия. E-mail: kirillnikitin09@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 24 октября 2023 г.
The article was submitted 24 October 2023.*