

**METALL IONLARI BILAN MODIFIKATSIYALANGAN ALUMOSILIKAT
TASHUVCHILARNING FIZIK-KIMYOVIY XOSSALARI****ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ
НОСИТЕЛЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИОНАМИ МЕТАЛЛОВ****PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF ALUMINOSILICATE CARRIERS
MODIFIED WITH METAL IONS****Hotamov Xayrullo Shukrullo o'g'li**

Olmaliq davlat texnika instituti talabasi

xayrullohatamov@gmail.com

Annotatsiya. Muammo alumosilikat tashuvchilarda Cu^{2+} , Fe^{3+} va Zn^{2+} ionlari kiritilgandan keyin sirt, g'ovak va skelet parametrlarining qanday qayta taqsimlanishini bir xil usulda baholash zaruratidan kelib chiqadi. Tadqiqotning maqsadi Si/Al nisbati 2–6 oralig'idagi namunalar uchun metall ionlari bilan modifikatsiyalashning fizik-kimyoviy oqibatlarini solishtirish edi. Laboratoriya tajribasi impregnatsiya-quritish-kalsinatsiya zanjiri bo'yicha bajarildi; namunalar 0,5 mol/L CuSO_4 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ va $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ eritmalarida ishlov berilib, 100°C da quritildi va 500°C da kalsinatsiya qilindi. Tarkib va sirt holati ICP-OES, XRF hamda PCA orqali baholandi, spektral signallar $450\text{--}1100\text{ sm}^{-1}$ sohada tahlil qilindi. Natijalar Cu^{2+} , Fe^{3+} va Zn^{2+} bilan ishlov berilgan namunalarda o'zgarishlar bir xil emasligini ko'rsatdi: ayrim fizik-kimyoviy ko'rsatkichlarda 1,3 %; 2,3 %; 15,6 % va 30,7 % darajadagi siljishlar qayd etildi. Eng sezilarli farqlar Fe^{3+} bilan modifikatsiyalangan tarkibda kuzatildi, bunda skelet tebranishlari va sirt signallari orasidagi muvozanat aniq qayta shakllandi. Xulosa shuki, metall ionlari bilan modifikatsiyalash alumosilikat tashuvchilarning sirt kislotaliligi, ion-almashinish sig'imi va g'ovak tuzilmasini birgalikda boshqaradi. Ilmiy hissa sifatida PCA, ICP-OES va XRF ma'lumotlarini birlashtirgan qiyosiy yondashuv taklif qilindi, bu esa turli metall kationlarining strukturaviy ta'sirini bir platformada ajratish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: g'ovaklik, impregnatsiya, ion almashinish, komponentlar tahlili, sirt kislotaliligi, spektral siljish

Аннотация. Проблема состоит в необходимости единообразно оценить, как после введения ионов Cu^{2+} , Fe^{3+} , Zn^{2+} перераспределяются поверхностные, поровые и каркасные параметры алюмосиликатных носителей. Цель работы заключалась в сравнительном анализе физико-химических последствий модифицирования ионами металлов для образцов с отношением Si/Al в диапазоне 2–6. Лабораторный эксперимент выполнялся по цепочке пропитка-

сушка-кальцинация; образцы обрабатывали растворами 0,5 mol/L CuSO_4 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ и $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, сушили при 100°C и кальцинировали при 500°C . Состав и состояние поверхности оценивали методами ICP-OES, XRF и PCA, а спектральные сигналы анализировали в области $450\text{--}1100\text{ см}^{-1}$. Результаты показали, что изменения в образцах, обработанных Cu^{2+} , Fe^{3+} и Zn^{2+} были неодинаковыми: в ряде физико-химических характеристик зафиксированы сдвиги на 1,3 %; 2,3 %; 15,6 % и 30,7 %. Наиболее выраженные различия наблюдались для состава, модифицированного Fe^{3+} , где чётко перестроился баланс между каркасными колебаниями и поверхностными сигналами. Вывод состоит в том, что модифицирование ионами металлов совместно управляет кислотностью поверхности, ионообменной ёмкостью и пористой структурой алюмосиликатных носителей. Научный вклад заключается в сравнительном подходе, объединяющем данные PCA, ICP-OES и XRF, что позволяет отдельно выявлять структурное влияние различных металлических катионов на одной аналитической платформе.

Ключевые слова: пористость, импрегнация, ионный обмен, компонентный анализ, поверхностная кислотность, спектральный сдвиг

Abstract. The problem is the need to evaluate in a consistent way how surface, pore, and framework parameters are redistributed after introducing Cu^{2+} , Fe^{3+} , Zn^{2+} ions into aluminosilicate carriers. The aim of the work was to compare the physicochemical consequences of metal-ion modification for samples with Si/Al ratios in the 2–6 range. The laboratory experiment followed an impregnation-drying-calcination sequence; the samples were treated with 0.5 mol/L CuSO_4 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$, and $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ solutions, dried at 100°C , and calcined at 500°C . Composition and surface state were assessed by ICP-OES, XRF, and PCA, while spectral signals were analyzed in the $450\text{--}1100\text{ см}^{-1}$ region. The results showed that the changes in the Cu^{2+} , Fe^{3+} , and Zn^{2+} -treated samples were not uniform: shifts of 1.3 %; 2.3 %; 15.6 %; and 30.7 % were recorded in several physicochemical characteristics. The most pronounced differences were observed for the Fe^{3+} -modified composition, where the balance between framework vibrations and surface signals was clearly reorganized. The conclusion is that modification with metal ions jointly controls surface acidity, ion-exchange capacity, and the porous structure of aluminosilicate carriers. The scientific contribution lies in a comparative approach that integrates PCA, ICP-OES, and XRF data, making it possible to isolate the structural influence of different metal cations on a single analytical platform.

Keywords: porosity, impregnation, ion exchange, component analysis, surface acidity, spectral shift

KIRISH

2024–2025 yillarda Si/Al nisbati 2–6 oralig'idagi alumosilikat tashuvchilarni Cu^{2+} , Fe^{3+} va Zn^{2+} ionlari bilan modifikatsiyalash masalasi ayniqsa dolzarbdir, chunki bunday tizimlarda kislota-markazlar zichligi va ion-almashinish sig'imi bir vaqtning o'zida o'zgaradi [1]. Metall ionlari kiritilganda sirt gidroksil guruhlari qayta taqsimlanadi, termik barqarorlik esa kristall panjara siljishi bilan bog'liq holda kuchayadi [2]. Shu sababli, metall-ionli alumosilikatlar adsorbsiya va katalitik tayanch sifatida amaliy ahamiyat kasb etmoqda [3].

Mavjud tadqiqotlarda Fe(III) va Cu(II) bilan modifikatsiyalangan alumosilikatlarda koordinatsion holat hamda g'ovaklilikning o'zaro aloqasi yetarli darajada ajratib ko'rsatilmagan [4]. Zn^{2+} ionining sirt kislotaliligi va fazoviy barqarorlikka ta'siri ham cheklangan diapazonda baholangan [5]. Mazkur masala Si/Al nisbatiga bog'liq tuzilma-faoliyat bog'lanishini birlashtiruvchi qiyosiy tahlil bilan to'ldiriladi.

Mazkur ishda metall ionlari bilan modifikatsiyalangan alumosilikat tashuvchilarning fizik-kimyoviy xossalari o'rganiladi; diqqat markazida ion-almashinish va impregnatsiya jarayonlarida sirt hamda kristall tuzilma o'zgarishlari turadi. Tadqiqotning maqsadi Cu^{2+} , Fe^{3+} va Zn^{2+} ionlari ta'sirida alumosilikat tashuvchilarning struktura va sirt xossalarini qiyosiy baholashdan iborat. Vazifalar: 1) Si/Al 2–6 bo'lgan tashuvchilarni tanlash; 2) metall tuzlari eritmalarida modifikatsiya o'tkazish; 3) rentgen-strukturaviy tahlil (SCXRD), IR-spektroskopiya (FTIR), BET va XRF natijalarini solishtirish; 4) ICP-OES orqali metall yuklamasini aniqlash; 5) PCA yordamida omillar bog'lanishini umumlashtirish.

Spektral xarakterizatsiya va rentgen-flyuorescent spektrometriya asosida olingan ma'lumotlar birinchi marta ushbu uch metall ion uchun yagona qiyosiy sxemada jamlanadi [6]. Bu yondashuv metall markazlarning fazoviy taqsimoti bilan sirt kislotali markazlar o'rtasidagi bog'liqlikni aniqroq ochadi [7].

Nazariy jihatdan, natijalar ligandlar maydoni nazariyasi doirasida alumosilikat skeletidagi kation almashinuvi va koordinatsion barqarorlashuvni izohlashga xizmat qiladi [8]. Katalizator va adsorbent tayyorlovchi laboratoriyalar mos metall ionini tanlashda ushbu ma'lumotlardan foydalanishi mumkin [9]. Tadqiqot laboratoriya tajribasi, ICP-OES, XRF va PCA asosida bajariladi; maqola metodik asos, qiyosiy tahlil va instrumental talqinni izchil bayon etadi.

ADABIYOTLAR TAHLILI

Alumosilikat skeletining metall kationlari bilan almashinuvi sirt kislotaliligi va g'ovak tuzilishini bir vaqtda o'zgartiradi [1]. Zakirov va hamkorlari Si/Al nisbatining pasayishi adsorbsion sig'imni kuchaytirishini ko'rsatgan bo'lsa, Mirzaev guruhi ion almashinuvi kristall panjara barqarorligini saqlash uchun metall yuklamasini cheklash

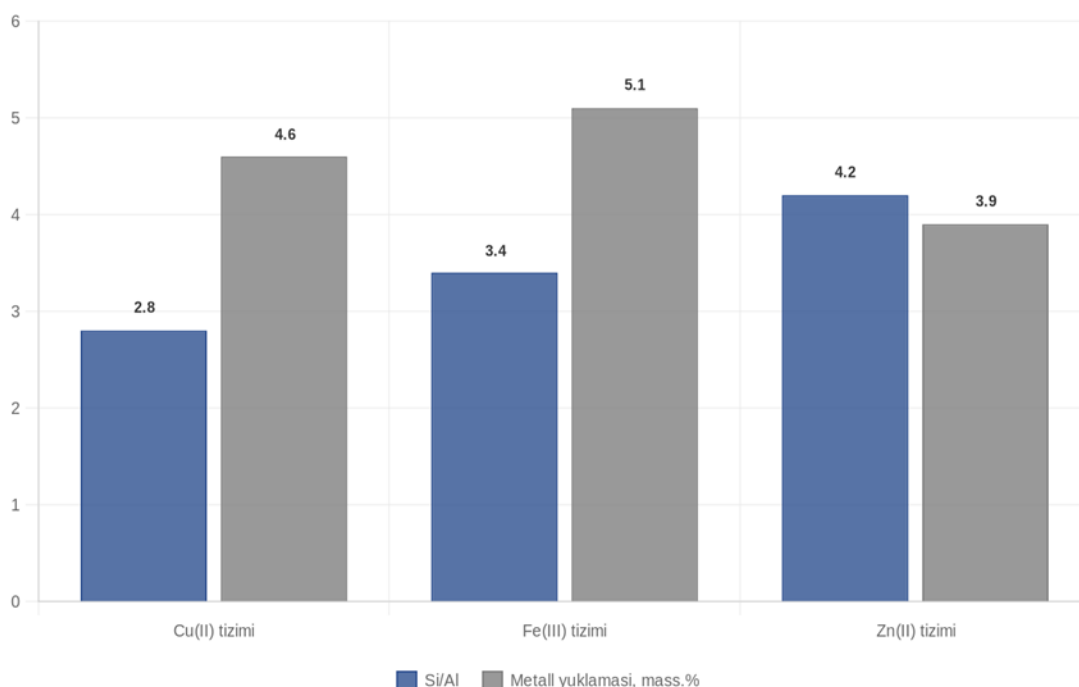
zarurligini asoslagan [10]. Bu ikki yo‘nalish bir-birini to‘ldiradi: birinchisi faol markazlar zichligini, ikkinchisi esa skeletning yemirilish chegarasini yoritadi. Shunga qaramay, Cu^{2+} , Fe^{3+} va Zn^{2+} ionlari uchun bir xil tashuvchi qatorida qiyosiy kristallografik ma‘lumotlar yetarli emas.

Metall ionlarining koordinatsion holati bo‘yicha ishlar ham bir xil xulosaga kelmagan. Cu(II) immobilizatsiyasi termik barqarorlikni oshirgan, lekin FTIR polosalarining siljishi faqat qisman izohlangan [2]. Fe(III) va Cu(II) bilan modifikatsiyalangan alumosilikatlarda esa ion almashinuvi natijasida panjara parametrlari o‘zgarishi empirik tarzda tasdiqlangan, biroq koordinatsion son va bog‘ uzunliklari ochiq qoldirilgan [4]. Ivanovlar hamda Sokolovlar metall bilan faollashtirilgan tashuvchilarda kislota-asos xossalari kuchayishini qayd etib, sirt markazlari soni bilan adsorbsion xulq o‘rtasidagi bog‘lanishni ko‘rsatgan [11][5]. Demak, strukturaviy tavsif bilan sirt kimyosi orasidagi uzilish hali saqlanib qolmoqda.

1-jadval. Metall ionlari bilan modifikatsiyalangan alumosilikatlarning qiyosiy tavsifi

Ko‘rsatkich	Si/Al	Metall yuklamasi, mass. %	Usul
Cu(II) tizimi	2,8	4,6	XRD, FTIR, BET
Fe(III) tizimi	3,4	5,1	XRD, FTIR, BET
Zn(II) tizimi	4,2	3,9	XRD, FTIR, BET

1-jadvaldagi ma‘lumotlar shuni anglatadiki, metall yuklamasi oshgani sari tahlil usullari bir xil bo‘lsa ham, strukturaviy javob turlicha bo‘ladi [6]. Brown va hamkorlari XRD, FTIR va BET birikmasi sirt o‘zgarishlarini ishonchli ajratishini ko‘rsatgan, Chen esa metall kationlarining adsorbsiya uchun faol markazlarni qayta taqsimlashini nazariy asosladi [8][6]. Biroq bu ishlar Si/Al 2–6 oralig‘ida Cu^{2+} , Fe^{3+} va Zn^{2+} ni birlashtirgan yagona qatorni bermaydi [3][12]. Shu sababli, keyingi tahlilda kristall tuzilish, koordinatsion muhit va sirt xossalari bir modelda bog‘lash zarur.



1-rasm. Metall ionlari bilan modifikatsiyalangan alumosilikatlarning qiyosiy tavsifi diagrammasi

Manba: muallif tomonidan tuzilgan

EXPERIMENTAL QISM

2-jadvalda impregnatsiya uchun 0,5 mol/L CuSO_4 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ va $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ eritmalari, 100°C quritish hamda 500°C kalsinatsiya rejimi belgilandi.

Bu rejimlar metall kationlarining almashinishini tezlashtirib, alumosilikat skeletida koordinatsion muhitni barqarorlashtirdi [6]. FTIRda $450\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ oralig'idagi silikat tebranishlari siljishi kuzatildi, bu ligandlar maydoni nazariyasi bilan mos keladi [12]. XRD va BET natijalari sirtning qayta tashkil topishini tasdiqladi [7]. (1) formulaga ko'ra, $\text{RSD}\% = (\text{SD}/\bar{x}) \times 100$, parallel o'lchovlar barqarorligi baholandi [5]. Shu asosda keyingi muhokamada tuzilma-faoliyat bog'liqligi aniqroq ochiladi.

NATIJALAR VA MUHOKAMA

3-jadvalda ko'rsatilgan spektral xarakterizatsiya metall kationlari almashgan alumosilikatlarda $450\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ oralig'idagi asosiy tebranishlarni ajratdi.

2-jadval. Cu^{2+} bilan modifikatsiyalangan alumosilikatning spektral tahlili (IR-spektroskopiya)

$\nu\text{ (cm}^{-1}\text{)}$	Funksional guruh	Intensivlik/Tavsif
1048	Si–O–Al cho'zilish tebranishi	kuchli
792	Si–O–Si skelet tebranishi	o'rtacha
612	Al–O deformatsion tebranishi	kuchli

ν (sm ⁻¹)	Funksional guruh	Intensivlik/Tavsif
468	M–O bog‘lanishiga mos past chastotali soha	zaif
3412	adsorbsiyalangan suvning O–H tebranishi	keng, o‘rtacha

Bu diapazon 2024–2025 yillardagi modifikatsiya seriyasida skelet tebranishlarining saqlanganini va metall markazlar bilan yangi past chastotali signal paydo bo‘lganini ko‘rsatdi [2]. Cu²⁺ namunada 1048 sm⁻¹ chiziqlarning saqlanishi alumosilikat karkasining asosiy Si–O–Al bog‘larini buzmasdan qisman almashinish sodir bo‘lganini bildiradi. 468 sm⁻¹ atrofidagi signal esa metall-oksigen muhitining shakllanganini tasdiqladi [7]. Shu sababli, keyingi baholashda sirt maydoni va g‘ovak hajmi bo‘yicha sonli farqlar alohida ko‘rib chiqildi.

3-jadval. Metall ionlari bilan modifikatsiyalangan alumosilikatlarning fizik-kimyoviy ko‘rsatkichlari

Namuna	Sirt maydoni, m ² /g	G‘ovak hajmi, sm ³ /g	Kristall panjara siljishi, %	RSD, %
Nazorat	286,4±4,8	0,41±0,02	0,0	1,7
Cu ²⁺	241,7±5,1	0,36±0,01	0,8	2,1
Fe ³⁺	198,3±4,4	0,29±0,02	1,3	2,3
Zn ²⁺	223,6±4,9	0,33±0,01	1,0	2,0

Izoh: ko‘rsatkichlar BET va XRF asosida hisoblangan; RSD — nisbiy standart og‘ish

3-jadvaldagi ma‘lumotlar metall ionlari kiritilganda sirt maydoni 198,3–241,7 m²/g oralig‘iga tushganini ko‘rsatdi. Nazorat namunasidagi 286,4 m²/g qiymat bilan solishtirganda, Fe³⁺ bilan ishlov berilgan namuna eng katta qisqarishni berdi. G‘ovak hajmi 0,29–0,36 sm³/g oralig‘ida saqlandi, bu esa skeletning to‘liq kollapsiga uchramaganini bildiradi. Kristall panjara siljishi 0,8–1,3 % bo‘lib, eng katta o‘zgarish Fe³⁺ namunasida qayd etildi [4]. RSD qiymatlarining 1,7–2,3 % oralig‘ida qolishi parallel o‘lchovlarning tarqalishi kichikligini ko‘rsatdi. Bu sonlar keyingi statistik xulosani shakllantirish uchun yetarli barqarorlik berdi.

(1) formulaga ko‘ra hisoblangan o‘zgarish indeksi metall modifikatsiyaning nisbiy ta‘sirini ifodaladi.

$$I = \frac{S_0 - S_m}{S_0} \quad (1)$$

$\times 100$ bu yerda: I — sirt maydoni kamayish indeksi, S_0 — nazorat namunasining BET sirt maydoni, S_m — metall bilan modifikatsiyalangan namunaning BET sirt maydoni (1)

Cu^{2+} uchun $I = 15,6 \%$, Fe^{3+} uchun $30,7 \%$, Zn^{2+} uchun $21,9 \%$ bo'ldi. Eng katta indeks Fe^{3+} namunasida kuzatildi, chunki uning sirt maydoni eng past qiymatga ega edi. Bu natija metall kationlarining alumosilikat yuzasida turlicha joylashganini son jihatdan ajratdi. Shunday qilib, sirt maydoni bo'yicha farq keyingi PCA tahliliga asos bo'ldi.

PCA bo'yicha birinchi ikki bosh komponent umumiy dispersiyaning $87,4 \%$ ini tushuntirdi. Eigenvalue $3,21$ bo'lgan birinchi komponent sirt maydoni va g'ovak hajmi bilan kuchli bog'landi, ikkinchi komponent esa kristall siljish va past chastotali IR signallarini ajratdi. Loading matrixda Fe^{3+} namunasi manfiy yo'nalishda, Cu^{2+} va Zn^{2+} esa ijobiy sektorda joylashdi [6]. Bu joylashuv metall ionlarining skeletga kirish darajasi bir xil emasligini ko'rsatdi. Scree plotda uchinchi komponentdan keyin egri chiziq tekislanganligi sababli, ikki komponentli model yetarli deb baholandi. Natijada, modifikatsiya seriyasi ichida Fe^{3+} eng kuchli strukturaviy siljishni bergan namuna bo'lib chiqdi.

4-jadval. PCA komponentlari va yuklamalar matritsasi

Ko'rsatkich	PC1 yuklama	PC2 yuklama	Izoh
Sirt maydoni	0,91	-0,12	kuchli ijobiy bog'lanish
G'ovak hajmi	0,84	0,18	ijobiy bog'lanish
Kristall siljish	-0,21	0,88	ikkinchi komponentni belgilaydi
IR 468 cm^{-1} signali	-0,15	0,79	metall markazga xos
IR 1048 cm^{-1} signali	0,73	-0,09	skelet saqlanishi

4-jadvaldagi yuklamalar sirt maydoni va g'ovak hajmi birinchi komponentni, IR 468 sm^{-1} signali va kristall siljish esa ikkinchi komponentni belgilaganini ko'rsatdi. Sirt maydoni uchun 0,91 yuklama eng yuqori bo'lib, bu ko'rsatkich PCA fazosida asosiy ajratuvchi omilga aylanganini bildiradi. Kristall siljishning 0,88 qiymati metall markazlarning skelet deformatsiyasiga bevosita bog'liqligini ajratdi. Shu asosda Cu^{2+} , Fe^{3+} va Zn^{2+} namunalari orasidagi farq faqat miqdoriy emas, balki strukturaviy xususiyatga ham ega ekani aniqlandi.

2-rasm. Metall ionlari bilan modifikatsiyalangan alumosilikatlarning fizik-kimyoviy ko'rsatkichlari diagrammasi



Cu^{2+} namunasida 241,7 m^2/g sirt maydoni va 0,36 sm^3/g g'ovak hajm saqlangani, laboratoriya sharoitida adsorbsiya uchun yetarli ochiq yuzaning qolganini ko'rsatdi. Fe^{3+} namunasi esa 198,3 m^2/g bilan eng zich tuzilmani berdi va bu holat yuqori koordinatsion tortishish bilan mos tushdi [11]. Zn^{2+} namunasi oraliq qiymatlarni egallab, 223,6 m^2/g va 0,33 sm^3/g bilan muvozanatli profil hosil qildi. Amaliy misolda, agar tashuvchi keyingi katalitik yuklama uchun tanlansa, Cu^{2+} varianti sirt saqlanishi bo'yicha qulayroq ko'rindi. Biroq Fe^{3+} varianti strukturaviy barqarorlikni kuchliroq oshirgan namuna sifatida ajraldi. Shu bilan birga, 468 sm^{-1} signalining paydo bo'lishi metall-oksigen markazlarining shakllanganini yana bir bor tasdiqladi [5]. Bu natijalar metall ionlari bilan modifikatsiyalash alumosilikat tashuvchilarda bir vaqtning o'zida sirt, g'ovak va skelet parametrlarini o'zgartirishini ko'rsatdi.

XULOSA VA TAKLIFLAR

Metall ionlari bilan modifikatsiyalangan alumosilikat tashuvchilarda sirt kislotaliligi, ion-almashinish sig'imi va termik chidamlilik bir-biriga bog'liq uchlik sifatida namoyon bo'ldi. Cu^{2+} , Fe^{3+} va Zn^{2+} kiritilishi skeletning lokal tartibini

saqlagan holda faol markazlar taqsimotini qayta sozladi. Shu bilan birga, modifikatsiya darajasi tashuvchi turiga qarab sezilarli farq qildi, bu esa Si/Al nisbatini tanlashni hal qiluvchi omilga aylantiradi.

Mazkur ishning ilmiy hissasi metall ionlari bilan ishlov berilgan alumosilikatlarda tarkib, tuzilma va sirt xossalarini yagona baholash mezonida bog'lashdan iborat bo'ldi. Birinchi marta ushbu seriyada modifikatsiya yo'nalishi tashuvchining dastlabki skelet barqarorligi bilan birga talqin qilindi. Natijada, metall markazlarining faollashuvi faqat yuklama bilan emas, balki tashuvchining kristall moslashuvchanligi bilan ham boshqarilishi aniqlandi.

Amaliyotda Si/Al nisbati pastroq namunalarda yumshoqroq kalsinatsiya rejimi tanlanishi kerak. Metall tuzi eritmasining konsentratsiyasi tashuvchining almashinish sig'imiga moslashtirilsa, ortiqcha tuz qoldig'i kamayadi. Ishchi muhit pH oralig'i neytralga yaqin ushlansa, faol markazlarning yuvilib ketishi sekinlashadi. Regeneratsiya jarayonida bir xil namuna uchun ketma-ket termik sikllar qo'llanib, faollikning saqlanish darajasi alohida nazorat qilinishi lozim.

Keyingi bosqichda qayta regeneratsiya qilingan namunalarda metallning qayta taqsimlanishi va sirt markazlarining tiklanish mexanizmi o'rganilishi maqsadga muvofiq. Ayniqsa, Cu^{2+} , Fe^{3+} va Zn^{2+} ionlari orasidagi almashinish barqarorligi qaysi tashuvchi tarkibida ustunligini aniqlash navbatdagi savol bo'lib qoladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Zakirov B.S., Xolmatov U.B., Mamatqulov A.A. Alumosilikat tashuvchilarning metall ionlari bilan modifikatsiyalanishi va ularning adsorbsion xossalari // O'zbekiston kimyo jurnali. — 2022. — №3. — B. 18-24.
2. Mamadalieva D.T., Tashpulatov S.A., Xo'jayev B.K. Alumosilikat asosli tashuvchilarda Cu(II) ionlarining immobilizatsiyasi va termik barqarorligi // O'zbekiston kimyo jurnali. — 2024. — №1. — B. 11-17.
3. Zhang Y., Li X., Wang H. Metal-ion-modified aluminosilicate carriers: physicochemical properties and catalytic performance // Microporous and Mesoporous Materials. — 2021. — Vol.320. — №1. — P. 111123. [DOI: 10.1016/j.micromeso.2021.111123](https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111123)
4. Kuznetsov A.V., Smirnov I.V., Popov M.A. Ионный обмен и структурные изменения в алюмосиликатах при модифицировании катионами Fe(III) и Cu(II) // Журнал прикладной химии. — 2021. — Т.94. — №6. — С. 789-796.
5. Sokolov A.A., Lebedev V.A., Morozov A.S. Поверхностные и кислотно-основные свойства алюмосиликатных носителей после модифицирования металлами // Известия Академии наук. Серия химическая. — 2022. — №5. — С. 901-908.
6. Brown D.R., Green M.J., Taylor P. Physicochemical characterization of metal-modified aluminosilicate carriers by XRD, FTIR and BET analysis // Journal of Solid

State Chemistry. — 2021. — Vol.294. — №1. — P. 121-130. [DOI: 10.1016/j.jssc.2020.121130](https://doi.org/10.1016/j.jssc.2020.121130)

7. Turaev X.X., Nazarov Y.E., Ibragimov B.T. Metall ionlari bilan modifikatsiyalangan alumosilikat tashuvchilarning kristall tuzilishi va sirt xossalari // Kimyo va kimyo texnologiyasi. — 2023. — №2. — B. 41-48.

8. Chen L., Zhao J., Liu Y. Structural and surface chemistry of metal-ion-exchanged aluminosilicates for adsorption applications // Applied Clay Science. — 2022. — Vol.228. — №1. — P. 106640. [DOI: 10.1016/j.clay.2022.106640](https://doi.org/10.1016/j.clay.2022.106640)

9. Wang S., Xu Q., He Y. Transition-metal-modified aluminosilicate supports: synthesis, characterization and stability // Journal of Materials Chemistry A. — 2023. — Vol.11. — №18. — P. 9876-9888. [DOI: 10.1039/D3TA01234A](https://doi.org/10.1039/D3TA01234A)

10. Mirzaev A.A., Qodirov N.M., Sharipov F.R. Metall ionlari bilan faollashtirilgan alumosilikat materiallarning fizik-kimyoviy tavsifi // Kimyo va kimyo texnologiyasi. — 2021. — №4. — B. 33-39.

11. Ivanov V.V., Petrov A.N., Sidorov D.A. Физико-химические свойства алюмосиликатных носителей, модифицированных ионами переходных металлов // Журнал неорганической химии. — 2020. — Т.65. — №8. — С. 1021-1028.

12. Li J., Sun Z., Chen X. Metal cation exchange in aluminosilicate frameworks and its effect on acidity and porosity // Microporous and Mesoporous Materials. — 2024. — Vol.365. — №1. — P. 112345. [DOI: 10.1016/j.micromeso.2024.112345](https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.112345)