



<https://doi.org/10.70728/a.series.tab.v08.i04.155>

UDK 541.183

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3370-1877>

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4339-9060>

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9021-5589>

EKOLOGIK TOZA ADSORBENTLAR ASOSIDA OQOVA SUVLAR TARKIBIDAN RUX(II) IONLARINI SAMARALI ADSORBSIYASI TAHLILI

Xonqulov Shoxrux Bahodirovich

Toshkent kimyo-texnologiya instituti, doktoranti
shoxruxxonqulov6@gmail.com. Tel: +99890-972-11-36

Abdirimova Madina Egamberganovna

Toshkent kimyo-texnologiya instituti, magistri
egamberganovamadina9@gmail.com. Tel: +99893-754-90-30

Bekmirzayev Akbarbek Shuxratovich

Toshkent kimyo-texnologiya instituti, doktoranti
akbarkimtex@gmail.com. Tel: +99897-724-26-27

Xandamov Davron Abdikodirovich

Toshkent kimyo-texnologiya instituti, kimyo fanlari doktori, professor
davron.khandamov@gmail.com. Tel: +99897-345-04-82

Norqobilov Adham Erkin o‘g‘li

Toshkent kimyo-texnologiya instituti, kimyo fanlari doktori, professor
norqobilovadham111@gmail.com. Tel: +99891-212-18-23

Annotatsiya. Ushbu maqolada adsorbsiya izotermasi Lengmyur tipidagi L-izotermaga mansubligini hamda DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlari uchun pH_{pzc} qiymatlari mos ravishda 7,75; 6,85 va 7,3 ga teng ekanligi aniqlangan. Lengmyur modeli natijalariga ko‘ra, adsorbentlarning maksimal adsorbsion sig‘imi (q_{max}) sezilarli farqlanishni ko‘rsatdi. Xususan, DB adsorbenti uchun q_{max} 10,68 mg/g, DB10 uchun 25,2 mg/g, DB-Ipak uchun esa eng yuqori ko‘rsatkich 91,12 mg/g ni tashkil etgan. Natijalar, modifikatsiyalab olingan DB-Ipak adsorbenti yuzasida faol adsorbsion markazlar soni boshlang‘ich adsorbentiga nisbatan rux (II) ionlarini sorbsiyalash qobiliyati sezilarli darajada yuqori ekanligini ko‘rsatgan.

Kalit so‘zlar: Bentonit, modifikatsiya, oqova suv, rux ionlari, adsorbsiya izotermalari, adsorbsiyalanish modellari, nol zaryad nuqtasi.

Аннотация. В данной статье установлено, что изотерма адсорбции относится к L-типу изотерм Ленгмюра, а значения pH_{pzc} для адсорбентов DB, DB10 и DB-Ипак составляют соответственно 7,75; 6,85 и 7,3. Согласно результатам модели Ленгмюра, максимальная адсорбционная емкость (q_{max}) адсорбентов показала значительные различия. В частности, для адсорбента DB значение q_{max} составило 10,68 мг/г, для DB10 — 25,2 мг/г, а для DB-Ипак — наибольшее значение 91,12 мг/г. Полученные результаты показывают, что модифицированный адсорбент DB-Ипак имеет значительно большее количество активных адсорбционных центров на поверхности и, следовательно, более высокую способность к сорбции ионов Rux (II) по сравнению с исходным адсорбентом.

Ключевые слова: бентонит, модификация, сточные воды, ионы цинка, изотермы адсорбции, модели адсорбции, точка нулевого заряда.

Abstract. This study established that the adsorption isotherm corresponds to the L-type Langmuir isotherm, and the pH_{pzc} values for DB, DB10, and DB-Silk adsorbents are 7.75, 6.85, and 7.3, respectively. According to the Langmuir model results, the maximum adsorption capacity (q_{max}) of the adsorbents showed significant differences. In particular, the q_{max} values were 10.68 mg/g for DB, 25.2 mg/g for DB10, and the highest value of 91.12 mg/g for DB-Silk. The obtained results indicate that the modified DB-Silk adsorbent has a significantly higher number of active adsorption sites on its surface and therefore exhibits a much higher sorption capacity for rux (II) ions compared to the initial adsorbent.

Keywords: bentonite, modification, wastewater, zinc ions, adsorption isotherms, adsorption models, point of zero charge.

KIRISH. Bugungi kunda global miqyosda suv resurslarining og‘ir metall ionlari bilan ifloslanishi eng dolzarb ekologik muammolardan biri sifatida e‘tirof etilib kelinmoqda. Ayniqsa, sanoat ishlab chiqarish darajasining ortishi va tez rivojlanib borishi, urbanizatsiya jarayonlarining jadallashuvi natijasida chiqindilarini nazoratsiz chiqarish jarayonlari suv va tuproq ekotizimlarining sezilarli darajada ifloslanishiga olib kelib hamda tabiiy resurslardan oqilona foydalanmaslik natijasida suv havzalarida insonlar sog‘ligini salbiy oqibatlariga olib keluvchi zararli (toksik) elementlar, jumladan rux (II) ionlarining konsentratsiyasi ortib bormoqda. Bunday holat nafaqat suv ekotizimlariga, balki inson salomatligiga ham sezilarli darajada xavf tug‘diradi. rux (II) ionlarining atrof-muhitga tushishining asosiy manbalari sifatida rangli metallurgiya sanoati, galvanik jarayonlari, kimyo sanoati, shuningdek bo‘yoqlar, plastmassa, rezina, kosmetika va farmatsevtika mahsulotlarini ishlab chiqarish korxonalarida qayd etiladi [1].

Shuningdek rux biologik ahamiyatga ega mikroelement bo‘lib, past konsentratsiyalarda organizmning u fermentativ jarayonlarida, oqsil sintezida va hujayra metabolizmidagi faol ishtirok etadi. Biroq uning ortiqcha miqdori toksik ta‘sir ko‘rsatib, inson salomatligi va ekologik tizimlar uchun xavf tug‘diradi. Shu sababli Jahon sog‘liqni saqlash tashkiloti (JSST) ichimlik suvida rux ionlarining maksimal ruxsat etilgan konsentratsiyasini 0,5 mg/L etib belgilagan [2].

ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODLAR. Adabiyotlar tahliliga ko‘ra, Zn^{2+}

ionlari biologik mikroelement sifatida organizm uchun zarur bo‘lsa-da, uning me‘yordan ortiq konsentratsiyasi toksik ta‘sir ko‘rsatishi mumkinligi bir qator tadqiqotlarda qayd etilgan [3]. Xususan, yuqori konsentratsiyali rux (II) ionlari uzoq muddat ta‘sir etganda asab tizimi faoliyatiga salbiy ta‘sir ko‘rsatib, neyronlar o‘tkazuvchanligining buzilishi, bosh og‘rig‘i, bosh aylanishi hamda diqqat va xotira funksiyalarining pasayishiga olib kelishi mumkinligi ilmiy manbalarda ko‘rsatilgan.

Shuningdek, tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, rux (II) ionlarining organizmda ortiqcha to‘planishi buyrak to‘qimalarida bioakkumulyatsiyaga olib kelib, nefronlarning shikastlanishi sabab bo‘ladi. Natijada, uzoq muddatli ta‘sirida buyrak yetishmovchiligi rivojlanish xavfi ortadi. Jigar to‘qimalarida esa rux (II) ionlari oksidlovchi stressni kuchaytirib, antioksidant himoya tizimini zaiflashtiradi va gepatotsitlar faoliyatining buzilishiga olib keladi, bu holat surunkali toksik gepatit rivojlanishi uchun qulay sharoit yaratadi [4].

Bundan tashqari, adabiyotlarda rux (II) ionlarining gematologik tizimga ta‘siri ham keng yoritilgan bo‘lib, u temir almashinuvi va gemoglobin sintezini buzishi natijasida eritrotsitlar hosil bo‘lishini kamaytiradi hamda anemiya rivojlanish ehtimolini oshiradi [5]. Umuman olganda, ortiqcha Zn^{2+} ionlari oksidlovchi stressni kuchaytirib, immun tizim hujayralarining faolligini pasaytiradi va organizmning umumiy himoya hamda regeneratsiya qobiliyatini susaytiradi [6].

Shu sababli, ilmiy manbalarda suv muhitida rux (II) ionlarining ortiqcha miqdorini samarali kamaytirish dolzarb ekologik muammo sifatida qaraladi. Ushbu muammoni hal etishda yuqori adsorbsion sig‘imga ega materiallar jumladan, tabiiy va modifikatsiyalangan bentonitlar, biopolimer asosidagi kompozitlar va ularning kombinatsiyalari istiqbolli yechim sifatida keng o‘rganilmoqda. Ularning yuqori faol yuzasi, funksional guruhlar mavjudligi va ion almashinish qobiliyati rux (II) ionlarini suv muhitidan samarali ajratib olish imkonini beradi.

Adsorbentlarni sintez qilish. Bombyx mori ipak pillalaridan 10 gr olinib kichikroq bo‘laklarga bo‘linib, so‘ngra 0,05 M suvli Na_2CO_3 eritmasi yordamida 1 soat davomida tozalandi va keyin distillangan suv yordamida seritsin oqsili kabi elimni olib tashlash uchun yaxshilab chayiladi. Keyin degummed tolalar 50 ° C da quritilgan va 6,5 gr ipak fibroini (degummed) tolalari olindi. Keyin bu ipak fibroini tolalar xona haroratida $CaCl_2/H_2O/C_2H_5OH$ (molyar nisbatda 1/8/2) eritmasida eritilgan ipak fibroini suvli eritmasi olingan, so‘ngra tuzni olib tashlash uchun membranali dializ qopchasi yordamida 96 soat davomida distillangan suv bilan dializlangan. Ushbu dializlangan eritma 5000 rpm tezlikda 30 daqiqa davomida sentrifuga qilindi. Supernatant (sentrafugadan keyin pastga cho‘kma tushadi, ustki eritmasini ajratib olamiz ya‘ni supernatantni) to‘plangan va 50-70 ° C da quritilgan. 5,75 gr ipak fibroini quruq kukun olindi.

Bentonitni tayyorlash. Bentonitni modifikatsiyalash jarayoniga tayyorlash quyudagi bosqichni o‘z ichiga oladi. Dastlab zarracha o‘lchami 0,04 mm dan kichik bo‘lgan tabiiy DB

bentonitidan 15 gr olinib, 600 ml distillangan suvga 1 soat davomida Plastinkali LED raqamli magnetli aralashtirgichda 1200 rpm tezlikda aralashtirilib suspenziya hosil qilindi. Ushbu bosqichda bentonit qatlamlari zarrachalarini bir-biridan ajratib, dispersiyasini oshirgan holda suv ichida bir tekis tarqalishini amalga oshirish maqsadida suv bilan suspenziya hosil qilinadi.

Bentonit–ipak kompozitini olish. Tayyorlangan bentonit suspenziyasiga bir necha tomchi HCl qo‘shish orqali pH 2.8 ga keltirib olindi va 0,3 gr ipak fibroini quruq kukunidan qo‘shilib 50 ° C da 8 soat davomida Plastinkali LED raqamli magnetli aralashtirgichda 200 rpm tezlikda aralashtirildi. Aralashtirilgandan keyin namunani pH qiymatini neytral holatga keltirish uchun deionizatsiyalangan suv bilan yuviladi va 50 ° C da mufelniy pechda qurutib DB-Ipak adsorbenti olinadi va mayda kukun holatiga maydalanadi.

Adsorbsiya jarayonini miqdoriy jihatdan baholash. Lambert–Beer qonunidan foydalanilgan. U eritmadagi modda konsentratsiyasini spektrofotometr yordamida aniqlashga asoslangan. Adsorbsiyadan oldingi va keying rux (II) ionlarining Abs (yutulish) qiymatlari quyidagi formula bilan hisoblangan [7]:

$$Abs = \varepsilon \cdot l \cdot C = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (3)$$

Oqova suvlar tarkibidagi Rux(II) ionlarini spektrofotometrik aniqlash usuli Zn^{2+} ionlarining ksilenol oranj (xylenol orange) reagenti bilan barqaror rangli kompleks hosil qilishiga asoslanadi. Bu kompleks sariq-to‘q sariq yoki qizg‘ish-sariq rang hosil qiladi.

Olingan rangli kompleksning optik zichligi 570 nm to‘lqin uzunligida spektrofotometr yordamida o‘lchanadi. Beer–Lambert qonuniga muvofiq, yutilish darajasi eritmadagi Zn^{2+} ionlarining konsentratsiyasiga to‘g‘ri proporsional bo‘ladi, bu esa ularning miqdoriy aniqlanishini ta‘minlaydi.

Adsorbentlar tomonidan rux (II) ionining adsorbsiyalanish miqdori quyidagi formula asosida hisoblab chiqildi:

$$q_e = \frac{(C_i - C_e) \cdot V}{W} \quad (2)$$

bu yerda: q_e -adsorbsion sig‘im, ($mg \cdot g^{-1}$); C_i va C_e – Cr (VI) ning boshlang‘ich va muvozanat konsentratsiyasi, ($mg \cdot L^{-1}$); V - eritmaning hajmi, (L); m - adsorbentning massasi, (gr).

Adsorbsiyalanish natijalarini statistik tahlili. Tajribalarda takrorlanadigan va olingan eksperimental ma‘lumotlarning ishonchliligini baholash uchun uch marotaba statistik tahlil amalga oshirildi. Tajriba natijalari orasidagi farqlarni aniqlash va xatolik darajasini baholash maqsadida o‘rtacha qiymatga nisbatan maksimal og‘ishi hisoblandi. Ushbu xususiyat quyidagi formula bilan ifodalanadi [8]:

$$\Delta q_{\max} = \max\{|q_i - q^-|\}, \quad 1 \leq i \leq 3 \quad (1)$$

bu erda, q_i - har bir tajriba natijasida o‘lchangan adsorbsion sig‘im (mg/g),

q^- -uchta mustaqil tajriba natijalari bo‘yicha o‘rtacha adsorbsion sig‘im (mg/g).

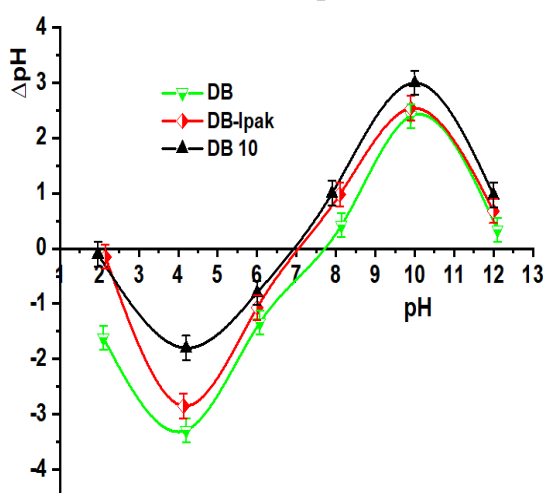
Aniqlash koeffitsienti (R^2) tenglamasi regressiya modelining aniqlik darajasini, ya‘ni modelni qanchalik yaxshi ishlashini baholash uchun ishlatiladi. R^2 quyidagi formula bilan ifodalanadi [9]:

$$R^2 = \frac{\sum (q_{ecal} - q_{mexp})^2}{\sum (q_{ecal} - q_{mexp})^2 + (q_{cal} - q_{mexp})^2} \quad (4)$$

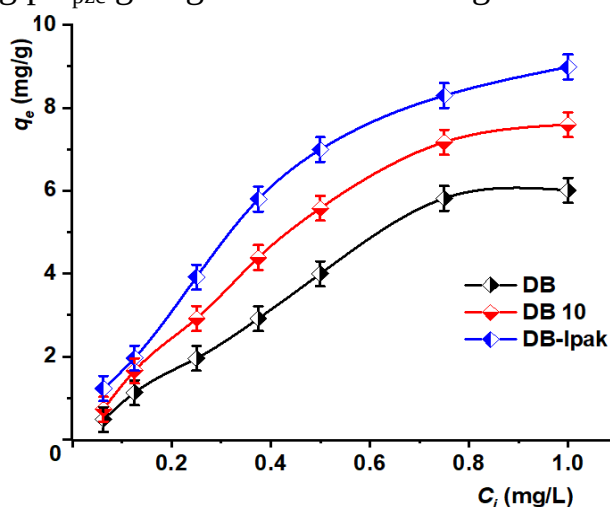
bu yerda: q_{ecal} -hisoblangan (kalibrlangan) qiymatlar, q_{mexp} -eksperimental (tajriba natijalari asosida olingan) qiymatlar, q_{cal} -model bo'yicha prognoz qilingan qiymatlar. Aniqlash koeffitsienti regressiya modelining natijaviy o'zgaruvchanlikni tushuntirish darajasini bildiradi va 0 dan 1 gacha bo'lgan oraliqda o'zgaradi.

NATIJALAR VA MUXOKAMA. Adsorbentlarning nol zaryad nuqtasini aniqlash orqali ularning sirt xossalarini oldindan keng miqyosda tahlil qilish, adsorbsiya mexanizmini izohlash va adsorbsiya jarayon samaradorligini oshirish uchun zarur bo'lgan xossalarni tushunish imkoniyatini beradi.

DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlarining pH_{pzc} grafigi 1-rasmda keltirilgan.



1-rasm. DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlarining pH_{pzc} grafigi



2-rasm. DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlarining izotermalari grafigi

Adsorbentlarining pH_{pzc} grafigini taxlil qiladigan bo'lsak, adsorbentlarning nol zaryad nuqtasi bu grafikda boshlang'ich pH va yakuniy pH qiymatlarining chiziqlari kesishgan joyda hosil bo'ladi. DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlari uchun pH_{pzc} qiymatlari mos ravishda 7,75; 6,85 va 7,3 ga teng ekanligi aniqlandi. DB adsorbenti uchun $pH_{pzc} = 7,75$ bo'lgan bo'lsa, DB-Ipak adsorbentida bu qiymat 7,3 gacha kamaygan. Bu o'zgarish ipak fibroini DB bentoniti qatlamlari orasiga kiritilishi natijasida ma'lum modifikatsiya yuz berganini ko'rsatadi. Bu esa ipak fibroini tarkibidagi funksional guruhlar ($-NH_2$ va $-COOH$) adsorbent sirt yuzasida ko'payib, adsorbentning kuchsiz kislotali xususiyatini oshiradi. Natijada nol zaryad nuqtasi pastroq pH tomonga siljiydi.

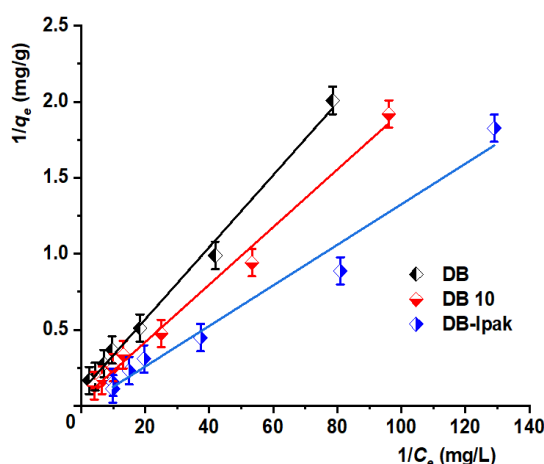
Suvdagi rux (II) ionlarini DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlari yordamida adsorbsiyalash izotermalari grafigi 2-rasmda keltirilgan. Suvdagi Zn^{2+} ionlarining DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlarida adsorbsiyalanish izotermalari Giles klassifikatsiyasi bo'yicha L-tip (Langmuir tip) ga mansub bo'lib, bu jarayon monoqavatli adsorbsiyaga asoslanganligini ko'rsatadi. DB adsorbentida L-tip izoterma sirtning cheklangan faol markazlari mavjudligini va Zn^{2+} ionlarining ushbu markazlarga bosqichma-bosqich to'yinib

borishini ifodalaydi. DB10 modifikatsiyalangan adsorbentida ham L-tip saqlanib qoladi, biroq modifikatsiya natijasida faol markazlar soni va ularning energiya holati yaxshilanib, adsorbsion sig‘im ortadi. DB-Ipak adsorbentida esa L-tipidagi izotermaga asoslangan holatda, sirt funksional guruhlari ($-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$ va boshqalar) hisobiga Zn^{2+} ionlari bilan kuchliroq o‘zaro ta’sir va yuqori bog‘lanish ehtimoli kuzatiladi.

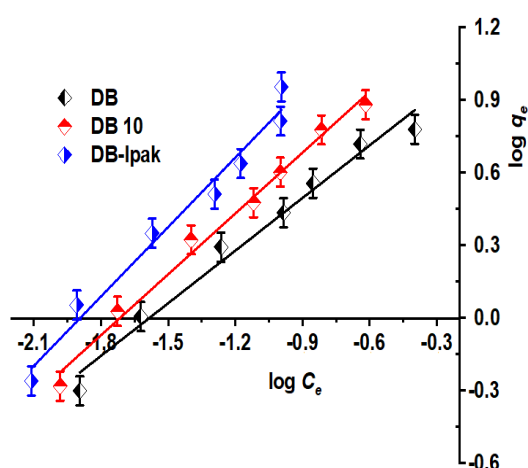
Umuman olganda, uchala adsorbentda ham to‘yinuvchi adsorbsiya bilan tavsiflanadi, farq esa faqat Langmuir tipidagi sirtning energiyasi va funksional guruhlarning faolligida namoyon bo‘ladi.

Suvdagi rux (II) ionlarining adsorbentlarga adsorbsiya izotermalarini tahlil qilish uchun Lengmyur, Freyndlix, Temkin, Dubinin-Radushkevich (D-R) modellaridan foydalanildi. Bu izoterma modellar orqali tahlil qilish jarayonining mexanizmini, sirt xossalarini va energetik tabiatini chuqur tushuntirish imkonini beradi. Ushbu modellarni birgalikda qo‘llab rux (II) ionlarining adsorbsiya jarayonini sig‘im, sirt tuzilishi, energiya taqsimoti va mexanizmlarini tushuntirish (fizik yoki kimyoviy) va baholash natijalari quyida keltirilgan.

Lengmyur va Freyndlix izotermalari bo‘yicha adsorbsiya tahlillari. DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlariga suvdagi rux (II) ionlari adsorbsiyasining Lengmyur va Freyndlix modellari bo‘yicha natijalari 3 va 4-rasmlarda keltirilgan.



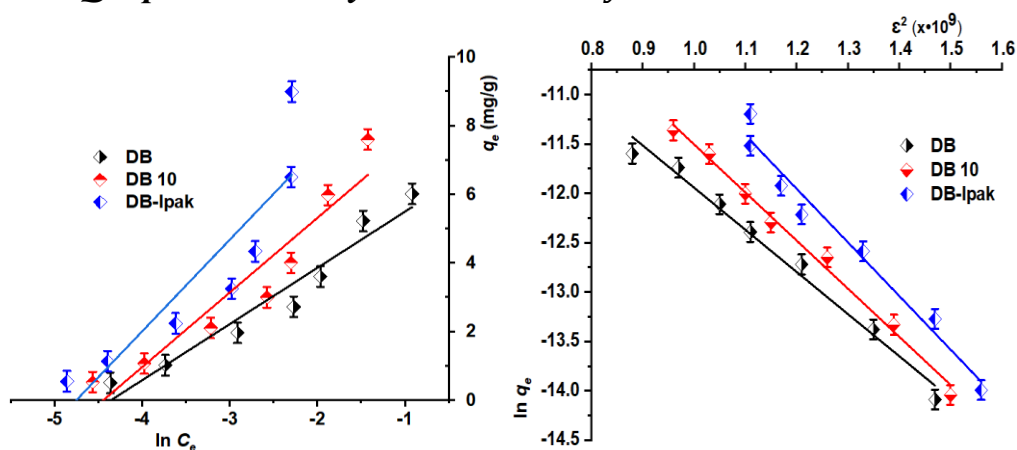
3-rasm. DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlariga suvdagi Zn (II) ionlarining adsorbsiyalanishining Lengmyur modeli grafigi



4-rasm. DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlariga suvdagi Zn (II) ionlarining adsorbsiyalanishining Freyndlix modeli grafigi

Suvdagi rux (II) ionlari adsorbsiyasining DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlariga Lengmyur va Freyndlix modellari bo‘yicha natijalari 2-jadvalda keltirilgan.

DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlariga suvdagi rux (II) ionlari adsorbsiyasining Temkin va Dubinin-Radushkevich (D-R) modellari bo‘yicha natijalari 5 va 6-rasmda keltirilgan.



5-rasm. DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlariga Zn (II) ionlarining adsorbsiyalanishining Temkin modeli grafigi

6-rasm. DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlariga Zn (II) ionlarining adsorbsiyalanishining Dubinin – Radushkevich modeli grafigi

Temkin va Dubinin-Radushkevich (D-R) modellari grafiklari natijalari 2-jadvalda keltirilgan.

DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlariga suvdagi rux (II) ionlarining adsorbsiyasi Lengmyur, Freyndlix, Temkin va Dubinin-Radushkevich (D-R) modellari taxlili quyidagi jadvalda keltirilgan.

1-jadval

DB-Ipak adsorbentiga rux (II) ionlarining adsorbsiyasi izotermalarning Lengmyur, Freyndlix, Temkin va Dubinin-Radushkevich modellari bo‘yicha ko‘rsatkichlari

Izoterma modellari	Ko‘rsatkichlar	DB	DB 10	DB-Ipak adsorbenti
Lengmyur	q_{max} (mg/g)	$10,68 \pm 0,02$	$25,2 \pm 0,011$	$91,12 \pm 0,008$
	KL (L/mg)	$3,94 \pm 0,015$	$2,09 \pm 0,013$	$0,82 \pm 0,006$
	RL	$0,33 \pm 0,014$	$0,48 \pm 0,01$	$0,7 \pm 0,012$
	R^2	0,99	0,99	0,97
Freyndlix	KF (mg/g)	$14,028 \pm 0,008$	$27,352 \pm 0,009$	$64,565 \pm 0,009$
	$1/n$	$0,725 \pm 0,016$	$0,838 \pm 0,017$	$0,956 \pm 0,017$
	n	$1,379 \pm 0,016$	$1,193 \pm 0,017$	$1,046 \pm 0,017$
	R^2	0,97	0,98	0,97
Temkin	BT (kJ/mol)	$1,637 \pm 0,013$	$2,174 \pm 0,015$	$2,67 \pm 0,017$
	KT (L/mg)	$77,717 \pm 0,016$	$84,909 \pm 0,019$	$115,649 \pm 0,022$

	R^2	0,93	0,88	0,77
Dubinin-Radushkevich	q_m (mg/g)	$0,000467 \pm 0,017$	$0,00132 \pm 0,014$	$0,581 \pm 0,019$
	βd (mol ² /kJ ²)	$4,27 \pm 0,32$	$4,87 \pm 0,21$	$5,43 \pm 0,08$
	E (kJ/mol)	$0,342 \pm 1,31$	$0,320 \pm 1,21$	$0,303 \pm 1,08$
	R^2	0,98	0,99	0,96

Jadvalni tahlil qildigan bo'lsak, o'tkazilgan tadqiqot natijalari Lengmyur, Freyndlix, Temkin va Dubinin–Radushkevich (D–R) izoterma modellari asosida DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlarining Zn^{2+} ionlariga nisbatan adsorbsion xususiyatlari ko'rsatkichlarini baholash imkonini berdi.

Lengmyur modeli bo'yicha olingan natijalarga ko'ra, maksimal adsorbsiya sig'imi (q_{max}) DB uchun 10,68 mg/g, DB10 uchun 25,2 mg/g va DB-Ipak uchun 91.12 mg/g ni tashkil etdi.

Freyndlix modeli asosida olingan natijalarni tahlil qiladigan bo'lsak, K_F qiymatlari adsorbentning adsorbatga bo'lgan sig'imini ifodalashi va K_F qiymatlari DB 14,028 mg/g, DB10 27,352 mg/g va DB-Ipak 64,565 mg/g bo'lishi DB-Ipak eng yuqori adsorbsion sig'imga ega ekanligini ko'rsatadi. K_F qiymatlarining yuqori bo'lishi adsorbent yuzasida adsorbatni ushlab qolish xususiyati yuqori bo'lishi va adsorbent va adsorbat o'rtasidagi o'zaro ta'sir kuchini yuqori bo'lishini bildiradi [10]. Bu esa ipak fibroin kiritilishi natijasida adsorbent yuzasi funksional guruhlar bilan boyiganligini anglatadi.

Umuman olganda, olingan natijalar DB-Ipak adsorbenti rux (II) ionlarini yutish bo'yicha eng yuqori samaradorlikka ega ekanligini ko'rsatadi. Adsorbsiya jarayoni asosan Lengmyur va Freyndlix modellari mos keladi. Bunda Lengmyur modeli bo'yicha adsorbsiya jarayoni monomolekulyar, fizik tabiatli va energetik jihatdan qulay jarayon sifatida tavsiflanadi. Freyndlix modelida esa adsorbsiya jarayoni o'rtacha konsentratsiyalar uchun to'g'ri natijalar berishini anglatadi.

XULOSA. Olingan natijalarga ko'ra DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlarining pH_{pzc} qiymatlari mos ravishda 7,75; 6,85 va 7,3 ga teng ekanligi aniqlandi. Bu ko'rsatkichlar adsorbent yuzasining zaryad holati pH muhitiga kuchli bog'liqligini bildiradi. rux (II) ionlarining DB, DB10 va DB-Ipak adsorbentlarida adsorbsiyasi asosan Lengmyur tipidagi L-izotermaga mansubligini aniqlandi. Bu esa jarayonning monoqavatli adsorbent yuzasida cheklangan va bir xil energiyaga ega faol markazlarning ko'pligi bilan izohlanadi. Shuningdek, Lengmyur modeli bo'yicha maksimal adsorbsiya sig'imi (q_{max}) DB uchun 10,68 mg/g, DB10 uchun 25,2 mg/g va DB-Ipak uchun 91,12 mg/g ni tashkil etib, DB-Ipak adsorbenti sezilarli darajada yuqori sig'imga ega ekanligi aniqlangan.

Freyndlix modeli asosida K_F qiymatlari DB (14,028 mg/g), DB10 (27,352 mg/g) va DB-Ipak (64,565 mg/g) bo'yicha adsorbsiya qobiliyatining ortib borishini ko'rsatadi. Bu esa DB-Ipak yuzasida faol funksional guruhlar ko'payganini va Zn^{2+} ionlari bilan o'zaro ta'sir kuchayganini ko'rsatadi. Temkin va D–R modellari esa adsorbsiya jarayonida adsorbent–adsorbat o'zaro ta'siri va mexanizmning ko'proq fizikaviy tabiatga yaqin ekanligi bilan

Qo‘qon DPI. Ilmiy xabarlar 2026-yil 4-son _____ *A seriya*
izohlanadi. Shunday qilib, DB-IPak adsorbentini oqova suvlarni rux (II) ionlaridan tozalashda istiqbolli adsorbent sifatida qo‘llash tavsiya etiladi.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Nasira W., Muhammad S., Muhammad I., Akhtar M., Muhammad S., Manzar Z., Amir W. Synthesis, Characterization, And Applications Of Silk/Bentonite Clay Composite For Heavy Metal Removal From Aqueous Solution. Sec. Green and Sustainable Chemistry Volume 7 - 2019 | <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00654>

2. Wen-Jing S., Qian-Tong T., Tian-Hao L., Ri-Dong F., Gao-Ge S., Yun-zhi T. Adsorption performance of bentonite and clay for rux (II) in landfill leachate. Sun et al. Geoenvironmental Disasters (2024) 11:4 <https://doi.org/10.1186/s40677-023-00265-2>

3. Ezel U., Tugba H.S., Nalan E.A., Gulhayat N.S. Removal of zinc from wastewaters using Turkish bentonite and artificial neural network [ANN] modeling. Heliyon. Volume 10, Issue 20 e39080 October 30, 2024

4. Ponnusamy S.K., Anbalagan S., Kodyingil A.K., Ramesh Y., Sridharan V. Removal of toxic zinc from water/wastewater using eucalyptus seeds activated carbon: non-linear regression analysis. IET Nanobiotechnology. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2015.0087>

5. Kanogwan T., Lupong K., Asadullaha. Enhancement of Adsorption Efficiency of Heavy Metal Cu(II) and Rux (II) onto Cationic Surfactant Modified Bentonite. Journal of Environmental Chemical Engineering Volume 6, Issue 2 April 2018, Pages 2821-2828. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.030>

6. Kubilay S., Gürkan R., Savran A., Sahan T. Removal of Cu(II), Rux (II) and Co(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto natural bentonite. Adsorption (2007) 13: 41–51 DOI 10.1007/s10450-007-9003-y.

7. Bamidele I.O., Emmanuel I.U. Adsorption of Zn^{2+} and Cu^{2+} onto sulphate and phosphate-modified bentonite. Applied Clay Science 51 (2011) 170–173. doi:10.1016/j.clay.2010.10.022

1. El-Sayed H., Khaled S., Merit R., Mohammed Y., Nagui A.K., Mohammed A.K. Surface modified bentonite mineral as a sorbent for Pb^{2+} and Zn^{2+} ions removal from aqueous solutions. Physicochem. Probl. Miner. Process. 2020;56(6):145-157. <https://doi.org/10.37190/ppmp/127833>

2. Khandamov D.A., Kurniawan T.A., Bekmirzayev A.SH., Eshmetov R.J., Nurullaev Sh.P., Babakhanova Z., Batool F., AbdulKareem-A.G. Cu^{2+} removal from synthetic wastewater using amine-modified bentonites: Kinetics and thermodynamic study based on multilinear regression (MLR) modeling. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2024, 105481. P.1-12. doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105481.

3. Muminov S.Z., Khandamov D.A., Rakhimova G.B. The equilibrium benzene vapor adsorption on alkylammonium montmorillonites. Colloid Journal. 2015. №77. P.668–671.