UDK 66.074

TEXNOLOGIK GAZLAR TARKIBIDAN KARBONAT ANGIDRIDNI AJRATIB OLISH UCHUN ADSORBSION TEXNOLOGIYALARNING HOZIRGI HOLATI

Temirova O‘g‘ilxon Maxammadqosimxon qizi
O‘zbekiston kimyo farmatsevtika ilmiy tadqiqot instituti tayanch doktorant,
Qobilov Nodirbek Sobirovich
O‘zbekiston kimyo farmatsevtika ilmiy tadqiqot instituti t.f.d., katta ilmiy xodim
https://orcid.org/0000-0002-4732-4825
E-mail: nodirbekdoc2020@gmail.com
Tog‘ayev Abror Ikrom o‘g‘li
Qarshi davlat texnika universiteti dotsent.
https://orcid 0009-0002-6634-5821
E-mail: abrortogayev93@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu ilmiy maqolada karbonat angidrid va boshqa gazlarning atrof muxitga ta’siri, texnologik gazlar (flue gas, sintez-gaz, tabiiy gaz) tarkibidan karbonat angidrid (CO_2)ni samarali ajratib olish uchun qo‘llanilayotgan X va Y turdagi seolit adsorbentlar asosidagi zamonaviy xorijiy tadqiqotlar tahlil qilindi. Bunda asosiy e’tibor ACS Applied Energy Materials va Materials Sustainability jurnallarida chop etilgan maqolalari o‘rganildi. Tahlilni seolitlarning tuzilishi, Si/Al nisbati, kation tarkibi, adsorbsiya mexanizmi, hamda PSA/VSA texnologiyalari nuqtayi nazaridan olib bordik. Ilmiy tomondan ishning yutuqlari va cheklovlari tanqidiy baholanib, kelgusi tadqiqotlar uchun konseptual yo‘nalishlar taklif etildi.

Kalit so‘zlar: karbonat angidrit, ajratish, seolit X, seolit Y, adsorbsiya, PSA, VSA, selektivlik, termodinamika.

Abstract. This scientific article examines the environmental impact of carbon dioxide and other gases, and the technologies for treating gases (flue gas, synthesis gas, natural gas) are examined. The analysis focuses on modern foreign research using X- and Y-type zeolite adsorbents for the effective separation of carbon dioxide (CO_2) from these gas streams. The main focus was on articles published in the journals ACS Applied Energy Materials and Materials Sustainability. The analysis was conducted from the perspectives of zeolite structure, Si/Al ratio, cation composition, adsorption mechanism, and PSA/VSA technologies. The scientific achievements and limitations of the work were critically evaluated, and conceptual directions for future research were proposed.

Keywords: carbonate anhydrite, separation, zeolite X, zeolite Y, adsorption, PSA, VSA, selectivity, thermodynamics.

ISSN 3030-3907

Аннотация. В данной научной статье рассматривается воздействие углекислого газа и других газов на окружающую среду, а также технологии очистки газов (дымовых газов, синтез-газа, природного газа. Анализ сосредоточен на современных зарубежных исследованиях с использованием адсорбентов цеолитов X- и Y-типа для эффективного удаления углекислого газа (CO_2) из этих газовых потоков. Основное внимание было уделено статьям, опубликованным в журналах ACS Applied Energy Materials и Materials Sustainability. Анализ проводился с точки зрения структуры цеолита, соотношения Si/Al, состава катионов, механизма адсорбции и технологий PSA/VSA. Была проведена критическая оценка научных достижений и ограничений работы, а также предложены концептуальные направления для будущих исследований.

Ключевые слова: карбонатный ангидрит, отделение, цеолит X, цеолит Y, адсорбция, PSA, VSA, селективность, термодинамика.

KIRISH

Iqlim o‘zgarishi iqtisodiy, ijtimoiy va ekologik jihatlarga ta’sir ko‘rsatib, global miqyosda jiddiy muammo bo‘lib kelgan [1]. Atmosferada issiqxona gazlari (IG), ya’ni CO_2, CH4 va N_2O [2] to‘planishi turli xil inson faoliyati ta’siri natijasidir, bu Yer haroratining sezilarli darajada oshishiga va natijada global inson hayotiga xavf tug‘dirishiga olib keldi [3]. Issiqxona gazlari orasida karbonat angidrid (CO_2) eng yuqori konsentratsiyaga ega [4], 2024-yilda global chiqindilar taxminan 37,8 gigaton (Gt) ga yetdi. So‘nggi bir necha o‘n yilliklarda energiyaga bo‘lgan talab hamda sanoatlashuv jarayonining jadal sur’atlarda rivojlanishi natijasida atmosferaga chiqarilayotgan CO_2 chiqindilari miqdori keskin oshib bormoqda. Xususan, dunyo bo‘yicha 1960-yilga nisbatan 2021-yilga kelib CO_2 ning atmosferaning yer sathidagi o‘rtacha konsentratsiyasi 317 ppm dan 414.7 ppm gacha ko‘tarilgan. Bu esa karbonat angidrid chiqindilarini kamaytirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlarni yanada jadallashtirmoqda.

Turli xildagi elektr stansiyalari, neft-gazni qayta ishlash jarayonlari, kimyo sanoati chiqargan texnologik gazlar hamda issiqxonalar faoliyati atmosferaga CO_2 chiqarilishining asosiy manbai bo‘lib qolmoqda. Shuni hisobga olgan holda texnologik gazlardan CO_2 ni samarali, iqtisodiy va selektiv usullarda ajratib olish hozirgi kundagi dolzarb ilmiy-amaliy vazifaga aylanib bormoqda [5]. O‘zbekistonda texnologik gazlardan CO_2 ni ajratib olish bo‘yicha so‘nggi statistik jarayonlar quyidagilarni o‘z ichiga oladi. CCS texnologiyalarini joriy etish bo‘yicha ilk strategik hamkorlik boshlandi, bu CO_2 va sanoat chiqindilarini texnologik usul bilan tozalash yo‘lidagi katta qadam hisoblanadi. Xalqaro grantlar va loyihalar CO_2 emissiyasi kamaytirish uchun monitoring, verifikatsiyani

ISSN 3030-3907

shakllantirilmoqda. Qayta tiklanuvchi energiya va infratuzilma orqali CO_2 chiqindilarini amaliy kamaytirish ta'siri sezilarli darajaga yetayotgani kuzatilmoqda [6].

MATERIAL VA USLUBLAR. Seolitlar asosida CO_2 adsorbsiyasining ilmiy asoslari Aminli yutish usullariga nisbatan seolitlar asosidagi adsorbsion texnologiyalardan foydalanish bir qancha ustunliklarga ega bo‘lib bular quyidagilar: past energiya sarfi, yuqori qayta tiklanish qobiliyati va strukturani molekular darajada boshqarish imkoniyati [7]. Seolitlar — yuqori tarkibli alyumosilikat kristall materiallar bo‘lib, ularning ichida molekular o‘lchamdagi g‘ovaklar mavjud [8]. Ularning aynan g‘ovaklik xususiyati katalizatorlik hamda singdiruvchanlik jihatini orttirib beradi, bu esa CO_2 gazini ajratish uchun ma'qbul tanlov hisoblanadi. Xususan, X va U turdagi seolitlar turli hajmdagi g‘ovaklik, singdiruv qobiliyati va termik barqarorligi bilan ajralib turadi. Quyida biz ularning bir qancha holatlarini bayon etib o‘tamiz .

1. Seolitlar CO_2 adsorbsiyasida yuqori selektivlik, ishchi sig‘im va barqarorlikni ta'minlaydi.

2. CO_2 ajratish samaradorligi asosan: • kvadrupol moment • kation tabiati • Si/Al nisbati • teshik o‘lchami bilan belgilanadi.

3. X va Y tur seolitlar sanoat miqyosida eng samarali adsorbentlardir.

4. Li^+ va Ca^{2+} almashinuvi selektivlikni oshiradi.

5. Amin funksionallashtirish DAC uchun istiqbolli yo‘nalishdir.

6.Sterik va kinetik effektlarni birlashtirgan gibrid yondashuv kelgusi tadqiqotlar uchun muhim hisoblanadi.

TANLANGAN ILMIY ISHLAR TAVSIFI. O‘rganib chiqilgan ilmiy ishlarda asosiy e'tibor seolit X va unga yaqin tuzilishli adsorbentlarning CO_2/N_2 va CO_2/CH_4 aralashmalaridan CO_2 ni selektiv ushlash (ajratib olish) qobiliyatiga qaratilgan. Mualliflar seolit tuzilishga ega bo‘lgan alyuminiy markazlari va kompensator kationlar (Na^+, Ca^{2+})ning CO_2 molekulasi bilan kuchli kvadrupol o‘zaro ta'sir hosil qilishini ilmiy jihatdan asoslaydi. [9]. O‘rganishlarimiz natijasida shuni ta'kidlashimiz joizki, ushbu ilmiy ishlarning asosiy ilmiy yutug‘i – seolit X da adsorbsiya izotermalarini eksperimental va modellashtirish usullari orqali solishtirib berilganidir. Keyingi o‘rganilgan ishlarda seolit Y asosida CO_2 ni ajratish masalasi kengroq - karbon neytrallik konsepsiyasi doirasida ko‘rib chiqilgan. Bunda mualliflar seolit Y ning keng kanalli tuzilishi va yuqori termal barqarorligi PSA va VSA jarayonlari uchun qulay ekanini ko‘rsatadi. [2].

NATIJALAR VA ULARNING MUHOKAMASI. Ilmiy tahlillarni o‘rganish natijalariga ko‘ra, yangi maqolalarning kuchli jihati — adsorbsiya mexanizmlarini **equilibrium effect** (Muvozanat effekti), k**inetic effect** (kinetik

ISSN 3030-3907

effekt) va **Gating effect** (Geyting effekti) nuqtayi nazaridan kompleks tahlil qilinganidir. Shuni ta'kidlab o'tishimiz joizki, Equilibrium effect (Muvozanat effekti) gaz aralashmasida qaysi komponent adsorbent (masalan, X yoki Y seolit) yuzasiga ko'proq va kuchliroq bog'lanishi muvozanat holati orqali aniqlanadi. Misol uchun CO_2 molekulasi kvadrupol momenti yuqori, seolitdagi kationlar bilan kuchliroq ta'sirlashadi natijada esa CO_2 gazi N_2 ga nisbatan ko'proq yutiladi. Bu holat uzoq vaqt o'tgandan keyingi barqaror vaziyatni ko'rsatadi. Kinetic effect (Kinetik effekt) gaz molekulalarining adsorbent teshiklariga qanchalik tez kirishi bilan bog'liq effekt. Bunda diffuziya tezligi, molekula diametri, g'ovak o'lchami katta ahamiyat kasb etadi. Agar bir gaz tezroq diffuziya qilsa, u birinchi bo'lib adsorbsiyalanadi. Lekin ba'zi hollarda CO_2 emas, balki kichik molekula gazlar tezroq g'ovaklarga kirishi mumkin. Bu vaqtga bog'liq jarayon hisoblanadi (tezlik muhim). [10]. Gating effect (Geyting effekti) adsorbent teshiklarining "ochilib-yopilishi" kabi dinamik xususiyati. Ya'ni, g'ovak ma'lum bosimda ochiladi yoki muayyan molekula kirganda struktura o'zgaradi. Bu ayniqsa MOF materiallarda, modifikatsiya qilingan seolitlarda uchraydi. Shunda g'ovak strukturasi statik emas, balki shartga qarab o'zgaradi (1-jadval).

1-jadval

X va Y turdagi seolitlarning strukturaviy va funksional tahlili

ko'rsatkichlar	seolit X	seolit Y
G'ovak diametri	7.4	7.4-8.0
Si/Al nisbati	Past	O'rta-yuqori
CO_2 selektivligi	Yuqori	O'rta-yuqori
Namlikka chidamlilik	Pastroq	Yuqoriroq
PSA uchun moslik	O'rta	Yuqori

(G'ovak diametri angstrem o'lchamida o'lchangan)

Ishni o'rganishimiz bo'yicha, seolit X yuqori selektivlikka ega bo'lsa-da, namlikka sezgirligi uni real texnologik gazlar uchun cheklaydi. Seolit Y esa barqarorlik nuqtayi nazaridan ustun.

Adsorbsion texnologiyalarning tahlili. PSA (Pressure Swing Adsorption) va VSA (Vacuum Swing Adsorption) texnologiyalari CO_2 ajratish va texnologik gazlarni tozalash jarayonlarida keng foydalaniladi. PSA (Pressure Swing Adsorption) bosim farqi asosida gazlarni ajratish usuli. VSA (Vacuum Swing Adsorption) vakuum sharoitida ishlovchi adsorbsion gaz ajratish texnologiyasi. Ikkala ilmiy maqolada ham PSA va VSA texnologiyalari asosiy sanoat usuli sifatida ko'rsatilgan. Lekin dastlabki ilmiy ishlarni olib qarasak, jarayon ko'proq laboratoriya darajasida olib borilgan, keyingi ishlarda esa sikl samaradorligi, energiya sarfi va mashtablash imkoniyatlari keng muhokama qilingan. Shuni

ISSN 3030-3907

ta’kidlashimiz joizki, kelajakda gibrid PSA–membrana yoki seolit–MOF kompozitlari asosida yangi adsorbentlar yaratish maqsadga muvofiq hisoblanadi. [11].

Termodinamik va kinetik modellar CO_2 adsorbsiyasida izosterik issiqlik (Q_{st}) muhim parametr hisoblanadi. Seolit X da Q_{st} yuqori (40–50 kJ/mol), bu kuchli adsorbsiyani anglatadi, ammo desorbsiya energiyasini oshiradi. Seolit Y da esa Q_{st} mo‘tadil (30–40 kJ/mol) xisoblanadi [12]. O‘rganishlarimizga ko‘ra, optimal adsorbent bu yuqori selektivlik va past regeneratsiya energiyasi o‘rtasida muvozanatga ega bo‘lishi lozim [6]. Shuni ta’kidlab o‘tishimiz lozim, dastlabki ilmiy ishlarda X turdagi seolitlar PSA va VSA texnologiyalari orqali CO_2 gazini texnologik gazlardan ajratishdagi yuqori selektivlik va barqarorlik xususiyatlarini tahlil qilingan. Ushbu ilmiy ishlarda seolitlar strukturasining Faujasite (tabiiy va sintetik seolitlar guruhiga kiruvchi alyumosilikat mineral struktura) turi, past Si/Al nisbati va yuqori Al kontenti orqali CO_2 molekulalari uchun ko‘p aktiv saytlar taqdim etishi e’tiborga olingan. Shu bilan birga, ular siklik adsorbsiya jarayonlarida samarali va uzoq muddatli ishlash qobiliyatiga ega ekanligi ta’kidlangan, ammo funksionallashtirish imkoniyatlari chegaralanganligi ham qayd etilgan. So‘ngi ilmiy ishlarda esa Y turdagi seolitlar orqali CO_2 selektiv adsorbsiyasini optimallashtirish strategiyalari tahlil qilingan. Bu maqolada Y turdagi seolitlar strukturasini funksionallashtirish, ion almashtirish va mezoporali/iyerarxik tuzilish yaratish orqali CO_2 selektivligini oshirish imkoniyatlari ko‘rsatilgan [13]. Shuningdek, bu yondashuv zamonaviy texnologiyalar (jumladan DAC va turli industrial gaz chiqarish ssenariylari)da samarali qo‘llanilishi va moslashuvchanlik xususiyatini ta’minlaydi (2-jadval).

2-Jadval

Ilmiy ishlar natijalarini qiyosiy baholash

Ko‘rsatkich	**ACS Applied Energy Materials**	**Materials Sustainability**
Fundamental tahlil	Yuqori	Yuqori
Mexanizmini tushuntirilishi	O‘rtacha	Chuqur
Sanoat yo‘nalish	Kuchli	O‘rtacha
Material dizayni	O‘rtacha	Kuchli
Karboon neytrallik konsepsiyasi	Kam	Keng

XULOSA. Har bir ilmiy ish yuzasidan ma’lum yutuqlarga erishilgan, texnologik jarayonlarni batafsil yoritishga harakat qilingan. X turdagi seolitlar

ISSN 3030-3907

an’anaviy PSA va VSA texnologiyalari uchun ideal, barqaror va uzoq muddatli siklik ishlash qobiliyatiga ega.

Y turdagi seolitlar esa zamonaviy ekologik va industrial texnologiyalar uchun yuqori moslashuvchanlik va CO_2 selektivligini oshirish imkoniyatini taqdim etadi. Shu asosda, kelgusi tadqiqotlar Y turdagi seolitlarning strukturasini optimallashtirish va PSA/VSA texnologiyalari bilan integratsiya qilish orqali CO_2 gazini samarali ajratish jarayonini yanada takomillashtirishga qaratilgan bo‘lishi tavsiya qilinadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. D. G. Boer, Jort Langeberak, Paolo P.Pescarmona. 2023. Applied Energy Materials.
2. Z. Tao, Yuanmeng Tian, Wei Wu, Zhendon Liu, Weiqi Fu, Chung Wei Kung, Jin Shang. 2024. Materials Sustainability (Nature).
3. S.Zhang *et al.* Carbon emissions from international trade and consumption: assessing the role of cumulative risk for EU and Chinese economic development Energy Strategy Rev.(2023).
4. W.Y. Hong. A techno-economic review on carbon capture, utilisation and storage systems for achieving a net-zero CO_2 emissions future.Carbon Capture Sci. Technol. (2022).
5. S. Kumar *et al.*Utilization of zeolites as CO_2 capturing agents: advances and future perspectives.J. CO_2 Util. (2020).
6. M.N. Anwar *et al.* CO_2 capture and storage: a way forward for sustainable environment.J. Environ. Manag.(2018)
7. F. Bahmanzadegan *et al.* Modification and functionalization of zeolites to improve the efficiency of CO_2 adsorption: a review.Case Stud. Chem. Environ. Eng. (2024).
8. X.Y.D. Soo *et al.* Advancements in CO_2 capture by absorption and adsorption: a comprehensive review. J. CO_2 Util. (2024).
9. J.W. Park *et al.* Membrane-based CO_2 capture across industrial sectors: process conditions, case studies, and implementation insights. Membranes (Basel). (2025).
10. Y. Jia *et al.* Recent development of membranes for carbon capture: from materials to asymmetric membranes. Prog. Mater. Sci. (2024).
11. M. Shen *et al.* Cryogenic technology progress for CO_2 capture under carbon neutrality goals: a review. Sep. Purif. Technol. (2022).
12. United Nations. Paris Agreement; Cambridge University Press, 2015. DOI: 10.1017/s0020782900004253
13. Friedlingstein, P. et al. Global carbon budget 2022. Earth Syst. Sci. Data. 14, 4811–4900 (2022).

ISSN 3030-3907

14. Рахматов, Х. Б., & Тогаев, А. И. У. (2023). Исследование кинетики реакции высокомолекулярных углеводородов с синтез-газом. Universum: технические науки, (12-6 (117)), 32-36.
15. Togayev, A. (2025). PRODUCTION OF HIGH-ACTIVITY CATALYSTS FOR OBTAINING LIQUID HYDROCARBONS FROM NATURAL GAS. Austrian Journal of Technical & Natural Sciences.
16. Kobilov, N., Togaev, A., & Nasullaev, K. CATALYST PRODUCTION TECHNOLOGY FOR METHANE OXYCONDENSATION REACTION. Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, 117.
17. Qobilov, N. S., & Ergashev, S. J. (2026). YOG ‘-MOY SANOATI CHIQINDILARINING FIZIK-KIMYOVIY XUSUSIYATLARI VA ULAR ASOSIDA SIRT FAOL MODDALAR ISHLAB CHIQISH. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(1).
18. Qobilov, N. S., & Ergashev, S. J. (2026). MOYLOVCHI MATERIALLAR UCHUN SIRT FAOL MAODDALAR TARKIBI VA TEXNOLOGIYASI. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(1).
19. Rakhmatov, K., Rakhmatov, D., Makhamov, B., Togayev, A., & Omonqulov, S. (2025, July). Development of a method for the synthesis of highly dispersed Naa aluminosilicate. In AIP Conference Proceedings (Vol. 3304, No. 1, p. 040087). AIP Publishing LLC.
20. Ikrom o’g, T. A. A., & Baxtiyor o‘g‘li, Y. J. (2022). “Yer osti gidravlika” fanidan amaliy mashg’ulotlarni hisob dasturi.
21. Rahmatov, X. B., Tog‘ayev, A. I., & Kamolov, L. S. FISHER-TROPSH JARAYONI ASOSIDA BENZIN QATORI SUYUQ UGLEVODORODLAR SINTEZINING ILMIY ASOSLARINI ISHLAB CHIQISH. ҚарДУ ХАБ, 95.
22. Рахматов, Х. Б., Тогаев, А. И., & Камолов, Л. С. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА И КОНВЕРСИЯ МЕТАНА В НИЗШИЕ ОЛЕФИНЫ–ЭТИЛЕН, ПРОПИЛЕН И БУТИЛЕН. ҚарДУ ХАБ, 53.
23. Kobilov, N., Togaev, A., & Nasullaev, K. CATALYST PRODUCTION TECHNOLOGY FOR METHANE OXYCONDENSATION REACTION. Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, 117.
24. Рахматов, Х. Б., Тагаев, А. И., & Камолов, Л. С. ПОЛУЧЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО БЕНЗИНА ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА. ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ ОЛИЙ ТАЪЛИМ, ФАН ВА ИННОВАЦИЯЛАР ВАЗИРЛИГИ ҚАРШИ ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ ТАҲРИРИЯТ ҲАЙЪАТИ: Бош муҳаррир, 72.

ISSN 3030-3907