DOI: 10.65322/j.srd.04182026.49

PIPERAZIN BILAN MODIFIKATSIYALANGAN SILIKOGELNING FIZIK-KIMYOVIY XOSSALARI VA CO_2 SORBSION XUSUSIYATLARINI TADQIQ ETISH

Tursunov S.A., *tayanch doktorant,*
Kimyo muhandisligi kafedrasi,
E-mail: sarvarbektursunov3226@mail.ru
Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar universiteti
Xodjamkulov S.Z., *doktor,*
Kimyo muhandisligi kafedrasi
Karimov M.U., *t.f.d., professor,*
Toshkent kimyo texnologiyalari ilmiy-tadqiqot instituti

Anotatsiya: *Ushbu tadqiqotda natriy silikat asosida silikogel sintez qilish, uni piperazin bilan modifikatsiyalash hamda olingan sorbentning fizik-kimyoviy, termik va karbonat angidrid (CO_2) gaziga nisbatan sorbsion xossalarini o‘rganish natijalari keltirilgan. Silikogel natriy silikat eritmasini 15 % li sulfat kislota yordamida kislotalash orqali olindi va quritilgan material piperazinning 10 % li etanoldagi eritmasi bilan modifikatsiyalandi. Modifikatsiyalangan silikogelning tuzilishi va termik barqarorligi FTIR hamda DTA–TGA usullari yordamida tadqiq qilindi. DTA–TGA tahlili argon muhitida 30–800 °C harorat oralig‘ida, 10 °C/min qizdirish tezligida olib borildi. 800 °C da umumiy massa yo‘qotilishi taxminan 17,6 %, qoldiq massa esa 82,4 % ni tashkil etib, materialning noorganik silika karkasi yuqori haroratlarda nisbatan barqaror ekanligini ko‘rsatdi. FTIR spektrida 1047,35 va 800,46 cm^{-1} sohalarda Si–O–Si karkasiga xos signallar, 1562,34; 1458,18 va 1338,60 cm^{-1} sohalarda esa piperazin modifikatsiyasi bilan bog‘liq N–H, C–H va C–N guruhlariga mos spektral o‘zgarishlar kuzatildi. Olingan SPIPER modifikatsiyalangan silikogelning CO_2 ni sorbsiyalash xususiyati laboratoriya sharoitida U-simon shisha naycha yordamida o‘rganildi. Tajribada 1,00 g sorbent ishlatilib, CO_2 gazi sorbent qatlami orqali o‘tkazildi va sorbsiya samaradorligi namunaning boshlang‘ich hamda tajribadan keyingi massalarini taqqoslash asosida baholandi. Tajriba natijalariga ko‘ra, modifikatsiyalangan silikogel o‘z massasiga nisbatan 5–15 % CO_2 yutish xususiyatini namoyon etdi. Olingan natijalar piperazin bilan funksionallashtirilgan silikogelni CO_2 ni tutib qolishga mo‘ljallangan sorbent material sifatida o‘rganish istiqbolli ekanligini ko‘rsatadi.*

Аннотация. *В данном исследовании представлены результаты синтеза силикагеля на основе силиката натрия, его модификации пиперазином, а также изучения физико-химических, термических и сорбционных свойств полученного сорбента по отношению к диоксиду углерода (CO_2). Силикагель получали путем подкисления раствора силиката натрия 15%-ным раствором серной кислоты, после чего высушенный материал модифицировали 10%-ным раствором пиперазина в этаноле. Структуру и термическую стабильность модифицированного силикагеля исследовали методами FTIR и DTA–TGA. Анализ DTA–TGA проводили в атмосфере аргона в диапазоне температур 30–800 °C при скорости нагрева 10 °C/мин. При 800 °C общая потеря массы составила приблизительно 17,6 %, а остаточная масса — 82,4 %, что свидетельствует об относительной стабильности неорганического кремнеземного каркаса материала при высоких температурах. В FTIR-спектре в областях 1047,35 и 800,46 $см^{-1}$ наблюдались характерные сигналы каркаса Si–O–Si, тогда как в областях 1562,34; 1458,18 и 1338,60 $см^{-1}$ были выявлены спектральные изменения, соответствующие группам N–H, C–H и C–N, связанным с модификацией пиперазином. Сорбционные свойства полученного модифицированного пиперазином силикагеля SPIPER по отношению к CO_2 исследовали в лабораторных условиях с использованием U-образной стеклянной трубки. В эксперименте использовали 1,00 г сорбента, через слой которого пропускали газ CO_2, а эффективность*

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.49

сорбции оценивали путем сравнения массы образца до и после эксперимента. Согласно полученным результатам, модифицированный силикагель продемонстрировал способность поглощать CO_2 в количестве 5–15 % от собственной массы. Полученные результаты показывают перспективность дальнейшего исследования функционализированного пиперазином силикагеля в качестве сорбционного материала для улавливания CO_2.

Abstract. *This study presents the results of synthesizing silica gel from sodium silicate, modifying it with piperazine, and investigating the physicochemical, thermal, and carbon dioxide (CO_2) sorption properties of the resulting sorbent. Silica gel was obtained by acidifying a sodium silicate solution with 15% sulfuric acid, after which the dried material was modified with a 10% solution of piperazine in ethanol. The structure and thermal stability of the modified silica gel were investigated using FTIR and DTA–TGA techniques. DTA–TGA analysis was carried out in an argon atmosphere over a temperature range of 30–800 °C at a heating rate of 10 °C/min. At 800 °C, the total mass loss was approximately 17.6%, while the residual mass was 82.4%, indicating that the inorganic silica framework of the material remained relatively stable at elevated temperatures. The FTIR spectrum showed characteristic signals of the Si–O–Si framework at 1047.35 and 800.46 cm^{-1}, while spectral changes corresponding to N–H, C–H, and C–N groups associated with piperazine modification were observed at 1562.34, 1458.18, and 1338.60 cm^{-1}. The CO_2 sorption properties of the obtained SPIPER piperazine-modified silica gel were investigated under laboratory conditions using a U-shaped glass tube. In the experiment, 1.00 g of sorbent was used, CO_2 gas was passed through the sorbent bed, and sorption efficiency was evaluated by comparing the initial mass of the sample with its mass after the experiment. The experimental results showed that the modified silica gel was capable of adsorbing CO_2 in an amount corresponding to 5–15% of its own mass. These findings indicate that piperazine-functionalized silica gel is a promising sorbent material for CO_2 capture applications.*

Kalit so‘zlar: *silikogel, piperazin, modifikatsiya, karbonat angidrid, CO_2 sorbsiyasi, adsorbent, FTIR, DTA–TGA, Si–O–Si, amin guruhlari.*

Ключевые слова: *силикагель, пиперазин, модификация, диоксид углерода, сорбция CO_2, адсорбент, FTIR, DTA–TGA, Si–O–Si, аминогруппы.*

Keywords: *silica gel, piperazine, modification, carbon dioxide, CO_2 sorption, adsorbent, FTIR, DTA–TGA, Si–O–Si, amine groups.*

Kirish. Silikogel o‘zining rivojlangan g‘ovak tuzilishi, yuqori solishtirma sirt maydoni va adsorbsion xossalari tufayli zamonaviy fan va texnikaning muhim materiallaridan biri hisoblanadi. U namlikni yutuvchi modda, adsorbent, katalizator va katalizator tashuvchisi sifatida keng qo‘llaniladi. Tuzilishi jihatidan silikogel kremniy dioksidining uch o‘lchamli g‘ovak tarmog‘idan tashkil topgan bo‘lib, yuqori adsorbsion sig‘imi bilan ajralib turadi[1; 141–165 b.]

Silikogelning fizik-kimyoviy xossalari uning sintez sharoitlariga bog‘liq bo‘lib, ushbu omillar orqali materialning g‘ovakligi, sirt maydoni va sorbsion samaradorligini boshqarish mumkin. Ayniqsa, modifikatsiyalangan silikogellar gazlarni ajratish va tozalash jarayonlarida yuqori samaradorlikni namoyon etadi [2; 1767-1775 b.]

Bugungi kunda silikogel kimyo, neft-gaz, energetika, farmatsevtika va ekologiya sohalarida keng qo‘llanilib, gazlarni tozalash, karbonat angidridni adsorbsiyalash va namlikni nazorat qilish kabi jarayonlarda muhim ahamiyat kasb etadi. Shu sababli yuqori sorbsion xossalarga ega yangi turdagi silikogellarni yaratish va ularning xossalarini o‘rganish dolzarb ilmiy yo‘nalishlardan biri hisoblanadi[3; 4811-4819 b.]

Grozdanova va boshqalar tomonidan p-toluolsulfon kislotasi yordamida sintez qilingan mezog'ovak silika kserogellari 1-(2-gidroksietil)piperazin bilan modifikatsiyalangan. Modifikatsiyalangan namunaning CO_2 ga nisbatan sorbsion sig'imi 3,4 mmol/g dan 4,4 mmol/g

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.49

gacha oshgan, bu esa piperazin guruhlarining CO_2 molekulalari bilan kuchli o‘zaro ta'sirini tasdiqlaydi. Sorbent 60 °C da to‘liq regeneratsiya qilingan va to‘rt martalik adsorbsiya-desorbsiya sikllaridan so‘ng ham funksional guruhlar yo‘qolmagan [1].

Tadqiqotchi Liu va boshqalar piperazinni silika aerogeliga singdirish orqali havodan to‘g'ridan-to‘g'ri CO_2 ushlash (DAC) uchun sorbent ishlab chiqishgan. Sorbent 24 martalik harorat-almashinuvli adsorbsiya-desorbsiya siklida o‘rtacha 1,3 mmol/g barqaror sig'im namoyish etgan. Muallarlar shuningdek, piperazinning halqasimon tuzilishi quruq CO_2 bilan regeneratsiya sharoitida karbamid hosil bo‘lishining oldini olishini isbotlashgan, bu esa aminli sorbentlarning eng jiddiy barqarorlik muammosini hal qiladi [2].

Ravutsov va boshqalar tomonidan amalga oshirilgan ishda MCM-48 va SBA-15 mezog'ovak silikalarini morfolin va 1-metilpiperazin bilan post-sintez usulida modifikatsiyalashgan. Modifikatsiyalash jarayoni boshlang'ich silikalarning strukturaviy xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko‘rsatmagan, biroq CO_2 sorbsion sig'imini 1-metilpiperazin bilan modifikatsiyalangan MCM-48 uchun 4,4 mmol/g gacha oshirgan. Qattiq holatdagi YaMR tahlili CO_2 ning turli adsorbsion shakllarda ushlanishini ko‘rsatgan [3].

Tadqiqotchi Fashi va boshqalar faollashtirilgan alyuminiy oksidini piperazin eritmasi (1–4 vazn%) bilan modifikatsiyalab, CO_2 adsorbsiyasini 2–8 bar bosim oralig'ida o‘rgangan. 25 °C va 8 bar bosimda, 2 vazn% piperazin bilan maksimal sorbsion sig'im 222,01 mg CO_2/g ni tashkil etgan. Termodinamik tahlil adsorbsiya jarayonining o‘z-o‘zidan boruvchi va ekzotermik xarakterga ega ekanligini tasdiqlagan [4].

Ramezanipour Penchah va boshqalar faollashtirilgan uglerodni piperazin bilan modifikatsiyalab, uning CO_2 ga nisbatan sorbsion samaradorligini oshirishgan. 25 °C va 8 bar bosimda maksimal sorbsion sig'im 203,842 mg/g ga yetgan, bu esa modifikatsiyalanmagan namunaga nisbatan sezilarli yuqori ko‘rsatkichdir. Tajriba natijalari Hill izoterma va Elovich kinetik modellariga yaxshi mos kelgan [5].

Kremniy sintezi usullari va materiallarining qiyosiy tahlili

An'anaviy tavsifiy hisobotlardan farqli o‘laroq, kremniy sintezi usullarini tanqidiy taqqoslash strukturaviy xususiyatlar, energiya sarfi, masshtablashuvchanlik va qo‘llanilish potentsialida sezilarli farqlarni ochib beradi.

Sol-gel usuli g'ovaklikni, sirt maydonini va kimyoviy funksionallikni aniq nazorat qilish qobiliyati tufayli eng keng qo‘llaniladigan yondashuv hisoblanadi. pH, prekursor turi (masalan, TEOS) va gidroliz/kondensatsiya tezligi kabi parametrlarni sozlash orqali moslashtirilgan xususiyatlarga ega materiallarni olish mumkin. Biroq, bu usulning cheklovlari bor, jumladan, uzoq ishlov berish vaqti, sintez sharoitlariga sezgirlik va qoldiq gidroksil guruhlari tufayli strukturaviy nuqsonlarning paydo bo‘lishi. Ushbu kamchiliklarga qaramay, sol-geldan olingan materiallar yuqori bir xillikni namoyish etadi va ayniqsa biosensorlar, kataliz va dori yetkazib berish tizimlari kabi ilg'or dasturlar uchun mos keladi [9].

Dunyo aholisining o‘sishi va energiyaga bo‘lgan talabning ortishi yuqori solishtirma sirt maydoniga (SSA) ega bo‘lgan ilg'or materiallarga bo‘lgan ehtiyojni kuchaytirdi. Silika asosidagi materiallar, xususan, aerogellar, ajoyib issiqlik barqarorligi va oson sirt funksionalizatsiyasi tufayli energiya saqlash, og'ir metallarni adsorbtsiya qilish va gazni ushlab turish sohalarida keng qo‘llaniladi. Biroq, ularning tabiiy past mexanik mustahkamligi muhim cheklov bo‘lib qolmoqda, ko‘pincha polimer qo‘shilishi yoki kompozit dizayn strategiyalari orqali mustahkamlashni talab qiladi [10].

Silikatlar asosidagi sorbentlar

Tadqiqotchilar Kato M., Yoshikawa S. va Nakagawa K. tomonidan olib borilgan tadqiqotda litiy ortosilikat (Li_4SiO_4) ning adsorbent sifatida yuqori haroratda karbonat angidridning konsentratsiyalari oralig‘ida CO_2 ni yutish xususiyatlarini o‘rganib, tadqiqot natijalarida litiy ortosilikat yuqori haroratlarda ham karbonat angidridni samarali adsorbsiya qilishi

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.49

va qayta tiklanish xususiyatiga ega ekanligini isbotlaadilar. Tadqiqotchilar izlanishlar natijasida litiy ortosilikatni adsorbent sifatida yuqori haroratda CO_2 ni tutib qolish va ushlab turish jarayonlari uchun samarali sorbent sifatida ta'kidladilar. Natijalar asosida karbonat angidridni sanoat gazlaridan ajratib olish va atrof muhitga chiqarib yuborilishini kamaytirishga qaratilgan texnologiyalarni rivojlantirishda muhim asos bo'lib hizmat qiladi [11]

Materiallar. Silika manbai sifatida sanoat darajasidagi natriy silikatning suvli eritmasi (suyuq shisha; tarkibida 28 og'irlik foizi SiO_2 va 10 og'irlik foizi Na_2O mavjud; SiO_2/Na_2O molyar nisbati: 2,89) ishlatildi. Natriy silikat eritmasi glotr.uz (O'zbekiston) orqali "TECH SNAB" MChJdan xarid qilindi. Sulfat kislota (H_2SO_4, 93,6–95,6 og'irlik foizi, kimyoviy toza daraja, GOST 4204-77) "Chemical Invest" MChJ (O'zbekiston) tomonidan yetkazib berildi. Distillangan suv bilan suyultirish orqali 15 og'irlik foizli sulfat kislota ishchi eritmasi tayyorlandi; ushbu eritma natriy silikat eritmasini kislotalash va gel hosil bo'lish jarayonida muhitning pH qiymatini rostlash uchun qo'llanildi. Suyultirish, yuvish va barcha suvli eritmalarni tayyorlashda distillangan suvdan foydalanildi. Barcha kimyoviy moddalar qo'shimcha tozalashsiz, olingan holatda ishlatildi.

Metodlar

Termik tahlil

Tayyorlangan silikogel asosidagi materialning termik xossalari Shimadzu DTG-60H termal analizatori (Shimadzu Corporation, Yaponiya) yordamida bir vaqtning o'zida o'tkazilgan termogravimetrik tahlil (TGA) va differensial termik tahlil (DTA) usullari orqali o'rganildi. Termogravimetrik tahlil material massasining haroratga bog'liq holda kamayishini baholash uchun, differensial termik tahlil esa tegishli endotermik va ekzotermik termik jarayonlarni aniqlash uchun qo'llanildi.

IQ-spestroskopiya

Tayyorlangan kremnezem asosidagi material tarkibidagi funksional guruhlar va xarakterli kimyoviy bog'lanishlar Shimadzu FTIR spektrometri (Shimadzu Corporation, Yaponiya) yordamida Furye-almashtirishli infraqizil (FTIR) spektroskopiyasi usuli bilan o'rganildi. FTIR spektri tahlil qilinayotganda Si–O–Si karkasi, sirtidagi Si–OH guruhlari va modifikatsiyalangan aminning N–H, C–N bilan bog'liq xarakterli tebranishlarga alohida e'tibor qaratildi.

Tajribaviy qism

Laboratoriya sharoitida qurulish uchun mo'ljallangan suyuq shisha (Na_2SiO_3) ga 15 % li sulfat kislota (H_2SO_4) tasir ettirildi va silikogel sintez qilindi. Olingan silikogel namunasi dastlab 4 soat vaqt davomida quritildi. Bu vaqt davomida piperazinning 10 % konsentratsiyali etil spirt (C_2H_5OH) dagi eritmasi tayyorlandi. Quritilgan silikogeldan 10 gr dan o'lchab olindi va 20 ml 10 %li piperazin bilan shisha stakanga solib 4-6 soat vaqt davomida og'zi yopiq holatda modifikatsiya jarayoni amalga oshirildi. Olingan namunalarda termik tahlil va IQ-spestroskopiya analiz jarayonlari amalga oshirildi va quydagicha tahlil qilindi.

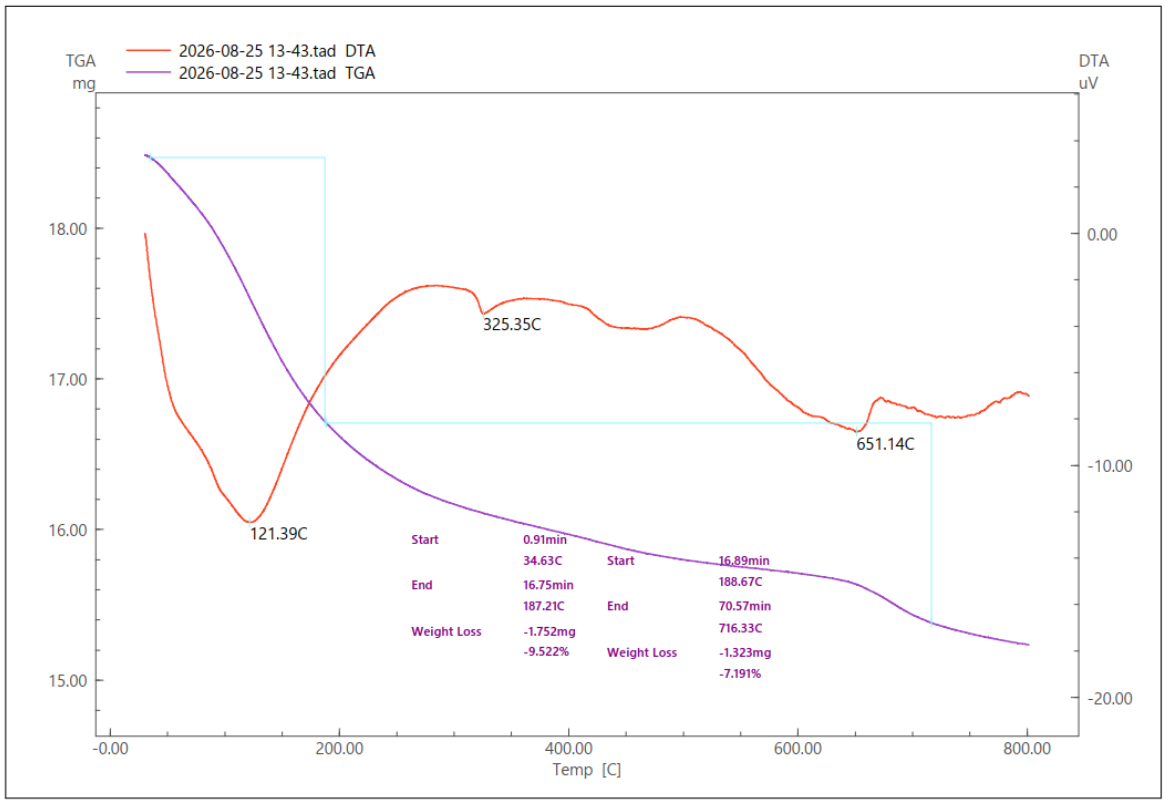
a) Olingan piperazin bilan modifikatsiyalangan silikogel namunalari termik tahlil (DTA-TGA) analiz jarayoni amalga oshirildi.

Piperazin bilan modifikatsiya qilingan silikogelning DTA–TGA tahlili argon muhitida 30–800 °C harorat oralig'ida, 10 °C/min tezlikda olib borildi. Termogravimetrik natijalarga ko'ra, namuna 30–100 °C da 3,4 %, 100–150 °C da qo'shimcha 4,0 % va 150–200 °C da 2,7 % massa yo'qotgan. 200–300 °C oralig'ida massa yo'qotish 2,4 % ni tashkil etdi.

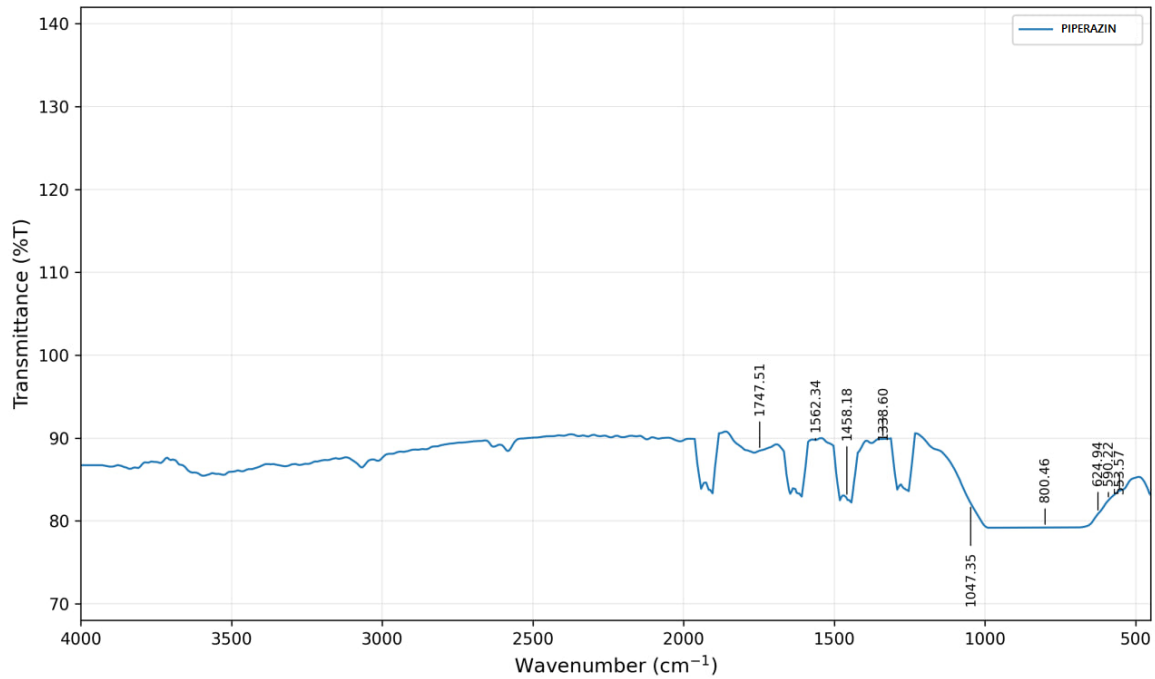
Eng sezilarli termik o'zgarishlar 120–140 °C atrofida kuzatilib, bu bosqich namlikning desorbsiyasi va sirt bilan bog'langan modifikatorning dastlabki termik o'zgarishlari bilan bog'liq bo'lishi mumkin. 800 °C da umumiy massa yo'qotish taxminan 17,6 %, qoldiq massa esa 82,4 % ni tashkil etdi. Natijalar silikogelning noorganik kremniy oksidi karkasi yuqori haroratlarda nisbatan barqarorligini ko'rsatadi (1-, va 2-jadvallar);

b) Shundan so'ng olingan piperazin bilan modifikatsiyalangan silikogel namunalari IQ spektroskopiya analizi amalga oshirildi.

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.49



1-rasm. Olingan piperazin bilan modifikatsiyalangan silikogel namunalari termik tahlil (DTA-TGA) analiz jarayoni



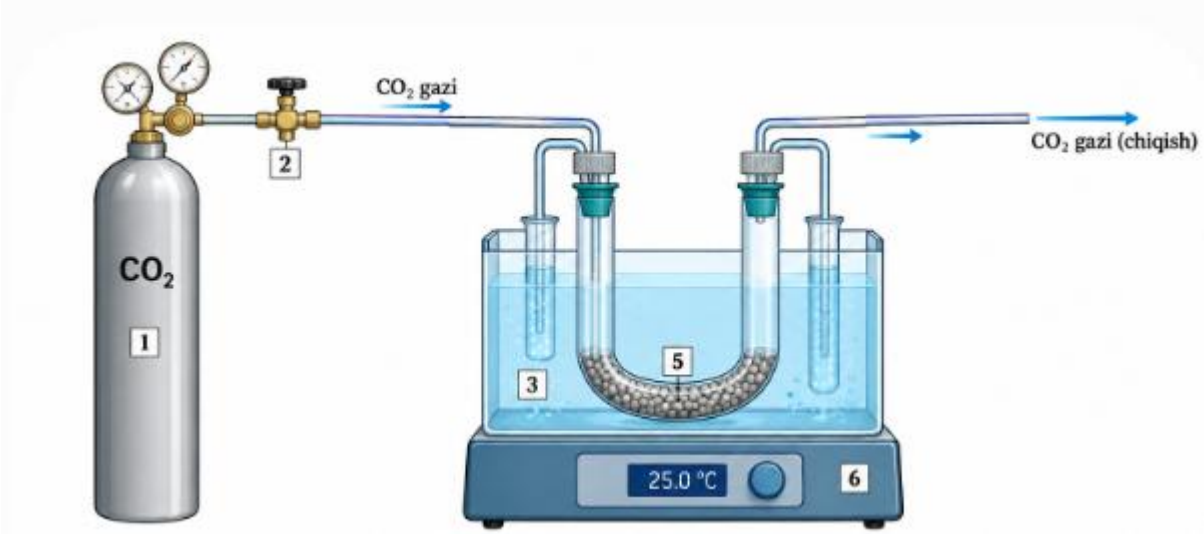
2-rasm. Olingan piperazin bilan modifikatsiyalangan silikogel namunalari termik tahlil (DTA-TGA) analiz jarayoni

Piperazin bilan modifikatsiya qilingan silikogelning FTIR spektrida 1747,51; 1562,34; 1458,18; 1338,60; 1047,35; 800,46; 624,94; 590,22 va 553,57 cm^{-1} da asosiy yutilish signallari

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.49

qayd etildi. 1047,35 cm^{-1} dagi kuchli signal silikogel tarkibidagi Si–O–Si bog‘larining valent tebranishlariga, 800,46 cm^{-1} dagi signal esa Si–O–Si guruhlarining strukturaviy tebranishlariga mos keladi. 1458,18 va 1338,60 cm^{-1} sohalaridagi signallar piperazin molekulasidagi C–H deformatsion hamda C–N bilan bog‘liq tebranishlar bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. 1562,34 cm^{-1} dagi signal esa sirtga birikkan piperazin tarkibidagi N–H guruhlarining deformatsion tebranishlari bilan izohlanishi mumkin. 624–553 cm^{-1} oralig‘idagi signallar silika karkasidagi Si–O bog‘larining deformatsion tebranishlarini ifodalaydi. Umuman, FTIR natijalari silikogelning Si–O–Si asosidagi strukturasi saqlanganini hamda piperazin modifikatsiyasi natijasida 1600–1300 cm^{-1} sohasida qo‘shimcha funksional guruhlarga xos spektral o‘zgarishlar yuzaga kelganini ko‘rsatadi.

Olingan silikogel namunasining karbonat angidrid (CO_2) gazini yutush xossasini o‘rganildi.buning uchun laboratoriya sharoitida CO_2 gazining sorbsiyalanish jarayonini o‘rganish maqsadida 3.1-rasmda keltirilgan tajriba qurilmasi yig‘ildi. Sorbsiya jarayoni bir tomoni vakuum nasosiga (4), ikkinchi tomoni esa CO_2 balloni (1) ga ulangan U-simon nay (5) ichida amalga oshirildi.



3-rasm. CO_2 gazining SPIPER modifikatsiyalangan silikogelda sorbsiyalanish jarayonining texnologik sxemasi. 1. CO_2 balloni. 2. Bosim rostlagich (reduktor) va ignali klapan. 3. Kirish va chiqish uchun qo‘shimcha naychalar (suvga botirilgan). 4. Suv hammomi (termostat). 4. U-simon shisha naycha (1 g SPIPER markali modifikatsiyalangan silikogel). 5. Termostatli magnit aralashtirgich (suv hammomi uchun)

Tajriba davomida U-simon nay ichiga 1,00 g sorbent namunasi (6) joylashtirildi va tizim 20 minut davomida 0,8 atm qoldiq bosimgacha vakuum ostida saqlandi. Bu jarayon sorbent yuzasida mavjud bo‘lgan namlik va boshqa adsorbsiyalangan gazlarni chiqarib yuborish uchun xizmat qildi.

Shundan so‘ng vakuum nasosi o‘chirildi va tizimga CO_2 gazi yuborildi. Gaz bosimi ballonga o‘rnatilgan manometr (2) yordamida nazorat qilindi. Sorbsiya jarayonining haroratga bog‘liqligini o‘rganish maqsadida U-simon nay suv hammomi (7) yordamida termostatlandi va tajribalar turli haroratlarda bir nechamarta amalga oshirildi.

Sorbsiyalanish darajasi tajriba yakunlangandan so‘ng sorbent namunasining massasini aniqlash hamda boshlang‘ich massa bilan taqqoslash orqali hisoblab topildi. Bunda olingan namuna o‘z vazniga nisbatan 5 % dan 15 % gacha CO_2 gazi yutganligi aniqlandi.

Xulosa. Olib borilgan tadqiqotlar natijasida natriy silikat asosida silikogel sintez qilinib, uning sirt xususiyatlari piperazin bilan modifikatsiyalash orqali o‘zgartirildi. Modifikatsiyalangan silikogelning fizik-kimyoviy xususiyatlari FTIR spektroskopiyasi va DTA–TGA termik tahlil

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.49

usullari yordamida baholandi. Termik tahlil natijalariga ko‘ra, namunaning 800 °C gacha bo‘lgan umumiy massa yo‘qotilishi taxminan **17,6 %**, qoldiq massa esa **82,4 %** ni tashkil etdi. Bu natija silikogelning noorganik kremniy oksidi karkasi yuqori haroratlarda nisbatan barqarorligini ko‘rsatadi.

FTIR tahlilida 1047,35 va 800,46 cm^{-1} sohalarda Si–O–Si karkasiga xos yutilish signallarining kuzatilishi silikogelning asosiy strukturasi modifikatsiyadan keyin saqlanib qolganligini ko‘rsatdi. Shu bilan birga, 1562,34; 1458,18 va 1338,60 cm^{-1} sohalardagi spektral o‘zgarishlar piperazin tarkibidagi N–H, C–H va C–N guruhlari bilan bog‘lanib, silikogel sirtining piperazin bilan modifikatsiyalanganligini ko‘rsatuvchi dalil sifatida baholandi.

Piperazin bilan modifikatsiyalangan silikogelning CO_2 gaziga nisbatan sorbsion xossalarini aniqlash bo‘yicha laboratoriya tajribalari ham amalga oshirildi. Tajriba natijalarida sorbentning boshlang‘ich va CO_2 ta’siridan keyingi massalari taqqoslanganda, olingan material o‘z massasiga nisbatan 5–15 % miqdorda CO_2 gazini yutishi aniqlandi.

Adabiyotlar ro‘yxati

1. Curran G.P., Fink C.E., Gorin E. *Carbon dioxide-acceptor (coal) gasification process. Studies of acceptor properties* // Adv. Chem. Ser. 1967. Vol. 69. P. 141–165.
2. J. Feng, Z. Li, X. Liu et al., Preparation of silica gel from quartz for direct synthesis of alkoxysilanes, Silicon, 17 (2025) 1767–1775.
3. I.N. Pyagay, Y.A. Svakhina, M.E. Titova et al., Effect of hydrogel molar composition on the synthesis of LTA-type zeolites in the utilization of technogenic silica gel, Silicon, 16 (2024) 4811–4819.
4. S. Grozdanova, I. Trendafilova, A. Szegedi, P. Shestakova, Y. Mitrev, I. Slavchev, S. Simeonov, M. Popova, Mesoporous silica xerogels prepared by p-toluenesulfonic acid-assisted synthesis: piperazine-modification and CO2 adsorption, Nanomaterials, 15 (2025) 1459. https://doi.org/10.3390/nano15191459
5. L. Liu, Q. Wang, Y.-H. Cho, H.-H. Park, C.-H. Lee, Piperazine-impregnated silica aerogel for direct air capture of CO2 for prevention of urea formation, Chemical Engineering Research and Design, 199 (2023) 74-86. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.09.021
6. M. Ravutsov, Y. Mitrev, P. Shestakova, H. Lazarova, S. Simeonov, M. Popova, CO2 adsorption on modified mesoporous silicas: the role of the adsorption sites, Nanomaterials, 11 (2021) 2831. https://doi.org/10.3390/nano11112831
7. F. Fashi, A. Ghaemi, P. Moradi, Piperazine-modified activated alumina as a novel promising candidate for CO2 capture: experimental and modeling, Greenhouse Gases: Science and Technology, 9 (2019) 37-51. https://doi.org/10.1002/ghg.1829
8. H. Ramezanipour Penchah, A. Ghaemi, F. Jafari, Piperazine-modified activated carbon as a novel adsorbent for CO2 capture: modeling and characterization, Environmental Science and Pollution Research, 29 (2022) 5134-5143.
9. E. Yapıcı, B. Keçeci and S. Yücel, Synthesis and hydrophobic modification of silica-CNT hybrid aerogels via one-pot and sol-gel methods using sustainable precursor, J. Porous Mater., 32 (2025) 2197–2210.
10. O. Ochildiyev, *Selecting wastewater treatment filters using local raw materials*, E3S Web of Conferences, 401 (2023) 03019. https://doi.org/10.1051/ e3sconf/202340103019
11. Kato M., Yoshikawa S., Nakagawa K. *Carbon dioxide absorption by lithium orthosilicate in a wide range of temperature and carbon dioxide concentrations* // Journal of Materials Science Letters. – 2002. – Vol. 21, No. 6. – P. 485–487.
12. I.N. Pyagay, Y.A. Svakhina, M.E. Titova et al., Effect of hydrogel molar composition on the synthesis of LTA-type zeolites in the utilization of technogenic silica gel, Silicon, 16 (2024) 4811–4819.

DOI: 10.65322/j.srd.04182026.49

13. I. Hraiech, B. Zallama, S. Belkhiria et al., Experimental description of adsorption and desorption isotherms of silica gel under variable temperature and relative humidity in a fixed bed reactor, Sci. Rep., 15 (2025) 29041

14. T.M. Daget, B.B. Kassie, M.T. Abate et al., Eco-friendly flame-retardant finishing of polyester fabrics using diammonium hydrogen phosphate, gelatin and silica gel for cultural heritage preservation, J. Sol-Gel Sci. Technol., 114 (2025) 1095–1108.

15. M.S. Mikhailova, N.A. Medvedeva and A.O. Vozyakov, Production of silicon dioxide by the sol–gel method and control of process parameters, Dokl. Chem., 517 (2024) 124–130.

16. J.I. Zink, Spectroscopic studies of molecules in sol–gel silica monoliths and thin films, J. Sol-Gel Sci. Technol., 114 (2025) 261–273.