УДК 546.05
DOI: 10.17223/24135542/17/2

А.В. Ливанова, Ж.Б. Будаев, Е.П. Мещеряков, И.А. Курзина

Национальный исследовательский Томский государственный университет, (г. Томск, Россия)

Композитный адсорбент на основе оксида алюминия, модифицированный хлоридом кальция

Синтезирована серия образцов двухкомпонентных адсорбентов состава $CaCl_2/Al_2O_3$ с содержанием гигроскопической соли $CaCl_2$ от 8,6 до15,5 мас. %. Образцы получены способом пропитки из избытка водного раствора $CaCl_2$ гранул оксида алюминия, которые имели форму цилиндра со средними размерами: длина l = 4–5 мм, диаметр d = 3,0 мм. Исходный оксид алюминия был получен с применением метода центробежной термической активации гидраргиллита (гиббсита). После гидратации продукта центробежной активации в кислой среде, проведения его сушки, помола и пептизации были сформованы гранулы оксида алюминия с последующей прокалкой экструдата при температуре 500°С в течение 4 ч. Полученный исходный оксид представляет собой смесь γ-Al_2O_3 (90 мас. %) и байерита (10 мас. %). Исследованы изменения фазового состава и текстурных характеристик модифицированных гигроскопической солью образцов в зависимости от содержания в них $CaCl_2$. Отмечено, что после модифицирования образцов на дифрактограмме исчезает фаза байерита. Величина удельной поверхности уменьшается с увеличением содержания $CaCl_2$ в образцах от 290 $м^2/г$ у исходного образца до 96 $м^2/г$ для образца с максимальным содержанием $CaCl_2$. При этом в образцах увеличивается средний диаметр пор и уменьшается значение суммарного объема пор, что может быть связано с блокированием части пор на стадии синтеза из-за осаждения в них соли при сушке адсорбента. Механическая прочность гранул с низким содержанием соли меньше, чем у исходного образца, но с ростом содержания соли наблюдается ее увеличение до 6,8 МПа. В отличие от исходного образца для всех модифицированных образцов адсорбционная емкость по парам воды не достигает равновесного значения даже по истечении более 5 ч с момента начала эксперимента. Это может быть связано с протеканием медленной химической реакции между водой и дисперсной солью. Для композитных образцов наблюдалось увеличение адсорбционной емкости по воде с увеличением содержания в нем гигроскопической соли $CaCl_2$, что свидетельствует о ее определяющей роли в процессе сорбции воды. Достаточно высокие значения констант скорости, прочностных и адсорбционных характеристик оказались характерны для образцов с содержанием соли $CaCl_2$ от 13,8 мас. % и выше.

Ключевые слова: *гигроскопическая соль, оксид алюминия, адсорбент, пропитка, адсорбционная емкость, пары воды.*

Введение

Адсорбенты, применяемые в процессах осушки технологических газов, должны обладать высокой адсорбционной емкостью, невысокой температурой регенерации и устойчивостью к рабочей среде. Оксид алюминия

по причине устойчивости к капельной влаге вызывает широкий интерес как адсорбент для глубокой осушки влагосодержащих газов, однако его адсорбционная емкость по отношению к воде меньше, чем у ряда других используемых адсорбентов-осушителей, например цеолитов.

Давно известно, что классические адсорбенты (активированный уголь, силикагель, оксид алюминия, цеолит) могут выступать в роли матрицы для различных гигроскопических неорганических солей [1, 2]. При этом свойства композитных систем могут существенно отличаться от индивидуальных свойств составляющих их компонентов. Некоторые классические адсорбенты в совокупности с гигроскопическими солями проявляют хорошую осушающую способность и стабильность в многоцикловых процессах осушки газов [2]. Осушающее действие таких композитных материалов, получивших название сорбентов типа «соль в пористой матрице», основано на совмещении принципов адсорбции за счет развитой удельной поверхности и объемного поглощения воды раствором гигроскопичной соли. От характеристик используемой матрицы зависят формирующийся размер частиц соли, ее поверхность и свойства, подвод теплоты по твердой фазе и транспорт газа по системе пор.

С помощью современной энергосберегающей технологии центробежной термической активации при варьировании условий проведения процесса могут быть сформованы гидроксиды и оксиды алюминия с различным содержанием аморфных и кристаллических фаз, обладающие развитой поверхностью и различным набором пор [3]. Актуальным поэтому представляется изучение влияния такой матрицы на характеристики адсорбентов состава $CaCl_2/Al_2O_3$, отличающихся содержанием гигроскопической соли.

Целью настоящей работы является исследование влияния модифицирующей добавки гигроскопической соли $CaCl_2$ на характеристики полученного композиционного материала.

Материалы и методы исследования

Для получения матрицы – оксида алюминия (АО), в качестве исходного сырья использовали продукт центробежной термической активации гидраргиллита (ЦТА ГГ), синтезированный в центробежном флашреакторе барабанного типа (установка ЦЕФЛАР™) [3, 4]. Гидратацию продукта ЦТА ГГ проводили в интервале температур 70–95°С при атмосферном давлении в течение 6 ч в кислой среде (pH = 2) в реакторе при постоянном перемешивании. После сушки продуктов гидратации при температуре 120°С в течение 24 ч их размалывали в шаровой мельнице в течение 8 ч. Стадии пептизации и формования проводили в смесителе с Z-образными лопастями, получая после продавливания пластичной массы через фильеру гранулы цилиндрической формы со средними размерами: длина l = 4–5 мм, диаметр d = 3,0 мм. После сушки гранул оксида алюминия на воздухе их прокаливали при температуре 500°С в течение 4 ч.

Получение образцов композитного адсорбента. Образцы композитных алюмооксидных адсорбентов получали способом пропитки из избытка раствора. Предварительно исходный оксид алюминия, а также гигроскопические соли прокаливали при температуре 200°С в течение 4 ч в муфельной электропечи. Затем гранулы оксида алюминия в количестве 250 г опускали в водный раствор соли (500 мл) необходимой концентрации. Полученную суспензию выдерживали в течение 24 ч при перемешивании, фильтровали и сушили при 200°С. При получении образцов с концентрацией больше 15 мас. % суспензию не фильтровали, а проводили упаривание при 120°С.

При таком способе получения в ходе установления равновесия активный компонент (ионы соли) перемещается из раствора в поры, взаимодействуя с поверхностью матрицы. При этом происходит электростатическое взаимодействие между ионами и заряженной поверхностью матрицы, адсорбция ионов на ее поверхности с образованием ионных пар, водородных связей, различных поверхностных комплексов. Также протекает поверхностно-индуцированный гидролиз, частичное растворение поверхности матрицы и образование смешанной твердой фазы [5, 6]. Так как адсорбция активного компонента на поверхности матрицы играет в этом методе определяющую роль, то такой способ нередко называют сорбционным.

Таким образом, получена серия образцов с концентрацией гигроскопической соли $CaCl_2$ в диапазоне от 8,6 до 15,5 мас. %.

Методы исследования. Содержание в образцах Са оценивали методом атомно-эмиссионной спектрометрии микроволновой плазмы (АЭС-МП, спектрометр Agilent 4100) с предварительным «вскрытием» анализируемой пробы в смеси кислот в системе микроволновой пробоподготовки. Затем по содержанию металла делался пересчет на содержание соли в адсорбенте. Исследование фазового состава и структурных параметров образцов проводилось на дифрактометре XRD-6000 на CuKα-излучении. Анализ фазового состава проведен с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Дифференциально-термический анализ (ДТА) исходного образца проводили на аппарате NETZSCH STA 409 PC/PG в диапазоне температур от 20 до 350°С со скоростью нагрева 30°С/10 мин в атмосфере аргона; навеска образца составляла 0,8 г, точность определения массовых потерь 0,5%. Определение удельной площади поверхности, пористости и среднего размера пор образцов оксида алюминия проводили на установке TriStar 3020. Прочность гранул адсорбентов измерялась на приборе ИПГ-1М. Эксперименты по изучению кинетики проводились на лабораторной установке с использованием весов Мак-Бена–Бакра [7]. Адсорбция паров воды проводилась из потока аргона, насыщенного парами воды, при отсутствии внешнедиффузионного торможения в слое адсорбента, при постоянной температуре (25°С) и влажности воздуха 100% на гранулах размером 0,5–1,0 мм. Перед проведением эксперимента образцы тренировали при температуре 200°С в течение 2 ч.

Результаты и обсуждение

Была получена серия образцов композитного адсорбента с различным содержанием гигроскопической соли в структуре: 8,6, 12,7, 13,8, 15,5 мас. % $CaCl_2$, которые мы обозначили 8 $CaCl_2$, 12 $CaCl_2$, 13 $CaCl_2$, 15 $CaCl_2$ соответственно.

Согласно результатам РФА исходный образец АО представляет собой смесь γ-Al_2O_3 (90 мас. %) и байерита (10 мас. %). Кроме этого был изучен фазовый состав композитных образцов с различным содержанием гигроскопической соли (рис. 1).

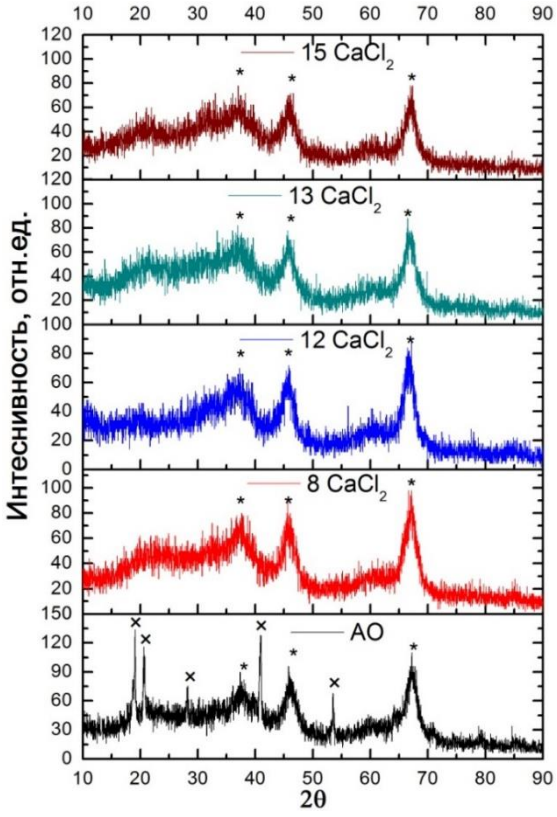
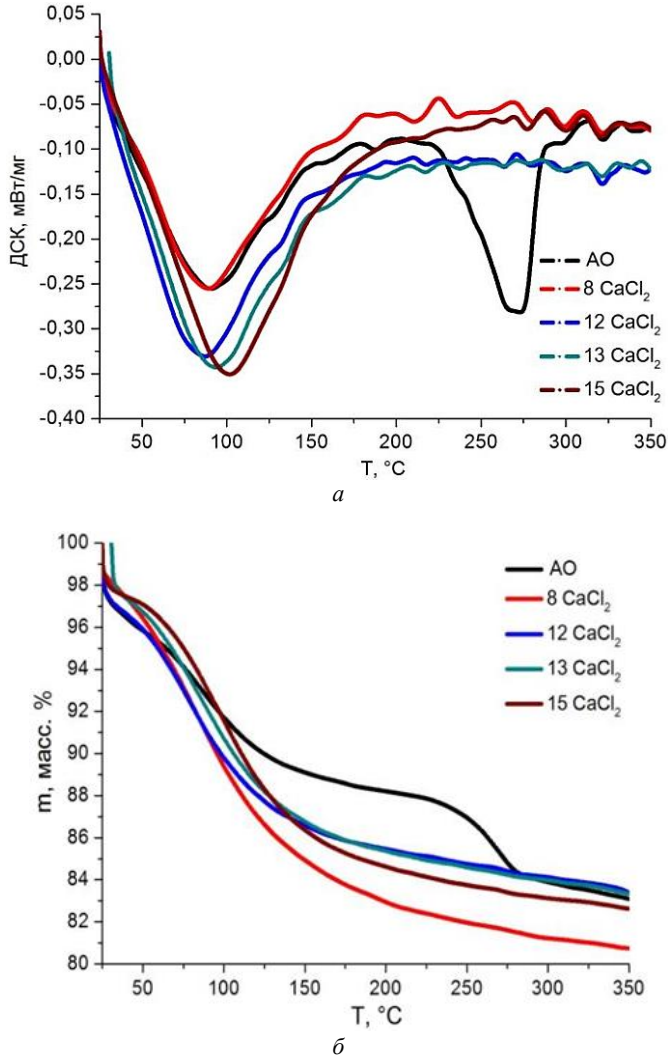


Рис. 1. Дифрактограмма для образца АО и образцов, модифицированных $CaCl_2$: * – характеристический сигнал γ-оксида алюминия; *x* – характеристический сигнал байерита

Из рис. 1 видно, что после нанесения гигроскопической соли на поверхность исходного образца на дифрактограмме пропадает фаза байерита. Возможно, гигроскопическая соль вступает в реакцию с гидроксильными группами байерита с образованием рентгеноаморфных алюминатов кальция [8]. Характерные пики фазы γ-Al_2O_3 не сдвигаются после пропитки

оксида алюминия гигроскопической солью. Это свидетельствует об отсутствии взаимодействия γ-Al_2O_3 с модификатором, т.е. в результате модификации новые фазы не образуются. Соль в образцах находится в аморфном состоянии, об этом свидетельствует широкое гало при 2θ = 10–30° на дифрактограммах модифицированных образцов. В указанном промежутке 2θ находятся характеристические сигналы кристаллических фаз хлорида кальция.

На рис. 2 представлены результаты термического анализа для образцов оксида алюминия, пропитанных $CaCl_2$.



а

б

Рис. 2. Термограммы для АО и образцов, импрегнированных хлоридом кальция: *а* – ДСК кривая; *б* – ТГ кривая

На кривой ДСК исходного образца (рис. 2, *а*) присутствует два ярко выраженных эндотермических эффекта в интервале температур 10–110 и 240–280°С, которые коррелируют с графиком изменения массы (рис. 2, *б*) в зависимости от температуры, имеющим две ступени при указанных температурах. Первый эндотермический эффект связан с удалением физически связанной воды из системы, второй – с дегидратацией байерита. Эндотермические эффекты дегидратации байерита при 270°С обусловлены формированием двух фаз: бемита и низкотемпературного γ-оксида алюминия. Для образцов, пропитанных $CaCl_2$, высокотемпературного пика не наблюдается, что, вероятно, связано с взаимодействием поверхностных гидроксильных групп с $CaCl_2$ и образованием аморфных алюминатов. Связи между изменением массы и концентрацией внесенной соли не выявлено, что может быть связано различной скоростью десорбции воды на образцах.

Текстурные характеристики синтезированных образцов приведены в табл. 1. Из данных, приведенных в таблице, видно, что удельная поверхность модифицированных образцов меньше, чем у исходного – 290 м^2/г, – и снижается с 225 до 96 м^2/г по мере увеличения концентрации соли в образце. Этот факт можно объяснить снижением суммарного объема пор в образцах после пропитки. Средний диаметр пор образцов при этом увеличивается. Важно отметить, что в качестве матрицы был использован пористый оксид алюминия с высокой механической прочностью – 7,1 МПа. Механическая прочность модифицированных образцов ниже по сравнению с исходным образцом, однако при этом растет с повышением содержания соли в образце.

Таблица 1

Текстурные характеристики исходного оксида алюминия и композитных адсорбентов

Образец	$S_{уд(BET)}$, м^2/г	Суммарный объем пор, см^3/г	Средний диаметр пор, нм	Механическая прочность, МПа
АО	290 ± 29	0,339	4,7	7,1 ± 0,5
8 $CaCl_2$	225 ± 23	0,288	5,1	4,1 ± 0,5
12 $CaCl_2$	182 ± 18	0,275	5,9	4,1 ± 0,3
13 $CaCl_2$	144 ± 15	0,214	5,9	4,9 ± 0,3
15 $CaCl_2$	96 ± 10	0,154	6,4	6,8 ± 0,6

Изотермы адсорбции-десорбции для всех образцов (рис. 3) согласно классификации ИЮПАК относятся к изотермам IV типа. Резкий подъем при низких относительных давлениях свидетельствует о наличие микропор во всех изученных образцах, петля гистерезиса указывает на наличие мезопор на поверхности адсорбентов и явление капиллярной конденсации. Можно отметить, что форма и размеры петли гистерезиса зависят от содержания гигроскопической соли в образце. С ростом содержания $CaCl_2$ размеры петли уменьшаются, свидетельствуя о снижении суммарного объема мезопор. По-видимому, при удалении влаги из раствора на стадии синтеза часть соли осаждается в порах оксида алюминия и блокирует их.

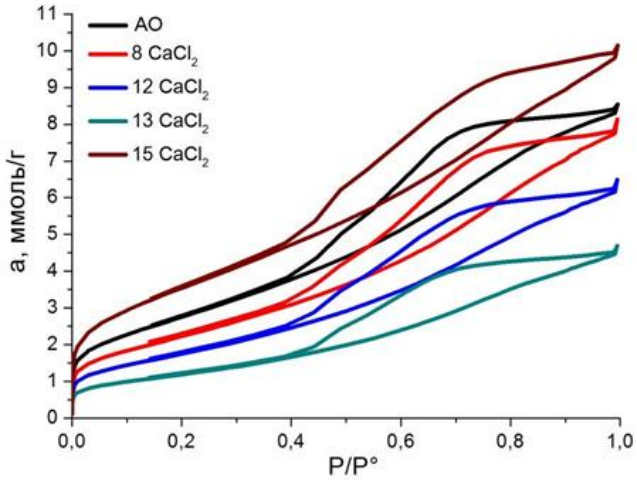


Рис. 3. Изотермы низкотемпературной адсорбции азота для образцов, пропитанных $CaCl_2$ и исходного оксида алюминия

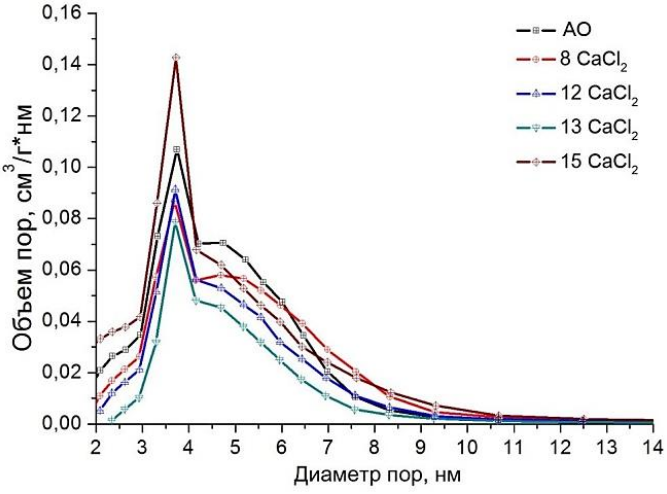


Рис. 4. Распределение пор по размерам для образцов, модифицированных $CaCl_2$ и исходного оксида алюминия

На рис. 4 представлено распределение пор по размерам для этих образцов. Из данного рисунка видно, что все адсорбенты имеют мелкие мезопоры с диаметром в интервале от 3 до 8 нм. Объем пор по мере увеличения содержания соли в образце уменьшается, а средний диаметр возрастает.

Результаты растровой электронной микроскопии (РЭМ). На рис. 5 представлены электронные изображения сечения гранул модифицированных образцов и изменения концентраций основных компонентов в системе

по ширине гранулы. Как можно видеть из рис. 5, поверхность исследованных образцов имеет развитую структуру макропор различного диаметра. Концентрация соли по ширине гранулы мало изменяется, соль входит глубоко вглубь и равномерно распределяется по грануле.

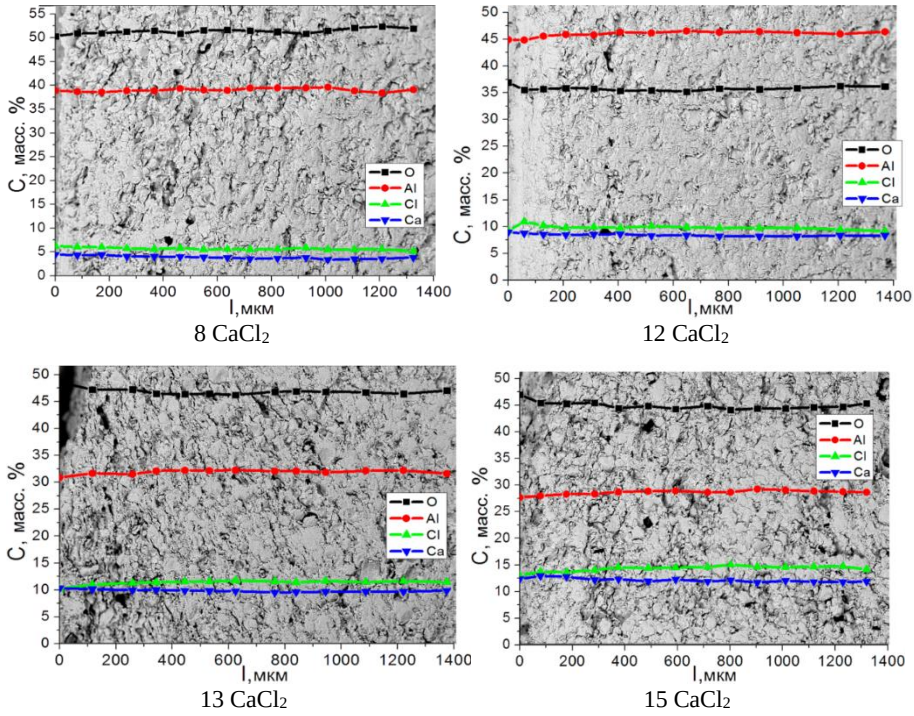


Рис. 5. РЭМ-изображение модифицированных образцов адсорбентов
и профиль изменения концентрации основных компонентов по ширине гранул

При изучении кинетики адсорбции паров воды при 100%-ной влажности и комнатной температуре было обнаружено [9], что кинетическая кривая для исходного образца приходит к насыщению за 200 мин. Кинетические кривые для модифицированных $CaCl_2$ образцов не достигают равновесия даже после 5 ч проведения процесса. В табл. 2 приведены значения равновесной адсорбционной емкости для исходного образца и величины адсорбционной емкости модифицированных образцов после 280 мин проведения процесса. Видно, что адсорбционная емкость композитных образцов увеличивается с ростом содержания соли. Этот эффект, а также значительное время, необходимое для достижения равновесия, ранее наблюдались в работе [10] и были объяснены протеканием медленной химической реакции между водой и дисперсной солью, из чего был сделан вывод, что для данного сорбента лимитирующей стадией сорбции может быть не только массоперенос, но и химическая твердофазная реакция паров воды с солью.

Таблица 2

Адсорбционные характеристики изученных образцов

Образец	*a*, г H_2O/г адс.	*A*, г/мин$^{1/2}$	R^{**}
АО	0,25	0,0199	0,990
8 $CaCl_2$	0,21*	0,0134	0,980
12 $CaCl_2$	0,24*	0,0146	0,996
13 $CaCl_2$	0,34*	0,0217	0,998
15 $CaCl_2$	0,40*	0,0263	0,996

* Значение адсорбционной емкости через 280 мин после начала процесса адсорбции.
** Коэффициент линейной корреляции.

Аппроксимация экспериментальных данных различными кинетическими уравнениями показала, что скорость процесса адсорбции хорошо описывается уравнением $a = A \cdot t^{1/2}$, где *a*, г/г адс. – количество адсорбированной воды за время *t*, мин; *A* – константа скорости г/мин$^{1/2}$. Значения константы скорости *A*, определенные из этого уравнения для изученных образцов, также приведены в табл. 2. Константа скорости также возрастает при увеличении концентрации $CaCl_2$ в адсорбенте.

Заключение

Для полученных методом пропитки из избытка раствора ряда образцов композиционных адсорбентов на основе оксида алюминия с содержанием гигроскопической соли $CaCl_2$, лежащем в интервале от 8,6 до 15,5 мас. %, были изучены физико-химические характеристики (текстурные характеристики, фазовый состав, изменения концентрации по ширине гранулы и др.). Показано, что соль равномерно распределяется в грануле оксида алюминия. В результате пропитки оксида алюминия с последующим термическим воздействием на полученный материал изменяется фазовый состав композитного адсорбента с переходом фазы байерита в рентгенаморфную фазу алюминатов кальция. При увеличении содержания $CaCl_2$ в образце уменьшаются удельная площадь поверхности и объем пор, увеличивается средний диаметр пор и возрастает механическая прочность композита. С ростом содержания соли в образце увеличивается адсорбционная емкость композита в изученном интервале концентраций соли, что свидетельствует о доминирующей роли $CaCl_2$ в процессе сорбции воды. Достаточно высокие значения констант скорости, прочностных и адсорбционных характеристик оказались характерны для образцов с содержанием соли $CaCl_2$ от 13,8 мас. %.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект № 0721-2020-0037).

Литература

1. Аристов Ю.И., Гордеева Л.Г. Адсорбенты «соль в пористой матрице»: дизайн фазового состава и сорбционных свойств // Кинетика и катализ. 2009. № 50 (1). С. 72–79.
2. Булучевский Е.А., Лавренов А.В., Дуплякин В.К. Сорбенты типа «соль в пористой матрице» в процессах переработки углеводородов // Российский химический журнал. 2007. № 51 (4). С. 85–92.

3. Кулько Е.В. и др. Получение оксидов алюминия на основе продуктов быстрого терморазложения гидраргиллита в центробежном флаш-реакторе. II. Структурные и текстурные свойства гидроксида и оксида алюминия, получаемых на основе продукта центробежно-термической активации гидраргиллита (ЦТА-продукта) // Кинетика и катализ. 2007. № 48 (2). С. 332–342.
4. Пат. РФ 2264589, F26BB7/00. Способ и устройство для импульсной тепловой обработки сыпучих материалов / В.С. Лахмостов [и др]; заявитель и патентообладатель Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. № 2004109970/06; заявл. 01.04.2004; опубл. 20.11.2005.
5. Neimark A.V., Kheifez L.I., Fenelonov V.B. Theory og preparation of supported catalysts // Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. 1981. Vol. 20. P. 439–450.
6. Jang H.M., Fuerstenau D.W. The specific adsorption of alkaline-earth cations at the rutile / water interface // Colloids Surfaces. 1986. Vol. 2. P. 235–257.
7. Решетников С.И., Ливанова А.В., Мещеряков Е.П., Курзина И.А., Исупова Л.А. Кинетические закономерности адсорбции на алюмооксидных осушителях, допированных катионами щелочных металлов // Журнал прикладной химии. 2017. Т. 90, № 11. С. 1451–1457.
8. Исмагилов З.Р., Шкрабина Р.А., Корябкина Н.А. Алюмооксидные носители: производство, свойства и применение в каталитических процессах защиты окружающей среды : аналит. обзор. Новосибирск : Ин-т катализа им. Г.К. Борескова, 1998. 82 с. (Сер. Экология. Вып. 50).
9. Budaev Z.B., Livanova A.V., Meshcheryakov E.P., Isupova L.A., Magaev O.V. Influence of the composition of the adsorbent “hygroscopic salt / aluminum oxide” on its physicochemical properties // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. Vol. 597. P. 1–8.
10. Глазнев И.С. Динамика поглощения воды в зерне и слое сорбентов $CaCl_2$ / силикагель и $CaCl_2$ /оксид алюминия : автореф. дис. ... канд. хим. наук. Новосибирск, 2006. 18 с.

Информация об авторах:
Ливанова Алеся Витальевна, аспирант Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: truelivanova@mail.ru
Будаев Жаргал Баирович, аспирант Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: budaev17@mail.ru
Мещеряков Евгений Павлович, кандидат химических наук, старший научный сотрудник отдела новых материалов для электротехнической и химической промышленности Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: meevgeni@mail.ru
Курзина Ирина Александровна, доктор физико-математических наук директор САЕ Институт «Умные материалы и технологии» Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kurzina99@mail.ru

Tomsk State University Journal of Chemistry, 2020, 17, 22–33. DOI: 10.17223/24135542/17/2

A.V. Livanova, Zh.B. Budaev, E.P. Mescheryakov, I.A. Kurzina

National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia)

Composite aluminum oxide adsorbent modified by calcium chloride

A series of samples of two-component adsorbents of the composition "$CaCl_2/Al_2O_3$" with the content of the hygroscopic salt $CaCl_2$ from 8.6 to 15.5 wt. % were synthesized. Samples were obtained by impregnation of aluminum oxide granules

from an excess of an aqueous solution of $CaCl_2$, which had the shape of a cylinder with average dimensions – length l = 4-5 mm, diameter d = 3.0 mm. The initial aluminum oxide was obtained using the method of centrifugal thermal activation of hydrargillite (gibbsite). After hydration of the product of centrifugal activation in an acidic environment, drying, grinding and peptising, aluminum oxide granules were formed, followed by calcination of the extrudate at a temperature of 500 °C for 4 hours. The resulting source oxide is a mixture of γ-Al_2O_3 (90 wt. %) and bayerite (10 wt. %). Changes in the phase composition and texture characteristics of samples modified with hygroscopic salt depending on their $CaCl_2$ content were studied. It is noted that after modification the samples of the diffraction pattern disappears at the phase bayerite. The specific surface area decreases with increasing $CaCl_2$ content in samples from 290 m^2/g for the initial sample to 96 m^2/g for the sample with the maximum $CaCl_2$ content. In the samples increases, the average pore diameter and decreases the value of total pore volume that may be due to blocking of the pores at the stage of synthesis due to deposition of salt during drying of the adsorbent. The mechanical strength of granules with a low salt content is less than that of the original sample, but with an increase in the salt content, its increase to 6.8 MPa is observed. In contrast to the original sample for all modified samples, the adsorption capacity for water vapor does not reach an equilibrium value even after more than 5 hours from the start of the experiment. This may be due to the occurrence of slow chemical reaction between water and the dispersed salt. For composite samples, an increase in the water adsorption capacity was observed with an increase in the content of the hygroscopic salt $CaCl_2$, which indicates its determining role in the water sorption process. Sufficiently high values of the speed constants, strength and adsorption characteristics were typical for samples with a salt content of CaCl2 from 13.8 wt. %. and higher.

Keywords: *hygroscopic salt, alumina, adsorbent, impregnation, adsorption capacity, water vapor.*

References

1. Aristov, Yu.I.; Gordeeva, L.G. "Salt in a porous matrix" adsorbents: Design of the phase composition and sorption properties. *Kinetics and Catalysis*. 2009, Vol. 50, *1*, 65–72.
2. Buluchevsky, E.A.; Lavrenov, A.V.; Duplyakin, V.K. Sorbents of the "salt in a porous matrix" type in the processes of hydrocarbon processing. *Russian chemical journal*. 2007, Vol. 51, *4*, 85–92.
3. Kulko, E.V. et al. Synthesis of aluminum oxides from the products of the rapid thermal decomposition of hydrargillite in a centrifugal flash reactor: II. Structural and textural properties of aluminum hydroxide and oxide obtained from the product of the centrifugal thermal activation of hydrargillite (CTA product). *Kinetics and Catalysis*. 2007, Vol. 48, *2*, 316–326.
4. Pat. RF 2264589, F26BB7/00. Method and device for pulsed heat treatment of bulk materials / V.S. Lakhmostov [et al.]; applicant and patent holder G. K. Boreskov Institute of catalysis SB RAS. No. 2004109970/06; application 01.04.2004; publ. 20.11.2005.
5. Neimark, A.V.; Kheifez, L.I.; Fenelonov, V.B. Theory og preparation of supported catalysts. *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev*. 1981, Vol. 20, 439–450.
6. Jang, H.M.; Fuerstenau, D.W. The specific adsorption of alkaline-earth cations at the rutile / water interface. *Colloids Surfaces*. 1986, Vol. 2, 235–257.
7. Reshetnikov, S.I.; Livanova, A.V.; Meshcheryakov, E.P.; Kurzina, I.A.; Isupova, L.A. Kinetic Aspects of the Adsorption on Aluminum Oxide Drying Agents Doped with Alkali Metal Ions. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2017, Vol. 90, *11*, 1760–1765.
8. Ismagilov, Z.R.; Shkrabina, R.A.; Koryabkina, N.A. Aluminum oxide carriers: production, properties and application in catalytic processes of environmental protection: analyt. review. Novosibirsk: Boreskov Institute of catalysis, 1998; 82 p. (Ser. Ecology. Issue 50).

9. Budaev, Z.B.; Livanova, A.V.; Meshcheryakov, E.P.; Isupova, L.A.; Magaev, O.V. Influence of the composition of the adsorbent "hygroscopic salt/aluminum oxide" on its physico-chemical properties. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2019, Vol. 597, 1–8.
10. Glaznev, I.S. Dynamics of water absorption in grain and layer of sorbents $CaCl_2$ / silica gel and $CaCl_2$ / aluminum oxide: autoref. diss. ... candidate of chemical Sciences. Novosibirsk, 2006; 18 p.

Information about the authors:
Livanova Alesya, Postgraduate Student, Department of Physical and Colloid Chemistry, Chemical Faculty, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: truelivanova@mail.ru
Budaev Zhargal, Postgraduate Student, Department of Physical and Colloid Chemistry, Chemical Faculty, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: budaev17@mail.ru
Meshcheryakov Evgeny, PhD in Chemistry, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: meevgeni@mail.ru
Kurzina Irina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: kurzina99@mail.ru