

March 2024

PREPARATION OF SORBENTS MODIFIED WITH MELAMINE-FORMALDEHYDE RESIN AND STUDY OF CARBONATE ANHYDRIDE SORPTION

Yusuf GELDIYEV

Termez State University, Termez, Uzbekistan, geld.88@mail.ru

Khayit TURAYEV

Termez State University, Termez, Uzbekistan, hhturaev@rambler.ru

Ibrahim UMBAROV

Termez State University, Termez, Uzbekistan, i_umbarov@mail.ru

Abdulakhat DJALILOV

Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology, Tashken, Uzbekistan, gup_tniixt@mail.ru

Follow this and additional works at: <https://cce.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

GELDIYEV, Yusuf; TURAYEV, Khayit; UMBAROV, Ibrahim; and DJALILOV, Abdulakhat (2024) "PREPARATION OF SORBENTS MODIFIED WITH MELAMINE-FORMALDEHYDE RESIN AND STUDY OF CARBONATE ANHYDRIDE SORPTION," *CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING*: Vol. 2022: No. 4, Article 15.

DOI: 10.34920/cce202244

Available at: <https://cce.researchcommons.org/journal/vol2022/iss4/15>

This Article is brought to you for free and open access by Chemistry and Chemical Engineering. It has been accepted for inclusion in CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING by an authorized editor of Chemistry and Chemical Engineering. For more information, please contact zuchra_kadirova@yahoo.com.

PREPARATION OF SORBENTS MODIFIED WITH MELAMINE-FORMALDEHYDE RESIN AND STUDY OF CARBONATE ANHYDRIDE SORPTION

Yusuf GELDIYEV¹ (geldi.88@mail.ru), Khayit TURAYEV¹ (hhturaev@rambler.ru),
Ibrahim UMBAROV² (i_umbarov@mail.ru), Abdulakhat DJALILOV² (gup_tniixt@mail.ru)

¹Termez State University, Termez, Uzbekistan

²Tashkent Scientific Research Institute of Chemical Technology, Tashken, Uzbekistan

An increase in the amount of carbon dioxide in the atmosphere is one of the main factors in the greenhouse effect. At present, the development of methods for obtaining solid sorbents for carbon dioxide sorption, along with studies to reduce the amount of gases emitted into the atmosphere, is one of the important areas of research. The ability of sorbents containing nitrogen to absorb carbon dioxide is relatively high. In this work, the preparation and properties of silica gel modified with a melamine-formaldehyde polymer were studied. As a result, it was found that its sorption of carbon dioxide is higher than the sorption properties of silica gel. It has been studied how the properties of the sorbent surface change during the modification process. The advantage of this study is that the process of sorption-desorption on the obtained sorbent can be carried out with simple technologies and low energy consumption. The duration of the working cycles of the sorbent was determined.

Keywords: silica gel, melamine, formaldehyde, sorption, carbon dioxide

ПРИГОТОВЛЕНИЕ СОРБЕНТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕЛАМИН-ФОРМАЛЬДЕГИДНОЙ СМОЛОЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ КАРБОНАТНОГО АНГИДРИДА

Юсуф ГЕЛДИЕВ¹ (geldi.88@mail.ru), Хайит ТУРАЕВ¹ (hhturaev@rambler.ru),
Ибрагим УМБАРОВ² (i_umbarov@mail.ru), Абдулахат ДЖАЛИЛОВ² (gup_tniixt@mail.ru)

¹Термезский государственный университет, Термез, Узбекистан

²Ташкентский научно-исследовательский химико-технологический институт, Ташкент, Узбекистан

Увеличение количества углекислого газа в атмосфере является одним из основных факторов возникновения парникового эффекта. В настоящее время разработка методов получения твердых сорбентов для сорбции углекислого газа, наряду с исследованиями по снижению количества выбрасываемых в атмосферу газов, является одним из важных направлений исследований. Способность сорбентов, содержащих азот, поглощать углекислый газ относительно высока. В работе изучены получение и свойства силикагеля, модифицированного меламиноформальдегидным полимером. В результате установлено, что его сорбция диоксида углерода выше, чем сорбционные свойства силикагеля. Изучено, как в процессе модифицирования изменяются свойства поверхности сорбента. Преимуществом данного исследования является то, что процесс сорбции-десорбции полученного сорбента может быть осуществлен при простых технологиях и малых энергозатратах. Определена продолжительность рабочих циклов сорбента.

Ключевые слова: силикагель, меламин, формальдегид, сорбция, диоксид углерода

MELAMIN-FORMALDEGID SMOLA BILAN MODIFIKATSIYALANGAN SORBENTLARNING OLINISHI VA KARBONAT ANGI DRID SORBSIYASINI O'RGANISH

Yusuf GELDIYEV¹ (geldi.88@mail.ru), Xayit TURAYEV¹ (hhturaev@rambler.ru),
Ibragim UMBAROV² (i_umbarov@mail.ru), Abdulaxat DJALILOV² (gup_tniixt@mail.ru)

¹Termiz davlat universiteti, Termiz, O'zbekiston

²Toshkent kimyo-texnologiya ilmiy tadqiqot instituti, Toshken, O'zbekiston

Issiqxona effekti jarayoni sodir bo'lishida atmosfera havosida karbonat anhidrid gazi miqdorining ortishi asosiy omillardan biridir. Hozirda atmosferaga chiqariladigan gazlar miqdorini kamaytirish bo'yicha tadqiqotlar bilan birgalikda karbonat anhidridni sorbsiyalash uchun qattiq sorbentlarni olish usullarini ishlab chiqish muhim tadqiqot yo'nalishlaridan hisoblanadi. Tarkibida azot saqlagan sorbentlarning karbonat anhidridni sorbsiyalash qobiliyati nisbatan yuqori bo'ladi. Tadqiqot ishida sirt yuzasi melamin-formaldegid polimeri bilan modifikatsiyalangan silikagelning olinishi va xossalari tadqiq qilindi. Natijada, uning karbonat anhidrid sorbsiyasi silikagelning sorbsion xususiyatlaridan yuqori ekanligi aniqlandi. Modifikatsiya jarayonining sorbent sirt xususiyatlari qanday o'zgartirilganligi o'rganildi. Ushbu tadqiqotning afzalligi olingan sorbentning sorbsiya-desorbsiya jarayonini oddiy texnologiyalar va kam energiya sarfi bilan amalga oshirish mumkinligi aniqlangan. Shuningdek, sorbentning ishlash sikllari davomiyligi aniqlangan.

Kalit so'zlar: silikagel, melamin, formaldegid, sorbsiya, karbonat anhidrid

DOI: 10.34920/cce202244

Kirish

Dunyoda global isish jarayoni natijasida iqlimning o'zgarishi toboro yaqqolroq namoyon bo'lmoqda. Issiqxona effektini hosil qilayotgan asosiy gazlardan biri karbonat anhidrid bo'lib, bu gaz yoqilg'ilarning yonishi natijasida hosil bo'ladi. Eng katta ulushi transport va energetika sohaslariga to'g'ri keladi. Bunda barcha davlatlarning o'z

hissasi mavjud bo'lib, barcha davlatlarda CO₂ ni kamaytirish bo'yicha rejalar ishlab chiqilgan va gazlar ajratilishini kamaytirish ishlariga qaramasdan atmosfera havosining isishi davom etib bormoqda. Bunga sabab chiqarilgan gazlarning qayta yutilishi uchun bir necha yuzlab yillar kerak bo'ladigan miqdorda ularning yig'ilib qolganligidir [1]. Bu muammoni bartaraf etish uchun kam CO₂

chiqaradigan texnologiyalar bilan birgalikda atmosfera gazlari tarkibidan CO₂ ni ajratib oladigan texnologiyalarni ham yaratish talab etilmoqda. Atmosfera gazlaridan CO₂ ni sorbsiyalash uchun sorbentlarga qo'yilgan bir qancha talablar mavjud bo'lib: yuqori sorbsion sig'im, kam energiya sarfi, zaharli emaslik, oson desorbsiya, siklik (foydalanish)ishlatish, past tannarx kabilardir. Ammo, bu talablarning barchasiga javob beradigan sorbentlar hozircha yaratilmagan [2].

Hozirgi kunda karbonat anhidrid sorbsiyasida qo'llash uchun tadqiq qilinayotgan qattiq sorbentlarni uchta katta guruhga bo'lish mumkin: noorganik birikmalar va minerallar, polimerlar va organik birikmalar, gibrid materiallar. Noorganik birikmalardan ishqoriy va ishqoriy yer metallarining oksidlari [3, 4], gidroksidlari [5] o'rganiladi. Minerallardan ko'mir [6, 7], seolitlar [8, 9], gidrotalkitlar [10], zirkonatlar [11] kabi minerallar keng tadqiq qilingan. Organik polimerlardan poliaminlar [12], polietilenimin [13] kabi azot saqlagan polimer birikmalar qo'llanilgan bo'lsa, gibrid materiallarga organik azot saqlovchi moddalar bilan modifikatsiyalangan noorganik sorbentlar – silikagel [14] va faollangan ko'mir kiritiladi.

Melamin-formaldegid smolalar asosida gazlarning tanlab yutilishiga asoslangan sorbentlar olishing asosiy usuli yuqoqir haroratlarda hosil bo'ladigan faollangan ko'mirlarga asoslanadi. Bu sorbentlarning CO₂ sorbsiyasi ham o'rganilgan bo'lib, yog'och sellyulozasidan olingan faollantirilgan ko'mirlarga nisbatan sorbsion qobilyati yuqori ekanligi aniqlangan [15, 16].

Turli polimer birikmalar tarkibiga melamin kiritilganda ularning qutbli gazlar sorbsiyasiga bo'lgan selektivligi ortib boradi. Vodorod, azot, metan tarkibidagi karbonat anhidrid gazini tanlab yutuvchi sorbentlar yaratish sohasida ham tajribalar olib borilgan [17–19].

Silikagelning turli organik birikmalar bilan modifikatsiyalash natijasida uning sorbsion hos-salarini yaxshilash bo'yicha ishlar olib borilgan. Har bir soha uchun selektiv birikmalar yaratish bo'yicha tadqiqotlarning asosiy yo'nalishlaridan biri ham modifikatsiyalash hisoblanadi. Silikagelning tetraalkilammoniy galogenidlar [20], allil glitsidil efir [21], bilan modifikatsiyalanishidan samarali katalizatorlar olingan.

Gazlar sorbsiyasi uchun esa etanolamin [22], aminlar [23], aminopropiltrimetoksisilan,

N1-(3-trimetoksisililpropil)dietilentriamin [24], shuningdek, turli kremniyorganik birikmalar [25] bilan modifikatsiyalash jarayonlari keng qo'llaniladi. Ammo, ko'pchilik kremniyorganik birikmalarning tannarxi yuqoriligi, ishlab chiqarilish jarayonida ekologik muammolarning mavjudligi va katta miqdorda ishlab chiqarilmasligi katta to'siqlardan biri bo'lib keladi. Silikagel asosida tayyorlangan kompozitsion birikmalarning ham sorbsion hossalari nisbatan yaxshi ekanligi o'rganilgan [26–28].

Melamin-formaldegid polimeri tarkibida juda ko'p miqdorda azot saqlaydi. Ammo, bu polimerning g'ovaklilik darajasi past va sirt yuzasi kamligi sababli sorbsion sig'imi kam bo'ladi. Ushbu tadqiqotning maqsadi - sirt yuzasi katta bo'lgan silikagel sorbentining yuzasiga melamin-formaldegid polimeri zarralarini modifikatsiyalash orqali uning karbonat anhidridga nisbatan sorbsion sig'imini oshirish hisoblanadi.

Tadqiqot usullari

Melamin-formaldegid bilan modifikatsiyalangan silikagel (SMF) sorbentlarning tuzilishi IQ spektroskopiya (IRTracer-100, Shimadzu) usulida 400-4000 sm⁻¹ sohada funksional guruhlarning tebranishlari orqali aniqlangan. Sirt yuzasining tahlili skanerlovchi elektron mikroskop (SEM EVO MA 10, Carl Zeiss) tahlili yordamida o'rganilgan.

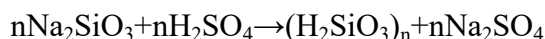
Sorbsion xususiyatlarni o'rganish. Olingan sorbentlarning sirt-sturktura xususiyatlari 20 °C haroratda, past bosimlarda brom gazining yutilishi bilan massaning ortishi natijasida sorbentlarni Mak-Ben-Bakra tarozisida o'lchash orqali o'rganildi. Olingan natijalar BET usulida hisoblandi [29].

Karbonat anhidrid sorbsiyasi va desorbsiyasini o'rganish. Sorbsiya jarayoni bir tomoni vakuum nasosiga, ikkinchi tomoni CO₂ balloniga ulangan U-simon nayda bajarildi. Nay ichiga 1,00 g sorbent solinib, 20 minut davomida 0,8 vakuumda saqlanadi. So'ngra nasos o'chirilib, ballondan CO₂ jo'natiladi. Bosim nasos monometri orqali nazorat qilinadi. Nayni suv hammomida termostatlash orqali turli haroratlarda sorbsiya jarayoni o'rganiladi. Sorbsiyalanish darajasi jarayon so'nggida sorbent massasini tortish orqali aniqlanadi.

Termik tahlillar Shimadzu TG-600 qurilmasida 40-600 °C oralig'ida bajarilgan. Sorbsiya va desorbsiya kinetikasini o'rganish uchun avvalo, azot muhitida 110 °C haroratda 30 min. qizdirish

orqali sorbentlar yutilgan gazlar va namlikdan tozalanadi. So'ngra 30, 50, 80 °C haroratlarda CO₂ muhitida massa ortishi to'xtagunga qadar ushlab turilgan. Shuningdek, jarayonni takrorlash sorbentlarning ishlash sikllarini o'rganish imkonini beradi [30].

Silikagelning olinishi. Silikagelni sintez qilish uchun natriy silikatning 0,1 M li eritmasi 0,1 M li sulfat kislota eritmasi bilan pH=4 bo'lgunga qadar neytrallanib, polikremniy kislotasining zollari olinadi. Zol 1 sutka davomida qoldirilganda gel hosil bo'ladi. So'ngra gel natriy sulfatning qoldiqlaridan qaynoq suv yordamida yuvib, filtrlanadi. Olingan modda 110 °C da doimiy massaga kelguncha quritiladi.



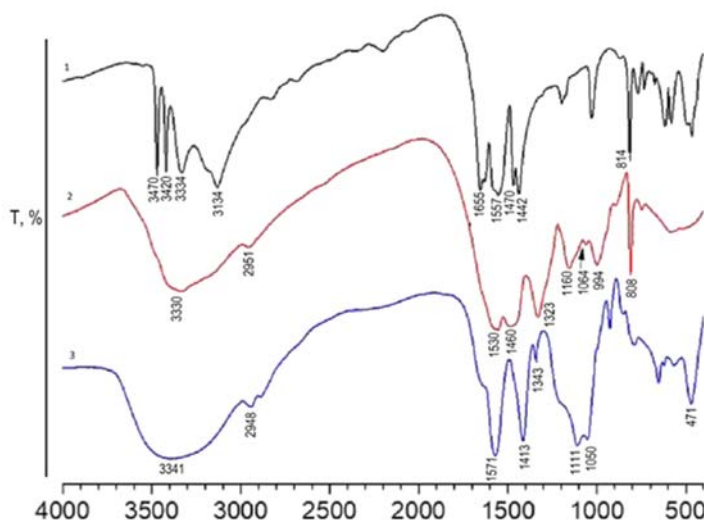
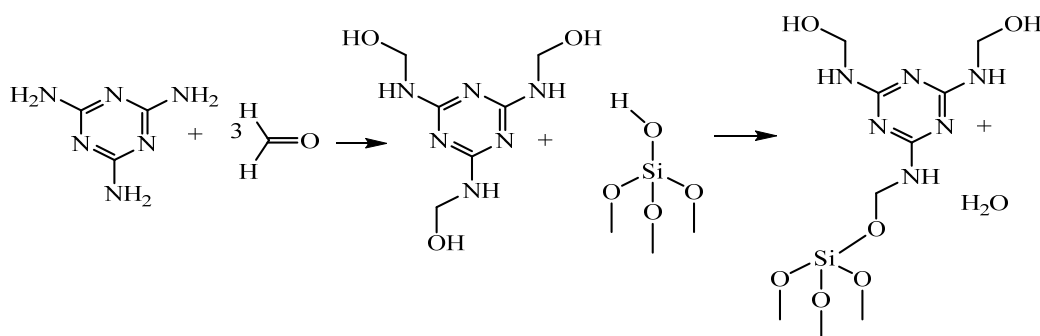
Sorbent sintezi. 160 ml formalin (37% formaldegid) ga 80 °C da qizdirib aralastirib turilgan holda 15 g melamin asta-sekin qo'shiladi. Tiniq eritma hosil bo'lguncha aralastiriladi. pH=8 atrofida bo'lishi kerak. Eritma hosil bo'lgach 10 g silikagel kukuni qo'shiladi.

So'ngra 48% li sulfat kislota eritmasi bilan pH=5 gacha turshiriladi. Aralshma harorati 95 °C ga ko'tariladi. 30 min davomida kondensatsiya reaksiyasi boradi. Olingan cho'kmani ortiqcha formalindan ammiak eritmasi bilan neytrallab tozalanadi. So'ngra cho'kma filtrlab olinib, maydalanadi va distillangan suv bilan yuviladi. So'ngra 150 °C da doimiy massaga kelguncha quritiladi.

Natijalar va muhokama

Melamin – formaldegid smola bilan modifikatsiyalangan silikagelning IQ spektri 1-rasmda keltirilgan. Rasmda melamin, melamin-formaldegid smolasi va olingan sorbentning IQ-spektrlarini solishtirish mumkin. Bunda ko'rinadiki, melaminning 3470 sm⁻¹ va 3419 sm⁻¹ sohadagi birlamchi amin guruhlarining valent tebranishlari metillanishi oqibatida yo'qoladi.

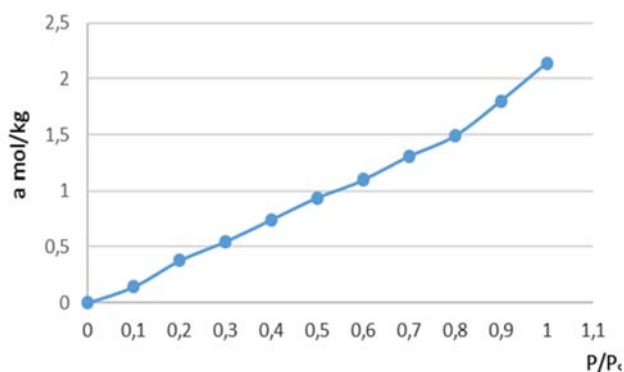
1655, 1555, 1469 va 1439 sm⁻¹ sohada 1,3,5 triazin xalqasining tebranishlari kuzatiladi. Biroz siljigan bo'lsada bu tebranishlar barcha birikmalarda mavjud. Melaminning formaldegid bilan birikishida odatda monomerlar hosil bo'lmaydi. Darrov to'rlanish jarayoni sodir bo'ladi,



1-rasm. Melamin (1), melamin-formaldegid smolasi (2) va SMF (3) IQ-spektrlari.

shuning uchun amin guruhlari yo'qolib, gidriksil guruhining $3000-3600\text{ cm}^{-1}$ sohadagi keng polosali tebranishlari paydo bo'ladi. Shuningdek, melaminda bo'lmagan C-H bog'larining valent tebranishlari 2965 cm^{-1} sohada paydo bo'ladi. Bu tebranishlar sorbent tarkibida ham saqlanib qoladi. Shuningdek, Si-O-Si bog'larining 1111 va 786 cm^{-1} sohalardagi assimetrik va 471 cm^{-1} sohada esa simmetrik tebranishlari kuzatiladi.

Struktura sorbsion xususiyatlari aniqlangan-da bromning sorbent yuzasiga yutilishi nisbiy bos-



2-rasm. SMF ga 20 °C dagi benzol bug'lari izotermasi.

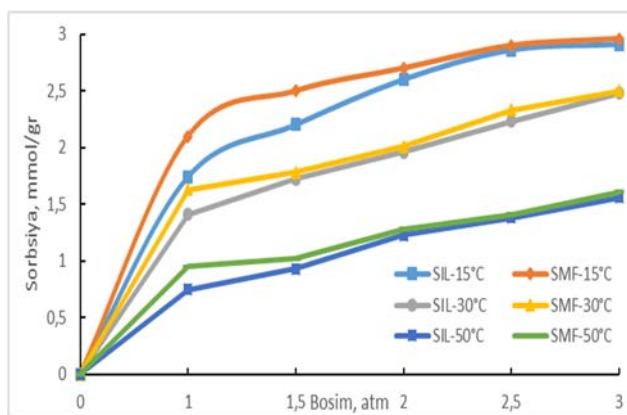
Modifikatsiyalangan (SMF) va modifikatsiyalanmagan (SIL) sorbentlarning struktura-sirt xususiyatlari

Namular	Monoqavatlar sig'imi, mol/kg	Solishtirma yuza, m ² /g	To'yinish hajmi, l	G'ovaklar radiusi, Å
SIL	3.8	704	0.2	4.2
SMF	0.4	98	0.18	38,6

imga bog'liqlik izotermasi tuzildi (2-rasm). Olingan natijalarga ko'ra namunaning hisoblangan sirt xususiyatlari 1-jadvalda keltirilgan.

Jadvaldan ko'rinadiki, melamin-formaldegid polikondensati silikagelning yuzasini qoplashi natijasida solishtirma yuza 7 martagacha kamayadi. G'ovaklarning o'rtacha radiusi yuqori ekanligi esa mikro va mezo g'ovaklarning polimer bilan to'lganligi natijasi deb qarash mumkin.

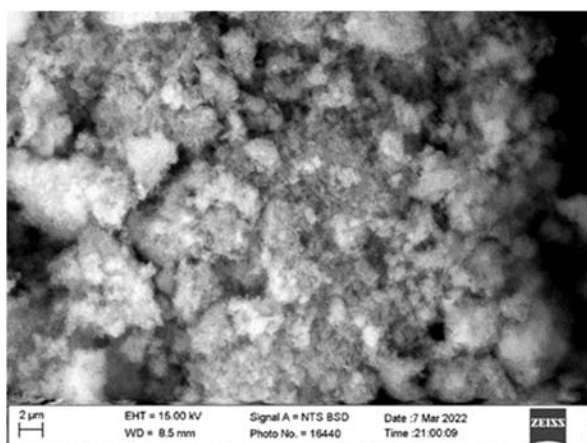
3-rasmda ko'rsatilgan SEM tasvirlari orqali olingan sorbentning g'ovaksimon modda ekanligi ko'rinadi. Katta sirt yuzaga ega bo'lgan sorbentning solishtirma sirt yuzasi yuqori bo'lib uning katta sorbsion sig'imiga ega bo'lishiga yordam beradi.



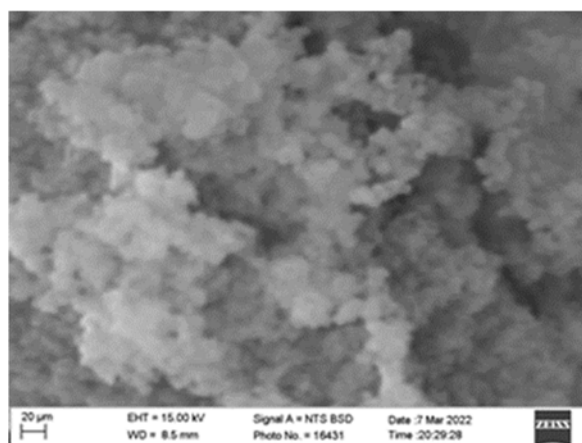
4-rasm. Karbonat anhidrid sorbsiyasining bosimga bog'liqligi.

Sorbsion xususiyatlar. Karbonat anhidrid bilan sorbsiyalash jarayoni 1-3 atmosfera bosimda olib borildi. Olingan natijalar 4-rasmda keltirildi.

Yuqoridagi rasimga ko'ra, melamin-formaldegid bilan modifikatsiyalangan sorbentlar modifikatsiyalanmagan sorbentlarga nisbatan 10-15% ko'proq karbonat anhidrid gazini yutadi. Am-



a



b

3-rasm. Sintezi qilingan SMF sorbentining 2mkm (a) va 20 mkm (b) SEM tasvirlari.

mo yuqori bosimlarda sorbsion xususiyat ortib borsada, kam o'zgaradi. Harorat ortganda esa, har ikkala sorbentning ham sorbsion sig'imi pasayadi. 110 °C dan yuqorida esa ikkala sorbentning ham sorbsion sig'imi deyarli yo'qoladi.

Sorbsiya-desorbsiya jarayonlarining optimal sharoitlarini aniqlash. Sorbentlarning desorbsiyasi termogravimetrik usulda o'rganilgan bo'lib, turli haroratlarda sorbsion sig'imning o'zgarishiga asoslanadi. Bajarilgan normal atmosfera bosimidagi sorbsiya uchun eng optimal haroratlarni aniqlash uchun o'lchangan haroratlar oralig'ida 15°C eng yuqori – 2.1 mmol/kg ni ko'rsatdi. 80 °C da esa sorbsion sig'im 0.15 mmol/kg bo'ladi. Desorbsiya jarayonini 110 °C da olib borish yanada to'liqroq bo'lsada, 5 ta sikldan keyin sorbsion sig'im 10% gacha kamayishi kuzatildi. 6-sikldan boshlab esa, modifikatsiyalanmagan silikagel bilan deyarli bir xil natijalar berishi aniqlandi. Shu sababli, de-

sorbsiyaning optimal sharoti sifatida 80 °C tanlandi.

Xulosalar

Melamin-formaldegid polimeri bilan modifikatsiyalangan silikagel sintezi amalga oshirildi. Uning tuzilishi IQ spektroskopik usulda o'rganildi. Stuktura-sirt xususiyatlari BET usulida hisoblanib, solishtirma yuzaning kamayishi va g'ovaklarning o'rtacha radiusining ortishi aniqlandi. Turli haroratlarda o'rganilgan sorbsion sig'im 15 °C da 1 atm bosimda 2,1 mmol/gr bo'lib, bundan yuqori bosimlarda esa kam o'zgaradi. Yuqori haroratlarda esa kamayadi. 1 atmosfera bosimdagi desorbsiya jarayoni uchun optimal harorat 80 °C ekanligi aniqlandi. Yuqori haroratlarda desorbsiya bilan birgalikda sorbentlarning tarkibi o'zgarishi natijasida samarali ishlash sikllari tez pasayib boradi. 110 °C da desorbsiyalardan 5 ta siklda 10% kamayishi aniqlandi.

REFERENCES

- Hannah R., Max R. Pablo R., CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Available at: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> (accessed: 18.08.2022).
- Choi S., Drese J.H., Jones C.W. Adsorbent materials for carbon dioxide capture from large anthropogenic point sources. *ChemSusChem.*, 2009, vol. 2, no. 9, pp. 796-854. DOI:10.1002/cssc.200900036.
- Barker R. The reversibility of the reaction $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$. *J. Appl. Chem. Biotechnol.*, 2007, vol. 23, no. 10, pp. 733-742. DOI: 10.1002/jctb.5020231005.
- Feng B., An H., Tan E. Screening of CO₂ adsorbing materials for zero emission power generation systems. *Energy and Fuels*, 2007, vol. 21, no 2, pp. 426-434. DOI: 10.1021/ef0604036.
- Wu Y.J., Li P., Yu J.G., Cunha A.F., Rodrigues A.E. Progress on sorption-enhanced reaction process for hydrogen production. *Reviews in Chemical Engineering*, 2016, vol. 32, no 3, pp. 271-303. DOI: 10.1515/revce-2015-0043.
- Davini P. Flue gas treatment by activated carbon obtained from oil-fired fly ash. *Carbon*, 2002, vol. 40, no. 11, pp. 1973-1979. DOI: 10.1016/S0008-6223(02)00049-0.
- Sarker A.I., Aroonwilas A., Veawab A. Equilibrium and Kinetic Behaviour of CO₂ Adsorption onto Zeolites, Carbon Molecular Sieve and Activated Carbons. *Energy Procedia*, 2017, vol. 114, pp. 2450-2459. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1394
- Walton K.S., Abney M.B., LeVan M.D. CO₂ adsorption in Y and X zeolites modified by alkali metal cation exchange. *Microporous Mesoporous Mater.*, 2006, vol. 91, no. 1-3, pp. 78-84. DOI: 10.1016/j.micromeso.2005.11.023
- Siriwardane R. V., Shen M.S., Fisher E.P. Adsorption of CO₂, N₂, and O₂ on natural zeolites. *Energy and Fuels.*, 2003, vol. 17, no 3, pp. 571-576. DOI: 10.1021/ef000241s.
- Yong Z., Mata V., Rodrigues A.E. Adsorption of carbon dioxide at high temperature - A review. *Sep. Purif. Technol.*, 2002, vol. 26, no 2-3, pp. 195-205. DOI: 10.1016/S1383-5866(01)00165-4.
- Ida J., Xiong R., Lin Y.S. Synthesis and CO₂ sorption properties of pure and modified lithium zirconate. *Sep. Purif. Technol.*, 2004, vol. 36, no. 1, pp. 41-51. DOI: 10.1016/S1383-5866(03)00151-5.
- Chen S., Jia B., Peng Y., Luo X., Huang Y., Jin B., Gao H., Liang Z., Hu X., Zhou Y., CO₂ Adsorption Behavior of 3-Aminopropyltrimethoxysilane-Functionalized Attapulgite with the Grafting Modification Method. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2021, vol. 60, no. 47, pp. 17150-17161. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c03436.
- Kaya G.G., Deveci H. CO₂ Capture using polyethyleneimine functionalized silica xerogels. *Konya J. Eng. Sci.*, 2021, vol. 9, no. 4, pp. 1109-1118. DOI: 10.36306/KONJES.1016120.
- Cherevotan A., Raj J., Peter S.C. An overview of porous silica immobilized amines for direct air CO₂ capture. *J. Mater. Chem. A.*, 2021, vol. 9, no. 48, pp. 27271-27303. DOI: 10.1039/D1TA05961K.
- Krupadam R.J., Rayalu S.S. Melamine-based resins and their carbons for CO₂ capture: a review. *Emergent Materials*, 2021, vol. 4, no. 2, pp.545-563. DOI: 10.1007/S42247-020-00157-3.
- Salaün F., Vroman I. Influence of core materials on thermal properties of melamine-formaldehyde microcapsules. *Eur. Polym. J.*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 849-860. DOI: 10.1016/J.EURPOLYMJ.2007.11.018.
- Principe I.A., Fletcher A.J. Adsorption selectivity of CO₂ over CH₄, N₂ and H₂ in melamine-resorcinol-formaldehyde xerogels. *Adsorption*. 2020, vol. 26, no. 5, pp. 723-735. DOI: 10.1007/S10450-020-00203-W.
- Tsubota T. Maguchi Y., Ishimoto K., Katamune Y., Kamimura S., Ohno T. Preparation of Porous Carbon Material Derived from Cellulose with Added Melamine Sulfate and Electrochemical Performance as EDLC Electrode. *J. Electron. Mater.*, 2018, vol. 48, no. 2, pp. 879-886. DOI: 10.1007/S11664-018-6799-Z.
- Wickramaratne N.P., Jaroniec M. Tailoring microporosity and nitrogen content in carbons for achieving high uptake of CO₂ at ambient conditions. *Adsorption*, 2014, vol. 20, no. 2-3, pp. 287-293. DOI: 10.1007/S10450-013-9572-X.
- Lyubimov S.E., Sokolovskaya M.V. Silica gel modified with tetraalkylammonium halides as an available and efficient catalyst for the synthesis of cyclic organic carbonates from epoxides and CO₂. *Russ. Chem. Bull.*, 2019, vol. 68, no. 10, pp. 1866-1868. DOI: 10.1007/S11172-019-2637-6.
- Lee M.K., Shim H.L., Dharman M.M., Kim K.H., Park S.W., Park D.W. Synthesis of cyclic carbonate from allyl glycidyl ether and CO₂ over silica-supported ionic liquid catalysts prepared by sol-gel method. *Korean J. Chem. Eng.*, 2009, vol. 25, no. 5, pp. 1004-1007. DOI: 10.1007/S11814-008-0162-7.
- Zhang Y., Chen K., Lv C., Wu T., Wen Y., He H., Yu Sh., Wang L. Adsorption Separation of CO₂/CH₄ from Landfill Gas by Ethanolamine-Modified Silica Gel. *Water. Air. Soil Pollut.*, 2021, vol. 232, no. 2, pp. 1-11.

23. Loganathan S., Kumar K., Ghoshal A.K. *Fabrication of Mesoporous Silica MCM-41 Via Sol-Gel and Hydrothermal Methods for Amine Grafting and CO Capture Application*. Springer, Cham, 2018. 349 p.
24. Jung H., Lee Ch.H., Jeon S., Jo D.H., Huh J., Kim S.H. Effect of amine double-functionalization on CO₂ adsorption behaviors of silica gel-supported adsorbents. *Adsorption*, 2016, vol. 22, no. 8, pp. 1137–1146. DOI: 10.1007/S10450-016-9837-2.
25. Velikova N., Spassova I. Bifunctional mesoporous hybrid sol-gel prepared silicas for CO₂ adsorption. *J. Sol-Gel Sci. Technol*, 2021, vol. 100, no. 2, pp. 326–340. DOI: 10.1007/s10971-021-05641-8.
26. Kong Y., Zhang J., Shen X. One-pot sol-gel synthesis of amine hybrid titania/silsesquioxane composite aerogel for CO₂ capture. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 2017, vol. 84, no. 3, pp. 422–431. DOI: 10.1007/S10971-017-4516-7.
27. Kang B.S., Hyun S.H. γ -Alumina composite membranes modified with microporous silica for CO₂ separation. *J. Mater. Sci.*, 1999, vol. 34, no. 6, pp. 1391–1398. DOI: 10.1023/A:1004531022136.
28. Moon J.H., Ahn H., Hyun S.H., Lee Ch.H. Separation characteristics of tetrapropylammoniumbromide templating silica/alumina composite membrane in CO₂/N₂, CO₂/H₂ and CH₄/H₂ systems. *Korean J. Chem. Eng.*, 2004, vol. 21, no. 2, pp. 477–487. DOI: 10.1007/BF02705438.
29. Lowell S., Shields J.E. *Powder Surf. Area Porosity*. Springer, Dordrecht, 1991. pp. 30–34. DOI: 10.1007/978-94-015-7955-1_5.
30. Geldiev Y.A., Turaev Kh.Kh., Umbarov I.A. Thermal analysis of modified polysilicic acid with amino alcohols. *Austrian J. Tech. Nat. Sci.*, 2022, no. 3–4, pp. 72–75. DOI: 10.29013/AJT-22-3.4-72-75.