

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

**QODIROV OLIMJON RAXIMJON O'G'LI**

**AEROSILGA SUV, UGLEROD (IV) OKSIDI, BENZOL VA AMMIAK  
MOLEKULALARI ADSORBSIYA MOLEKULYAR MEXANIZMLARI**

**02.00.11 – Kolloid va membrana kimyosi**

**KIMYO FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI  
AVTOREFERATI**

**Namangan-2025**

**Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi**  
**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)**  
**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)**

**Qodirov Olimjon Raximjon o'g'li**

Aerosilga suv, uglerod (IV) oksidi, benzol va ammiak molekulari adsorbsiya  
molekulyar mexanizmlari ..... 3

**Кодиров Олимжон Рахимжон угли**

Молекулярные механизмы адсорбции молекул воды, оксида углерода,  
бензола и аммиака на аэросиле ..... 21

**Kodirov Olimjon**

Molecular mechanisms of adsorption of water molecules, carbon monoxide,  
benzene and ammonia on aerosil..... 41

**E'lon qilingan ilmiy ishlar ro'yxati**

**Список опубликованных работ**

**List of published works .....44**

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI  
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI  
DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**NAMANGAN DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

**QODIROV OLIMJON RAXIMJON O'G'LI**

**AEROSILGA SUV, UGLEROD (IV) OKSIDI, BENZOL VA AMMIK  
MOLEKULALARI ADSORBSIYA MOLEKULYAR MEKANIZMLARI**

**02.00.11 – Kolloid va membrana kimyosi**

**KIMYO FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD) DISSERTATSIYASI  
AVTOREFERATI**

**Namangan-2025**

**Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestasiya komissiyasida B2025.1.PhD/K947 raqam bilan ro‘yxatga olingan.**

Dissertasiya Namangan davlat texnika universitetida bajarilgan.

Dissertasiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus va ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasi ([www.namdtu.uz](http://www.namdtu.uz)) va «ZiyoNet» axborot ta’lim tarmog‘iga ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Ergashev Oybek Karimovich**  
Kimyo fanlari doktori, professor

**Rasmiy opponentlar:**

**Abduraxmonov Eldor Baratovich**  
Kimyo fanlari doktori, professor

**Abdikamalova Aziza Baxtiyarovna**  
Kimyo fanlari doktori, professor

**Yetakchi tashkilot:**

**Toshkent kimyo-texnologiya instituti**

Dissertatsiya himoyasi Namangan davlat texnika universiteti huzuridagi DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil «15» dekabr soat 13<sup>00</sup> dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko‘chasi 7-uy. Tel.: (69) 234-14-85; faks: (69) 234-14-85, e-mail: [info@namdtu.uz](mailto:info@namdtu.uz)), Namangan davlat texnika universiteti, 6-bino, 1-qavat, ilmiy kengash xonasi.

Dissertatsiya bilan Namangan davlat texnika universiteti Axborot-resurs markazida tanishish mumkin. (93-raqami bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 160115, Namangan shahri, Kosonsoy ko‘chasi 7. Tel.:(69) 234-14-85).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil 2-dekabr kuni tarqatildi.  
(2025 yil «2» dekabrda № 35-raqamli reestr bayonnomasi).

**I.T. Shamshidinov**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi o‘rinbosari, t.f.d., professor

**O.T. Mallabayev**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash kotibi, k.f.f.d., dotsent

**D.Sh. Sherqo‘ziyev**

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi, t.f.d., professor

## KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertasiya annotasiyasi)

**Dissertasiya mavzusining dolzarbligi va talabgorligi.** Dunyoda sanoat korxonalaridan chiqadigan oqova suvlarni tozalashda ishlatiladigan kremniy va alyuminiy oksidlaridan iborat bo'lgan katalitik faol adsorbent va katalizatorlarni qo'llash muhim masalalardan biri hisoblanadi. Neft va neft mahsulotlarini qayta ishlash jarayonida hosil bo'ladigan oqava suvlarni turli xil organik va noorganik qo'shimchalar hamda metall ionlaridan samarali tozalash maqsadida yuqori sirt faolligiga ega Aerosil tipidagi adsorbentlardan foydalanish maqsadga muvofiq hisoblanadi. So'nggi yillarda ishlash muddati uzoq bo'lgan va desorbsiya jarayonlari orqali qayta tiklanishi va qayta ishlatilish imkoni bo'lgan adsorbentlarga bo'lgan talab doimiy ravishda o'sib bormoqda. Shu nuqtai nazardan, mahalliy xomashyodan olinadigan, import qilinadigan analoglarga munosib muqobil bo'lishi mumkin bo'lgan yuqori quvvatli, raqobatbardosh yuqori sirt yuzali adsorbentlarni sintez qilish usullarini ishlab chiqish, ularning sorbsion xususiyatlarini o'rganish va olingan natijalar asosida ilmiy va amaliy yangiliklarga erishish muhim ahamiyatga ega.

Bugungi kunda jahonda yuqori sirt yuzali, qayta ishlatish imkoni bo'lgan hamda yuqori haroratga chiqdamli aerosilni olish texnologiyasini ishlab chiqish va ularning sorbsion jarayon mexanizmlarini tavsiflash bo'yicha ilmiy-tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Bu borada, hozirda mavjud maxsus sirt yuzali Aerosil adsorbentining sorbsion xususiyatlarini o'rganish; aerosil adsorbentlarini turi va ishlash davriyligini aniqlash; aromatik birikmalar bilan o'zaro  $\pi$ -komplekslarni shakllantirishga moyillik tavsiflash; adsorbsiyalangan qutbli va qutbsiz molekulalarining to'liq termodinamik qonuniyatlar asosida to'liq tavsiflash; faol sirt yuzalarga ega, yuqori haroratga chidamli va qayta ishlatish imkoniyati bo'lgan aerosil olishga alohida e'tibor berilmoqda.

Respublikamizda ishlab chiqarish sanoatining jadal rivojlanishi ishlab chiqarish ob'ektlari yo'nalishiga qarab yangi mahsulotlar ishlab chiqarish quvvatlarini yaratish va mavjudlarini kengaytirish imkonini bermoqda. Bu esa o'z navbatida sifat jihatidan raqobatbardosh mahsulotlar turlarining hamda ularning ishlab chiqarish hajmining ortishiga xizmat qilmoqda. Jumladan, yuqori sirt yuzasiga va katalitik xususiyatlarga ega aerosil tipidagi adsorbentlarni olish, ularning adsorbsion xossalari chuqur o'rganish yo'nalishida muhim ilmiy va amaliy natijalarga erishilmoqda. O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirishga qaratilgan Yangi O'zbekiston taraqqiyot strategiyasining uchinchi yo'nalishida «Neft-gaz sohasida transformatsiya jarayonlarini jadallashtirish orqali tabiiy gaz ta'minotida ijtimoiy himoya kafolatlari belgilangan holda bozor mexanizmlarini joriy etish»<sup>1</sup> vazifalari belgilangan. Bu borada yuqori sirt yuzaga ega Aerosil adsorbentlarni olish bugungi kunda muhim ahamiyat kasb etadi.

O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-sonli "2022-2026 yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekiston taraqqiyot strategiyasi

---

<sup>1</sup>O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60 "2022-2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to'g'risida"gi farmoni

to'g'risida"gi Farmoni<sup>1</sup>da belgilangan vazifalarni amalga oshirishga, shuningdek, O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirishga yo'naltirilgan 2022-yil 10-oktyabrdagi PQ-388-sonli "Kimyo va gaz kimyo sanoatini strategik rivojlantirish bo'yicha maqsadli dasturni tasdiqlash to'g'risida"gi Qarorga, 2021-yil 15-dekabrdagi 753-sonli "Kimyo sanoati uchun innovatsion ilmiy-ishlab chiqarish va ta'lim klasterini yaratish to'g'risida"gi Vazirlar Mahkamasi Qaroriga, 2022-yil 7-iyuldagi PQ-309-sonli "Neft va gaz sanoatida ta'lim va ishlab chiqarish klasterini yaratish to'g'risida"gi Qarorga hamda ushbu sohada qabul qilingan boshqa normativ-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni bajarishga mazkur dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning Respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi.** Mazkur tadqiqot Respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining VII «Kimyoviy texnologiyalar va nanotexnologiyalar» ustuvor yo'nalishiga muvofiq holda bajarilgan.

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Dunyoda olib borilayotgan ilmiy-tadqiqot ishlarida rentgen nurlari difraksiyasi, neytron va sinxrotron spektroskopik usullar yordamida o'rganiladigan seolitlarning adsorbsion xossalari bo'yicha ishlar keng yoritilgan.

Xorijiy mualliflar (B.F. Mentzen, B. Boddenberg va O.P.Bellat) adsorbsion kalorimetriya bilan olingan ma'lumotlarni taqdim etadilar. N.N.Avgul, A.V.Kiselev, Ya.V. Mirskiy, M.V.Serdobov faqat o'rtacha to'ldirish bilan chegaralangan suv adsorbsiyasining differensial issiqliklari bo'yicha tadqiqot ma'lumotlarini nashr etdi. O'zbekistonda prof. A.A. A'zamxo'jaev, S.S. Xamrayev, S.Z. Muminov va Akbarov X.I. Magben vakuum qurilmasida gazlar va bug'larning sirt yuzali adsorbentlarda adsorbsiya izotermalarini o'rgangan.

O'zbekistonda A.A. Agzamxo'jaev, S.S. Xamrayev, S.Z. Mo'minov, I.D. Eshmetov, D.S. Salixanova, Sh.A.Kuldashevalar Angren ko'miri va gil minerallariga, H.I. Akbarov, A.Y. Yarkulovlar polimer-kremnezem gibrid nanokompozitlarga har xil molekulalar adsorbsiyasini vakuumli magben qurilmasida o'rganishgan. Mamlakatimizda k.f.d., professor G. U. Raxmatkariyev rahbarligida shakllangan ilmiy maktab doirasida sorbsiya va kataliz sohalarida samarali tadqiqotlar olib borilmoqda. Mazkur ilmiy maktab vakillari — F.G. Raxmatkariyeva, O.K. Ergashev, X.N. Baxronov, E.B. Abduraxmonov, D.J.Jumaeva, Y.Yu. Yakubov, G'.A. Doliyev, T.D. Abdulxayev, M.X. Koxxarov va boshqalar tomonidan **A, X, Y va LSX rusumli seolitlar**, shuningdek **gil minerallari, aerosil, muskovit, silikalit, rutil** hamda boshqa turdagi adsorbentlarda yuqori vakuumli **adsorbsion mikrokalorimetrik uskunalar** yordamida kechuvchi adsorbsion jarayonlar mexanizmlarini chuqur o'rganishga qaratilgan keng ko'lamli tadqiqot ishlari amalga oshirilgan.

Ushbu ishni bajarishda biz Germaniyaning Degussa firmasi tomonidan ishlab chiqariladigan Aerosil adsorbentidan foydalandik. Biz ushbu adsorbentlarni birinchi bo'lib o'rganganimiz sababli, olingan natijalar misli ko'rilmagan va fundamental muammolarni yoritib beradi.

**Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilayotgan ilmiy tadqiqot muassasining ilmiy tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti

Namangan davlat texnika universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining «NaLTA, CaLTA va sodalit molekulyar g'alvirlarida mezbon-mexmon bog'lanishlari mexanizmlari» hamda Umumiy va noorganik kimyo instituti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining FA-F-7-010 raqamli «Nanostrukturali fojazit tipidagi seolitlar panjarasi yuzasida ion-molekulyar klasterlarni energetikasi, tuzilishi va joylashishi» va «Alyuminiy va kremniy oksidlari bo'lgan import adsorbentlari o'rnini bosish, adsorbsiya nazariy asoslarini rivojlantirish maqsadida asosi kaolin bo'lgan adsorbent mikrog'ovaklari va yuzalarida suv bug'i, metil va etil spirtlari va boshqa birikmalarni sorbsiya energetikasini tadqiq etish» va «Qator sorbentlarni import o'rnini bosish va adsorbsiya nazariy asoslarini rivojlantirish maqsadida seolit, ko'mir adsorbentlari yuzasida sulfidlar va boshqa birikmalarni sorbsiya energetikasini tadqiq etish» mavzusidagi fundamental loyihalari va byudjet dasturini bajarish doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi** Aerosil adsorbentida qutbli va qutbsiz molekulalarning adsorbsiyasiga xos termodinamik xususiyatlarni, sirt yuzasining tuzilishini hamda faol markazlarda adsorbat molekulalarining lokalizatsiya holatini yuqori aniqlikka ega adsorbsion kalorimetrik uskunalarda yordamida aniqlashdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

Aerosil adsorbentida suv, benzol, ammiak, azot va uglerod (IV) oksidi molekulalarining adsorbsiyasi jarayoniga xos izotermalarni, differensial issiqlik qiymatlarini, entropiya ko'rsatkichlarini hamda issiqlik muvozanatining vaqt tavsiflarini aniqlash;

Aerosil adsorbentida suv, benzol, ammiak, azot va uglerod (IV) oksidi molekulalari adsorbsiyasi izotermalarni tadqiq qilish va ularni sirt yuzalari BET va Lengmyur tenglamalari yordamida hisoblash;

Suv, benzol, ammiak, azot va uglerod (IV) oksidi molekulalarining adsorbsiyalangan holatida aerosil adsorbentida strukturasi tahlil qilish;

Aerosil adsorbentida suv, benzol, ammiak, azot va uglerod (IV) oksidi molekulalari adsorbsiyasidan hosil bo'ladigan ion-molekulyar komplekslar shakllanishi va adsorbent-adsorbat tizimlarini aniqlash;

Aerosil adsorbentlarining sorbsion ekspluatatsion davriyligini aniqlash va adsorbsion imkoniyatlarini tadqiq etish.

**Tadqiqotning ob'ekti** sifatida Aerosil adsorbenti, suv, benzol, ammiak, azot va uglerod (IV) oksidi molekulalari tanlangan.

**Tadqiqotning predmetini** adsorbsiyaning molekulyar mexanizmini, adsorbsion jarayonlarning qonuniyatlarini, shuningdek o'rganilayotgan seolitlarning matritsasida ion-molekulyar komplekslarning joylashuvi va holatini aniqlash tashkil etadi.

**Tadqiqot usullari.** Dissertatsiyada fizik va kolloid-kimyoviy, analitik hamda adsorbsion-kalorimetrik tadqiqot va tahlil usullaridan foydalanilgan.

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

Mikrokalorimetrik usulda suv, benzol, ammiak, azot va uglerod (IV) oksidi molekulalarining aerosil adsorbentida adsorbsiyasining adsorbsiya aniq izotermalari va to'liq termodinamik tavsiflari aniqlangan;

Aerosilda suv, ammiak, benzol va uglerod (IV) oksidi molekulalarining

adsorbsiya differensial issiqligi bosqichli ko‘rinishda egri chiziqlar bilan ifodalanib va har bir bosqichda faol sirt yuzalardagi proton va natriy kationlari bilan ion molekulyar komplekslar hosil bo‘lishi aniqlangan;

Aerosilga past haroratli azot adsorbsiya sirt yuzalari BET, Lengmyur tenglamalari yordamida hisoblandi. Aerosilni 150, 250, 350 va 450<sup>0</sup>C haroratlarda vakumli sharoitda tozalandi. Harorat ko‘tarilishi bilan azotga nisbatan o‘ziga xos sirt yuzalari kattalashishi aniqlangan;

Aerosil adsorbentiga suv, benzol, ammiak va uglerod (IV) oksidi molekulari adsorbsiyalanishi jarayonida, sorbent sirt yuzalarida joylashgan H<sup>+</sup> va Na<sup>+</sup> kationlarining sorbsion markazlarga migratsiyasi isbotlangan.

Aerosil adsorbenti faol sirt yuzalarida adsorbat molekulari proton va natriy kationlari bilan ((C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)<sub>n</sub>/Na<sub>n</sub><sup>+</sup>(H<sup>+</sup>), ((CO<sub>2</sub>)<sub>n</sub>/Na<sub>n</sub><sup>+</sup>(H<sup>+</sup>), ((NH<sub>3</sub>)<sub>n</sub>/Na<sub>n</sub><sup>+</sup>(H<sup>+</sup>) va (H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>/Na<sub>n</sub><sup>+</sup>(H<sup>+</sup>)) ion-molekulyar komplekslar hosil qiladi va kuchli adsorbsiyalanishi va lokalizatsiyalanishi aniqlangan;

Aerosil adsorbentida suv, benzol, ammiak, azot va uglerod (IV) oksidi molekularining adsorbsiya izotermalari yarim logarifmik qiymatlari hisoblandi va adsorbentga sorbsiyalangan molekularning sirt yuzalari BET, Lengmyur tenglamalari asosida tavsiflangan.

#### **Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:**

Aerosil adsorbentida suv, benzol, ammiak, azot va uglerod (IV) oksidi molekulari adsorbsiyasining asosiy termodinamik tavsiflari — izoterma, entalpiya, differensial molyar entropiya hamda issiqlik muvozanat vaqti bo‘yicha olingan natijalar asosida mahalliy xomashyolardan yuqori sorbsion hajmga ega mikrog‘ovakli sorbentlarni sintez qilish imkoniyati yaratilgan;

«Farg‘ona neftni qayta ishlash zavodi» MChJ da neftni qayta ishlashda chiqadigan oqova suvlarni aromatik birikmalar birikmalarni adsorbsiya qilib ajratib olish imkoniyatlari asoslangan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Tajriba natijalari kimyoviy (elementar, gravimetrik) va fizik-kimyoviy tahlil usullari, jumladan, olingan natijalar kalorimetrik o‘lchovlar hamda tegishli tajriba-sinov usullari orqali ilmiy jihatdan asoslab berilgan va eksperimental tarzda tasdiqlangan.

#### **Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.**

Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati fizik-kimyoviy adsorbsiyaga oid nazariy bilimlarning yanada rivojlanishiga xizmat qiladi. Yuqori aniqlikka ega bo‘lgan maxsus yuqori vakuumli adsorbsion qurilma yordamida olingan eksperimental natijalar asosida Aerosil adsorbentida suv, benzol, ammiak va uglerod (IV) oksidi molekularining adsorbsiyasi jarayoniga xos termodinamik funksiyalar to‘liq aniqlangan bo‘lib, bu ma’lumotlar ularning fizik-kimyoviy ko‘rsatkichlarini chuqur tahlil qilish uchun ilmiy asos yaratadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati shundan iboratki, turli o‘lchamdagi gaz va suyuq holatdagi aromatik birikma molekularining Aerosil yuzasiga yutilishi jarayoni boshlang‘ich bosimdan to to‘yinganlik bosimigacha bo‘lgan oraliqda chuqur o‘rganildi. Ushbu jarayonlarning to‘liq adsorbsion mexanizmlari hamda adsorbat molekularining faol markazlardagi kationlar bilan hosil qiladigan ion-molekulyar komplekslari aniqlanib, ularning shakllanish qonuniyatlari tahlil qilindi.

Olingan ilmiy natijalar asosida sanoat jarayonlarida sirt yuzasi yuqori bo'lgan adsorbentlarning samaradorligini oshirish, shuningdek xomashyolardan maqsadli komponentlarni ajratib olish va tozalash usullarini takomillashtirish imkoniyatlari ishlab chiqish, atrof-muhitni muhofaza qilish va kimyo-texnologiya tarmoqlarida innovatsion yechimlarni rivojlantirishga xizmat qiladi. Bundan tashqari OTM magistrantlariga fizik, kolloid va tibbiy kimyo fanidan o'tiladigan maxsus kurslarda qo'llashga xizmat qiladi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Aerosil adsorbentining adsorbtsion xususiyatlarini aniqlash bo'yicha olingan ilmiy natijalar asosida:

Neft mahsulotlarini suv molekulalaridan tozalashda aerosil «Farg'ona NQIZ» MChJning «2026-2027-yillarda amaliyotga joriy etish bo'yicha istiqbolli ishlanmalar ro'yxati»ga kiritilgan («Farg'ona NQIZ» MChJning 2025-yil 14-iyuldagi 15/84-son ma'lumotnomasi). Natijada, benzin va dizel yoqilg'isi tarkibidagi suv molekulalarini tozalash imkonini bergan.

Neftni qayta ishlashda neft mahsulotlarini tarkibidagi qo'shimcha aromatik birikmalardan tozalashda aerosil «Farg'ona NQIZ» MChJning «2026-2027-yillarda amaliyotga joriy etish bo'yicha istiqbolli ishlanmalar ro'yxati»ga kiritilgan («Farg'ona NQIZ» MChJning 2025-yil 14-iyuldagi 15/84-son ma'lumotnomasi). Natijada, neftni mahsulotlari tarkibidan aromatik birikmalar (benzol) molekulalaridan tozalash imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarini aprobatsiyasi.** Tadqiqot natijalari 2 ta xalqaro va 9 ta respublika ilmiy anjumanlarida muhokama qilingan.

**Tadqiqot natijalarini nashr etilganligi.** Dissertatsiya mavzusi bo'yicha jami 18 ta ilmiy maqola chop etilgan bo'lib, ulardan 7 tasi ilmiy nashrlarda, shu jumladan 5 tasi Respublika jurnallarida, 2 tasi MDH davlatlarining jurnallarida O'zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan doktorlik dissertatsiyalarining asosiy ilmiy natijalarini nashr etish uchun tavsiya etilgan ilmiy jurnallarida. Shuningdek, 11 ta tezislari ilmiy-amaliy anjumanlarda chop etilgan.

**Dissertatsiya tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, to'rt bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiya hajmi 137 bet.

## DISSERTASIYANING ASOSIY QISMI

**Kirish** qismida olib borilgan tadqiqot ishlarining dolzarbligi va zaruriyati, maqsad va vazifalari, o'rganilganlik darajasi, tadqiqot usullari, ob'ekti va predmeti, O'zbekiston Respublikasi fan va texnologiyalarni rivojlantirish yo'nalishiga muvofiqligi, tadqiqotning ilmiy yangiligi, natijalarning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy etish ro'yxati keltirilgan, chop etilgan ishlar va dissertasiyaning hajmi, tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar berilgan.

Dissertasiyaning «**Aerosilning tuzilishi, sirt xossalari va sorbsion xususiyatlari**» deb nomlangan birinchi bobida, aerosil haqida umumiy tushuncha, qutbli va qutbsiz molekulalar adsorbtsiyasion xususiyatlari, ion-molekulyar mexanizmlari, suv va azotli birikmalarning adsorbtsiyasi buyicha xorijiy va mahalliy olimlarning tadqiqot ishlari haqida ma'lumotlar keltirilgan.

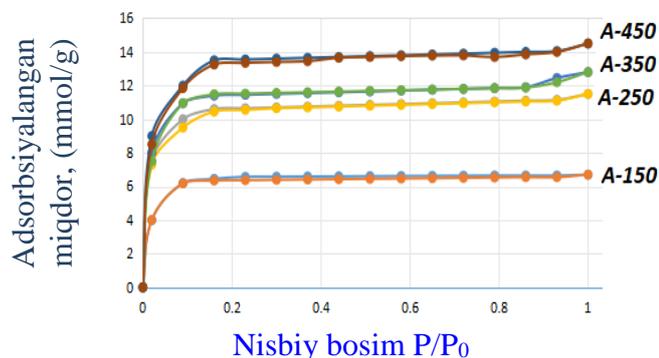
Dissertasiyaning «**Tadqiqot ob'ekti va fizik-kimyoviy usullari tavsifi**» deb nomlangan ikkinchi bobida universal adsorbtsion-mikrokolorimetrlil qurilmalarda

ishlash va olingan natijalarni nazariy hisoblashlarda foydalaniladigan formulalar va aerosilga sorbsiyalash usuli to‘g‘risida batafsil ma'lumotlar berilgan.

Dissertasiyaning «**Aerosilga qutbsiz molekulari adsorbsiya qonuniyat-lari**» deb nomlangan uchinchi bobida aerosilga azot, benzol va uglerod (IV) oksidi molekularining adsorbsiya izotermasi, differensial issiqligi, adsorbsiya differensial entropiyasi va issiqlik muvozanat vaqti, adsorbatlarning aerosol sirt yuzalariga so‘rilishi kalorimetrik tahlillari keltirilgan.

**Aerosilga past haroratli azot molekulari adsorbsiyasi.** G‘ovakli tuzilmaning asosiy parametrlaridan biri bo‘lgan o‘ziga xos sirt maydoni ( $S_{sp}$ ), umumiy g‘ovak hajmi ( $V_s$ ) hamda o‘rtacha g‘ovak diametri ( $d_{pore}$ ) 77 K haroratda past haroratli azot adsorbsiyasi usuli asosida aniqlandi. O‘lchovlar **Quantachrome Nova 1000e** statik turdagi adsorbsion analizatori yordamida amalga oshirildi. Tadqiqotga jalb qilingan namunalar dastlab 100 °C haroratda 12 soat davomida vakuum sharoitida aktivlashtirildi. Azotning adsorbsiyasi va desorbsiyasi egri chiziqlari qisman bosim diapazoni 0,005 dan 0,995 P/P<sub>0</sub> gacha bo‘lgan oraliqda yozib olindi. Qoldiq bosim ostida aniqlangan adsorbsiyalangan gaz miqdoriga asoslangan holda, sirt maydonining hisob-kitoblari Brunauer–Emmett–Teller (BET) usuli orqali amalga oshirildi.

1-rasm tahliliga ko‘ra, karbonizatsiya harorati 150 °C dan 450 °C gacha oshirilganda mikrog‘ovaklar hajmi ( $V_a$ ) ortadi, bu esa harorat oshishi bilan mikrog‘ovakli tuzilmaning shakllanishi kuchayishini ko‘rsatadi.



**1-rasm Aerosilni turli haroratlarda qizdirish natijasida past haroratli azotning adsorbsiya va desorbsiya izotermalari: 1) A-150; 2) A-250; 3) A-350; 4) A-450.**

Izoterma asosida aerosilning past haroratli azot adsorbsiyasida olingan natijalar 1-jadvalda keltirilgan.

**1-jadval.**

**Aeosilning past haroratli azot adsorbsiyasida olingan natijalar**

Namuna	$S_{ud}$ , $m^2/g$	$S_{ud}$ , $m^2/g$	t - Plot (tashqi sirt), $m^2/g$	$V_a$ , $sm^3/g$	$V_b$ , $sm^3/g$	R, Å	O‘rtacha g‘ovak kengligi, Å	G‘ovaklar- ning o‘rtacha radiusi, Å
A-150	360.17	578.13	78.87	0.2147	0.25	21,97	127.11	6.895
A-250	517.67	879.17	166.89	0.3784	0.38	22,24	90.78	6,778
A-350	778.57	1278.47	185.26	0.4128	0.48	22.34	65.74	6.658
A-450	897.17	1347.21	203.36	0.4974	0.58	22.58	45.47	6.624

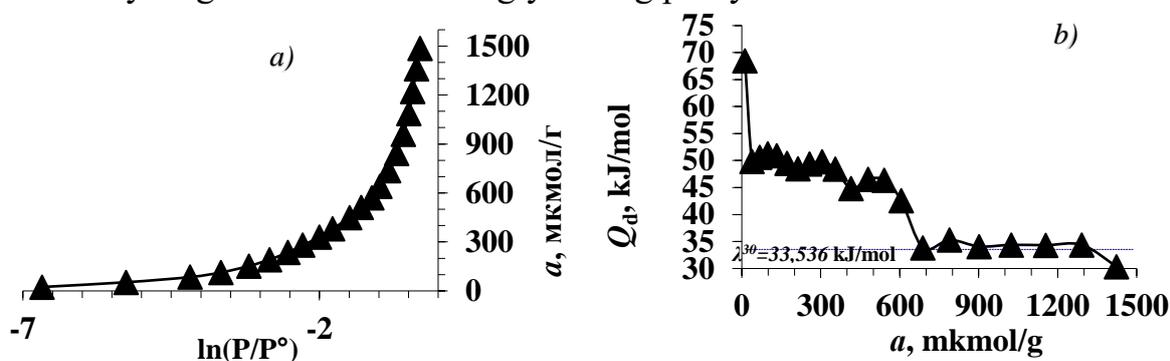
Aerosil materialining 400 °C dan yuqori haroratlarda regeneratsiya qilish jarayonida harorat sharoitlarini qat'iy nazorat qilish ularning tekstura xususiyatlarini optimallashtirishda muhim rol o'ynashini ko'rsatadi. Bunday yondashuv aerosilning adsorbsion imkoniyatlarini sezilarli darajada oshirishi mumkin.

**Aerosilga benzol molekulari adsorbsiyasining termodinamik tavsiflari.**

2(a)-rasmida Aerosil adsorbentida benzolning adsorbsion izotermasi yarim logarifmik koordinatalarda chizilgan. Izotermiya boshlang'ich fazadagi minimal adsorbsiyaga mos keladigan taxminan -7,58 logarifmik qiymatdan boshlanadi. Adsorbsiya jarayoni davom etar ekan, izoterm egri chizig'ining asta-sekin o'sishi kuzatiladi, bu adsorbent yuzasida benzol molekularining progressiv to'planishini ko'rsatadi. Adsorbsiya taxminan 200 mkmol/g ga yetganda, logarifmik qiymat -5,5 ga ko'tariladi, bu esa kirish mumkin bo'lgan adsorbsiya joylarida molekulyar lokalizatsiya boshlanishini bildiradi.

Adsorbsiya izotermasi  $0,017 < P/P^0 < 0,39$  nisbiy bosim diapazonida BET koordinatalari yordamida chizilganda chiziqli munosabatni namoyish etadi. Hisoblangan bir qatlamli adsorbsion quvvati ( $a_m$ ) 605 mkmol/g, adsorbsiya energiyasini aks ettiruvchi mos keladigan BET konstantasi esa 1,01 ga teng. Ushbu qiymatlardan foydalangan holda, benzol adsorbsiyasi uchun o'ziga xos sirt maydoni 198 m<sup>2</sup>/g deb baholandi.

2(b)-rasmida tasvirlanganidek, Aerosil yuzasida benzol molekulari uchun differensial adsorbsiya issiqligi ( $Q_d$ ) qiymatlari asta-sekin pasayuvchi, ammo to'liqinsimon xarakterga ega bo'lgan profilni namoyon etadi. Adsorbsiyaning boshlang'ich bosqichida  $Q_d$  68,50 kJ/mol dan 49,85 kJ/mol gacha kamayadi, bu esa yuqori energiyali adsorbsion markazlarning ketma-ket ishg'ol etilishi natijasida molekula–yuzaga o'zaro ta'sir energiyasining pasayishini ko'rsatadi.



**2-rasm. a) 303 K da Aerosil adsorbentida benzol bug'i adsorbsiyasi izotermalari  
b) 303 K da Aerosil adsorbentida benzol adsorbsiyasi differensial issiqligi. 303 K da benzol adsorbsiyasi gorizontal uzuq chiziqlar –issiqlik kondensasiyasi**

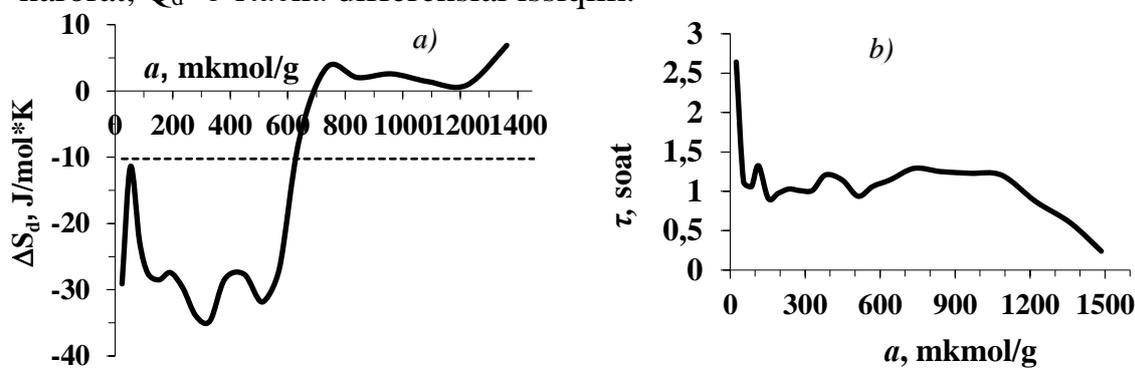
Adsorbsiyaning taxminan 51,2 mkmol/g darajasida  $Q_d$  qiymati 48 kJ/mol atrofida barqarorlashadi, bu esa yuzadagi nisbatan past energiyali, ammo barqaror adsorbsion markazlarning ishg'ol etila boshlashini anglatadi. 300 mkmol/g gacha cho'zilgan adsorbsion oralig'ida o'zaro ta'sir mexanizmi faqat van der Waals kuchlari bilan cheklanmay, balki benzol molekularining  $\pi$ -elektron tizimi va Aerosil matritsasiga kiritilgan gidroksid guruhlari yoki ishqoriy metall kationlari (masalan, Na<sup>+</sup>) o'rtasida  $\pi$ -komplekslarning hosil bo'lishi bilan ham bog'liq bo'lishi mumkin. Adsorbsion ma'lumotlarning differensial issiqligi shuni ko'rsatadiki,

benzolning o'zlashtirilishi taxminan 200 mkmol/g ga yetgandan so'ng, adsorbsiya aerosil faol markazlarining sirt yuzalariga o'tadi. Keyingi bosqichda benzol molekullari adsorbsiya energiyasi 38.60 dan 688 kJ/mol gacha bo'lgan tashqi sirt hududlari bilan tobora o'zaro ta'sir qiladi. Bu bosqichda adsorbsiyaning differensial issiqligi 68,50 kJ/mol dan 33,82 kJ/mol gacha pasayadi, bu esa o'zaro ta'sir kuchining asta-sekin kamayishini ko'rsatadi.

3(a)-rasmda Aerosil adsorbentida benzol adsorbsiyasining differensial entropiyasi keltirilgan. Differensial entropiyani hisoblash Gibbs-Gelmgolts tenglamasi yordamida adsorbsiya izotermasi va adsorbsiyaning differensial issiqligining eksperimental aniqlangan qiymatlari asosida amalga oshirildi.

$$\Delta S_d = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} = \frac{-(Q_d - \lambda) + A}{T}$$

$\lambda$ -issiqlik kondensatsiyasi,  $\Delta H$  va  $\Delta G$ -entalpiya va erkin energiya o'zgarishi,  $T$  – harorat,  $Q_d$  – o'rtacha differensial issiqlik.



**3-rasm. a) 303K temperaturada Aerosil adsorbentida benzol adsorbsiyasi differensial entropiyasi. Gorizontaal shtrix chiziqlar – o'rtacha integral entropiya b) 303 K temperaturada Aerosil adsorbentida benzol adsorbsiyasi muvozanat vaqti**

Miqdoriy jihatdan, kremniy dioksidiga asoslangan materiallarda benzol adsorbsiyasi uchun entropiya o'zgarishi odatda sirt xususiyatlariga, haroratga va qoplamaga qarab -10 dan -35 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> oralig'ida topiladi. Ushbu salbiy qiymat quyidagilarni aks ettiradi. Adsorbsiya o'rtacha molyar integral entropiya -10,24 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup> ni tashkil etadi, bu adsorbsiyalangan fazaning termodinamik xususiyatga ega ekanligi haqidagi tushunchani mustahkamlaydi.

3(b)-rasmda adsorbsiya kinetikasi shuni ko'rsatadiki, 200 mkmol/g yuklanganda benzol adsorbsiyasi birinchi navbatda adsorbsiyaning differensial issiqligi nisbatan yuqori bo'lgan adsorbent qatlamlararo hududlarida sodir bo'ladi. Bu 2 dan 3 soatgacha bo'lgan cho'zilgan muvozanat vaqtlari bilan bog'liq. Qo'shimcha qatlamlarning shakllanishi bilan bog'liq bo'lgan keyingi adsorbsiya bosqichida tizim tezroq muvozanatga erishadi - taxminan 1 soat ichida. Oxirgi bosqichda, tashqi bazal sirtlarda adsorbsiyaga mos keladigan, muvozanat 20 daqiqa ichida erishiladi, bu energiya kamroq talab qilinadigan sirt domenlarida adsorbsiya tezligining oshishini aks ettiradi.

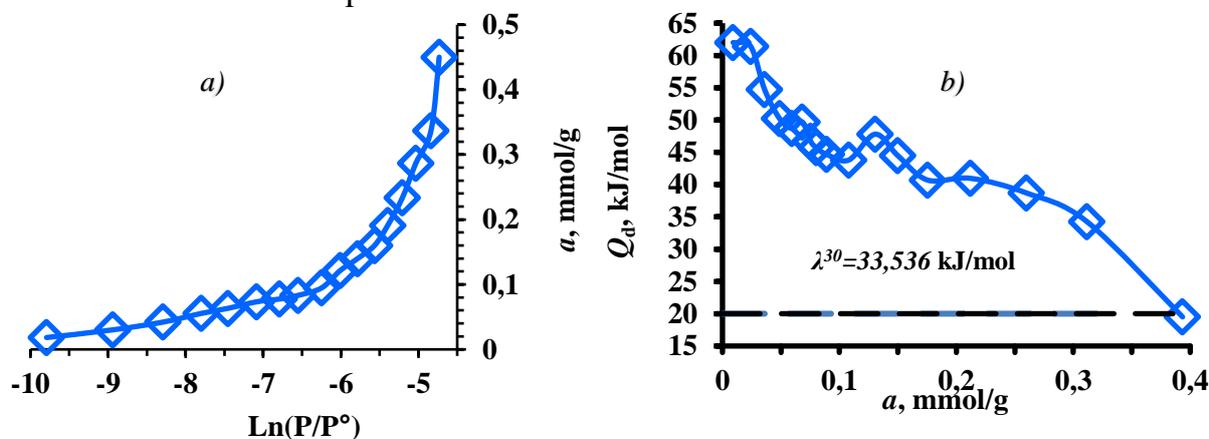
**Aerosilga uglerod (IV) oksidi molekullari adsorbsiyasining termodinamik tavsiflari.** CO<sub>2</sub> ning eksperimental haroratdagi yuqori to'yingan bug' bosimi (30 ° C da P°=54086 mmHg) Aerosil adsorbentida to'liq adsorbsion izotermi olishni

cheklaydi. Binobarin, Aerosilda CO<sub>2</sub> adsorbsiyasi uchun faqat qisman izoterm 4(a)-rasmida tasvirlangan.

Dastlabki bosqichda adsorbsiya izotermasi ijobiy egri traektoriyani ko'rsatadi, u adsorbsion sig'im taxminan 100 mkmol/g ga yaqinlashganda tez ko'tarilish bilan tavsiflanadi. Brunauer-Emmett-Teller (BET) modeli yordamida izotermni baholash Aerosil namunasi uchun 76,8 m<sup>2</sup>/g o'ziga xos sirt maydonini berdi.

Aerosilda CO<sub>2</sub> adsorbsiyasining differensial issiqligi adsorbsiyalovchi molekulalar bilan yuzadagi faol markazlar o'rtasidagi o'zaro ta'sir kuchini ifodalaydi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, adsorbsiyaning dastlabki bosqichlarida differensial issiqlikning yuqori qiymatlari kuzatiladi, bu esa silanol guruhlariga yaqin joylashgan kuchli energetik markazlarga CO<sub>2</sub> molekulalarining mahkam bog'lanishini anglatadi. Adsorbsiya davom etgan sari yuzadagi faollik markazlari band bo'lib boradi va differensial issiqlik bosqichma-bosqich kamayadi.

Aerosil yuzasida karbonat anhidrid (CO<sub>2</sub>) molekulalarining adsorbsiyasi jarayonida o'lchanadigan differensial issiqlik qiymatlari, CO<sub>2</sub> molekulalari va amorf kremniy dioksidi (SiO<sub>2</sub>) yuzasidagi aktiv markazlar o'rtasidagi o'zaro ta'sir kuchlarining miqdoriy ifodasidir. Dastlabki, past qoplama darajalarida kuzatilgan yuqori differensial issiqlik qiymatlari, energiya jihatidan eng qulay bo'lgan va odatda silanol ( $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ ) guruhlari bilan bog'liq bo'lgan yuqori-aktiv sirt markazlarida kuchli adsorbat-adsorbent o'zaro ta'sirlarini anglatadi. Ushbu markazlar asosan gidrogen bog'lanishlar va dipol-induktsiya mexanizmlari orqali CO<sub>2</sub> molekulalarini barqarorlashtiradi.

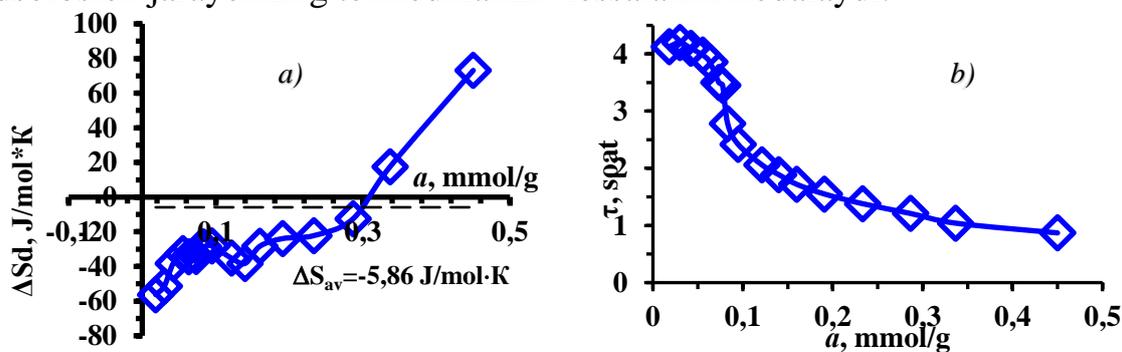


**4-pacm. a) 303 K da aerosil adsorbentida uglerod (IV)-oksidi adsorbsiyasi izotermalari b) 303 K da aerosil adsorbentida uglerod (IV)-oksidi adsorbsiyasi differensial issiqligi. 303 K da benzol adsorbsiyasi gorizontall uzunq chiziqlar –issiqlik kondensasiyasi**

Aerosil adsorbentida CO<sub>2</sub> molekulalarining adsorbsiyasi jarayonida o'lchangan differensial issiqlik profili (4(b)-rasm) jarayonning bosqichma-bosqich kechishini va energetik jihatdan murakkab tuzilishga ega ekanligini yaqqol namoyon etadi. Past sirt qoplamasi sharoitida (ya'ni, adsorbat molekulalari soni nisbatan kam bo'lganda) dastlabki adsorbsion entalpiya qiymati 62,0 kJ/mol ni tashkil etadi. Adsorbsiyaning ilk fazasida entalpiya asta-sekin, to'liqsimon pasayish tendensiyasini namoyish qiladi, bu esa adsorbent sirtining energetik geterogenligini va faol markazlarning energiya taqsimoti bir xil emasligini tasdiqlaydi. Yuklama 0,11 mmol/g ga yetganda adsorbsion issiqlik 43,8 kJ/mol gacha kamayadi, so'ngra 0,20 mmol/g da lokal maksimal qiymatga — 40,97 kJ/mol ga ko'tariladi. Bu oraliq o'zgarishlar, ehtimol,

CO<sub>2</sub> molekularining dastlab yuqori energiyali markazlardan pastroq energiyali markazlarga o'tishi, so'ngra esa yangi, nisbatan kuchliroq sirt markazlari bilan o'zaro ta'sirlashuvi natijasida yuzaga keladi. Adsorbsiyaning yanada chuqurlashishi bilan entalpiya yana pasayib, 0,23 mmol/g da minimal 35 kJ/mol ga tushadi, biroq 0,80 mmol/g yuklama darajasida yana o'rtacha 40 kJ/mol atrofida tiklanadi. Ushbu issiqlik tebranishlari adsorbat molekularining turli tipdagi sirt markazlari bilan ketma-ket va selektiv o'zaro ta'sirlashishidan kelib chiqadi. Aerosil sirtini faol metall komponentlari bilan modifikatsiyalash adsorbsion issiqlikni oshirishi mumkin. Bunday modifikatsiya adsorbent-adsorbat o'zaro ta'sirlarini kuchaytirib, ion-molekula komplekslari hosil bo'lishini rag'batlantiradi va natijada CO<sub>2</sub> ning bog'lanish barqarorligini sezilarli darajada oshiradi.

5(a)-rasmida karbonat angidridning (CO<sub>2</sub>) Aerosil yuzasiga adsorbsiyasi jarayonida entropiya o'zgarishlari grafik ko'rinishda ifodalangan. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, adsorbsion sig'im 50 mkmol/g dan past bo'lgan holatlarda entropiya qiymatlari CO<sub>2</sub> ning standart entropiyasidan past bo'lib, bu boshlang'ich adsorbsiya bosqichida molekulyar erkinlikning sezilarli darajada pasayishini aks ettiradi. Bu, o'z navbatida, gaz molekularining yuzaga adsorbsiyalanishi natijasida ularning translatsion va rotatsion harakatchanligining cheklanishi bilan bog'liqdir. Biroq, adsorbsion sig'im ushbu chegaradan oshganda, entropiya qiymatlari standart holat ko'rsatkichlaridan yuqori bo'lib, bu molekularning yuzada yuqori harakatchanlikka ega bo'lishi yoki yuzaki strukturaning qisman buzilishi holatini bildiradi. O'rta hisobda integral adsorbsiya entropiyasi -5,86 J/mol·K ga teng bo'lib, bu CO<sub>2</sub> ning Aerosil yuzasida o'zaro ta'siri va adsorbsion jarayonning termodinamik xossalarini ifodalaydi.



5-rasm. a) 303K temperaturada aerosil adsorbentida uglerod (IV)-oksidi adsorbsiyasi differensial entropiyasi. Gorizontaal shtrix chiziqlar – o'rtacha integral entropiya b) 303 K temperaturada Aerosil adsorbentida uglerod (IV)-oksidi adsorbsiyasi muvozanat vaqti

5(b)-rasmida karbonat angidrid (CO<sub>2</sub>) molekularining Aerosil adsorbentiga adsorbsiyasi jarayonida muvozanat vaqtining o'zgarishi ko'rsatilgan. Dastlabki bosqichlarda tizim taxminan 1,5 soat davomida muvozanatga erishadi, ammo adsorbsiya jarayoni rivojlanishi bilan muvozanat vaqti doimiy ravishda qisqarib, oxir-oqibat bir necha daqiqagacha kamayadi. Eksperimental natijalar shuni ko'rsatdiki, CO<sub>2</sub> ning Aerosil yuzasida adsorbsiyalanishi odatda 2–3 soat davomida muvozanat holatiga yaqinlashadi. Ammo sirtning to'yinganlik darajasi ortishi bilan, ya'ni sorbsion markazlar sonining kamayishi sababli, muvozanat vaqti sezilarli darajada qisqarib, bir necha daqiqagacha kamayadi. Ushbu holat Aerosil yuzasida

mavjud bo'lgan adsorbsion markazlarning turli energetik faollik darajalariga ega ekanligini ko'rsatadi, bu esa gaz molekularining adsorbsiya kinetikasini va adsorbsion termodinamikani murakkablashtiradi.

Dissertasiyaning «**Aerosilga qutbli molekular adsorbsiya qonuniyatlari**» deb nomlangan to'rtinchi bobida aerosilga suv va ammiak molekularining adsorbsiya izotermasi, differensial issiqligi, adsorbsiya differensial entropiyasi hamda adsorbsiya muvozanat vaqtlari haqida ma'lumotlar batafsil berilgan.

**Aerosilga suv molekulari adsorbsiyasining termodinamik tavsiflari.** Aerosil adsorbentidagi suv molekularining adsorbsion izotermalari tizimli va batafsil o'rganildi. 303 K haroratda o'lchangan izoterma natijalari 6(a)-rasmda ko'rsatilgan. Adsorbsion jarayonning nisbiy bosim diapazoni 0,05 dan 0,4 gacha (P/Ps) oralig'ida Brunauer–Emmett–Teller (BET) tenglamasining koordinatalarida chiziqli bog'lanish kuzatildi. Ushbu chiziqlilik adsorbsiyaning ushbu bosim diapazoni doirasida monomolekulyar qatlam hosil qilish bosqichida sodir bo'layotganini isbotlaydi, ya'ni suv molekulari Aerosil yuzasida bir qatlam shaklida joylashmoqda.

Natriy kationlari bilan modifikatsiyalangan Aerosil namunasi uchun suv molekularining bir qatlamli adsorbsion sig'imi ( $a_m$ ) 1,767 mkmol/g sifatida aniqlangan. Bundan tashqari, adsorbsion jarayonning bog'liq energiya konstantasi 14,32 mkmol/g ni tashkil qilib, bu parametr adsorbsiyaning energetik xususiyatlari va molekular bilan yuzaki o'zaro ta'sirlarning mustahkamligini aks ettiradi.

Tadqiqot davomida Aerosil yuzasining suv bilan o'zaro ta'sirida o'ziga xos sirt maydoni 162,1 m<sup>2</sup>/g ekanligi hisoblab chiqildi. Agar suv molekularining zich va homogjen monolayer (bir qatlam) hosil qilish sharti qabul qilinsa, har bir suv molekulasi yuzada egallagan maydoni taxminan 15,8 Å<sup>2</sup> deb hisoblanadi. Bu qiymat molekularning Aerosil yuzasida qanday joylashishini va adsorbsion qatlamning fizikaviy o'lchamlarini aniqlashda muhim ahamiyatga ega.

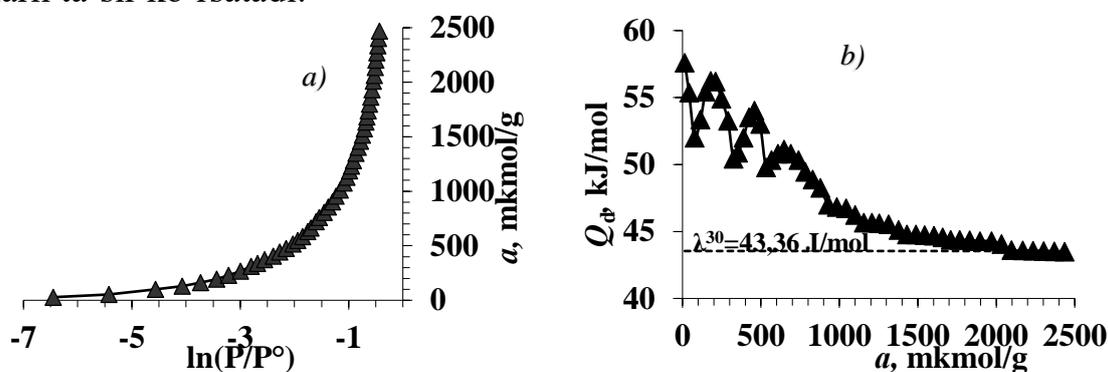
Aerosil adsorbentida 303 K haroratda o'lchangan suv molekularining differensial adsorbsiya issiqliklari ( $Q_d$ ) 6(b)-rasmda grafik ko'rinishda keltirilgan. Tadqiqot natijalariga ko'ra, boshlang'ich adsorbsion yuklanish darajasida, taxminan 1,20 mkmol/g da, adsorbsiya issiqligi 69,09 kJ/mol qiymatiga teng bo'lib, bu Aerosil yuzasida energetik jihatdan yuqori faollikka ega bo'lgan adsorbsiya joylarining mavjudligini bildiradi. Birinchi bosqichda adsorbsion issiqlik 57,17 kJ/mol dan 52,25 kJ/mol gacha kamaygan bo'lib, bu bosqichda adsorbsion yuklanish 49 mkmol/g dan 62,52 mkmol/g gacha o'zgaradi. Keyingi bosqichlarda, jumladan ikkinchi bosqichda adsorbsiya issiqligi 61,81 kJ/mol gacha pasayadi, to'rtinchi bosqichda esa, adsorbsion yuklanish taxminan 348 mkmol/g ga yetganda, differensial issiqlik yana 50,17 kJ/mol darajasiga tushadi.

Bundan tashqari, ikkinchi qo'shimcha bosqich mavjudligi aniqlangan bo'lib, u umumiy issiqlik o'zgarishining 10,25 kJ/mol ga teng bo'lishiga sabab bo'ladi. Birinchi bosqich esa Aerosil yuzasidagi strukturaviy nuqsonlar bilan bog'liq bo'lib, taxminan 20 mkmol/g suv molekularining adsorbsiyasiga mos keladi. Bu bosqich yuqori faollikdagi faol markazlarning dastlabki to'yinish jarayonini ifodalaydi.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, Aerosil adsorbentida sodir bo'layotgan adsorbsion jarayon har bir bosqichda taxminan 50,1 kJ/mol va ~45,6 kJ/mol

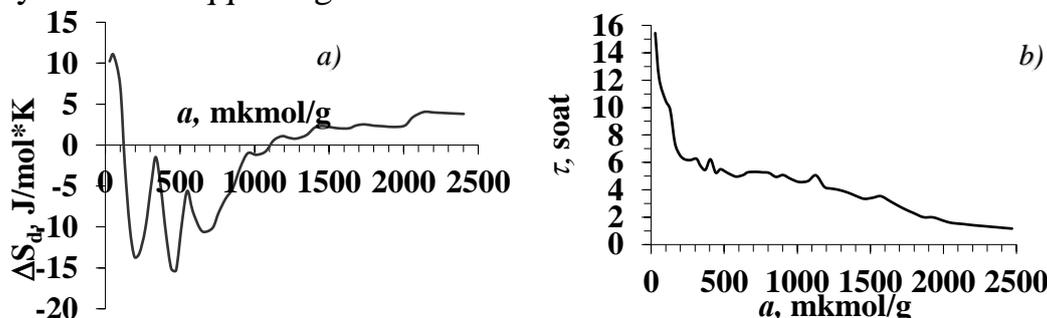
qiymatlarida ikki qavatli adsorbsiya qatlamining shakllanishiga olib keladi. Ushbu bosqichlar natijasida hosil bo‘lgan umumiy adsorbsion sig‘im esa 3155 mkmol/g gacha yetadi. Suv molekularining adsorbsion xususiyatlari asosida, dastlabki faol adsorbsiya markazlari asosan taxminan 77 mkmol/g hajmidagi H<sup>+</sup> kationlaridan iborat ekanligi aniqlangan.

Keyingi bosqichlarda faol markazlardagi H<sup>+</sup> kationlarining soni 348 mkmol/g dan 230 mkmol/g ni ayirish orqali hisoblangan 118 mkmol/g ga oshadi. Shu bilan birga, faollik markazlaridagi Na<sup>+</sup> kationlarining soni bazal sirt maydonidagi qiymatning taxminan yarmini tashkil etadi, ya’ni 230 mkmol/g ning yarmi bo‘lgan 115 mkmol/g ga teng. Eksperimental o‘lchovlar va nazariy hisob-kitoblar o‘rtasidagi yaqin moslik, Aerosil yuzasida 92 mkmol/g miqdorida H<sup>+</sup> kationlarining faol sirt markazlarida adsorbsiyalanganligi haqidagi gipotezani mustahkamlaydi. Bundan tashqari, Aerosil yuzasidagi natriy kationlarining nisbatan past zaryadga ega bo‘lishi, muskovitga nisbatan adsorbsion komplekslarning yaqin joylashuvi va o‘zaro ta’sirini osonlashtiradi, bu esa yuzaki kimyoviy va fizik xususiyatlarga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi.



**6-rasm. a) Aerosilga suv molekulari adsorbsiya izotermalari b) Aerosilga suv molekulari adsorbsiya differensial issiqligi. Shtrix chiziqlar – 303 K da suvning kondensatsiya issiqligi**

Aerosilda suv molekularining adsorbsion izotermalari va differensial adsorbsiya issiqliklaridan foydalanib, Gibbs-Gelmgolts tenglamasi yordamida adsorbsiyaning molyar differensial entropiyasi ( $\Delta S_d$ ) aniqlangan (7(a)-rasm). 303 K haroratda o‘lchangan differensial adsorbsiya entropiyalari suyuq suvning entropiyasi bilan taqqoslangan.



**7-rasm. a) Aerosilga suv molekulari adsorbsiyasining differensial molyar entropiyasi. Shtrix chiziqlar-o‘rtacha integral entropiyasi. Suv molekularining suyuq holat entropiyasi nolga teng deb hisoblanadi b) Aerosilga suv molekulari adsorbsiyasining muvozanat vaqti**

Issiqlik egri chizig'ining bosqichma-bosqich o'zgarishi entropiya egri chizig'ida bir nechta ekstremumlardan iborat poliekstremal naqshni yuzaga keltiradi.

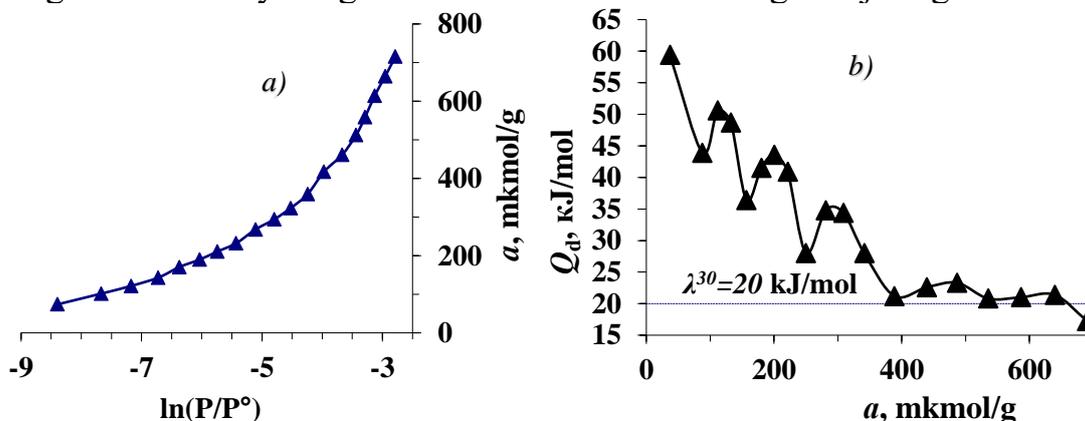
Adsorbsiya qamrovi ortishi bilan, ayniqsa  $(\text{H}_2\text{O})_n/\text{Na}^+$  komplekslari shakllanish jarayonida, entropiya qiymatlari sezilarli darajada oshadi va suyuq suvning entropiyasidan yuqori bo'ladi. Bu suv molekulalarining yuzada ko'proq erkinlikka ega bo'lishi, ya'ni molekulyar harakatchanlik va strukturalik o'zgarishlar natijasida yuzaga keladi. Poliekstremal (bir nechta ekstremumli) entropiya naqshlari yuzasining geterogenligi va suv molekulalari o'rtasidagi murakkab o'zaro ta'sirlarni aks ettiradi.

500 mkmol/g dan boshlab,  $(\text{H}_2\text{O})_6/\text{Na}^+$  komplekslari shakllanguncha, adsorbsion entropiya egri chizig'i suyuq suvning entropiyasi ostida qoladi. Ammo, 5–8 a'zoli komplekslar paydo bo'lganda, adsorbsiya entropiyasi suyuq suvnikidan oshib ketadi va sezilarli darajada oshadi. Bu esa adsorbsiya jarayonining rivojlanishi bilan suv molekulalarining harakatchanligi va strukturalik erkinlik darajasining oshishini ko'rsatadi.

7(b)-rasmda taqdim etilgan natijalar asosida, adsorbsion muvozanatni o'rnatish uchun zarur bo'lgan vaqt va Aerosil adsorbentining sirt qoplami zichligi o'rtasidagi bog'liqlik batafsil tahlil qilindi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, adsorbsiya qamrovi taxminan 110 mkmol/g ga yetganda muvozanatga erishish jarayoni sezilarli darajada sekinlashadi. Kamroq qoplamalar holatida, ya'ni nisbatan past adsorbsiya zichligida, muvozanat odatda taxminan 5 soat ichida o'rnatiladi, ammo qoplama zichligi oshgani sari bu vaqt 1–1,5 soatgacha qisqaradi. Ushbu kinetik o'zgarishlar, avvalo, yuzadagi adsorbsion joylarning to'yishi va shu bilan bog'liq yuzaki jarayonlarning dinamikasiga bog'liq ekanligi ta'kidlanadi.

#### **Aerosilga ammiak molekulalari adsorbsiyasining termodinamik tavsiflari.**

Aerosil adsorbentida ammiak molekulalarining adsorbsiyasi izotermasi 8(a)-rasmda yarim logarifmik koordinatalarda taqdim etilgan. Izotermaning boshlang'ich nuqtasi nisbiy bosim  $\ln(P/P^\circ) = -8.398$  da aniqlangan bo'lib, bu 73.841 mkmol/g hajmda boshlang'ich adsorbsiyalangan ammiak molekulalarining mavjudligini ko'rsatadi.



8-rasm. (a) Aerosil adsorbentiga ammiak molekulalari adsorbsiya izotermalari (b) Aerosilga ammiak molekulalari adsorbsiya differensial issiqligi. Shtrix chiziqlar – 303 K da ammiakning kondensasiya issiqligi

Adsorbsiyaning rivojlanishi davomida izoterma egri chizig'i sekin-asta ko'tarilib, ammiak molekulalarining Aerosil yuzasiga ketma-ket adsorbsiyalanishini

namoyish etadi. Nisbiy bosim  $\ln(P/P_0)=-5.11$  ga yetganda, adsorbsion sig'imi taxminan 300 mkmol/g ni tashkil qiladi. Ushbu bosqichda ammiak molekulari Aerosilning o'ziga xos, yuqori faollikdagi adsorbsion joylarida immobilizatsiyalanadi va bu markazlar aerosolning ichki sirt qatlamlarida joylashgan faol markazlar bilan bog'liqdir.

Keyingi bosqichda, adsorbsion sig'imi 400 mkmol/g ga yetganida, nisbiy bosim  $\ln(P/P_0)=-3.97$  ga teng bo'ladi. Bu nuqtadan keyin izotermada keskin o'sish kuzatiladi va adsorbsiyaning to'yinganlik darajasiga yaqinlashishi davomida adsorbsion sig'imi 700 mkmol/g ga yaqinlashadi. Ushbu jarayon yuzada mavjud markazlarning to'yinishi va ammiak molekularining faol markazlar orasida qayta taqsimlanishidan dalolat beradi. 303 K haroratda ammiakning to'yingan bug' bosimi 8456.35 mmHg ga teng bo'lib, bu o'lchovlarning yuqori bosim sharoitlarida amalga oshirilganligini ko'rsatadi.

Aerosil adsorbenti uchun ammiak molekularining adsorbsiyasiga mo'ljallangan o'ziga xos sirt maydoni taxminan 89.5 m<sup>2</sup>/g ni tashkil qiladi. Bitta ammiak molekulasini monoqatlamda zich joylashganda egallagan sirt maydon 21 Å<sup>2</sup> deb baholangan. Ushbu parametr Langmuir adsorbsion modelida ishlatiladigan molekulyar maydon bilan mos kelib, ammiak molekularining Aerosil yuzasida taqsimlanishini nazariy jihatdan ifodalaydi.

Aerosil adsorbentida ammiak molekularining adsorbsiyasining differensial issiqligi ( $Q_d$ ) 8 (b)-rasmda grafik ko'rinishda taqdim etilgan bo'lib, unda to'lqinsimon pasayish tendentsiyasi aniq kuzatiladi. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, adsorbsiyaning dastlabki bosqichida differensial issiqlik qiymati 60,10 kJ/mol dan boshlanib, bosqichma-bosqich pasayib, oxir-oqibat 43,88 kJ/mol darajasiga yetadi. Aerosil adsorbentida ammiak molekularining adsorbsiyasi jarayonining keyingi bosqichlarida differensial issiqlik qiymatida ma'lum darajada ortish kuzatiladi, u taxminan 51,4 kJ/mol gacha yetadi. Bu jarayonning davomida adsorbsiyaning miqdori 180 mkmol/g ga yetganidan keyin adsorbsion issiqlik pasayish boshlaydi va 35,44 kJ/mol qiymatiga tushadi. Adsorbsion jarayon yanada rivojlanib, adsorbsiyaning umumiy miqdori 249,55 mkmol/g ga yetganda, differensial issiqlik qiymati taxminan 28 kJ/mol atrofida barqarorlashadi. Ushbu stabilizatsiyalangan issiqlik platosi adsorbsion yuzada o'zaro ta'sirlarning doimiy energetik rejimga o'tganini ko'rsatadi.

Keyinchalik, adsorbsiyaning miqdori 388,29 mkmol/g ga yetganda, differensial issiqlik yana 21,92 kJ/mol ga kamayadi. Dastlabki adsorbsion entalpiya qiymati taxminan 54 kJ/mol ga teng bo'lib, bu Aerosil adsorbentining faol markazlaridagi struktural domenlarning ichki botiqlari va botiqlararo bo'shliqlarda joylashgan ammiak molekularining o'zaro ta'siri bilan izohlanadi.

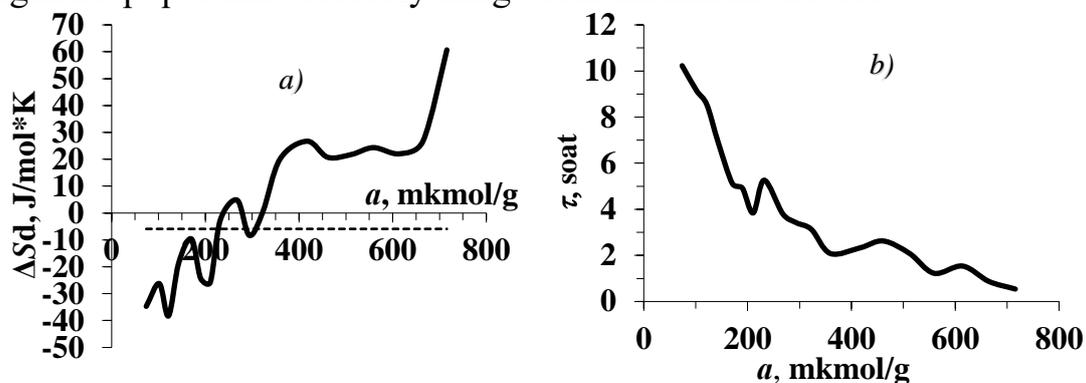
$\pi$ -komplekslarning hosil bo'lishi ikkilamchi g'ovaklik xususiyatlari bilan bog'liq bo'lib, bu jarayon adsorbsiya miqdorining 388,65 mkmol/g gacha bo'lgan yuqori qiymatlarida amalga oshadi.

Shu bilan birga, 87,71 dan 535,65 mkmol/g gacha bo'lgan oraliqda differensial issiqlik asta-sekin 28,92 kJ/mol dan 21,16 kJ/mol gacha kamayadi. Bu tendensiya ammiak molekulari va kationlar o'rtasidagi o'ziga xos o'zaro ta'sirlarning

zaiflashuvi va qo'shni kationik qatlamlar bo'ylab  $\pi$ -komplekslarning bosqichma-bosqich rivojlanishi tufayli bog'lanish energiyasining pasayishini aks ettiradi.

Adsorbsiyaning yakuniy bosqichida ammiak molekulari asosan Aerosil adsorbentining yuzalarida to'planadi. Bu bosqichda adsorbsion energiya 21,16 kJ/mol dan boshlab asta-sekin ko'tarila boshlaydi va ammiak molekularining kondensatsiya entalpiyasiga mos keladigan qiymatga 717,9 mkmol/g ga yetadi.

9(a)-rasmda Aerosil adsorbentida ammiak molekularining adsorbsiyasining differensial entropiyasi ko'rsatilgan. Termodinamik hisob-kitoblar natijasida Aerosil adsorbentidagi ammiak molekularining o'rtacha molyar integral entropiyasi -5,92 J/mol·K qiymatida aniqlanib, bu molekularning matritsada kondensatsiyalangan fazaga o'xshash termodinamik xatti-harakatini tasdiqlaydi. Differensial entropiya grafigida esa 73,82 dan 300,20 mkmol/g gacha bo'lgan adsorbsiya diapazonida entropiya qiymatlari o'rtacha integral entropiyadan oshib, bir qavatli qoplamaning to'liq shakllanganini va entropiya maksimaliga mos keladigan ko'p qatlamli adsorbsiyaning boshlanishini ko'rsatadi.



**9-rasm. a) Aerosilga ammiak molekulari adsorbsiyasining differensial moli entropiyasi. Shtrix chiziqlar-o'rtacha integral entropiyasi. Ammiak molekularining suyuq holat entropiyasi nolga teng deb hisoblanadi b) Aerosilga ammiak molekulari adsorbsiyasining muvozanat vaqti**

Ushbu tahlil Aerosilda ammiak molekularining adsorbsiyasining bosqichma-bosqich o'tishini va molekulyar tartiblanish darajasidagi o'zgarishlarni chuqurroq tushunishga imkon beradi. Boshlang'ich oraliq adsorbsiya diapazonida, taxminan 101,23 mkmol/g qiymatida, adsorbsiyaning muvozanat holati yuqori differensial issiqlik bilan birga uzoq davom etuvchi muvozanat vaqtlariga ega bo'ladi

9 (b)-rasmda aerosilga ammiak molekulari muvozanatga erishish uchun 10,8 dan 5,2 soatgacha bo'lgan vaqt oralig'ini talab qiladi. Ushbu uzoq davom etuvchi muvozanat vaqti faol markazlar orqali sekin molekulyar diffuziya va yuzada molekularning cheklangan qayta taqsimlanishi bilan bog'liq bo'lib, jarayonning kinetik omillaridan biridir. Keyingi bosqichlarda, ammiak molekularining adsorbsion qatlamida muvozanat odatda 2–3,5 soat ichida o'rnatiladi. Shu bilan birga, yuzaning to'yinganlik darajasi oshgani sayin muvozanatga erishish vaqti asta-sekin qisqaradi va jarayon oxirgi bosqichlarda, ya'ni yuzadagi bo'sh joylar sezilarli darajada kamayganda, taxminan 2 soatdan 20 daqiqagacha tushadi. Bu o'zgarish molekularning yuzadagi mavjud bo'sh joylarga nisbatan zichlashuvi va ko'p qatlamli adsorbsiyaning boshlanganligiga ishora qiladi. Adsorbsiya odatda 30-40 daqiqa ichida muvozanat holatiga erishadi.

## UMUMIY XULOSALAR

Dissertasiyasi ishini bajarishda olingan asosiy ilmiy natijalari quyidagilar hisoblanadi:

1. Aerosil adsorbentiga past haroratli azot molekulalarining adsorbsiyasi yuqori darajada disperslangan sirt maydoni bilan bog'liqligi aniqlandi. Bunda harorat ortgan sari suyuq azot uchun aerosilda sirt yuzalari kattalashishi kuzatildi. BET tenglamasi orqali tahlil qilingan eksperimental izotermalardan foydalanib, Aerosilning o'ziga xos sirt maydoni va sorbsion faol markazlari aniqlandi.

2. Aerosilda benzol molekulalarining adsorbsion izotermalar tahlili natijasida o'ziga xos sirt maydoni Brunauer-Emmett-Teller (BET) tenglamasi yordamida aniqlangan bo'lib, bu metodlar mos ravishda faol sirt yuzalarga adsorbsiyasida sodir bo'ladigan jarayonlarga asoslanadi. Aerosilda benzol adsorbsiyasi differensial issiqligi pog'onali ko'rinishda borib, dastlabki to'yinishlarda 68,50 kJ/molni tashkil qiladi. Adsorbsiyaning o'rtacha integral entropiyasi  $-10,24 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$  ga teng, adsorbent yuzasiga bog'langan benzol molekulalarining harakatchanligi sezilarli darajada cheklanganlini va issiqlik muvozanati shu markazlarda qisman lokalizasiyalanganlini bildiradi.

3. Aerosilga uglerod (IV)-oksidi ( $\text{CO}_2$ ) adsorbsiyasining differensial issiqligi to'lqinsimon ko'rinishda, bosqichma-bosqich pog'onali o'zgaruvchanlik bilan boradi. Aerosilda 0.3 mmol/g gacha bo'lgan  $\text{CO}_2$  adsorbsiyasi uchun standart holatdagi entropiya qiymatlaridan nisbatan past bo'lib, dastlabki adsorbsiya bosqichlarida yanada tartibli molekulyar joylashuvni ko'rsatadi. Bu adsorbsiya miqdorida issiqlik muvozanat varti ham yuqori bo'ladi. Bunday termodinamik xarakteristikalar aerosil sirt yuzalarining geterogenligi va kuchli lokalizasiyalanganligidan dalolat beradi.

4. Aerosil adsorbentining suv molekulalarining adsorbsiya miqdori va izoterma qiymatlari asoslanib, suvga nisbatan sirt yuza qiymatlari 162,1  $\text{m}^2/\text{g}$ ga teng bo'ladi. Aerosilga dastlabki qutbli suv molekulalari adsorbsiya differensial issiqligi suv molekulalari adsorbsiyalanishida 57,6 kJ/mol dan boshlanib, issiqlik grafigi minimum va maksimum qiymatlarga erishadi va adsorbsiya issiqligi pasayib boradi. Issiqlikning yuqori bo'lishi adsorbentning faol sirt markazlarida joylashgan kationlarning, ayniqsa  $\text{H}^+$  va  $\text{Na}^+$  kationlarining migratsiyasi bilan bog'liq bo'ladi.

5. Aerosilga ammiak molekulalari adsorbsiyasi izotermalari BET tenglamasi yordamida solishtirma sirt yuzalari hisoblandi va 89.5  $\text{m}^2/\text{g}$  teng bo'ldi. Adsorbsiya differensial issiqligi 59,40 kJ/mol dan bosjlanib, keyingi ammiak molekulalar adsorbsiyalanish issiqligi pasayib boradi va 1 atm bosimida 22 kJ/molga tenglashadi. 300 mkmolgacha adsorbsiyalanagan ammiak molekulalari kuchli lokalizasiyalanadi va o'rtacha integral entropiya qiymati  $-5,90 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$  ga teng bo'ladi.

6. Ushbu tadqiqot o'ziga xos sorbsiya qobiliyatiga ega bo'lgan mahalliy xomashyodan samarali foydalanishni rivojlantirishda muhim rol o'ynaydi. Ularning strukturaviy, fizik-kimyoviy va sirt xususiyatlarini muntazam ravishda o'rganish orqali tadqiqot maqsadli o'zgartirish va qayta ishlash usullari orqali sorbsiya qobiliyatini optimallashtirish uchun ilmiy asos yaratadi. Bundan tashqari, tadqiqot ishi asisida zamonaviy innovatsion sorbentlarni sintez qilish uchun asos yaratadi, ular atrof-muhitni qayta tiklash, sanoat tozalash jarayonlari va boshqa texnologik sohalarda qo'llanilishiga xizmat qilish imkonini beradi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
DSc.03/29.08.2023.К/Т.66.02 ПРИ НАМАНГАНСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

---

**НАМАНГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

**КОДИРОВ ОЛИМЖОН РАХИМЖОН УГЛИ**

**МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ АДСОРБЦИИ МОЛЕКУЛ ВОДЫ,  
ОКСИДА УГЛЕРОДА, БЕНЗОЛА И АММИАКА НА АЭРОСИЛЕ**

**02.00.11 – Коллоидная и мембранная химия**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО  
ХИМИЧЕСКИМ НАУКАМ**

**Тема диссертации доктора философии (PhD) по химическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве Высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером B2025.1.PhD/K947**

Диссертация выполнена в Наманганском государственном техническом университете.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещён на веб-странице Научного совета ([www.namdtu.uz](http://www.namdtu.uz)) и Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу ([www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz)).

**Научный руководитель:**

**Эргашев Ойбек Каримович**  
доктор химических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Абдурахмонов Элдор Баратович**  
доктор химических наук, профессор

**Абдикамалова Азиза Бахтияровна**  
доктор химических наук, профессор

**Ведущая организация:**

**Ташкентский химико-технологический институт**

Защита диссертации состоится «15» декабрь 2025 г. в «13<sup>00</sup>» часов на заседании Научного совета DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02 при Наманганском государственном техническом университете по адресу: 160115, г. Наманган, ул. Косонсой, 7, Тел: (+99869) 234-14-85, Факс: (+99869) 234-14-85; e-mail: [info@namdtu.uz](mailto:info@namdtu.uz), Наманганский государственный технический университет, 6-здание, 1-этаж, ауд. 303).

Диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Наманганского государственного технического университета за № «93», с которой можно ознакомиться в информационно-ресурсном центре 160115, г. Наманган, ул. Касансай, 7. Тел: (+99869) 234-14-85, Факс: (+99869) 234-14-85).

Автореферат диссертации разослан «2» декабрь 2025 года.  
(Реестр за № 35 от «2» декабрь 2025 года).

**Шамшидинов И.Т.**

Заместитель председателя научного совета по присуждению учёной степени, д.т.н., профессор

**Маллабаев О.Т.**

Ученый секретарь научного совета по присуждению ученой степени, д.х.н.ф, доцент

**Шеркузиев Д.Ш.**

Председатель научного семинара при научном совете по присуждению учёной степени, д.т.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и востребованность темы диссертации.** Одним из важнейших вопросов в мировой практике является использование каталитически активных адсорбентов и катализаторов на основе оксидов кремния и алюминия при очистке сточных вод промышленных предприятий. Для очистки сточных вод, образующихся при переработке нефти и нефтепродуктов от различных примесей и ионов металлов, рекомендуется применение аэросильных адсорбентов с высокой удельной поверхностью. В последние годы постоянно возрастает потребность в адсорбентах, обладающих длительным сроком службы, возможностью регенерации и повторного использования за счёт процессов десорбции. С этой точки зрения имеет важное значение разработка методов синтеза высокоэффективных, конкурентоспособных адсорбентов с большой удельной поверхностью, получаемых из местного сырья и способных служить достойной альтернативой импортным аналогам, изучение их сорбционных свойств и достижение научных и практических новшеств на основе полученных результатов.

В настоящее время в мире ведутся научные исследования, направленные на разработку технологии получения аэросила с высокой удельной поверхностью, возможностью многократного использования и устойчивостью к высоким температурам, а также на характеристику механизмов сорбционных процессов. В этом направлении особое внимание уделяется изучению сорбционных свойств существующих аэросильных адсорбентов со специальной поверхностью; определению типов адсорбентов и их срока службы; описанию склонности аэросила к формированию  $\pi$ -комплексов с ароматическими соединениями; всесторонней характеристике адсорбированных полярных и неполярных молекул на основе термодинамических закономерностей; а также получению аэросила с активной удельной поверхностью, обладающего высокой термостойкостью и возможностью повторного использования.

В нашей Республике ускоренное развитие промышленного производства, в зависимости от типа производственных объектов, приводит к созданию и увеличению мощностей по выпуску новых продуктов, а также к расширению ассортимента и объёмов конкурентоспособной продукции. В частности, достигаются научные и практические результаты по получению аэросильных адсорбентов с высокой удельной поверхностью и каталитическими свойствами, а также по всестороннему изучению их адсорбционных характеристик. В третьем направлении Стратегии развития «Нового Узбекистана», направленной на дальнейшее развитие Республики Узбекистан, определены задачи по «ускорению трансформационных процессов в нефтегазовой сфере посредством внедрения рыночных механизмов при

гарантии социальной защиты в обеспечении природным газом»<sup>2</sup> В этом контексте получение аэросильных адсорбентов с высокой удельной поверхностью в настоящее время имеет важное значение.

Во исполнение задач, определённых Указом Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № ПФ-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы»<sup>1</sup>, а также в соответствии с Постановлением Президента Республики Узбекистан от 10 октября 2022 года № ПК-388 «Об утверждении целевой программы стратегического развития химической и газохимической промышленности», Постановлением Кабинета Министров от 15 декабря 2021 года № 753 «О создании инновационного научно-производственного и образовательного кластера для химической промышленности», Постановлением Президента Республики Узбекистан от 7 июля 2022 года № ПК-309 «О создании образовательного и производственного кластера в нефтегазовой промышленности», а также других нормативно-правовых актов, принятых в данной сфере, данное диссертационное исследование в определённой степени направлено на их реализацию и служит развитию Республики Узбекистан.

**Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с VII приоритетным направлением развития науки и технологий Республики — «Химические технологии и нанотехнологии».

**Степень изученности проблемы.** В мировых научных исследованиях широко освещены адсорбционные свойства цеолитов, изучаемые с использованием рентгеновской дифракции, нейтронных и синхротронных спектроскопических методов.

Иностранные авторы (Б.Ф. Ментзен, Б. Бодденберг и О.Р. Беллат) представляют данные, полученные с помощью адсорбционной калориметрии. Н.Н. Авгул, А.В. Киселев, Я.В. Мирский, М.В. Сердобов публиковали результаты исследований лишь по дифференциальной теплоте адсорбции воды, ограниченной средним заполнением.

В Узбекистане проф. А.А. Агзамходжаев, С.С. Хамраев, С.З. Муминов и Х.И. Акбаров изучали изотермы адсорбции газов и паров на поверхностных адсорбентах с использованием вакуумного прибора Мэгбена. А.А. Агзамходжаев, С.С. Хамраев, С.З. Муминов, И.Д. Эшметов, Д.С. Салиханова, Ш.А. Кулдашева исследовали адсорбцию различных молекул на ангреномском угле и глинистых минералах, а Х.И. Акбаров, А.Ю. Яркулов — на полимерно-кремнеземных гибридных нанокompозитах в вакуумном приборе Мэгбена.

В нашей стране под руководством к.ф.н., профессора Г.У. Рахматкариева создана научная школа, представители которой — Ф.Г. Рахматкариева, О.К. Эргашев, Х.Н. Бахронов, Э.Б. Абдурахманов, Д.Ж. Джумаева, Й.Ю. Якубов, Г.А. Долиев, Т.Д. Абдулхаев, М.Х. Коххаров и другие — провели обширные

---

<sup>2</sup>Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № ПФ-60 «О стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы».

исследования по полному изучению механизмов адсорбционных процессов на цеолитах типов А, X, Y и LSX, глинистых минералах, аэросиле, мусковите, силикалите, рутиле и других адсорбентах с использованием вакуумного адсорбционного микрокалориметрического оборудования.

В настоящей работе использовался аэросильный адсорбент, производимый немецкой фирмой Degussa. Поскольку мы впервые изучали данные адсорбенты, полученные результаты являются уникальными и освещают фундаментальные проблемы.

**Связь исследования с научно-исследовательскими планами научно-исследовательского учреждения, в котором была выполнена диссертация.** Диссертационное исследование выполнено в рамках плана научно-исследовательских работ Намганского государственного технического университета по теме «Механизмы взаимодействия “хозяин–гость” в молекулярных ситах NaLTA, CaLTA и содалита» а также в соответствии с планом научно-исследовательских работ Института общей и неорганической химии по проекту № FA-F-7-010 «Энергетика, структура и локализация ионно-молекулярных кластеров на поверхности решётки наноструктурных цеолитов фожазитового типа» и в рамках выполнения бюджетных программ и фундаментальных проектов по темам: «Исследование энергетики сорбции водяного пара, метилового и этилового спиртов и других соединений в микропорах и на поверхностях адсорбентов на основе каолина с целью замещения импортных адсорбентов на основе оксидов алюминия и кремния и развития теоретических основ адсорбции» а также «Исследование энергетики сорбции сульфидов и других соединений на поверхности цеолитных и угольных адсорбентов в целях замещения ряда импортных сорбентов и развития теоретических основ адсорбции».

**Целью исследования** является определение термодинамических характеристик адсорбции полярных и неполярных молекул на аэросильном адсорбенте, структуры поверхности и локализации адсорбатов на активных центрах с использованием высокоточного адсорбционного калориметрического оборудования.

**Задачи исследования:**

Определение изотерм адсорбции молекул воды, бензола, аммиака, азота и оксида углерода (IV) на аэросильном адсорбенте, дифференциальной теплоты, энтропии и характеристик времени теплового равновесия;

Исследование изотерм адсорбции молекул воды, бензола, аммиака, азота и оксида углерода (IV) на аэросильном адсорбенте и расчет их поверхностей с использованием уравнений БЭТ и Ленгмюра;

Анализ структуры аэросильного адсорбента в состоянии адсорбированных молекул воды, бензола, аммиака, азота и оксида углерода (IV);

Определение образования ионно-молекулярных комплексов и систем адсорбент–адсорбат, возникающих в процессе адсорбции молекул воды, бензола, аммиака, азота и оксида углерода (IV) на аэросильном адсорбенте;

Определение сорбционной эксплуатационной цикличности аэросильных адсорбентов и исследование их адсорбционных возможностей.

**Объектами исследования являются** аэросильный адсорбент, а также молекулы воды, бензола, аммиака, азота и оксида углерода (IV).

**Предметом исследования** является молекулярный механизм адсорбции, законы адсорбции, а также локализация и состояние ионно-молекулярных комплексов в матрице изучаемых цеолитов.

**Методы исследования.** В диссертации использованы физико-химические и коллоидно-химические, аналитические, адсорбционно-калориметрические методы исследований и анализа.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

с использованием микрокалориметрического метода определены точные изотермы адсорбции и полные термодинамические характеристики адсорбции молекул воды, бензола, аммиака, азота и оксида углерода (IV) на аэросильном адсорбенте;

дифференциальная теплота адсорбции молекул воды, аммиака, бензола и оксида углерода (IV) на аэросиле представлена ступенчатыми кривыми, при этом на каждом этапе выявлено образование ионно-молекулярных комплексов с протонами и ионами натрия на активных поверхностях;

поверхности адсорбции азота при низких температурах на аэросиле рассчитаны с использованием уравнений БЭТ и Ленгмюра. Аэросил очищался в вакуумных условиях при температурах 150, 250, 350 и 450 °С. Установлено, что с повышением температуры удельная поверхность по азоту увеличивается;

в процессе адсорбции молекул воды, бензола, аммиака и оксида углерода (IV) доказана миграция катионов  $H^+$  и  $Na^+$ , расположенных на поверхности сорбента, к сорбционным центрам;

на активных поверхностях аэросильного адсорбента молекулы адсорбатов образуют ионно-молекулярные комплексы с протонами и катионами натрия:  $((C_6H_6)_n/Na^+(H^+))$ ,  $((CO_2)_n/Na^+(H^+))$ ,  $((NH_3)_n/Na^+(H^+))$  и  $(H_2O)_n/Na^+(H^+)$ , при этом выявлена их сильная адсорбция и локализация;

Изотермы адсорбции молекул воды, бензола, аммиака, азота и оксида углерода (IV) на аэросиле были приведены в полу-логарифмическом виде, а поверхности адсорбции адсорбированных молекул рассчитаны и охарактеризованы на основе уравнений БЭТ и Ленгмюра.

**Практическая значимость исследования** заключается в следующем:

На основе основных термодинамических характеристик адсорбции молекул воды, бензола, аммиака, азота и оксида углерода (IV) на аэросильном адсорбенте, изотерм, энтальпии, дифференциальной молекулярной энтропии и времени теплового равновесия создана возможность синтеза микропористых сорбентов с высокой сорбционной ёмкостью из местного сырья;

На предприятии ООО «Ферганский нефтеперерабатывающий завод» изучены возможности адсорбции ароматических соединений из сточных вод, образующихся при переработке нефти, для их выделения.

**Достоверность результатов исследования.** Результаты экспериментов научно обоснованы и подтверждены с использованием химических (элементарных, гравиметрических) и физико-химических методов анализа, включая калориметрические измерения, а также соответствующие экспериментально-испытательные методы.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследования заключается в развитии теоретических знаний в области физико-химической адсорбции и в том, что на основе данных, полученных с использованием высокоточного вакуумного адсорбционного оборудования, полностью определяются термодинамические функции адсорбции молекул воды, бензола, аммиака и оксида углерода (IV) на аэросильном адсорбенте.

Практическая значимость результатов заключается в том, что изучение полного механизма адсорбции молекул ароматических соединений в газовой и жидкой фазах на аэросиле — от начального давления до давления насыщения — и образование ионно-молекулярных комплексов с катионами на активных центрах позволяет разрабатывать методы повышения эффективности сорбентов с высокой удельной поверхностью в промышленных процессах, извлекать целевые компоненты из сырья, защищать окружающую среду и развивать инновационные решения в химико-технологических отраслях. Кроме того, результаты могут быть использованы в специальных курсах для магистрантов вузов по физической, коллоидной и медицинской химии.

**Внедрение результатов исследования.** На основе научных результатов, полученных при определении адсорбционных свойств аэросильного адсорбента:

Очистка нефтепродуктов от молекул воды включена в «Перспективный перечень работ по внедрению в практику на 2026–2027 годы» ООО «Ферганский нефтеперерабатывающий завод» (справка № 15/84 от 14 июля 2025 года). Это позволяет удалять молекулы воды из бензина и дизельного топлива.

Очистка нефтепродуктов от дополнительных ароматических соединений включена в тот же «Перспективный перечень работ по внедрению в практику на 2026–2027 годы» ООО «Ферганский нефтеперерабатывающий завод» (справка № 15/84 от 14 июля 2025 года). Это позволяет удалять молекулы ароматических соединений (бензола) из нефтепродуктов.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследования обсуждались на 2 международных и 9 республиканских научных конференциях.

**Опубликование результатов исследования.** По теме диссертации опубликовано всего 18 научных статей, из которых 7 в научных изданиях: 5 — в республиканских журналах, 2 — в журналах стран СНГ, рекомендованных Аттестационной комиссией при Министерстве высшего образования Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов

докторских диссертаций. Кроме того, 11 тезисов опубликованы в материалах научно-практических конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объём диссертации — 137 страниц.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** раскрыты актуальность и необходимость проведённых исследований, цели и задачи, степень изученности проблемы, методы исследования, объекты и предмет исследования, соответствие направлениям развития науки и технологий в Республике Узбекистан, научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведён перечень внедрения результатов исследования в практику, публикации, а также информация о структуре и объёме диссертации.

В первой главе диссертации под названием **«Структура аэросиля, свойства поверхности и сорбционные характеристики»** представлены общие сведения о аэросиле, адсорбционные свойства полярных и неполярных молекул, ионно-молекулярные механизмы, а также обзор исследований зарубежных и отечественных учёных по адсорбции воды и азотистых соединений.

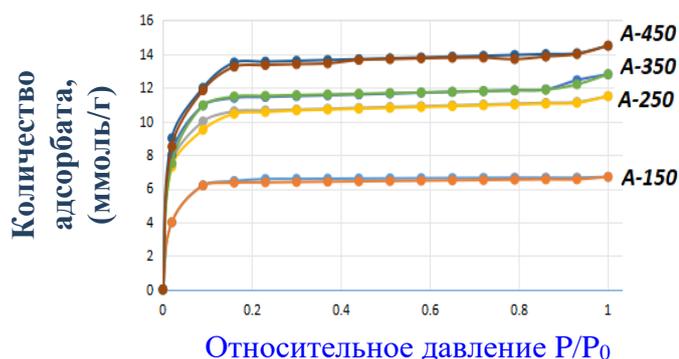
Во второй главе диссертации под названием **«Объект исследования и физико-химические методы»** приведена подробная информация о работе с универсальными адсорбционно-микромалориметрическими установками, формулах, используемых для теоретических расчётов полученных результатов, а также о способах сорбции на аэросиле.

В третьей главе диссертации под названием **«Законы адсорбции неполярных молекул на аэросиле»** представлены изотермы адсорбции молекул азота, бензола и оксида углерода (IV) на аэросиле, дифференциальная теплота адсорбции, дифференциальная энтропия адсорбции, время теплового равновесия и калориметрический анализ адсорбции адсорбатов на поверхности аэросиля.

**Адсорбция молекул азота при низкой температуре.** Специфическая поверхность ( $S_{sp}$ ), общий объём пор ( $V_S$ ) и средний диаметр пор ( $d_{pore}$ ) — основные параметры пористой структуры — были определены методом низкотемпературной адсорбции азота при 77 К. Измерения проводились с использованием статического адсорбционного анализатора Quantachrome Nova 1000e. Образцы, привлекаемые к исследованию, предварительно активировались в вакууме при температуре 100 °С в течение 12 часов. Кривые адсорбции и десорбции азота регистрировались в диапазоне относительного давления  $P/P_0$  от 0,005 до 0,995. На основе количества адсорбированного газа при остаточном давлении расчет площади поверхности выполнялся методом Брунауэра–Эмметта–Теллера (БЭТ).

Согласно анализу рисунка 1, при увеличении температуры карбонизации с 150 °С до 450 °С объём микропор ( $V_a$ ) возрастает, что свидетельствует о

усилении формирования микропористой структуры с повышением температуры.



**Рисунок 1.** Изотермы адсорбции и десорбции азота при низкой температуре после термообработки аэросиля при различных температурах: 1) А-150; 2) А-250; 3) А-350; 4) А-450.

На основе изотерм результаты адсорбции азота при низкой температуре на аэросиле приведены в таблице 1.

**Таблица 1.**

**Результаты адсорбции азота при низкой температуре на аэросиле**

Образец	$S_{ud}, m^2/g$	$S_{ud}, m^2/g$	t - Plot (внешняя поверхность), $m^2/g$	$V_a, sm^3/g$	$V_b, sm^3/g$	$R, \text{Å}$	Средняя ширина пор, $\text{Å}$	Средний радиус пор, $\text{Å}$
А-150	360.17	578.13	78.87	0.2147	0.25	21,97	127.11	6.895
А-250	517.67	879.17	166.89	0.3784	0.38	22,24	90.78	6,778
А-350	778.57	1278.47	185.26	0.4128	0.48	22.34	65.74	6.658
А-450	897.17	1347.21	203.36	0.4974	0.58	22.58	45.47	6.624

Процесс регенерации аэросильного адсорбента при температурах выше  $400\text{ }^\circ\text{C}$  показывает, что строгий контроль температурных условий играет важную роль в оптимизации текстурных характеристик. Такой подход может значительно повысить адсорбционные возможности аэросиля.

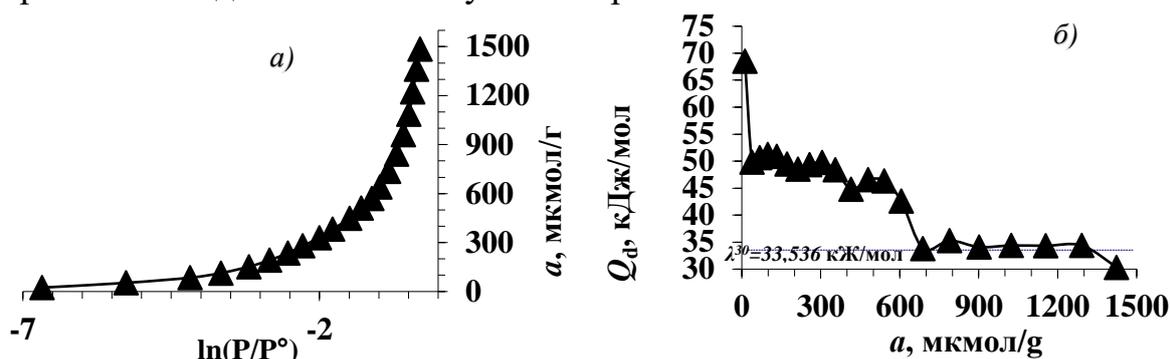
**Термодинамическая характеристика адсорбции молекул бензола на аэросиле.**

На рисунке 2(а) приведена адсорбционная изотерма бензола на аэросиле в полулогарифмических координатах. Изотерма начинается примерно с логарифмического значения  $-7,58$ , соответствующего минимальной адсорбции в начальной фазе. По мере протекания процесса наблюдается постепенный рост кривой изотермы, что указывает на прогрессивное накопление молекул бензола на поверхности адсорбента. При достижении адсорбцией примерно  $200\text{ мкмоль/г}$ , логарифмическое значение увеличивается до  $-5,5$ , что свидетельствует о начале молекулярной локализации на доступных адсорбционных центрах.

Изотерма адсорбции в диапазоне относительного давления  $0,017 < P/P^0 < 0,39$  в координатах БЭТ демонстрирует линейную зависимость. Рассчитанная

однослойная адсорбционная ёмкость ( $a_m$ ) составляет 605 мкмоль/г, а соответствующая константа БЭТ, отражающая энергию адсорбции, равна 1,01. Используя эти значения, удельная поверхность для адсорбции бензола была оценена в 198 м<sup>2</sup>/г.

На рисунке 2(б) показано, что дифференциальная теплота адсорбции ( $Q_d$ ) молекул бензола на поверхности аэросиля постепенно снижается, демонстрируя волнообразный характер. На начальной стадии адсорбции  $Q_d$  уменьшается с 68,50 до 49,85 кДж/моль, что указывает на поэтапное заполнение высокоэнергетических адсорбционных центров и снижение энергии взаимодействия молекула–поверхность.



**Рисунок 2. а) Изотермы адсорбции паров бензола на аэросиле при 303 К; б) Дифференциальная теплота адсорбции бензола на аэросиле при 303 К. Горизонтальные пунктирные линии при 303 К — теплота конденсации.**

При адсорбции примерно 51,2 мкмоль/г значение  $Q_d$  стабилизируется около 48 кДж/моль, что указывает на начало заполнения относительно низкоэнергетических, но стабильных адсорбционных центров на поверхности. В диапазоне адсорбции, протяжённостью до 300 мкмоль/г, механизм взаимодействия ограничивается не только силами ван-дер-Ваальса, но также может включать образование  $\pi$ -комплексов между  $\pi$ -электронной системой молекул бензола и гидроксильными группами или щелочными металлическими катионами (например, Na<sup>+</sup>), внедрёнными в матрицу аэросиля. Дифференциальная теплота адсорбции показывает, что после достижения адсорбцией около 200 мкмоль/г бензол перемещается на активные центры поверхности аэросиля. На следующем этапе молекулы бензола взаимодействуют с внешними поверхностями, имеющими энергию адсорбции от 38,60 до 68,8 кДж/моль. На этом этапе дифференциальная теплота адсорбции уменьшается с 68,50 до 33,82 кДж/моль, что свидетельствует о постепенном снижении силы взаимодействия.

На рисунке 3(а) представлена дифференциальная энтропия адсорбции бензола на аэросиле. Расчёт дифференциальной энтропии проводился с использованием уравнения Гиббса–Гельмгольца на основе экспериментально определённых значений изотермы адсорбции и дифференциальной теплоты адсорбции.

$$\Delta S_d = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} = \frac{-(Q_d - \lambda) + A}{T}$$

$\lambda$  — теплота конденсации,  $\Delta H$  и  $\Delta G$  — изменение энтальпии и свободной энергии,  $T$  — температура,  $Qd'$  — средняя дифференциальная теплота.

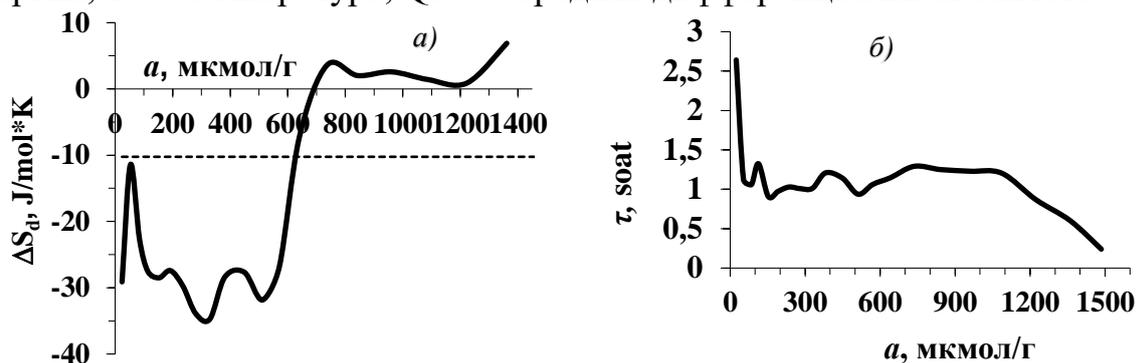


Рисунок 3. а) Дифференциальная энтропия адсорбции бензола на аэросиле при 303 К. Горизонтальные штриховые линии — средняя интегральная энтропия; б) Время установления равновесия адсорбции бензола на аэросиле при 303 К.

В количественном отношении изменение энтропии при адсорбции бензола на материалах на основе диоксида кремния обычно находится в диапазоне от  $-10$  до  $-35$  Дж·моль $^{-1}$ ·К $^{-1}$  в зависимости от свойств поверхности, температуры и покрытия. Этот отрицательный показатель отражает особенность процесса. Средняя молярная интегральная энтропия адсорбции составляет  $-10,24$  Дж·моль $^{-1}$ ·К $^{-1}$ , что подтверждает термодинамический характер адсорбированной фазы.

На рисунке 3(б) кинетика адсорбции показывает, что при загрузке 200 мкмоль/г бензол адсорбируется сначала в областях межслойного пространства адсорбента с относительно высокой дифференциальной теплотой адсорбции. Этот этап сопровождается длительным временем достижения равновесия от 2 до 3 часов. На следующем этапе, связанном с формированием дополнительных слоев, система достигает равновесия быстрее — примерно за 1 час. На последнем этапе, соответствующем внешним базальным поверхностям, равновесие достигается за 20 минут, что отражает ускорение скорости адсорбции на низкоэнергетических поверхностных доменах.

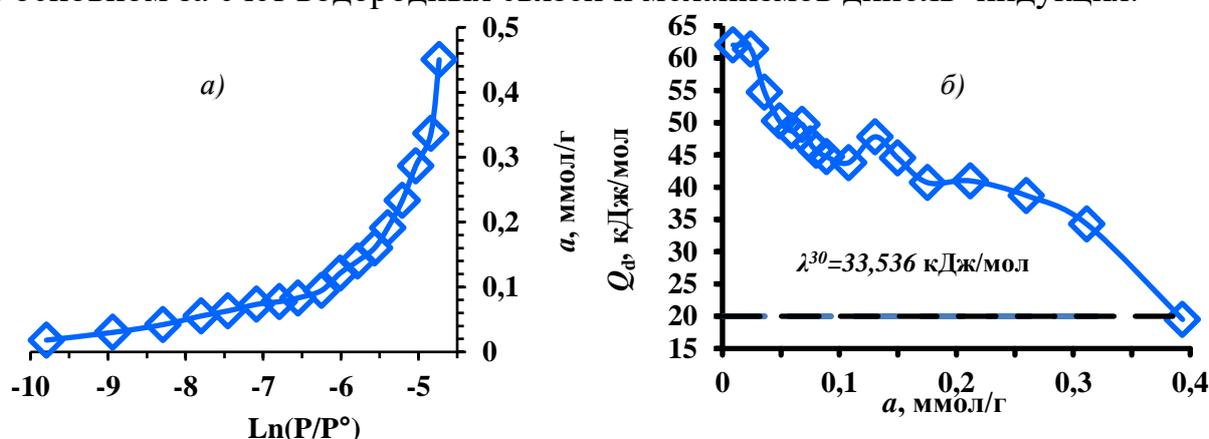
**Термодинамическое описание адсорбции молекул углекислого газа (CO $_2$ ) на аэросиле.** Экспериментальное давление насыщенного пара CO $_2$  при высокой температуре (30 °С,  $P^0 = 54086$  мм рт. ст.) ограничивает возможность получения полной адсорбционной изотермы на аэросиле. Следовательно, для адсорбции CO $_2$  на аэросиле может быть получена лишь частичная изотерма, показанная на рисунке 4(а).

На начальном этапе изотерма адсорбции имеет положительный криволинейный характер и характеризуется быстрым ростом при приближении адсорбционной емкости к примерно 100 мкмоль/г. Оценка изотермы с помощью модели Брунаера–Эммет–Теллера (БЭТ) показала для образца аэросиля удельную поверхность 76,8 м $^2$ /г.

Дифференциальная теплота адсорбции CO $_2$  на аэросиле отражает силу взаимодействия между адсорбируемыми молекулами и активными центрами на поверхности. Исследования показывают, что на начальных стадиях наблюдаются высокие значения дифференциальной теплоты, что

свидетельствует о сильной адсорбции молекул  $\text{CO}_2$  на энергетически активных центрах, расположенных вблизи силанольных групп. По мере продолжения адсорбции активные центры поверхности постепенно насыщаются, и дифференциальная теплота уменьшается ступенчато.

Измеренные значения дифференциальной теплоты при адсорбции молекул  $\text{CO}_2$  на поверхности аэросила количественно выражают силу взаимодействия между молекулами  $\text{CO}_2$  и активными центрами на аморфной поверхности диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ). Высокие значения дифференциальной теплоты на начальных, низких степенях покрытия указывают на сильные взаимодействия адсорбат–адсорбент на наиболее энергетически благоприятных активных центрах поверхности, которые обычно связаны с силанольными ( $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ ) группами. Эти центры стабилизируют молекулы  $\text{CO}_2$  в основном за счет водородных связей и механизмов диполь–индукция.

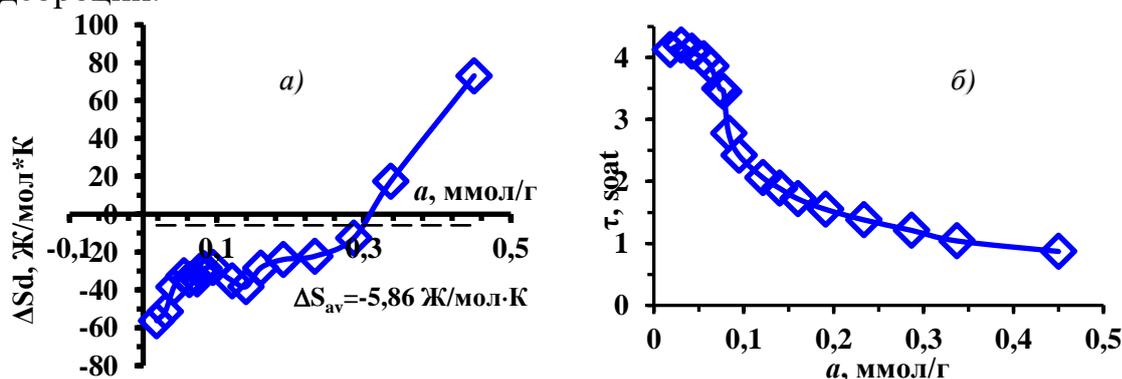


**Рисунок 4. а) Изотермы адсорбции углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) на аэросиле при 303 К; б) Дифференциальная теплота адсорбции углекислого газа на аэросиле при 303 К. Горизонтальные пунктирные линии при адсорбции бензола при 303 К обозначают конденсацию тепла.**

В процессе адсорбции молекул  $\text{CO}_2$  на аэросиле, профиль измеренной дифференциальной теплоты (рис. 4б) наглядно демонстрирует поэтапное протекание процесса и сложную энергетическую структуру поверхности. При низкой степени покрытия поверхности (т.е. при относительно малом числе адсорбатных молекул) начальная адсорбционная энтальпия составляет 62,0 кДж/моль. На первой фазе адсорбции энтальпия постепенно, с волнообразной тенденцией, снижается, что подтверждает энергетическую гетерогенность поверхности адсорбента и неоднородное распределение активных центров по энергии. При загрузке 0,11 ммоль/г адсорбционная теплота снижается до 43,8 кДж/моль, затем при 0,20 ммоль/г достигает локального максимума 40,97 кДж/моль. Эти промежуточные изменения, вероятно, обусловлены переходом молекул  $\text{CO}_2$  с высокоэнергетических центров на менее активные, с последующим взаимодействием с новыми, относительно более сильными центрами поверхности. При дальнейшем увеличении адсорбции энтальпия снова снижается, достигая минимума 35 кДж/моль при 0,23 ммоль/г, однако при 0,80 ммоль/г она восстанавливается до среднего значения около 40 кДж/моль. Эти колебания теплоты адсорбции отражают последовательное и селективное взаимодействие молекул адсорбата с различными типами

активных центров поверхности. Модификация поверхности аэросила активными металлическими компонентами может увеличить адсорбционную теплоту, усиливая взаимодействие адсорбент–адсорбат, стимулируя образование ионово–молекулярных комплексов и значительно повышая стабильность связывания  $\text{CO}_2$ .

На рис. 5а показаны изменения энтропии в процессе адсорбции  $\text{CO}_2$  на поверхности аэросила. Результаты исследования демонстрируют, что при адсорбционном объеме менее 50 мкмоль/г значения энтропии ниже стандартной энтропии  $\text{CO}_2$ , что отражает значительное снижение молекулярной подвижности на начальном этапе адсорбции. Это связано с ограничением трансляционной и вращательной подвижности молекул газа вследствие их адсорбции на поверхности. При превышении адсорбционного объема выше указанного порога значения энтропии превышают стандартные показатели, что свидетельствует о повышенной подвижности молекул на поверхности или частичном нарушении структуры поверхности. В среднем интегральная энтропия адсорбции составляет  $-5,86$  Дж/моль·К, что отражает взаимодействие  $\text{CO}_2$  с аэросилом и термодинамические свойства процесса адсорбции.



**Рисунок 5. а) Дифференциальная энтропия адсорбции углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) на аэросиле при температуре 303 К. Горизонтальные штриховые линии – средняя интегральная энтропия. б) Время достижения равновесия адсорбции  $\text{CO}_2$  на аэросиле при температуре 303 К.**

На рис. 5(б) показана зависимость времени достижения равновесия при адсорбции молекул углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) на аэросиле. На начальных этапах система достигает равновесия примерно за 1,5 часа, однако по мере протекания процесса адсорбции время равновесия постепенно сокращается и в конечном итоге составляет всего несколько минут. Экспериментальные данные показывают, что адсорбция  $\text{CO}_2$  на поверхности аэросила обычно приближается к равновесию в течение 2–3 часов. При этом с ростом степени насыщения поверхности, то есть при уменьшении числа сорбционных центров, время равновесия значительно сокращается, достигая нескольких минут. Эта особенность указывает на наличие на поверхности аэросила сорбционных центров с различной энергетической активностью, что усложняет кинетику адсорбции газовых молекул и термодинамику адсорбционного процесса.

В четвертой главе диссертации, озаглавленной «**Закономерности адсорбции полярных молекул на аэросиле**», подробно рассмотрены изотермы адсорбции молекул воды и аммиака на аэросиле, их дифференциальная теплота адсорбции, дифференциальная энтропия адсорбции, а также времена установления адсорбционного равновесия.

**Термодинамические характеристики адсорбции молекул воды на аэросиле.** Изотермы адсорбции молекул воды на аэросиле были систематически и детально изучены. Результаты измерений при температуре 303 К представлены на рис. 6(а). Диапазон относительного давления адсорбции составляет от 0,05 до 0,4 ( $P/P_s$ ). В координатах уравнения Бруннауэра–Эмметта–Теллера (БЭТ) наблюдается линейная зависимость. Эта линейность свидетельствует о том, что в указанном диапазоне давления происходит образование мономолекулярного слоя, то есть молекулы воды располагаются на поверхности аэросила в виде одного слоя.

Для образца аэросила, модифицированного натриевыми катионами, адсорбционная емкость одного слоя воды ( $a_m$ ) составила 1,767 мкмоль/г. Кроме того, константа энергии адсорбции оказалась равной 14,32 мкмоль/г, что отражает энергетические свойства адсорбции и прочность взаимодействия молекул с поверхностью.

В ходе исследования была рассчитана специфическая поверхность аэросила, участвующая во взаимодействии с водой, которая составила 162,1 м<sup>2</sup>/г. При предположении плотного и однородного мономолекулярного слоя каждая молекула воды занимает на поверхности примерно 15,8 Å<sup>2</sup>. Это значение имеет важное значение для определения расположения молекул на аэросиле и физических размеров адсорбционного слоя.

Дифференциальные теплоты адсорбции молекул воды на аэросиле при температуре 303 К представлены графически на рис. 6(б). Согласно результатам исследования, на начальном этапе адсорбции, при нагрузке около 1,20 мкмоль/г, теплота адсорбции составляет 69,09 кДж/моль, что указывает на наличие высокоактивных энергетически адсорбционных центров на поверхности аэросила. На первом этапе теплота адсорбции снижается с 57,17 кДж/моль до 52,25 кДж/моль, при этом адсорбционная нагрузка изменяется от 49 мкмоль/г до 62,52 мкмоль/г. На последующих этапах, включая второй этап, теплота адсорбции снижается до 61,81 кДж/моль, а на четвертом этапе, при адсорбционной нагрузке около 348 мкмоль/г, дифференциальная теплота адсорбции снова уменьшается до 50,17 кДж/моль.

Кроме того, был выявлен второй дополнительный этап, который обуславливает изменение общей теплоты на величину 10,25 кДж/моль. Первый этап связан со структурными дефектами поверхности аэросила и соответствует адсорбции примерно 20 мкмоль/г молекул воды. Этот этап отражает начальное насыщение высокоактивных адсорбционных центров.

Результаты исследования показывают, что на аэросиле процесс адсорбции проходит поэтапно, формируя двухслойную адсорбцию с теплотами примерно 50,1 кДж/моль и ~45,6 кДж/моль на каждом этапе. Общая адсорбционная емкость, формируемая этими этапами, достигает

3155 мкмоль/г. На основании адсорбционных свойств молекул воды установлено, что начальные активные адсорбционные центры состоят преимущественно из  $H^+$ -катионов в объеме около 77 мкмоль/г.

На последующих этапах количество  $H^+$ -катионов в активных центрах увеличивается на 118 мкмоль/г за счет уменьшения с 348 мкмоль/г до 230 мкмоль/г. При этом количество  $Na^+$ -катионов в активных центрах составляет примерно половину от значения на базальной поверхности, то есть около 115 мкмоль/г. Близкое соответствие между экспериментальными измерениями и теоретическими расчетами подтверждает гипотезу о том, что на поверхности аэросила около 92 мкмоль/г  $H^+$ -катионов участвуют в формировании активных адсорбционных центров. Кроме того, относительно низкий заряд натриевых катионов на поверхности аэросила, близкое расположение адсорбционных комплексов по отношению к мусковиту и их взаимодействие способствуют облегчению процессов адсорбции и оказывают значительное влияние на химические и физические свойства поверхности.

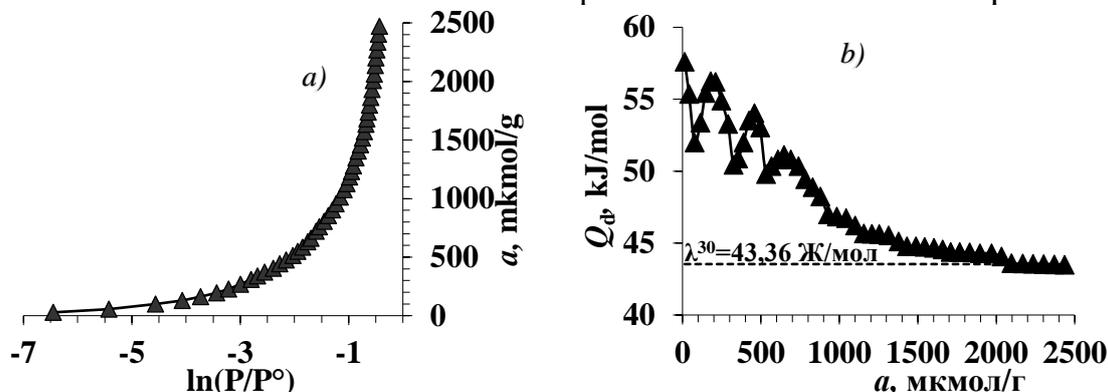


Рисунок 6. а) Изотермы адсорбции молекул воды на аэросиле. б) Дифференциальная теплота адсорбции молекул воды на аэросиле. Штриховые линии – теплота конденсации воды при 303 К.

С помощью изотерм адсорбции молекул воды на аэросиле и дифференциальных теплот адсорбции была рассчитана молярная дифференциальная энтропия адсорбции ( $\Delta S_d$ ) с использованием уравнения Гиббса–Гельмгольца (рис. 7(а)). Дифференциальные энтропии адсорбции, измеренные при 303 К, сопоставлены с энтропией жидкой воды. Пошаговые изменения кривой теплот приводят к формированию многоэкстремальной структуры кривой энтропии.

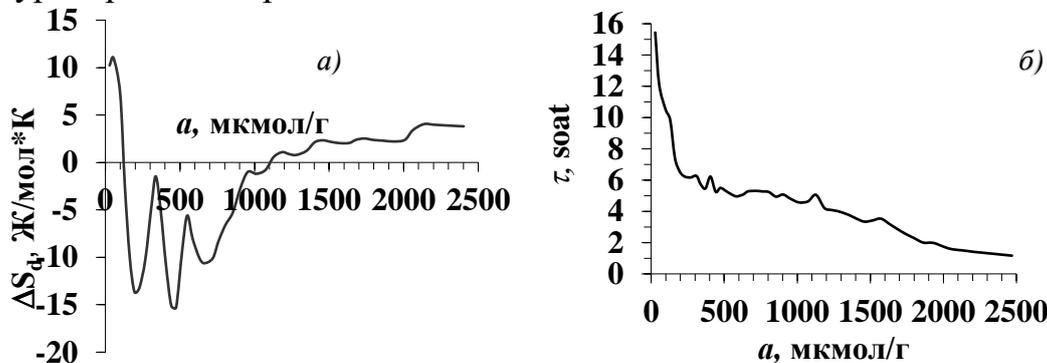


Рисунок 7. а) Дифференциальная молярная энтропия адсорбции молекул воды на аэросиле. Штриховые линии – средняя интегральная энтропия. Энтропия молекул

воды в жидком состоянии принята за ноль. б) Время достижения равновесия адсорбции молекул воды на аэросиле.

С увеличением степени адсорбции, особенно при формировании комплексов  $(\text{H}_2\text{O})_n/\text{Na}^+$ , значения энтропии значительно возрастают и превышают энтропию жидкой воды. Это отражает более высокую свободу молекул воды на поверхности, то есть увеличение молекулярной подвижности и структурной перестройки. Полиэкстремальная (с несколькими экстремумами) форма кривой энтропии указывает на гетерогенность поверхности и сложные взаимодействия между молекулами воды.

Начиная с 500 мкмоль/г, до формирования комплексов  $(\text{H}_2\text{O})_6/\text{Na}^+$  кривая адсорбционной энтропии остается ниже энтропии жидкой воды. Однако при появлении комплексов с 5–8 молекулами адсорбционная энтропия превышает энтропию жидкой воды и значительно возрастает. Это свидетельствует о том, что с развитием процесса адсорбции подвижность и структурная свобода молекул воды увеличиваются.

На основании представленных данных (рис. 7б) проведен детальный анализ зависимости времени установления адсорбционного равновесия от плотности покрытия поверхности аэросила. Результаты показывают, что при степени покрытия примерно 110 мкмоль/г процесс достижения равновесия значительно замедляется. При меньших покрытиях, то есть при относительно низкой плотности адсорбции, равновесие обычно устанавливается за ~5 часов, тогда как с увеличением плотности покрытия это время сокращается до 1–1,5 часов. Эти кинетические изменения, прежде всего, связаны с насыщением адсорбционных участков поверхности и динамикой связанных с этим поверхностных процессов.

**Термодинамические характеристики адсорбции молекул аммиака на аэросиле.** Адсорбция молекул аммиака на аэросиле представлена на рис. 8(а) в полулогарифмических координатах. Начальная точка изотермы была определена при относительном давлении  $\ln(P/P^0) = -8,398$ , что соответствует наличию примерно 73,841 мкмоль/г адсорбированных молекул аммиака на поверхности аэросила.

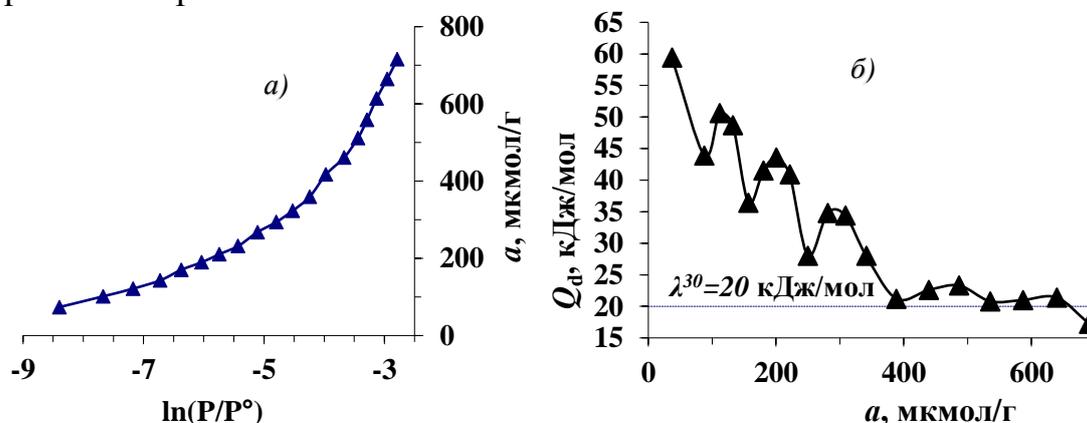


Рисунок 8. а) Адсорбционные изотермы молекул аммиака на аэросиле; б) Дифференциальная теплота адсорбции аммиака на аэросиле. Штриховые линии – теплота конденсации аммиака при 303 К.

В ходе развития адсорбции кривая изотермы постепенно повышается, демонстрируя последовательное адсорбирование молекул аммиака на поверхности аэросила. При относительном давлении  $\ln(P/P^0) = -5,11$  адсорбционная емкость составляет примерно 300 мкмоль/г. На этом этапе молекулы аммиака иммобилизованы в специфических высокоактивных адсорбционных центрах аэросила, которые связаны с активными центрами, расположенными во внутренних слоях поверхности аэросила.

На следующем этапе, когда адсорбционная емкость достигает 400 мкмоль/г, относительное давление составляет  $\ln(P/P^0) = -3,97$ . После этой точки наблюдается резкий рост изотермы, и по мере приближения адсорбции к насыщению адсорбционная емкость достигает примерно 700 мкмоль/г. Этот процесс свидетельствует о насыщении имеющихся на поверхности активных центров и перераспределении молекул аммиака между высокоактивными центрами. При температуре 303 К давление насыщенного пара аммиака составляет 8456,35 мм рт. ст., что указывает на проведение измерений в условиях высокого давления.

У аэросила удельная поверхность, предназначенная для адсорбции молекул аммиака, составляет примерно 89,5 м<sup>2</sup>/г. Площадь поверхности, занимаемая одной молекулой аммиака при плотном размещении в монослое, оценивается в 21 Å<sup>2</sup>. Этот параметр соответствует молекулярной площади, используемой в адсорбционной модели Ленгмюра, и теоретически описывает распределение молекул аммиака на поверхности аэросила.

Дифференциальная теплота адсорбции (Q<sub>d</sub>) молекул аммиака на аэросиле представлена графически на рис. 8(б), где явно прослеживается волнообразная тенденция снижения. Результаты исследований показывают, что на начальном этапе адсорбции дифференциальная теплота составляет 60,10 кДж/моль, затем постепенно снижается и в конечном итоге достигает 43,88 кДж/моль. На последующих этапах адсорбции молекул аммиака наблюдается некоторое увеличение дифференциальной теплоты до примерно 51,4 кДж/моль. По мере того как количество адсорбата достигает 180 мкмоль/г, адсорбционная теплота снова начинает снижаться и достигает 35,44 кДж/моль. С дальнейшим развитием адсорбционного процесса и увеличением общего количества адсорбата до 249,55 мкмоль/г, дифференциальная теплота стабилизируется примерно на уровне 28 кДж/моль. Этот стабилизированный тепловой плато свидетельствует о переходе взаимодействий на адсорбционной поверхности в устойчивый энергетический режим.

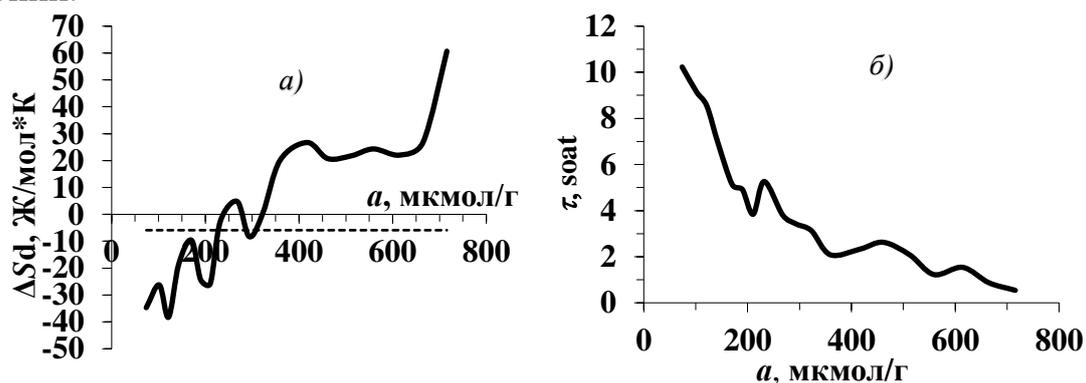
Далее, при увеличении количества адсорбата до 388,29 мкмоль/г дифференциальная теплота снова снижается до 21,92 кДж/моль. Первоначальное значение энтальпии адсорбции составляло примерно 54 кДж/моль, что объясняется взаимодействием молекул аммиака, расположенных во внутренних впадинах и междоменных поровых пространствах структурных доменов активных центров аэросила.

Формирование π-комплексов связано с особенностями вторичной пористости и происходит при высоких значениях адсорбции, близких к 388,65 мкмоль/г. В диапазоне от 87,71 до 535,65 мкмоль/г дифференциальная

теплота постепенно снижается с 28,92 до 21,16 кДж/моль. Эта тенденция отражает ослабление специфических взаимодействий между молекулами аммиака и катионами, а также поэтапное формирование  $\pi$ -комплексов вдоль соседних катионных слоев, что приводит к снижению энергии связывания.

На заключительном этапе адсорбции молекулы аммиака в основном концентрируются на поверхности аэросила. На этом этапе адсорбционная энергия начинает постепенно повышаться от 21,16 кДж/моль и достигает значения, соответствующего энтальпии конденсации аммиака, при 717,9 мкмоль/г.

На рис. 9(а) представлена дифференциальная энтропия адсорбции молекул аммиака на аэросиле. Согласно термодинамическим расчетам, средняя молярная интегральная энтропия молекул аммиака в аэросиле составляет  $-5,92$  Дж/моль·К, что подтверждает термодинамическое поведение молекул, сходное с конденсированной фазой в матрице. На графике дифференциальной энтропии в диапазоне адсорбции от 73,82 до 300,20 мкмоль/г значения энтропии превышают среднюю интегральную энтропию, что свидетельствует о полном формировании однослойного покрытия и начале многослойной адсорбции, соответствующей максимуму энтропии.



**Рисунок 9. а) Дифференциальная молярная энтропия адсорбции молекул аммиака на аэросиле. Пунктирные линии – средняя интегральная энтропия.**

**Энтропия аммиака в жидком состоянии принята равной нулю. б) Время установления равновесия адсорбции молекул аммиака на аэросиле.**

Этот анализ позволяет глубже понять поэтапное протекание адсорбции молекул аммиака на аэросиле и изменения на уровне молекулярной организации. В начальном диапазоне адсорбции, примерно при 101,23 мкмоль/г, установление равновесного состояния сопровождается высокой дифференциальной теплотой и длительным временем достижения равновесия.

На рис. 9(б) показано, что молекулам аммиака требуется от 10,8 до 5,2 часов для достижения равновесия на аэросиле. Это длительное время равновесия связано с медленной молекулярной диффузией через активные центры и ограниченной перераспределяемостью молекул на поверхности, являясь одним из кинетических факторов процесса. На последующих стадиях равновесие адсорбционного слоя аммиака устанавливается обычно за 2–3,5 часа. При этом с увеличением степени насыщения поверхности время достижения равновесия постепенно сокращается, и на заключительных

стадиях, когда число доступных свободных участков значительно уменьшается, оно составляет примерно от 2 часов до 20 минут. Эти изменения указывают на уплотнение молекул в отношении оставшихся свободных участков поверхности и начало формирования многослойной адсорбции. Обычно адсорбция достигает равновесного состояния за 30–40 минут.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

### Основные научные результаты диссертационной работы:

1. Установлена высокая зависимость адсорбции молекул азота при низких температурах на аэросиле от диспергированной площади поверхности. При повышении температуры наблюдается увеличение поверхности аэросила для жидкого азота. На основании экспериментальных изотерм, проанализированных с использованием уравнения Брунера–Эмметта–Теллера (ВЕТ), определены удельная поверхность аэросила и активные сорбционные центры.

2. Анализ адсорбционных изотерм молекул бензола на аэросиле позволил определить удельную поверхность методом БЭТ, основанную на процессах адсорбции на активных участках поверхности. Дифференциальная теплота адсорбции бензола на аэросиле имеет ступенчатый характер и в начальной фазе достигает 68,50 кДж/моль. Средняя интегральная энтропия составляет – 10,24 Дж/моль·К, что свидетельствует о значительном ограничении подвижности молекул бензола, связанных с поверхностью адсорбента, и частичной локализации теплового баланса в этих центрах.

3. Дифференциальная теплота адсорбции углекислого газа (CO<sub>2</sub>) на аэросиле имеет волнообразный, ступенчатый характер. Для адсорбции CO<sub>2</sub> до 0,3 ммоль/г значения энтропии находятся ниже стандартных, что отражает упорядоченное молекулярное расположение на начальных стадиях адсорбции. В этом диапазоне загрузки наблюдаются также высокие времена достижения теплового равновесия. Такие термодинамические характеристики указывают на гетерогенность и локализованность поверхности аэросила.

4. На основании данных по адсорбции молекул воды на аэросиле определена удельная площадь поверхности относительно воды, которая составляет 162,1 м<sup>2</sup>/г. Дифференциальная теплота адсорбции первых полярных молекул воды изменяется от 57,6 кДж/моль и проходит через минимальные и максимальные значения по графику теплового эффекта, постепенно снижаясь. Высокие значения теплового эффекта связаны с миграцией катионов, в частности H<sup>+</sup> и Na<sup>+</sup>, в активных центрах поверхности адсорбента.

5. Адсорбция молекул аммиака на аэросиле позволила определить сравнительную удельную поверхность с использованием метода БЭТ, которая составила 89,5 м<sup>2</sup>/г. Дифференциальная теплота адсорбции аммиака уменьшается с 59,40 кДж/моль и при давлении 1 атм стабилизируется на уровне 22 кДж/моль. Молекулы аммиака, адсорбированные до 300 мкмоль/г, локализованы на поверхности, а средняя интегральная энтропия составляет – 5,90 Дж/моль·К

6. Полученные результаты имеют важное значение для эффективного использования местного сырья с высокой сорбционной способностью. Систематическое изучение структурных, физико-химических и поверхностных свойств позволяет разработать научную основу для целенаправленной модификации и оптимизации сорбционных характеристик. Кроме того, результаты работы создают предпосылки для синтеза современных инновационных сорбентов, применимых в экологической рекультивации, промышленных процессах очистки и других технологических областях.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02 ON AWARDING  
SCIENTIFIC DEGREES AT NAMANGAN STATE TECHNICAL  
UNIVERSITY**

---

**NAMANGAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**KODIROV OLIMJON**

**MOLECULAR MECHANISMS OF ADSORPTION OF WATER MOLECULES, CARBON  
MONOXIDE, BENZENE AND AMMONIA ON AEROSIL**

**02.00.11 – Colloid and membrane chemistry**

**DISSERTATION ABSTRACT FOR THE DOCTOR OF PHILOSOPHY  
(PhD) CHEMICAL SCIENCES**

**Namangan-2025**

**The topic of the doctor of philosophy (PhD) dissertation is registered under number B2025.1.PhD/K947 at the Higher Attestation Commission under the Ministry of higher education, science and innovation of the Republic of Uzbekistan.**

The dissertation was completed at the Namangan state technical university.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (summary)) is posted on the web page of the Scientific Council ([www.namdtu.uz](http://www.namdtu.uz)) and on the information education portal "ZiyoNet" at ([www.ziyo.net](http://www.ziyo.net)).

**Research supervisor:**

**Ergashev Oybek**

doctor of chemical sciences, professor

**Official opponents:**

**Abduraxmonov Eldor**

doctor of chemical sciences, professor

**Abdikamalova Aziza**

doctor of chemical sciences, professor

**Leading organization:**

**Tashkent Institute of Chemical Technology**

The defense of the dissertation will take place on December «15», 2025 y. at 13<sup>00</sup> at the meeting of Scientific council DSc.03/29.08.2023.K/T.66.02 at the Namangan state technical university and Research Center at the following address: 7, Kasansay Street, Namangan District, 160115, Namangan, Phone: (+99 869) 234-14-85, fax: (+99 869) 234-14-85, e-mail: [info@namdtu.uz](mailto:info@namdtu.uz), Namangan State Technical University, Building 6, 1st floor, room № 303).

The dissertation has been registered at the Information-resource Center of the Namangan state technical university (registration number № 93). (Address: 7., Kasansay Street 160115, Namangan) Tel.: (+99869) 234-14-85; fax: (+99869) 234-14-85)

The abstract of dissertation is distributed on December “2”, 2025 year  
(Protocol at the register № 35 of December “2”, 2025 year)

**I. Shamshidinov**

Deputy of chairman of the scientific council awarding scientific degree, doctor of technical science, professor

**O. Mallabayev**

Scientific secretary of the scientific award council scientific degrees, doctor of philosophy in chemical sciences, docent

**D. Sherkuziev**

Chairman of the scientific seminar at the scientific council for awarding scientific degrees, doctor of technical sciences, professor

## INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

**The aim of the study** is to determine the thermodynamic characteristics of the adsorption of polar and non-polar molecules on Aerosil, as well as the surface structure and localization of adsorbates at active sites, using a high-precision adsorption calorimetric apparatus.

**The subject of the study** is the molecular mechanism of adsorption, the laws governing adsorption, and the determination of the location and state of ion–molecular complexes within the studied zeolite matrices.

**The scientific novelty of the study is as follows:**

using microcalorimetric methods, precise adsorption isotherms and complete thermodynamic characteristics of water, benzene, ammonia, nitrogen, and carbon dioxide molecules on Aerosil adsorbent were determined;

the differential adsorption heats of water, ammonia, benzene, and carbon dioxide on Aerosil were represented as stepwise curves, showing that at each stage, ion–molecular complexes with protons and sodium cations on active surface sites are formed;

the specific surface areas for low-temperature nitrogen adsorption on Aerosil were calculated using the BET and Langmuir equations. Aerosil samples were vacuum-treated at 150, 250, 350, and 450 °C, revealing that the specific surface area for nitrogen increases with temperature;

during the adsorption of water, benzene, ammonia, and carbon dioxide molecules on Aerosil, the migration of  $H^+$  and  $Na^+$  cations on the sorbent surface to adsorption centers was experimentally confirmed;

on the active surface sites of Aerosil, adsorbate molecules form ion–molecular complexes with protons and sodium cations—specifically  $((C_6H_6)_n/Na^+(H^+))$ ,  $((CO_2)_n/Na^+(H^+))$ ,  $((NH_3)_n/Na^+(H^+))$ , and  $((H_2O)_n/Na^+(H^+))$ —demonstrating strong adsorption and localization;

the adsorption isotherms of water, benzene, ammonia, nitrogen, and carbon dioxide on Aerosil were presented in semi-logarithmic form, and the surface areas occupied by adsorbed molecules were characterized using the BET and Langmuir equations.

**Implementation of research results.** Based on the scientific results obtained in determining the adsorption properties of Aerosil:

Aerosil has been included in the “List of Promising Developments for Implementation in 2026–2027” of Fergana Oil Refinery LLC (Certificate No. 15/84 dated July 14, 2025) for the removal of water molecules from petroleum products. As a result, it enables the purification of gasoline and diesel fuel from water content.

Aerosil has been included in the “List of Promising Developments for Implementation in 2026–2027” of Fergana Oil Refinery LLC (Certificate No. 15/84 dated July 14, 2025) for the removal of additional aromatic compounds from petroleum products during refining. As a result, it enables the purification of petroleum products from aromatic compounds, such as benzene molecules.

**Dissertation structure and volume.** The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of used literature, notations and appendices. The length of the dissertation was 137 pages.

**E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI**  
**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**  
**LIST OF PUBLISHED WORKS**

**I bo'lim (I часть; part I)**

1. Kodirov O., Ergashev O. Liquid nitrogen adsorption isotherm on aerosil. // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Vol. 7 Issue 8 2025 (02.00.00№ 8)
2. O.P.Кодиров, O.K.Эргашев. Molecular mechanisms of ammonia molecule adsorption on aerosil // Universum: химия и биология. №8 (134). August, 2025. 47-51 pp. (02.00.00 № 8).
3. Kodirov O., Ergashev O. Energetics of adsorption of water molecules to aerosil // Namangan muhandislik-texnologiya instituti ilmiy-texnika jurnali 2024-yil 4-son 212-218-bet (02.00.00 № 29).
4. O.Qodirov, O.Ergashev. Aerosilga suv molekulari adsorbsiya izotermasi va differensial issikligi // Andijon mashinasozlik-instituti Mashinasozlik ilmiy-texnika jurnali 2024-yil maxsus son 2. 36-42-bet (05.00.00; №76).
5. O.Qodirov, O.Ergashev. Aerosilda past haroratda azot adsorbsiyasining tekstur xususiyatlari. Development of science jurnali 2025-yil 5-son, 245-252-betlar. (02.00.00; №80).
6. O.Qodirov, O.Ergashev. Aerosilda ammiak molekulari adsorbsiya entropiyasi va muvozanat vaqti. "Central Asian food engineering and technology" elektron ilmiy jurnali 2025-yil 6-son 129-136-betlar (02.00.00; №91).
7. O.P.Қодиров, O.K.Эргашев. Аэросилда аммиак молекулаларининг адсорбция изотермаси ва дифференциал иссиқлиги. "Қўқон давлат педагогика институти илмий хабарлари" илмий журналі 2025-йил 7-сон 57-64-бетлар (02.00.00; №30).

**II bo'lim (II часть; part II)**

8. O.Kodirov, O.Ergashev. Structural formation of aerosil particles in dispersed systems // LVII International Multidisciplinary Conference "Innovations and Tendencies of State-of-Art Science" «Innovations and Tendencies of State-of-Art Science». Mijnbestseller Nederland, Rotterdam, Nederland. 2025. 75-80 pp.
9. O.Kodirov, O.Ergashev. Influence of aerosils on the properties of polymer composites // LXX International Multidisciplinary Conference "Recent Scientific Investigation" «Recent Scientific Investigation». Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA. 2025. 77-82 pp.
10. O.Kodirov. Enhancing the mechanical properties of epoxy resing using aerosil-380: A comparative analysis // "Oziq-ovqat xavfsizligi: global muammolarning innovatsion yechimlari" mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman to'plami. Namangan 2024-yil 4-5-iyun. 459-461 b.
11. O.Kodirov., O.Ergashev. The synthesis of aerosil-380: process and applications // "Oziq-ovqat xavfsizligi: global muammolarning innovatsion yechimlari" mavzusidagi xalqaro ilmiy-amaliy anjuman to'plami. Namangan 2024-

yil 4-5-iyun. 461-463 b.

12. О.Кодиров, О.Эргашев. Структурообразование аэросилов в дисперсных средах // Коллоидная химия: инновации и решения для химической технологии, экологии и промышленности Материалы международной научно-технической конференции, посвященной светлой памяти академика МАНЭБ, д.х.н., проф. А.А.Агзамходжаева. 7-8 февраля 2025 года город Термез с. 1767-1769.

13. О.Кодиров, О.Эргашев. Влияние аэросилов на свойства полимерных композитов // Коллоидная химия: инновации и решения для химической технологии, экологии и промышленности Материалы международной научно-технической конференции, посвященной светлой памяти академика МАНЭБ, д.х.н., проф. А.А.Агзамходжаева. 7-8 февраля 2025 года город Термез с. 1769-1772.

14. O.Kodirov, O.Ergashev., Anna Masek. General description of aerosil sorbent // Коллоидная химия: инновации и решения для химической технологии, экологии и промышленности Материалы международной научно-технической конференции, посвященной светлой памяти академика МАНЭБ, д.х.н., проф. А.А.Агзамходжаева. 7-8 февраля 2025 года город Термез с. 1669-1770.

15. O.Kodirov, O.Ergashev., Anna Masek. Some physicochemical mechanics of dispersed systems in aerosil // Коллоидная химия: инновации и решения для химической технологии, экологии и промышленности Материалы международной научно-технической конференции, посвященной светлой памяти академика МАНЭБ, д.х.н., проф. А.А.Агзамходжаева. 7-8 февраля 2025 года город Термез с. 1671-1772.

16. О.Кодиров, О.Эргашев., В.Василев. Реологические свойства аэросила в ароматических углеводородах // Коллоидная химия: инновации и решения для химической технологии, экологии и промышленности Материалы международной научно-технической конференции, посвященной светлой памяти академика МАНЭБ, д.х.н., проф. А.А.Агзамходжаева. 7-8 февраля 2025 года город Термез с. 1714-1715.

17. O.R.Qodirov., O.K.Ergashev. Aerosilga suv molekulari adsorbsiyasining termodinamikasi va sirt xossalari // “Oziq-ovqat mahsulotlarini xavfsizligini ta’minlash: global muammolar va yangi innovatsion yechimlari” mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjuman. 6-7-iyun Namangan 2025. 106-107-betlar.

18. O.R.Qodirov., O.K.Ergashev. Aerosil va suv o‘zaro ta’sirining termodinamik asoslari // “Oziq-ovqat mahsulotlarini xavfsizligini ta’minlash: global muammolar va yangi innovatsion yechimlari” mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjuman. 6-7-iyun Namangan 2025. 30-31-betlar

Avtoreferat Namangan muhandislik-texnologiya instituti ilmiy-texnika jurnali tahririyatida tahrirdan o'tkazildi va o'zbek, rus, ingliz tillaridagi matnlari mosligi tekshirildi (2.12.2025 y.).

Bosishga ruxsat etildi: 2.12.2025 yil.  
Bichimi 60x841/16, «Times New Roman»  
garniturada raqamli bosma usulida bosildi.  
Shartli bosma tabog'i 3,0 Adadi: 100. Buyurtma: № 50/12  
NamDTU bosmaxonasida chop etildi.  
Namangan shahri, Kosonsoy ko'cha, 7-uy.



