



KIMYOVIY FAOLLASHTIRILGAN UGLERODLI MATERIALLARNING TEKSTURAVIY KO‘RSATKICHLARI VA G‘OVAKLI TUZILISHINI TAHLIL QILISH

Payg‘amova Mahliyo Ilxomjonovna

Qo‘qon davlat universiteti o‘qituvchisi, PhD

Email: mpaygamova87@gmail.com

Payg‘amov Raximjon Abdukayumovich

Qo‘qon davlat universiteti dotsenti, k.f.d.

Annotatsiya. Ushbu tadqiqot ishida kimyoviy faollantiruvchi reagentning miqdorini o‘zgarishi uglerodli adsorbentlarning teksturaviy xususiyatlariga ta’siri o‘rganildi. Tadqiqot davomida turli massa nisbatdagi KOH bilan ishlov berilgan uglerodli materiallarning solishtirma sirt maydoni, g‘ovaklar hajmi va ularning taqsimoti tahlil qilindi. Adsorbentlarning strukturaviy parametrlarini aniqlash uchun past haroratda azot adsorbsiyasi usulidan foydalanildi hamda sirt maydoni BET usuli yordamida, g‘ovaklar hajmi va mezog‘ovaklar taqsimoti esa BJH usuli asosida hisoblab chiqildi. KOH miqdorining ortib borishi tartibida uglerodli materiallarning g‘ovak tuzilishining shakllanishi, mikro va mezog‘ovaklarning rivojlanishi hamda solishtirma sirt maydonining ortishiga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi aniqlandi.

Kalit so‘zlar: uglerodli adsorbentlar, kimyoviy faollashtirish, g‘ovak tuzilishi, solishtirma sirt maydoni, mikro va mezog‘ovaklar, azot adsorbsiyasi, BET usuli, BJH usuli, teksturaviy xususiyatlar, adsorbsiya jarayoni.

Аннотация. В настоящем исследовании изучено влияние изменения количества химического активирующего реагента на текстурные характеристики углеродсодержащих адсорбентов. В ходе исследования были проанализированы удельная площадь поверхности, объём пор и распределение пор по размерам углеродсодержащих материалов, обработанных KOH при различных массовых соотношениях. Для определения структурных параметров адсорбентов использован метод адсорбции азота при низкой температуре; удельная площадь поверхности рассчитана по методу BET, а объём пор и распределение мезопор по размерам — на основе метода ВЖН. Установлено, что увеличение количества KOH оказывает существенное влияние на формирование пористой структуры углеродсодержащих материалов, развитие микро- и мезопор, а также увеличение удельной площади поверхности.

Ключевые слова: углеродсодержащие адсорбенты, химическая активация, пористая структура, удельная площадь поверхности, микро- и мезопоры, адсорбция азота, метод BET, метод БЖН, текстурные характеристики, процесс адсорбции.

Abstract. This study investigated the effect of varying the amount of a chemical activating agent on the textural properties of carbon-based adsorbents. During the study, the specific surface area, pore volume, and pore size distribution of carbon-based materials treated with KOH at different mass ratios were analyzed. Nitrogen adsorption at low temperature was employed to determine the structural parameters of the adsorbents, while the specific surface area was calculated using the BET method, and the pore volume and mesopore size distribution were determined based on the BJH method. It was established that increasing the amount of KOH significantly affected the formation of the porous structure of the carbon-based materials, the development of micro- and mesopores, and the increase in specific surface area.

Keywords: carbon-based adsorbents, chemical activation, porous structure, specific surface area, micro- and mesopores, nitrogen adsorption, BET method, BJH method, textural properties, adsorption process.

KIRISH. Uglerodli adsorbentlar hozirgi zamonaviy sorbent materiallari orasida eng samarali va ko'p qo'llaniladigan turlaridan biri hisoblanadi. Ularning yuqori samaradorligi, birinchi navbatda, yuqori solishtirma sirt yuzasi, turli o'lchamdagi mikro-, mezo- va makrog'ovaklarning o'zaro uyg'un taqsimlanishiga va sirtidagi funksional guruhlarining mavjudligiga bog'liqdir. Bu xususiyatlar esa faollashtirish sharoitlariga (temperatura, faollantirish davomiyligi, faollashtiruvchi reagentning sifat va miqdor tarkibida) bevosita bog'liq bo'ladi. Uglerodli materiallarni faollashtirishda keng qo'llaniladigan reagentlardan biri kaliy gidroksidi bo'lib, u yuqori samarali mikrog'ovakli va mezog'ovakli tuzilishga ega adsorbentlarni olish imkonini beradi. KOH yordamida faollashtirish jarayoni natijasida yuzaga keladigan kimyoviy reaksiyalar, strukturaviy o'zgarishlar va teksturaviy xususiyatlar ilmiy adabiyotlarda keng o'rganilgan bo'lsada, o'simlik biomassasi va mahalliy respublikamiz hududida o'sadigan daraxtlar ikkilamchi xomashyolaridan olinadigan adsorbentlarga tatbiq etish masalalari hali ham o'z dolzarbligini yo'qotmagan [1-3].

Kaliy gidroksidi bilan faollashtirish jarayoni, odatda, ikki asosiy bosqichdan iborat bo'ladi: dastlab xomashyo KOH eritmasi bilan ma'lum nisbatda aralashtiriladi va quritiladi, keyin esa inert atmosfera (odatda azot yoki argon oqimida) yuqori haroratda karbonizatsiya qilinadi. Ushbu jarayon davomida KOH uglerod skeleti bilan turli xil reaksiyalarga kirishadi: masalan, $6\text{KOH} + 2\text{C} \rightarrow 2\text{K} + 3\text{H}_2 + 2\text{K}_2\text{CO}_3$ reaksiyasi natijasida kaliy va karbonatlar hosil bo'ladi. Kaliy uglerod qatlamlariga interkalatsiyalanib, ularning kengayishiga sabab bo'ladi. Natijada uglerod skeleti ichida g'ovaklar ochiladi va yangi sorbsiya markazlari hosil bo'ladi. Shu sababli KOH bilan faollashtirish jarayoni uglerodli materiallarda yuqori darajada mikrog'ovaklilikni shakllantiruvchi eng samarali usullardan biri hisoblanadi [4].

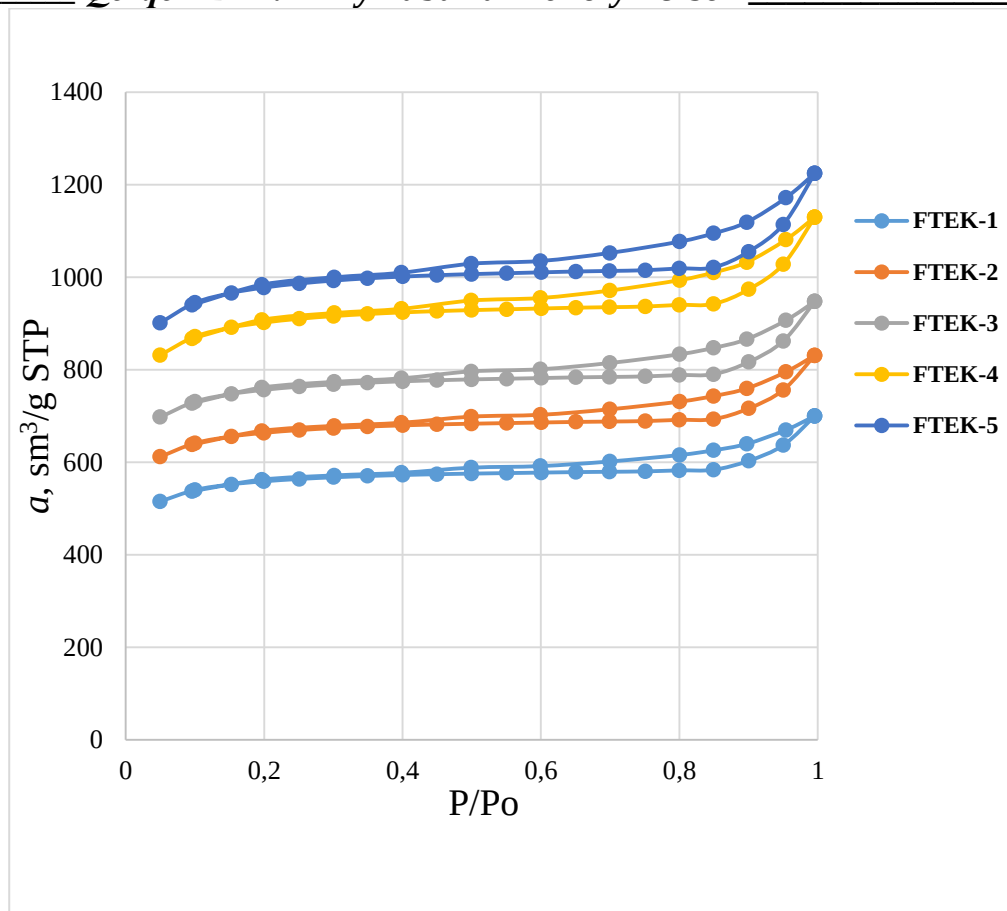
ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODLAR. 77 K haroratda azot adsorbsiya-desorbsion tahlillarini termik va kaliy gidroksid bilan faollashtirilgan ko'mirlar uchun

amalga oshirish ularning g‘ovaklar tuzilishi, hajmi, taqsimoti va materialning solishtirma sirt yuzasini o‘rganish imkonini beruvchi eng muhim usullardan biri hisoblanadi. Ushbu sharoitda azot molekulalarining past kinetik energiyasi sababli mikrog‘ovaklarga to‘liq adsorbsiyalanib, BET nazariyasi va formulalari orqali solishtirma sirt yuzasini, t-Plot metodi yordamida mikrog‘ovak hajmini hamda BJH, HK va DFT modellari yordamida mezo- va mikrog‘ovaklarning taqsimoti, gisterezis turi va g‘ovaklar radiusi kabi ko‘rsatkichlarni hisoblash va ular asosida hulosalar chiqarishga imkon yaratadi. Termik faollashtirish jarayonida ko‘mirning strukturaviy parchalanishi natijasida asosan mezog‘ovaklik shakllansa, KOH bilan kimyoviy faollashtirish uglerodli komponentlar va kaliy metalli reaksiyalari hamda karbonizatsiya jarayonlari orqali yuqori darajada mikrog‘ovaklik strukturaga ega materiallar hosil bo‘lishiga olib keladi. Shu sababli 77 K da olingan azot adsorbsiya-desorbsiya izotermalari o‘rganish faollashtirish usuli va sharoitlarining samaradorligini solishtirish, ko‘mir asosidagi adsorbentlarning adsorbsion jarayonlar va katalizorlar, elktrokimyoviy jarayonlarda qo‘llanilishini amaliy imkoniyatlarini aniqlash hamda ilmiy xulosalarga kelish uchun asosiy manba bo‘lib xizmat qiladi.

Uglerodli adsorbentlarni mahalliy xom-ashyolar, jumladan, daraxt poyalari chiqindilari asosida tayyorlash alohida ahamiyatga ega. Shu maqsadda tadqiqot ob‘ekti sifatida Respublikamiz hududida o‘sadigan terak va tol daraxtlari ikkilamchi homashyolari kimyoviy usulda laboratoriya qurilmasida faollantirib ko‘mir adsorbentlar tayyorlandi.

Kimyoviy usulda faollantirishda KOH eritmasidan foydalanildi. Dastlab xomashyo maydalanib, 500 °C da inert muhitda piroliz qilindi. Olingan karbonizat kaliy gidroksid eritmasi bilan kimyoviy ishlov berildi. Karbonizat va faollashtiruvchi reagentning massa nisbati (1:1, 1:2, 1:3, 1:4 va 1:5) ta’siri o‘rganildi. Keyin olingan aralashmalar filtrlandi va ajratib olingan uglerodli materialni 800°C (10°C/min-1) harorat yordamida faollantirildi. Olingan uglerodli adsorbentlarni neytral muhit hosil bo‘lgunga qadar 0,5 N xlorid kislotasi eritmasi bilan ishlov berildi. So‘ngra adsorbentlarni distillangan suv bilan bir necha marta yuvildi va 100±5°C haroratda quritildi. Olingan namunalar quyidagicha nomlandi: tol daraxti poyasi chiqindilari asosida olingan ko‘mir adsorbentlar FTOK-1 (tol+KOH-1:1), FTOK -2 (tol+KOH-1:2), FTOK-3 (tol+KOH-1:3), FTOK-4 (tol+KOH-1:4), FTOK-5 (tol+KOH-1:5) va terak daraxti poyasi chiqindilari asosida olingan ko‘mir FTEK-1 (terak+KOH-1:1), FTEK -2 (terak +KOH-1:2), FTEK-3 (terak +KOH-1:3), FTEK-4 (terak +KOH-1:4), FTEK-5 (terak +KOH-1:5) [5,6].

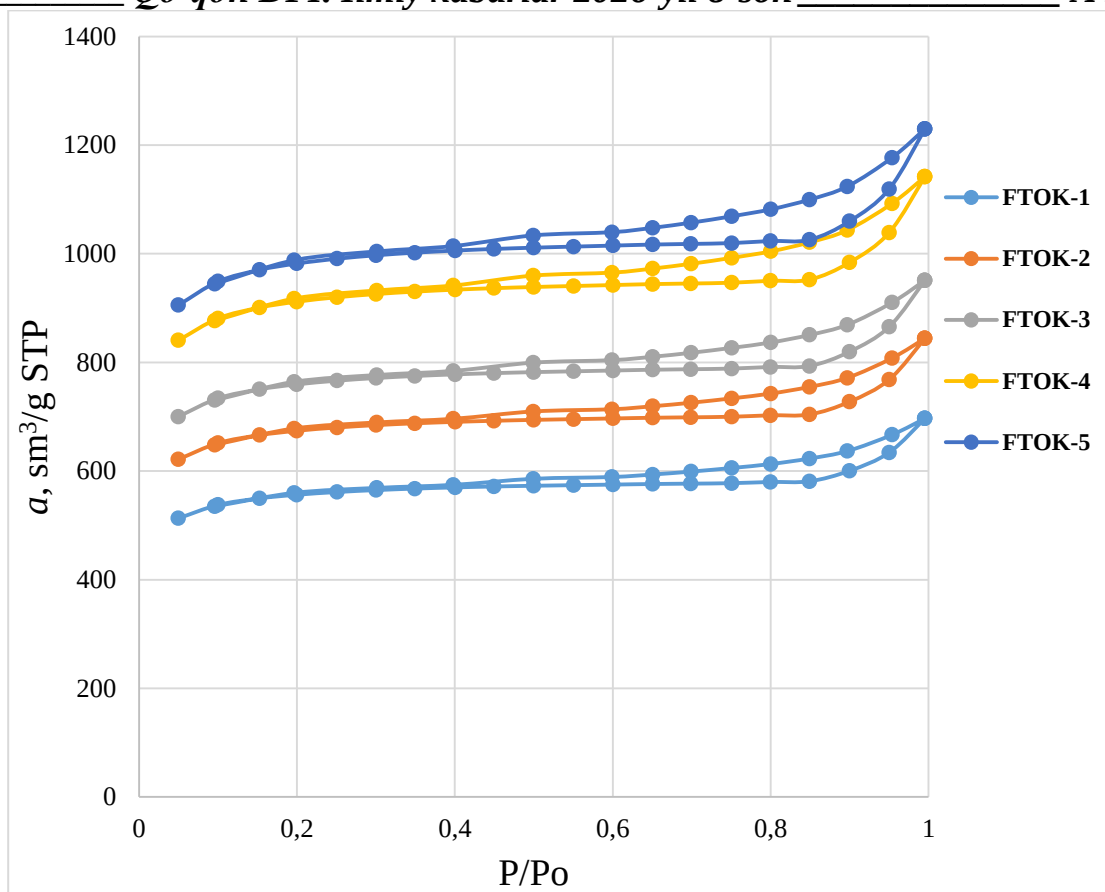
NATIJALAR VA MUHOKAMA. Shu maqsadda kimyoviy-termik faollashtirilgan terak va tol biommassi asosida olingan ko‘mir adsorbentlarning azot adsorbsiya-desorbsiya izotermalari o‘rganildi.



1-rasm. Terak daraxti biomassini kimyoviy faollantirib olingan namunalarning azot adsorbsiya-desorbsiya izotermalari.

77 K da o‘lchangan azot adsorbsiya-desorbsiya izotermalari barcha FTEK namunalarda nisbiy bosim (P/P_0) ortishi bilan adsorbsiyalangan azot miqdori kaliy ishqori massa nisbati o‘zgarishiga mos ravishda ortganligini ko‘rsatadi. Past nisbiy bosimlar oralig‘ida ($P/P_0 < 0,2$) izotermalarning keskin ortishi mikrog‘ovaklar hajmini mezog‘ovaklar miqdoridan ortiq ekanligini bildiradi. FTEK-5 namunasi eng yuqori adsorbsiyamiqdoriga ega bo‘lib, taxminan $977 \text{ cm}^3/\text{g STP}$ atrofida boshlang‘ich yuqori qiymatlarni namoyon etadi, FTEK-1 esa eng past qiymatga ($\approx 558 \text{ cm}^3/\text{g STP}$) ega. $P/P_0 \approx 0,3-0,8$ oraliqda adsorbsiya miqdori barcha namunalarda sekinlik bilan ortganligini ko‘rish mumkin. Bu esa namunalar tarkibidagi mikrog‘ovaklarga azot molekulasini to‘liq adsorbsiyalanib, keyingi bosqichlarda mezog‘ovaklarga adsorbsiyalanishini va polimolekulyar adsorbsion qavat hosil qilayotganligidan dalolat beradi. Adsorbsiyaning so‘ngi bosqichlarida ($>0,8$) barcha namunalarning izotermalarida adsorbsiyaning keskin o‘sishi kuzatiladi. Ushbu bosqichda adsorbsiyalangan azot molekulasini mezog‘ovaklar va nisbatan o‘lchami katta g‘ovaklarga (10-50 nm) kapilyar kondensatsiya mexanizmi asosida yutilganidan dalolat beradi.

Barcha namunalarning izotermalari IUPAC tasnifiga ko‘ra, mikrog‘ovaklar tomonidan past bosimda tez va ko‘p miqdorda adsorbsiyalanishiga ko‘ra I tip xususiyatini, yuqori bosimlarda esa mezog‘ovaklarda kapilyar kondensatsiyaga xos bo‘lgan qo‘shimcha keskin ko‘talishiga ko‘ra IV tip xususiyatini aks ettiradi - ya‘ni izotermalar aralash I/IV tur xususiyatini ko‘rsatadi.



2-rasm. Tol daraxti biomassini kimyoviy faollantirib olingan namunalarning azot adsorbsiya-desorbsiya izotermalari.

FTOK namunalarning azot adsorbsiya-desorbsiya izotermalari mikrog‘ovaklarda past nisbiy bosimlarda ($P/P_0 < 0,1-0,2$) faol adsorbsiyalanganini, o‘rta bosimlarda ($P/P_0 \approx 0,3-0,8$) mikrog‘ovaklarga asta-sekin to‘liq azot molekularining adsorbsiyalanganligini va huddi FTEK namunalari singari bir necha qavatli adsorbsiya jarayonlari sodir bo‘lganligini, yuqori bosimlarda yaqin hududlarda esa kapillyar kondensatsiyaga xos keskin o‘shish kuzatilganini ko‘rsatadi. Shuningdek, adsorbsiya-desorbsiya chiziqlari $P/P_0 \approx 0,4-0,5$ nisbiy bosimlarda gisterezis halqasini hosil qilishi namunalarning tarkibida sezilarli miqdorda mikrog‘ovaklik o‘lchamidagi yoriqlar va teshiklar strukturasi hosil bo‘lganligini bildiradi.

1-jadval.

Kimyoviy faollantirilgan namunalarning tekstur xususiyatlari

Namunal ar	S1, m ² /g	t-Plot*, m ² /g	Va, sm ³ /g	Vb, sm ³ /g	R, Å	D, Å	D*, Å
FTEK-1	577,690	216,042	0,704	0,308	29,981	14,301	3,714
FTEK-2	686,007	256,549	0,837	0,366	27,243	14,194	3,641
FTEK-3	782,146	292,503	0,954	0,417	25,342	14,024	3,557
FTEK-4	932,550	348,750	1,137	0,497	22,174	13,846	3,364
FTEK-5	1010,692	377,974	1,233	0,538	21,867	13,548	3,348
FTOK-1	575,268	215,136	0,701	0,306	29,978	14,304	3,708
FTOK-2	697,044	260,677	0,850	0,371	27,234	14,188	3,637
FTOK-3	785,317	293,689	0,958	0,418	25,398	14,023	3,554
FTOK-4	942,695	352,544	1,150	0,502	22,167	13,843	3,358

FTOK-5	1015,367	379,722	1,238	0,541	21,856	13,545	3,345
--------	----------	---------	-------	-------	--------	--------	-------

Yuqoridagi jadvalda keltirilgan ma’lumotlar asosida har ikki daraxt biomassasi asosida olingan adsorbent (FTEK va FTOK) namunalarda faollantiruvchi reagent massa miqdori 1-dan 5 massa nisbatda ortishi bilan S^1 (BET bo‘yicha sirt yuzasi) va V_a hamda V_b mos ravishda ortganligini ko‘rish mumkin: S^1 FTEK-1 uchun 577,69 m²/g dan FTEK-5 da 1010,69 m²/g gacha, FTOK-1 dan FTOK-5 gacha mos ravishda 575,27 → 1015,37 m²/g; V_a 0,704 → 1,233 cm³/g (FTEK) va 0,701 → 1,238 cm³/g (FTOK); V_b 0,308 → 0,538 cm³/g (FTEK) va 0,306 → 0,541 cm³/g (FTOK). Shuningdek, t-Plot metodi orqali aniqlangan qiymatlar (mikrog‘ovaklar sirt yuzasi) ham o‘sim, 216 → 379 m²/g oralig‘ida ortmoqda, ya’ni mikrog‘ovaklarning sirt yuzasi ham ortmoqda. Xulosa qilib aytganda, FTOK namunalarida mos qiymatlar FTEK namunalarinikidan biroz yuqoriroq yoki deyarli teng bo‘lib, bu ikki daraxt (tol va terak) biomassasi asosida kaliy ishqori vositasida faollashtirib olingan ko‘mir adsorbentlarning g‘ovaklik strukturalari va adsorbsion xossalari bir-biriga yaqin ekanligini ko‘rsatadi.

Strukturaviy o‘zgarishlar shuni ko‘rsatadiki, namunalarda KOH massa nisbati ortishi qatorida solishtirma sirt yuzasi va umumiy g‘ovak hajmning ortishi g‘ovaklik darajasining ortishini, ya’ni yangi mikrog‘ovaklarning hosil bo‘lishi va mezog‘ovaklik tizimining rivojlanishini ifodalaydi; ayniqsa har ikki namunalarda ham KOH massa nisbati 1:4 va 1:5 bo‘lgan ko‘mirlarda V_b qiymatlarining keskin ko‘tarilishi kengroq mezog‘ovaklik kanallarni shakllanganidan dalolat beradi. Shu bilan birga, o‘rtacha gidravlik radius R ning 29,98 Å dan 21,87 Å gacha kamayishi g‘ovaklar tarmog‘ining tobora maydaroq va zichroq bo‘layotganini, ya’ni o‘lchamlar taqsimotining kichik o‘lchamdagi g‘ovaklar tomon siljishini bildiradi. D va D^* ko‘rsatkichlarining ($\approx 14,3$ Å → $\approx 13,5$ Å va $\approx 3,7$ Å → $\approx 3,35$ Å) kamayib borishi ham g‘ovak diametrlari taqsimotida mikrog‘ovak miqdoriy ulushi ortayotganini tasdiqlaydi.

XULOSA. KOH yordamida faollashtirilgan uglerodli materiallarning teksturaviy xususiyatlarini chuqur o‘rganish nafaqat fundamental ahamiyatga ega, balki amaliy jihatdan ham muhim o‘rin tutadi. Chunki bunday materiallar oqova suvlarni og‘ir metall ionlari va organik ifloslantiruvchilardan samarali tozalash, havo filtrlash, katalizator tashuvchisi sifatida ishlatish, hamda elektrokimyoviy qurilmalarda (superkondensatorlar, yonilg‘i elementlari) energiya saqlash imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytiradi.

Ekologik nuqtai nazardan, ushbu yondashuv biologik chiqindilarning ikkilamchi foydalanishiga asoslangan bo‘lib, atrof-muhit ifloslanishini kamaytirish, chiqindilarni utilitatsiya qilish va tabiiy resurslarni tejashga xizmat qiladi. Ko‘mir adsorbentlarining qayta tiklanuvchi, arzon va keng tarqalgan biomassa manbalaridan olinishi ularni ekologik xavfsiz va iqtisodiy jihatdan maqbul mahsulotga aylantiradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR.

1. Husniya Qurbonnazarova. (2026). Suvni tozalash uchun yuqori samarali sorbent materiallarni sintez qilish va ularning adsorbsion xususiyatlarini tadqiq etish. Acumen: International Journal of Multidisciplinary Research. 3. 14-18. 10.66301/zwjdjx98.

2. Petrovic, Ben & Gorbounov, Mikhail & Soltani, Salman. (2022). Impact of Surface Functional Groups and Their Introduction Methods on the Mechanisms of CO₂ Adsorption on Porous Carbonaceous Adsorbents. Carbon Capture Science & Technology. 3. 100045. 10.1016/j.ccst.2022.100045.

3. Khosrowshahi MS, Abdol MA, Mashhadimoslem H, Khakpour E, Emrooz HBM, Sadeghzadeh S, Ghaemi A. The role of surface chemistry on CO₂ adsorption in biomass-derived porous carbons by experimental results and molecular dynamics simulations. Sci Rep. 2022 May 26;12(1):8917. doi: 10.1038/s41598-022-12596-5. PMID: 35618757; PMCID: PMC9135713.

4. Shu Hui, Tang & Ahmad Zaini, Muhammad Abbas. (2015). Potassium hydroxide activation of activated carbon: a commentary. Carbon letters. 16. 275-280. 10.5714/CL.2015.16.4.275.

5. Ochilov, A., Paygamova, M., Khamzakhojayev, A., Paygamov, R. (2025). Physicochemical properties of carbon adsorbents derived from renewable biomass. Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology, 10(2), 121-130.

6. Пайгамова Махлиё Илхомжоновна, Хамзахужаев Асрорхужа Ахрорхужа Угли, Очилов Голибжон Мамаюнусович, Пайгамов Рахимжон Абдукаюмович (2024). Исследование влияния химической активации на адсорбционную активность растительного угля по отношению к бензолу. Universum: химия и биология, 2 (9 (123)), 12-16. doi: 10.32743/UniChem.2024.123.9.18091