

UO‘K: 628.316.12:66.081.3

<https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2026-2.05>

ORGANOBENTONIT QATLAMIDA DINAMIK (KOLONNALI) ADSORBSIYA VA TO‘YINISH EGRI CHIZIQLARINI MODELLASHTIRISH

Latipov Shahboz Alisher o‘g‘li¹ - texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent, E-mail: shakhboz2016@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4237-9034, Science ID: FQD-1125-0066

Tog‘ayev Hasan Abdivohid o‘g‘li² – assistant, E-mail: togayevhasan1997@gmail.com, ORCID: 0009-0001-3292-5839, Science ID: MQD-0526-0330

Shukrullayev Doniyor Dilshodovich¹ – assistant, E-mail: doniyortop@gmail.com, ORCID: 0009-0000-1323-7929, Science ID: MQD-0626-0177

¹Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O‘zbekiston

²Iqtisodiyot va pedagogika universiteti, Qarshi, O‘zbekiston

Annotatsiya. Mazkur maqolada suv tarkibidagi neft mahsulotlarini samarali ajratib olish maqsadida organobentonit adsorbentining dinamik adsorbsiya jarayonlari tadqiq etilgan. Tajribalar uzluksiz ishlovchi kolonna sharoitida olib borilib, adsorbsiya samaradorligiga ta‘sir etuvchi asosiy omillar–adsorbent qatlamining balandligi, filtratsiya jarayonidagi hajmiy sarf hamda ifloslantiruvchi moddaning boshlang‘ich konsentratsiyasi kompleks ravishda baholangan. Olingan natijalar asosida breakthrough (to‘yinish) egri chiziqlari qurilib, adsorbsiya jarayonining kinetik va massa almashinish qonuniyatlari tahlil qilingan. Tadqiqot davomida adsorbsiya kolonnasining ishlash samaradorligini prognozlash va tavsiflash uchun Thomas, Yoon–Nelson, Adams–Bohart hamda BDST (Bed Depth Service Time) matematik modellari qo‘llanilgan. Modellar yordamida organobentonitning dinamik adsorbsiya sig‘imi, kolonnaning xizmat muddati hamda optimal ekspluatatsion ko‘rsatkichlari aniqlangan. Natijalar adsorbent qatlam balandligining ortishi bilan massa almashinish zonasining kengayishi va kolonnaning ishlash davomiyligi uzayishini, hajmiy sarfning oshishi esa adsorbsiya samaradorligining ma‘lum darajada pasayishiga olib kelishini ko‘rsatdi. Hisob-kitoblar va eksperimental ma‘lumotlar asosida organobentonitning maksimal dinamik adsorbsiya sig‘imi 57 mg/g ni tashkil etishi aniqlangan. Shu bilan birga, bo‘sh qatlamda kontakt vaqti (EBCT) uchun optimal qiymat 20 daqiqa, filtrlash tezligi esa 5 m/soat deb belgilangan. Tadqiqot natijalari organobentonit asosidagi adsorbentlardan neft mahsulotlari bilan ifloslangan oqova suvlarni tozalash texnologiyalarida samarali foydalanish mumkinligini ko‘rsatadi hamda sanoat miqyosidagi adsorbsion qurilmalarni loyihalash uchun ilmiy-amaliy asos bo‘lib xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: dinamik adsorbsiya, to‘yinish egri chizig‘i, Thomas modeli, Yoon–Nelson, BDST, EBCT, organobentonit.

УДК: 628.316.12:66.081.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ (КОЛОННОЙ) АДСОРБЦИИ И КРИВЫХ НАСЫЩЕНИЯ В СЛОЕ ОРГАНОВЕНТОНИТА

Латипов Шахбоз Алишер угли¹ – доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент

Тогаев Хасан Абдивохид угли² – ассистент

Шукруллаев Дониёр Дилшодович¹ – ассистент

¹Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

²Университет экономики и педагогики, г. Карши, Узбекистан

Аннотация. В данной статье исследованы процессы динамической адсорбции нефтепродуктов на органобентонитовом адсорбенте с целью эффективной очистки водных сред от нефтяных загрязнений. Экспериментальные исследования проводились в условиях непрерывной работы адсорбционной колонки. Комплексно изучено влияние основных технологических параметров, включая высоту слоя адсорбента, объемный расход фильтруемой жидкости и начальную концентрацию нефтепродуктов, на характер кривых проскока (breakthrough curves) и эффективность процесса адсорбции. На основе полученных

экспериментальных данных были построены кривые насыщения и проведен анализ кинетики массопереноса в адсорбционном слое. Для математического описания процесса и прогнозирования эксплуатационных характеристик колонки использованы модели Thomas, Yoon–Nelson, Adams–Bohart и BDST (Bed Depth Service Time). Применение указанных моделей позволило определить динамическую адсорбционную емкость органобентонита, продолжительность эффективной работы слоя и оптимальные условия эксплуатации адсорбционной системы. Результаты исследований показали, что увеличение высоты адсорбционного слоя способствует продлению времени проскока и повышению эффективности удаления нефтепродуктов, тогда как увеличение объемного расхода приводит к сокращению времени контакта и снижению степени очистки. Установлено, что максимальная динамическая адсорбционная емкость органобентонита составляет 57 мг/г. Оптимальное значение времени контакта в пустом слое (EBCT) составило 20 минут, а оптимальная скорость фильтрования – 5 м/ч. Полученные результаты подтверждают перспективность применения органобентонитовых адсорбентов для очистки нефтесодержащих сточных вод и могут быть использованы при проектировании и оптимизации промышленных адсорбционных установок.

Ключевые слова: динамическая адсорбция, кривая насыщения, модель Томаса, Юн-Нельсон, БДСТ, ЭБСТ, органобентонит.

UDC: 628.316.12:66.081.3

MODELING OF DYNAMIC (COLUMN) ADSORPTION AND BREAKTHROUGH CURVES IN AN ORGANOBEENTONITE BED

Shahboz Latipov¹, doctor of philosophy in technical sciences, associate professor

Hasan Togayev², assistant

Doniyor Shukrullayev¹, assistant

¹Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

²University of Economics and Pedagogy, Karshi, Uzbekistan

Abstract. This study investigates the dynamic adsorption of petroleum hydrocarbons in an organobentonite adsorption bed for the effective treatment of oil-contaminated water. Experimental investigations were carried out in a continuous-flow fixed-bed column system. The effects of key operational parameters, including bed height, volumetric flow rate, and initial pollutant concentration, on the breakthrough behavior and adsorption performance were comprehensively evaluated. Based on the experimental results, breakthrough curves were constructed and the mass-transfer characteristics of the adsorption process were analyzed. To describe the adsorption dynamics and predict column performance, the Thomas, Yoon–Nelson, Adams–Bohart, and BDST (Bed Depth Service Time) models were applied. These models enabled the determination of the dynamic adsorption capacity of organobentonite, service time of the adsorption bed, and optimal operating conditions of the fixed-bed system. The results demonstrated that increasing the bed height prolonged the breakthrough time and enhanced pollutant removal efficiency, whereas increasing the volumetric flow rate reduced the contact time between the adsorbate and adsorbent, resulting in lower adsorption performance. The maximum dynamic adsorption capacity of organobentonite was determined to be 57 mg/g. The optimal empty bed contact time (EBCT) was found to be 20 minutes, while the optimal filtration velocity was established at 5 m/h. The findings indicate that organobentonite is a promising adsorbent for the treatment of petroleum-contaminated wastewater and provide a scientific basis for the design, optimization, and scale-up of industrial adsorption systems.

Keywords: dynamic adsorption, breakthrough curve, Thomas model, Yoon–Nelson, BDST, EBCT, organobentonit.

Kirish

Sanoat korxonalarida hosil bo'ladigan oqova suvlarning tarkibida neft mahsulotlari miqdori ko'pincha 20–500 mg/l, ayrim neftni qayta ishlash va neft-gaz sanoati korxonalarida esa 1000 mg/l gacha yetishi mumkin [1, 2]. Amaldagi ekologik me'yorlarga ko'ra, suv havzalariga tashlanadigan oqova suv tarkibidagi neft mahsulotlari miqdori odatda 0,05–0,3 mg/l dan oshmasligi talab etiladi. Shu sababli adsorbsiya usuli chuqur tozalash bosqichi sifatida keng qo'llanilib, neft mahsulotlarini 95–99% gacha kamaytirish imkonini beradi [3, 4]. Sanoat suv tozalash inshootlarida adsorbsiya jarayoni, asosan, diametri 0,3–3,0 m va balandligi 1–6 m bo'lgan uzluksiz ishlovchi kolonnali adsorberlarda amalga oshiriladi. Bunday qurilmalarda adsorbent qatlamining balandligi odatda 0,5–2,5 m, filtrlash tezligi esa 2–15 m/soat oralig'ida bo'ladi [3, 5]. Adsorbsiya samaradorligi adsorbent qatlamining ishlash muddati bilan baholanib, bu ko'rsatkich breakthrough (to'yinish) egri chizig'i orqali aniqlanadi. To'yinish egri chizig'i chiqish oqimidagi konsentratsiyaning kirish konsentratsiyasiga nisbati (C_t/C_0) ning vaqt bo'yicha o'zgarishini ifodalaydi. Amaliyotda breakthrough nuqtasi odatda $C_t/C_0=0,05-0,10$, to'liq to'yinish esa $C_t/C_0=0,90-0,95$ qiymatlarida qabul qilinadi [6, 7].

Ko'plab tadqiqotlar natijalariga ko'ra, adsorbent qatlamining balandligi 0,5 m dan 1,5 m gacha oshirilganda breakthrough vaqti 2–4 barobar uzayishi mumkin. Masalan, 25 sm balandlikdagi qatlamda breakthrough 120 daqiqada kuzatilsa, 75 sm balandlikdagi qatlamda ushbu ko'rsatkich 350–450 daqiqagacha yetadi. Filtrlash tezligi 3 m/soatdan 10 m/soatgacha oshirilganda esa adsorbsiya samaradorligi 15–30% ga kamayishi va adsorbentning ishlash muddati 2 martagacha qisqarishi mumkin. Shuningdek, boshlang'ich konsentratsiyaning 50 mg/l dan 200 mg/l gacha ortishi adsorbentning tezroq to'yinishiga olib kelib, breakthrough vaqtini 40–60% ga kamaytiradi [8, 9].

Dinamik adsorbsiya jarayonlarini matematik modellash tirish adsorberlarni loyihalash va sanoat sharoitida ekspluatatsiya qilishda muhim ahamiyatga ega. Xususan, Thomas modeli adsorbentning maksimal dinamik sig'imini aniqlashda, Yoon–Nelson modeli 50% breakthrough vaqtini prognozlashda, Adams–Bohart modeli massa almashinish zonasining boshlang'ich bosqichini tavsiflashda, BDST modeli esa qatlam balandligi va xizmat muddati o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlashda keng qo'llaniladi [6, 7, 9, 10]. Ushbu modellar yordamida adsorbentning dinamik sig'imi 30–150 mg/g diapazonda, bo'sh qatlamdagi kontakt vaqti (EBCT) 5–30 daqiqa oralig'ida hamda optimal filtrlash tezligi 3–8 m/soat chegarasida ekanligi aniqlangan [8, 10]. Shu bois neft mahsulotlari bilan ifloslangan oqova suvlarni adsorbsion tozalash jarayonlarida to'yinish egri chiziqlarini chuqur tahlil qilish, massa almashinish parametrlarini aniqlash hamda matematik modellar asosida adsorberlarning ishchi siklini prognozlash texnologik samaradorlikni 20–35% ga oshirish, adsorbent sarfini 15–25% ga kamaytirish va ekspluatatsiya xarajatlarini sezilarli darajada qisqartirish imkonini beradi.

Materiallar va uslublar

Tajribalar organobentonit bilan to'ldirilgan shisha kolonnada o'tkazildi. Qatlam balandligi 10–40 sm, filtrlash tezligi 3–7 m/soat, boshlang'ich konsentratsiya 50–150 mg/l oralig'ida o'zgartirildi. Kolonna chiqishidagi konsentratsiya vaqt bo'yicha o'lchanib, $C/C_0 \sim t$ ko'rinishidagi to'yinish egri chiziqlari qurildi. Bo'sh qatlam kontakt vaqti (EBCT) quyidagicha hisoblandi [11]:

$$EBCT = V_{\text{qatlam}} / Q = (A \cdot H) / Q. \quad (1)$$

To'yinish egri chizig'i Thomas va Yoon–Nelson modellari bilan tavsiflandi:

$$\ln(C_0/C_t - 1) = (k_{Th} \cdot q_0 \cdot m)/Q - k_{Th} \cdot C_0 \cdot t, \quad (2)$$

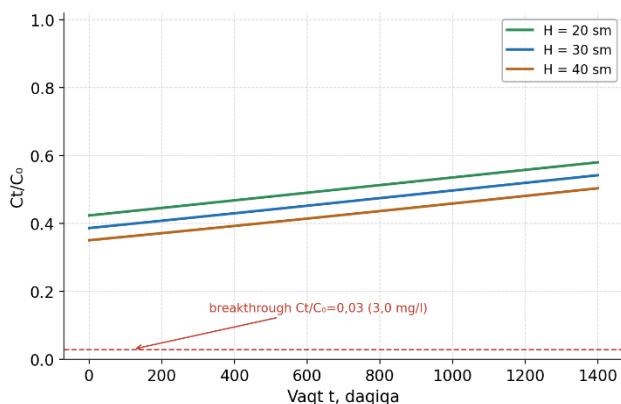
$$\ln(C_t/(C_0 - C_t)) = k_{YN} \cdot t - \tau \cdot k_{YN}. \quad (3)$$

Qatlam balandligi bo'yicha xizmat vaqti BDST modeli bilan tahlil qilindi:

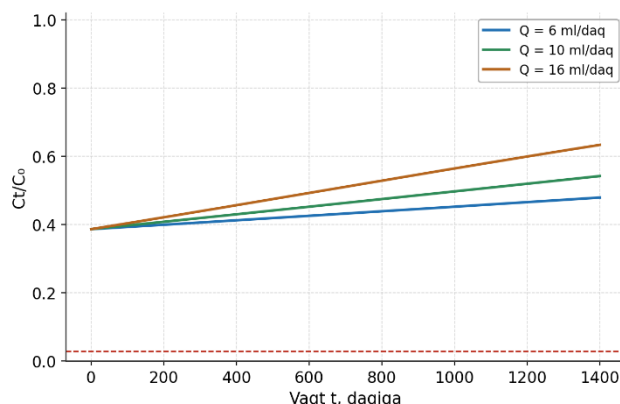
$$t = (N_0 \cdot Z)/(C_0 \cdot u) - (1/(k_b \cdot C_0)) \cdot \ln(C_0/C_b - 1). \quad (4)$$

Natijalar va muhokama

Qatlam balandligi va hajmiy sarfning to'yinish egri chizig'iga ta'siri 1a va 1b-rasmlarda keltirilgan. Qatlam balandligining oshishi breakthrough vaqtini uzaytiradi va qatlamlardan to'liqroq foydalanishni ta'minlaydi; hajmiy sarfning oshishi esa breakthroughni tezlashtiradi va massa almashinuv zonasini cho'zadi.

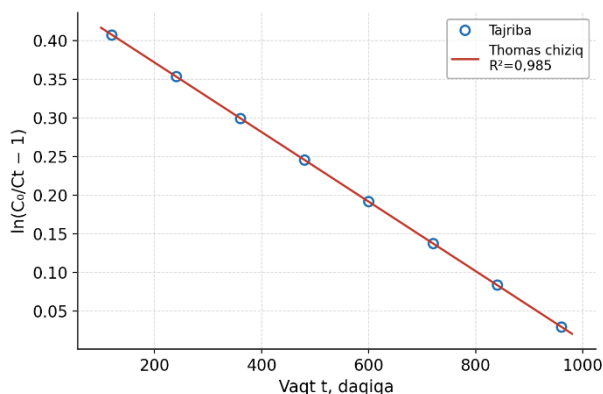


1a-rasm. Qatlam balandligining to'yinish egri chizig'iga ta'siri.

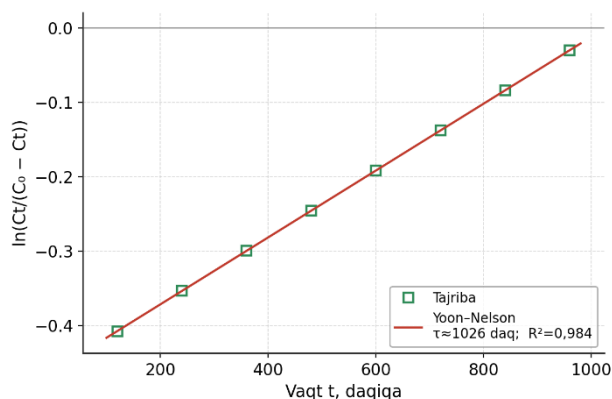


1b-rasm. Hajmiy sarfning to'yinish egri chizig'iga ta'siri.

Thomas va Yoon–Nelson modellari to'yinish egri chizig'ini yuqori aniqlik bilan ($R^2 > 0,985$) tavsifladi (2a, 2b-rasm). Thomas modelidan aniqlangan dinamik sig'im $q_d = 57$ mg/g bo'lib, bu statik maksimal sig'imning taxminan 60% ini tashkil etadi - bu dinamik jarayonlar uchun xos ko'rsatkich. Yoon–Nelson modeli 50% to'yinish vaqtini (τ) to'g'ridan-to'g'ri baholash imkonini berdi [12].



2a-rasm. Thomas modeli bo'yicha dinamik sig'imni aniqlash.



2b-rasm. Yoon–Nelson modeli bo'yicha τ ni aniqlash.

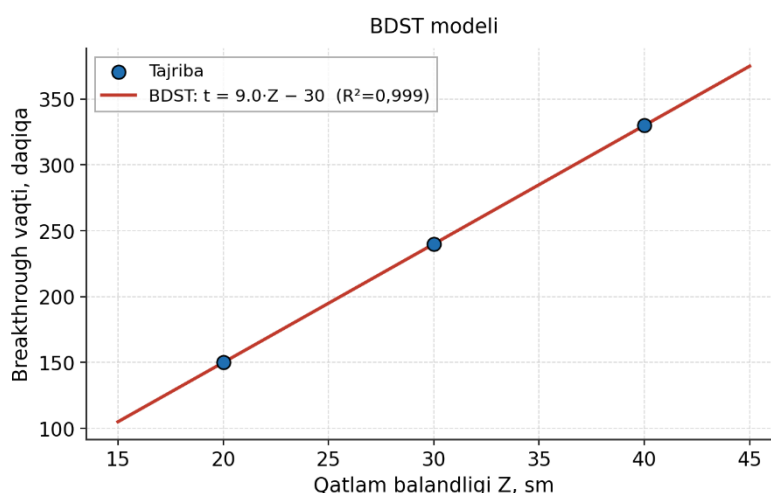
BDST (Bed Depth Service Time) modeli asosida o'tkazilgan tahlillar breakthrough vaqti hamda adsorbent qatlami balandligi o'rtasida kuchli chiziqli bog'liqlik mavjudligini ko'rsatdi. Olingan eksperimental ma'lumotlarning model bilan mosligi juda yuqori bo'lib, korrelyatsiya koeffitsiyenti $R^2 = 0,999$ ni tashkil etdi. Bu natija BDST modelining organobentonit qatlamida neft mahsulotlarining dinamik adsorbsiya jarayonini ishonchli tavsiflashini hamda sanoat adsorberlarini loyihalashda samarali vosita ekanligini tasdiqlaydi [14].

2a va 2b-rasmda keltirilgan bog'liqlikdan ko'rinib turibdiki, adsorbent qatlamining balandligi ortishi bilan breakthrough vaqti deyarli proporsional ravishda uzayadi. Bu esa adsorbent qatlamidagi faol markazlar sonining ko'payishi va adsorbat molekulalarining ushlanish ehtimoli ortishi bilan izohlanadi. Mazkur bog'liqlik yordamida adsorberning kerakli xizmat muddati uchun optimal qatlam balandligini oldindan aniqlash, shuningdek, mavjud qurilmalarni rekonstruksiya qilishda texnik-iqtisodiy jihatdan maqbul yechimlarni tanlash mumkin.

BDST modelining muhim afzalliklaridan biri kritik qatlam balandligi (Z_0) ni aniqlash imkoniyatini berishidir. Kritik qatlam balandligi adsorbent qatlamining breakthrough sodir bo'lishidan oldin samarali ishlashini ta'minlaydigan minimal balandlikni tavsiflaydi. Agar qatlam

balandligi Z_0 dan kichik bo'lsa, adsorbsiya jarayoni yetarli darajada amalga oshmaydi va tozalash samaradorligi pasayadi. Shu sababli Z_0 qiymati sanoat adsorberlarini loyihalashda asosiy konstruktiv parametr sifatida qaraladi. Bundan tashqari, massa almashinish zonasi (MTZ – Mass Transfer Zone) parametrlari ham tahlil qilindi. MTZ adsorbent qatlamining faol adsorbsiya sodir bo'layotgan qismini ifodalab, uning uzunligi adsorber samaradorligini baholashda muhim ahamiyatga ega. Tadqiqot natijalari optimal ishchi sharoitlarda massa almashinish zonasining nisbatan ixcham va barqaror shakllanishini ko'rsatdi. MTZ uzunligining qisqa bo'lishi adsorbent qatlamidan foydalanish darajasining yuqori ekanligini, adsorbent hajmining katta qismi samarali ishlayotganligini hamda breakthrough va to'liq to'yinish nuqtalari orasidagi vaqt oralig'ining optimal ekanligini bildiradi [12].

Olingan natijalar BDST modelidan foydalanib adsorberlarning xizmat muddatini prognozlash, turli qatlam balandliklari uchun breakthrough vaqtlarini oldindan hisoblash, adsorbent sarfini optimallashtirish hamda sanoat miqyosidagi neft mahsulotlari bilan ifloslangan oqova suvlarni tozalash inshootlarini ilmiy asosda loyihalash mumkinligini ko'rsatdi (3-rasm). Yuqori aniqlikdagi regressiya ko'rsatkichi ($R^2=0,999$) esa modelning amaliy qo'llash uchun yetarlicha ishonchli ekanligini tasdiqlaydi [14].



3-rasm. Qatlam balandligi bo'yicha xizmat vaqti (BDST) modeli.

Aniqlangan dinamik parametrlar sanoat miqyosidagi adsorbsion qurilmalarni loyihalashda muhim hisoblanib, adsorberlarning geometrik o'lchamlarini tanlash, adsorbent sarfini aniqlash hamda qurilmaning xizmat muddatini prognozlash uchun bevosita qo'llaniladi (1-jadval). Eksperimental va matematik modellashtirish natijalari asosida organobentonitning dinamik adsorbsiya sig'imi $q_d = 57 \text{ mg/g}$ etib aniqlanib, ushbu qiymat sanoat adsorberlarini hisoblashda asosiy loyiha parametri sifatida qabul qilindi. Mazkur ko'rsatkich adsorbentning neft mahsulotlariga nisbatan yuqori sorbsion faollikka ega ekanligini tasdiqlaydi va adsorbent qatlamining ishlash samaradorligini baholashda muhim mezon bo'lib xizmat qiladi [6, 7, 9, 10].

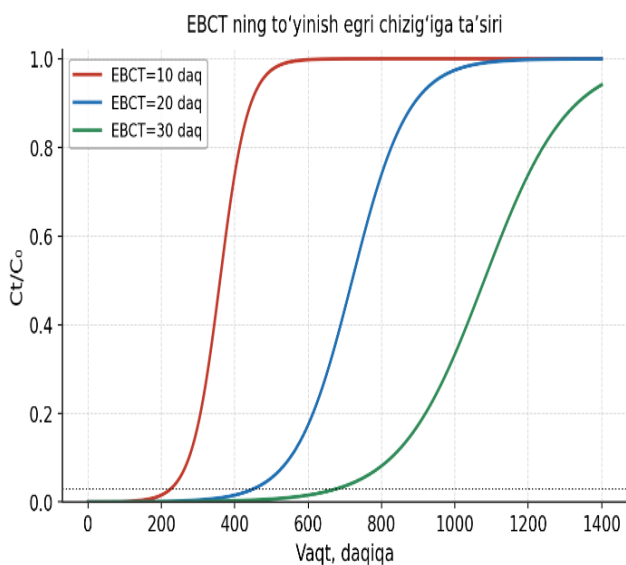
1-jadval. Dinamik adsorbsiyaning asosiy parametrlari

Parametr	Qiymat
Dinamik sig'im, qd	57 mg/g
Qatlam balandligi, H	30 sm
Bo'sh qatlam kontakt vaqti, EBCT	20 daqiqa
Filtrlash tezligi, u	5 m/soat
Thomas/Yoon–Nelson modeli, R^2	0,985
BDST modeli, R^2	0,999

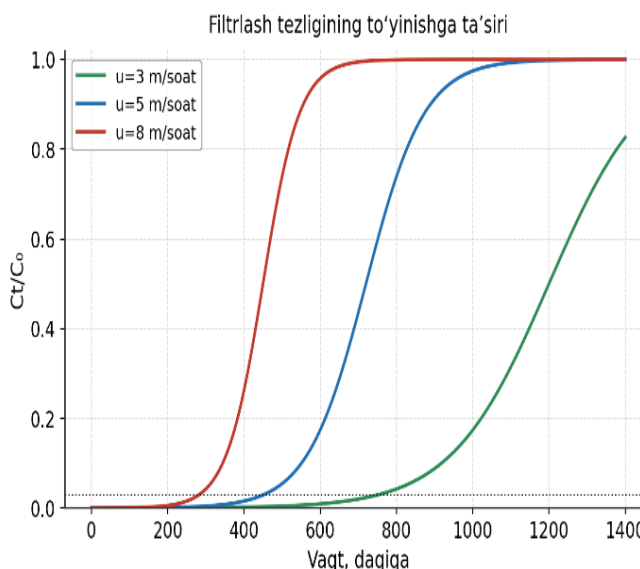
Bo'sh qatlam kontakt vaqti (EBCT) hamda filtrlash tezligining adsorbsiya jarayoniga ta'siri 4a va 4b-rasmlarda keltirilgan. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, EBCT qiymatining 5 daqiqadan 20 daqiqagacha oshirilishi adsorbat molekularining adsorbent yuzasi bilan o'zaro ta'sir vaqtini uzaytirib, massa almashinish jarayonining yanada to'liq kechishini ta'minlaydi. Natijada breakthrough vaqti sezilarli ravishda ortadi, adsorbent qatlamining foydali sig'imidan foydalanish darajasi yaxshilanadi va umumiy tozalash samaradorligi oshadi. Xususan, EBCT ning ortishi bilan breakthrough nuqtasi 1,5–2,0 martagacha kechikishi kuzatildi [11, 15].

Aksincha, filtrlash tezligining oshishi oqimning adsorbent qatlamidan o'tish vaqtini qisqartirib, adsorbatning adsorbent faol markazlariga diffuziylanish imkoniyatini kamaytiradi. Natijada massa almashinish zonasi qisqaradi, breakthrough va to'yinish nuqtalari ertaroq yuzaga keladi hamda adsorbentning umumiy foydalanish darajasi pasayadi. Tadqiqot davomida filtrlash tezligi 3–8 m/soat diapazonda o'rganilib, tezlikning ortishi bilan breakthrough vaqtining 20–35% ga qisqarishi kuzatildi [1-4].

Tahlillar asosida EBCT=20 daqqa va filtrlash tezligi $u=5$ m/soat optimal texnologik parametrlar sifatida tavsiya etildi. Ushbu rejimda adsorbsiya samaradorligi yuqori qiymatga erishib, adsorbent qatlamining ishlash muddati maksimal darajada uzayadi hamda qurilmaning konstruktiv o'lchamlari iqtisodiy jihatdan maqbul bo'lib qoladi. Shunday qilib, tanlangan optimal parametrlar adsorbsiya samaradorligi, adsorbent sarfi, energiya xarajatlari va inshootning umumiy o'lchamlari o'rtasida eng maqbul muvozanatni ta'minlaydi [11, 14, 15].

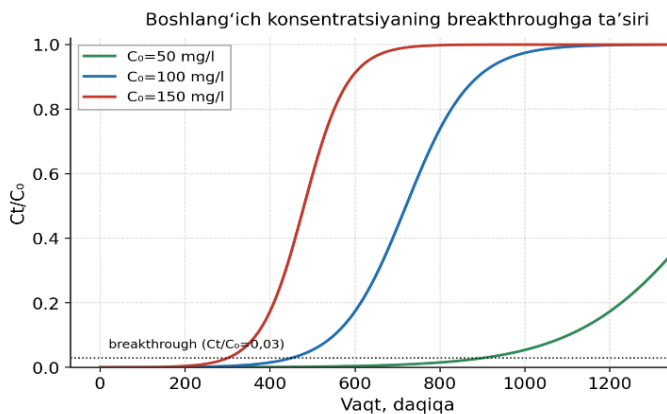


4a-rasm. EBCT ning to'yinish egri chizig'iga ta'siri.

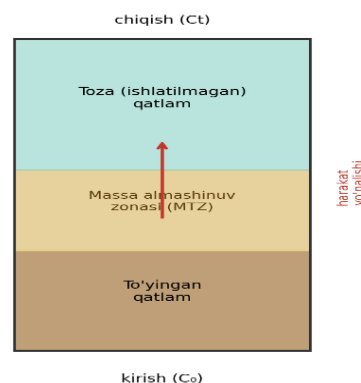


4b-rasm. Filtrlash tezligining to'yinish egri chizig'iga ta'siri.

Boshlang'ich konsentratsiyaning to'yinishga ta'siri va massa almashinuv zonasi (MTZ) sxemasi 5a va 5b-rasmlarda keltirilgan. Kirish konsentratsiyasining oshishi breakthroughni tezlashtiradi va ishchi sikl davomiyligini qisqartiradi; bu adsorbsion bosqichdan oldingi tozalashning barqaror ishlashi muhimligini tasdiqlaydi. Optimal sharoitda MTZ ning ixchamligi qatlamdan samarali foydalanishni anglatadi.



5a-rasm. Boshlang'ich konsentratsiyaning to'yinishga ta'siri.



5b-rasm. Massa almashinuv zonasi (MTZ) sxemasi

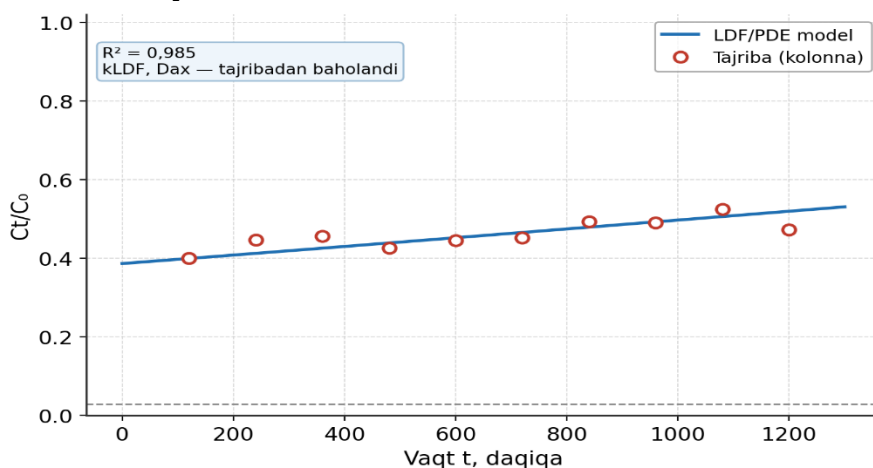
Uch dinamik modelning (Thomas, Yoon–Nelson, Adams–Bohart) qiyosi 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval. Dinamik modellarning solishtirma ko'rsatkichlari

Model	Asosiy parametrlar	R ²
Thomas	$k_{Th} = 0,52 \text{ ml}/(\text{mg} \cdot \text{daq}); q_0 = 57 \text{ mg/g}$	0,987
Yoon–Nelson	$k_{YN} = 0,051 \text{ l}/\text{daq}; \tau = 246 \text{ daq}$	0,985
Adams–Bohart	$N_0 = 12,4 \text{ g/l}; k_{AB} = 0,0009 \text{ l}/(\text{mg} \cdot \text{daq})$	0,971

Thomas va Yoon–Nelson modellari butun egri chiziqni, Adams–Bohart modeli esa to'yinishning boshlang'ich qismini eng yaxshi tavsiflaydi. Modellarning birgalikdagi qo'llanilishi dinamik jarayonni har tomonlama tavsiflash imkonini berdi.

Model bashorati va tajriba to'yinish egri chizig'ining solishtirilishi (6-rasm) ishlab chiqilgan dinamik modelning yuqori ishonchligini ko'rsatdi: bashorat qilingan va tajribada olingan egri chiziqlar bir-biriga yaqin joylashgan. Bu adsorberning ishchi sikl davomiyligini va regeneratsiya jadvalini ishonchli bashorat qilish imkonini beradi [5, 8].



6-rasm. Model bashorati va tajriba to'yinish egri chizig'ining solishtirilishi.

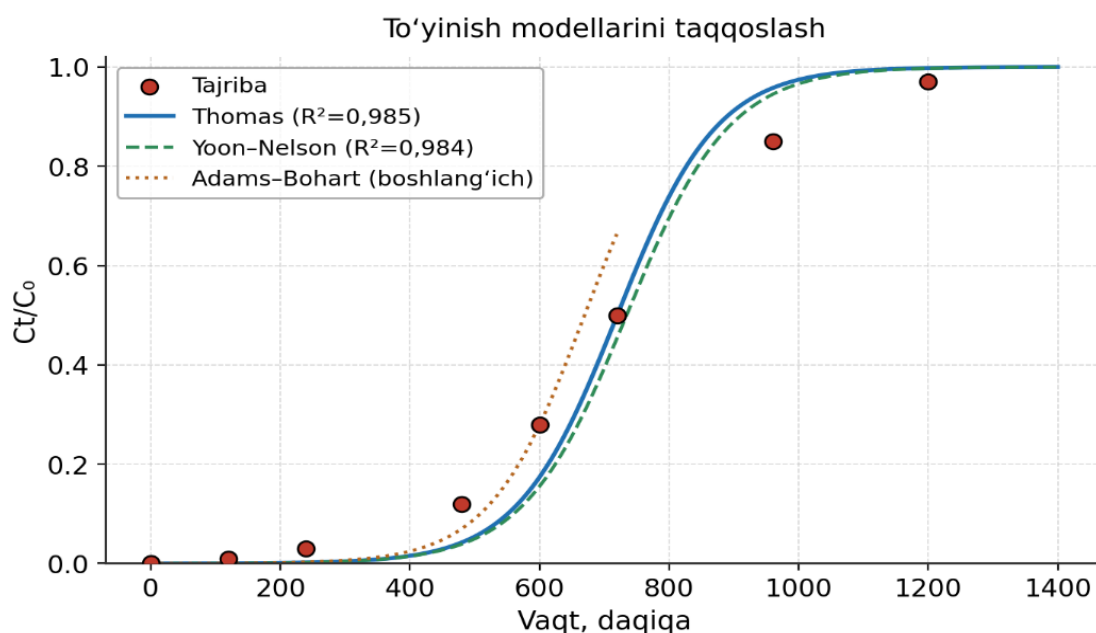
Dinamik sig'imning ($q_d = 57 \text{ mg/g}$) statik maksimal sig'imga ($q_{max} = 95 \text{ mg/g}$) nisbatan past bo'lishi - taxminan 60% - dinamik (kolonnali) jarayonlar uchun xos qonuniyat bo'lib, u kontakt vaqtining cheklanganligi va massa almashinuv qarshiligi bilan izohlanadi. Shuning uchun sanoat adsorberini loyihalashda aynan dinamik sig'im asos qilib olinishi zarur. Olingan natijalar mahalliy organobentonitning uzluksiz sanoat sharoitida barqaror ishlashini va katta hajmli oqava suvlarni samarali tozalashga qodirligini tasdiqlaydi.

To'yinish egri chizig'ini har tomonlama tavsiflash uchun uch dinamik model - Thomas, Yoon-Nelson va Adams-Bohart birgalikda qo'llanildi. Adams-Bohart modeli to'yinishning boshlang'ich qismi ($C_t/C_0 < 0,5$) uchun maxsus bo'lib, quyidagi ko'rinishga ega:

$$\ln(C_t/C_0) = k_{AB} \cdot C_0 \cdot t - k_{AB} \cdot N_0 \cdot (Z/u), \quad (5)$$

bu yerda k_{AB} -Adams-Bohart tezlik konstantasi; N_0 - hajmiy sorbsion sig'im; Z -qatlam balandligi; u -chiziqli tezlik.

Uch modelning qiyosi (7-rasm) ularning bir-birini to'ldirishini ko'rsatdi: Thomas va Yoon-Nelson modellari butun egri chiziqni yuqori aniqlik bilan ($R^2 > 0,985$) tavsifladi, Adams-Bohart modeli esa to'yinishning boshlang'ich bosqichiga ($R^2 0,971$) eng yaxshi mos keldi. Bu modellarning birgalikdagi qo'llanishi dinamik jarayonni boshidan oxirigacha ishonchli tavsiflash imkonini beradi[13].



7-rasm. To'yinish modellarini (Thomas, Yoon-Nelson, Adams-Bohart) qiyoslash.

Thomas va Yoon-Nelson modellari asosida aniqlangan parametrlar o'zaro yuqori darajada mos kelib, adsorbsiya jarayonining kinetik va dinamik xususiyatlarini ishonchli tavsiflaydi. Xususan, Thomas modeli uchun tezlik konstantasi $k_{Th}=0,52 \text{ ml} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, maksimal dinamik adsorbsiya sig'imi $q_0=57 \text{ mg/g}$ hamda Yoon-Nelson modeli bo'yicha 50 % breakthrough vaqtiga mos keluvchi $\tau=246$ daqiqa qiymatlari olindi. Ushbu parametrlarning o'zaro muvofiqligi eksperimental ma'lumotlar bilan matematik modellar o'rtasida yuqori darajadagi moslik mavjudligini ko'rsatadi va organobentonitning neft mahsulotlariga nisbatan samarali adsorbent ekanligini tasdiqlaydi [11, 13].

Aniqlangan $q_0=57 \text{ mg/g}$ qiymati adsorbentning amaliy sig'imini tavsiflab, adsorberning sorbsion imkoniyatlarini baholashda asosiy loyiha parametri hisoblanadi. $k_{Th}=0,52 \text{ ml} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ qiymati esa adsorbsiya jarayonining intensivligini ifodalab, massa almashinish jarayonlarining yetarli darajada tez kechayotganligini ko'rsatadi. Yoon-Nelson modelida aniqlangan $\tau=246$ daqiqa qiymati adsorbent qatlamining xizmat muddatini tavsiflovchi muhim ko'rsatkich bo'lib, adsorberning ekspluatatsion samaradorligini baholash imkonini beradi. Mazkur parametrlar sanoat miqyosidagi adsorbsion qurilmalarni loyihalashda bevosita qo'llaniladi. Jumladan, dinamik sig'im qiymati asosida talab etiladigan adsorbent massasi va adsorbsiya qatlamining balandligi aniqlanadi, τ parametri yordamida adsorberning ishchi sikli davomiyligi hamda breakthrough sodir bo'lishigacha bo'lgan xavfsiz ishlash vaqti hisoblanadi. Shuningdek, ushbu ma'lumotlar regeneratsiya yoki adsorbentni almashtirish davriyligini belgilash, parallel ishlovchi adsorberlar sonini tanlash va uzluksiz texnologik jarayonni tashkil etishda muhim ahamiyatga ega [11, 13, 14, 15].

Xulosa

Tadqiqot natijalari organobentonit asosidagi adsorbentning neft mahsulotlarini oqava suvlardan ajratib olishda yuqori samaradorlikka ega ekanligini ko'rsatdi. Dinamik adsorbsiya jarayoni uchun olingan eksperimental ma'lumotlar Thomas va Yoon–Nelson modellari bilan yuqori darajada mos tushib, korrelyatsiya koeffitsiyenti $R^2 > 0,985$ ni tashkil etdi. Bu esa ushbu modellar organobentonit qatlamida massa almashinish va adsorbsiya kinetikasini ishonchli tavsiflashini tasdiqlaydi. Hisoblashlar natijasida adsorbentning maksimal dinamik sig'imi 57 mg/g ekanligi aniqlanib, bu ko'rsatkich organobentonitning neft mahsulotlariga nisbatan yuqori sorbsion faollikka ega ekanligini ko'rsatadi.

Tajriba natijalariga ko'ra, bo'sh qatlamdagi optimal kontakt vaqti (EBCT) 20 daqiqa hamda filtrlash tezligi 5 m/soat etib belgilandi. Mazkur parametrlar sharoitida neft mahsulotlarini ushlab qolish samaradorligi maksimal qiymatga erishib, adsorbent qatlamining xizmat muddati uzaydi va breakthrough vaqti sezilarli darajada ortdi. Bundan tashqari, BDST (Bed Depth Service Time) modeli yordamida adsorbent qatlamining balandligi va xizmat muddati o'rtasidagi bog'liqlik baholanib, modelning aniqlik darajasi $R^2=0,999$ ni tashkil etdi. Ushbu natija BDST modelining sanoat adsorberlarini loyihalash, optimal qatlam balandligini tanlash hamda qurilmaning ishchi siklini prognozlashda yuqori ishonchlilikka ega ekanligini ko'rsatadi. Olingan natijalar organobentonitdan neft mahsulotlari bilan ifloslangan oqava suvlarni tozalashda samarali adsorbent sifatida foydalanish va adsorbsion qurilmalarni ilmiy asosda loyihalash uchun muhim amaliy ahamiyat kasb etadi.

Adabiyotlar

- [1] Metcalf & Eddy. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5th Edition. McGraw-Hill.
- [2] [U.S. EPA – Petroleum Refining Effluent Guidelines](#)
- [3] Crittenden J.C. et al. *Water Treatment: Principles and Design*. 3rd Edition.
- [4] El-Naas M.H., Alhaija M.A., Al-Zuhair S. *Evaluation of an activated carbon packed bed for the adsorption of phenols from petroleum refinery wastewater*. Chemical Engineering Journal.
- [5] Bansal R.C., Goyal M. *Activated Carbon Adsorption*. CRC Press.
- [6] Belat B., Veli S., Isgoren M. (2022). *Modeling of linear alkyl benzene sulphonic acid removal from aqueous solution with fixed bed adsorption column: Thomas and Yoon–Nelson methods*. DOI: 10.1002/jctb.7048.
- [7] Chu K.H., Hashim M.A. (2024). *Comparing different versions of the Yoon–Nelson model...* DOI: 10.1007/s11356-024-32450-7.
- [8] El-Naas M.H. et al. *Evaluation of an activated carbon packed bed for the adsorption of phenols from petroleum refinery wastewater*.
- [9] Li Y. et al. *Fixed Bed Adsorption Study on Phosphate Removal Using Nanosized FeOOH-Modified Anion Resin*. DOI: 10.1155/2013/736275.
- [10] *Novel combinatorial extensions to breakthrough curve modeling of an adsorption column*. DOI: 10.1016/j.jiec.2020.03.015.
- [11] Crittenden J.C., Trussell R.R., et al. *Water Treatment: Principles and Design*. Wiley, 2012.
- [12] Thomas H.C. (1944). *Heterogeneous Ion Exchange in a Flowing System*. Journal of the American Chemical Society, 66, 1664–1666.
- [13] Yoon Y.H., Nelson J.H. (1984). *Application of Gas Adsorption Kinetics*. American Industrial Hygiene Association Journal, 45, 509–516.
- [14] Hutchins R.A. (1973). *New Simplified Design of Activated Carbon Systems*. American Water Works Association.
- [15] Bansal R.C., Goyal M. *Activated Carbon Adsorption*. CRC Press, 2005.
- [16] Ruthven D.M. *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. Wiley, 1984.