

UO‘K: 628.35:665.6

 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.15

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

NEFT KONLARIDA FOYDALANILADIGAN TEXNIK SUVNI TOZALASHDA SORBSION-FLOTATSION JARAYONLAR KINETIKASI VA TEXNOLOGIK PARAMETRLARINI OPTIMALLASHTIRISHNING ILMIY ASOSLARI



**Tangirov Jasurbek Mixli
o'g'li**

*Texnika fanlari bo'yicha falsafa
doktori (PhD), Toshkent davlat
texnika universiteti, Toshkent,
O'zbekiston*

E-mail:

jasurtangirov0895@gmail.com
ORCID ID: 0009-0002-3624-8852
Science ID: FQD-0826-0067



**Xabibullayev Saidaziz
Shoxsuvorovich**

*Texnika fanlari bo'yicha falsafa
doktori (PhD), dotsent, Toshkent
davlat texnika universiteti, Toshkent,
O'zbekiston*

E-mail:

saidazizxonhabibullayev@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4948-9885
Science ID: FTN-0326-0044



**Amirqulov Nuritdin
Sayfullayevich**

*Texnika fanlari nomzodi, professor,
Toshkent davlat texnika universiteti,
Toshkent, O'zbekiston*

E-mail:

NuritdinAmirqulov1964@gmail.com
ORCID ID: 0009-0003-6955-0860
Science ID: FSD-0626-0090



**Muradullayev Doston
Muzaffar o'g'li**

*Stajor-o'qituvchi, Qarshi davlat
texnika universiteti, Qarshi,
O'zbekiston*

E-mail:

muradullayevdoston2@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-3381-1201
Science ID: FQD-0726-0261

Annotatsiya. Maqolada neft konlarida ishlatiladigan texnik suvni tozalash muammosi ko'rib chiqilgan bo'lib, unda neft mahsulotlari va mexanik aralashmalarni bir vaqtning o'zida yo'qotish maqsadida sorbsiya va mikropufakchali flotatsiya jarayonlari yagona texnologik yechim sifatida birlashtirilgan. Tadqiqotda flotatsiya bosqichi birinchi tartibli, sorbsiya jarayoni esa psevd-ikkinchi tartibli kinetik tenglamalar orqali tavsiflanib, ikkala jarayonni bog'lovchi umumlashtirilgan massa balans modelini taklif etilgan. Havoning sarfi, reagent konsentratsiyasi va kontakt vaqti kabi asosiy texnologik omillar javob sirti usuli yordamida optimallashtirilgan. Mavjud tajriba natijalarini qayta tahlil qilish orqali pufakcha o'lchami, ion kuchi va sorbent qatlami parametrlarining tozalash samaradorligiga ta'siri miqdoriy baholangan. Olingan natijalar sanoat sharoitida energiya va reagent sarfini minimal darajaga tushirish bilan birga yuqori tozalash darajasiga erishish imkonini beruvchi optimal texnologik rejimni aniqlashga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: neftli oqova suv, sorbsiya, flotatsiya, mikropufakcha, bentonit, Fe_3O_4 , kinetika, javob sirti usuli, optimallashtirish, mexanik aralashmalar.

Received: 10.08.2026

Accepted: 29.08.2026

Issue publication: 28.09.2026

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КИНЕТИКИ СОРБЦИОННО-ФЛОТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОЧИСТКЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОДЫ, ИСПОЛЪЗУЕМОЙ НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Тангиров Жасурбек
Михли угли

Доктор философии по
техническим наукам (PhD),
Ташкентский государственный
технический университет,
Ташкент, Узбекистан

Хабибуллаев Саидазиз
Шохсусорович

Доктор философии по
техническим наукам (PhD),
доцент, Ташкентский
государственный технический
университет, Ташкент,
Узбекистан

Амиркулов Нуритдин
Сайфуллаевич

Кандидат технических наук,
профессор, Ташкентский
государственный технический
университет, Ташкент,
Узбекистан

Мурадуллаев Достон
Музаффар угли

Стажёр-преподаватель,
Каршинский государственный
технический университет,
Карши, Узбекистан

Аннотация. В статье рассматривается проблема очистки технической воды, используемой на нефтяных месторождениях, в рамках которой процессы сорбции и микропузырьковой флотации объединены в единое технологическое решение с целью одновременного удаления нефтепродуктов и механических примесей. В исследовании стадия флотации описана кинетическим уравнением первого порядка, а процесс сорбции — псевдо-второго порядка, при этом предложена обобщённая модель массового баланса, связывающая оба процесса. Основные технологические факторы, такие как расход воздуха, концентрация реагента и время контакта, оптимизированы с использованием метода поверхности отклика. Путём повторного анализа имеющихся экспериментальных данных количественно оценено влияние размера пузырьков, ионной силы и параметров слоя сорбента на эффективность очистки. Полученные результаты служат для определения оптимального технологического режима, позволяющего достичь высокой степени очистки при минимальных затратах энергии и реагентов в промышленных условиях.

Ключевые слова: нефтесодержащие сточные воды, сорбция, флотация, микропузырьки, бентонит, Fe_3O_4 , кинетика, метод поверхности отклика, оптимизация, механические примеси.

SCIENTIFIC FOUNDATIONS OF THE KINETICS OF SORPTION- FLOTATION PROCESSES AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR THE PURIFICATION OF TECHNICAL WATER USED IN OIL FIELDS

Tangirov Jasurbek
Mikhli ugli

Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Tashkent State
Technical University, Tashkent,
Uzbekistan

Khabibullayev Saidaziz
Shokhsuvorovich

Doctor of Philosophy (PhD) in
Technical Sciences, Associate
Professor, Tashkent State Technical
University, Tashkent, Uzbekistan

Amirqulov Nuritdin
Sayfullayevich

Candidate of Technical Sciences,
Professor, Tashkent State Technical
University, Tashkent, Uzbekistan

Muradullayev Doston
Muzaffar ugli

Trainee Lecturer, Karshi State
Technical University, Karshi,
Uzbekistan

Abstract. The article addresses the problem of purifying technical water used in oil fields, in which sorption and microbubble flotation processes are combined into a unified technological solution aimed at simultaneously removing petroleum products and mechanical impurities. In the study, the flotation stage is described by a first-order kinetic equation, while the sorption process is described by a pseudo-second-order equation, and a generalized mass balance model linking both processes is proposed. Key technological factors such as air flow rate, reagent concentration, and contact time are optimized using the response surface methodology. Through a re-analysis of existing experimental data, the effects of bubble size, ionic strength, and sorbent layer parameters on purification efficiency are quantitatively assessed. The obtained results serve to determine the optimal technological regime that ensures a high degree of purification while minimizing energy and reagent consumption under industrial conditions.

Keywords: oily wastewater, sorption, flotation, microbubbles, bentonite, Fe_3O_4 , kinetics, response surface methodology, optimization, mechanical impurities.

Kirish. Neft qazib olish, tashish va qayta ishlashda foydalaniladigan texnik suvda erkin, dispers va emulsiyalangan uglevodorodlar bilan birga qum, korroziya mahsulotlari uchraydi.

Emulsiya tomchilari kichrayganda Stoks bo'yicha ko'tarilish tezligi keskin kamayadi, shu sababli gravitatsion tindirish ko'p fazali texnik suv uchun yetarli emas. Zamonaviy yechimlar koagulyatsiya-flokulyatsiya, sorbsiya, nanopufakchali flotatsiya va filtrlashni gibrid ketma-ketlikda qo'llashga yo'naltirilgan [1–5].

Nanopufakchalar katta sirt/hajm nisbati va past ko'tarilish tezligi sababli neft tomchisi-pufakcha to'qnashuvi hamda birikish ehtimolini oshiradi [2,4,6]. Bunda (5,6–9,8) m³/h oralig'ida nanopufakchali qurilmada o'rtacha neft ajratish samaradorligi (59,92–79,40)% bo'lganini qayd etgan [2]. Sorbsiya bosqichida bentonit, modifikatsiyalangan bioasosli tolalar va magnit kompozitlarni qo'llash samarali hisoblanadi. Fe₃O₄/bentonit qatlamida Thomas va Yoon–Nelson modellari tajribani R²>0,95 bilan tavsiflagan [7]; modifikatsiyalangan bentonit neft mahsulotlari bilan birga mexanik aralashmalarni ham kamaytirgan [8]. Esterifikatsiyalangan kenaf o'zagida 76% neft ajratish va R²=0,94 bo'lgan kvadratik optimallashtirish modeli olingan [9].

Mavjud ishlarda flotatsiya va sorbsiya ko'pincha alohida baholanadi; havo sarfi, reagent konsentratsiyasi, sorbent miqdori va kontakt vaqtining o'zaro kompensatsiyalanuvchi ta'siri yagona kinetik mezon bilan yetarli ifodalanmagan. Shunday ekan, ko'p fazali neftli oqova suvda sorbsiya va flotatsiya tezliklarini birlashtirib, ortiqcha energiya va reagent sarfini cheklaydigan, sanoat masshtabiga ko'chiriladigan optimallashtirish mezonini shakllantirish dolzarb masala hisoblanadi.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Tadqiqot ikkilamchi eksperimental ma'lumotlarning miqdoriy sintezi va fizik-kimyoviy modellashga asoslandi. 2021–2025-yillarda tarkibida neft bo'lgan suvni nanopufakchali flotatsiya, Fe₃O₄ bentonit, modifikatsiyalangan bentonit va bioasosli sorbentlar yordamida tozalashga bag'ishlangan, tajriba sharoiti hamda miqdoriy javoblari ochiq berilgan ishlar tanlandi [10]. Flotatsiya bosqichida neft konsentratsiyasining kamayishi birinchi tartibli samarali tezlik bilan ifodalandi. Ushbu yaqinlashuv tomchi-pufakcha to'qnashuvi, birikish va yuzaga ko'tarilish jarayonlari k_f parametri (1) orqali ifodalanadi.

$$\frac{(dC_o)}{(dt)} = -k_f C_o \quad (1)$$

bu yerda: C_o — neft konsentratsiyasi, k_f — flotatsiyaning samarali tezlik doimiysi. k_f havo sarfi Q_a, pufakcha diametri d_b, reagent konsentratsiyasi C_r, ion kuchi va gidrodinamik rejimga bog'liq. Kamayuvchi chegaraviy samarani ifodalash uchun k_f quyidagi to'yinganlik funksiyasi ko'rinishida yozildi (2):

$$k_f = k_{(max)} \cdot \frac{Q_a}{K_Q + Q_a} \cdot \frac{C_r}{K_R + C_r} \cdot f(d_b) \quad (2)$$

Sorbsiya bosqichida yuzadagi faol markazlarning bosqichma-bosqich band bo'lishini tavsiflash uchun psevd-ikkinchi tartibli kinetik shakl tanlandi (3):

$$\frac{(dq_t)}{(dt)} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (3)$$

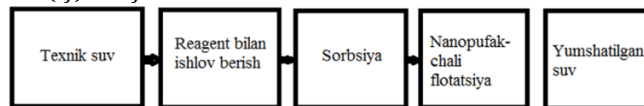
Sorbsiya va flotatsiya parallel yoki ketma-ket ta'sir qilganda suyuq fazadagi umumiy massa balansi quyidagicha yozildi:

$$\frac{(dC_o)}{(dt)} = -k_f C_o - \frac{(m_s)}{(V)k_2(q_e - q_t)^2} \quad (4)$$

bu yerda: m_s — sorbent massasi, V — suv hajmi, q_t va q_e — vaqt t dagi va muvozanatdagi sorbsiya sig'implari. (4)-tenglama sorbent yuzasida neftning to'planishi va hosil bo'lgan agregatlarning pufakcha bilan olib chiqilishini bir massa balansi doirasida ifodalaydi.

Optimallashtirish omillari: x₁ — havo sarfi, x₂ — reagent konsentratsiyasi, x₃ — kontakt vaqti. Javob Y neftni ajratish darajasi, zarur holatda muallaq moddalar bo'yicha ikkinchi javob bilan birgalikda baholanadi. Uch omilli RSM uchun ikkinchi darajali model:

$$Y = \beta_0 + \sum_i \beta_i x_i + \sum_i \beta_{(ii)} x_i^2 + \sum_{(i < j)} \beta_{(ij)} x_i x_j \quad (5)$$



1-rasm. Sorbsion-flotatsion tozalashning integrallashgan kinetik sxemasi.

Optimal rejim ko'p mezonli desirability bo'yicha tanlanadi: ajratish darajasi maksimal, havo va reagent sarfi minimal, kontakt vaqti esa apparat unumdorligini cheklamaydigan bo'lishi kerak. Shuning uchun optimal nuqta omillarning yuqori chegarasida emas, qo'shimcha resursga nisbatan samara o'sishi sekinlashadigan javob sirtining pastki qismida izlanadi. Quyida Sorbsion-flotatsion

tozalashning integrallashgan kinetik sxemasi (1-rasm) keltirilgan.

Natijalar. Tadqiqot natijalariga ko'ra to'rtta qonuniyat ishlab chiqildi: (1) pufakcha kichrayishi to'qnashuvni yaxshilaydi, lekin ortiqcha gaz yuklamasi koalesensiyani kuchaytiradi; (2) sorbsiya qatlamida oqim tezligi pasayishi kontakt vaqtini va q_e ni oshiradi; (3) boshlang'ich konsentratsiya ortishi sig'imni oshiradi, ammo yorib chiqishni tezlashtiradi; (4) sorbentni gidrofob modifikatsiyalash selektivlikni oshiradi, biroq maksimal reagent sarfi iqtisodiy optimal emas. Quyidagi 1-jadvalda texnik suvni tozalashda sorbsion-flotatsion jarayonlar kinetikasi va texnologik parametrlarini optimallashtirishning ilmiy asoslari keltirilgan.

1-jadval

Texnik suvni tozalashda sorbsion-flotatsion jarayonlar kinetikasi va texnologik parametrlarini optimallashtirishning ilmiy asoslari

Usul va sharoit	Haqiqiy natija	Texnologik talqin
Mikropufakchali flotatsiya; pH va NaCl ta'siri	Nanopufakcha samarasi yirikroq pufakchaga nisbatan 1,72 marta yuqori; pH≈3 da ~75%; 1 g/L NaCl da ~84%	Pufakcha o'lchami va ion kuchi birikish ehtimolini boshqaradi; tuzning ortiqcha dozasi samara pasayishiga olib keladi.
Modifikatsiyalangan bentonit; neftli oqova suv	20°C da neft mahsulotlari ajralishi (99,67–99,90)%; mexanik aralashmalar bo'yicha ~80% gacha	Sorbentning sirt xossalari yuqori ajratish beradi, biroq komponentlar bo'yicha kinetika bir xil emas.
Fe ₃ O ₄ /bentonit; Q=(3,0–3,8) mL/min; qatlam (2–4) cm	Q: q_e 129,14→88,10 mg/g; qatlam: q_e 93,71→121,25 mg/g; t_b 40→95 min	Oqim–kontakt vaqti va qatlam–faol markazlar o'rtasida muvozanat talab qilinadi.
Esterifikatsiyalangan kenaf; CCD/RSM	Optimal tajribada 76% neft ajratish; R ² =0,94	Gidrofob modifikatsiya samarali, lekin 1 soatlik ishlov iqtisodiy jihatdan yetarli deb topilgan.

Kenaf o'zagini stearin kislotasi bilan 1:0,5 nisbatda, 15% katalizator va 1 soat qizdirishda 76% neft ajratishga erishgan; xom kenafda 51% bo'lgan [9]. Nisbiy yaxshilanish 49,0% ni tashkil etadi, biroq modifikatsiya bosqichining o'zi ham iqtisodiy optimallashtirilishi kerak.

Muhokama. Natijalar sorbsion-flotatsion jarayon uchta ketma-ket qarshilik bilan boshqarilishini ko'rsatadi: neftning sorbent/agregat sirtiga massa ko'chishi, neft tomchisi–sorbent–pufakcha kompleksining hosil bo'lishi va kompleksning flotokonsentratga ko'tarilishi. Shu sababli (4)-tenglamadagi sorbsiya va flotatsiya

tezlik hadlari nisbatini texnologik rejimning asosiy kinetik mezoni sifatida qarash mumkin.

Kichik pufakchalarning soni va umumiy sirt maydoni ortib, ularning ko'tarilish tezligi kamayadi; bu neft tomchilari bilan to'qnashuv ehtimolini oshiradi. Biroq havo sarfi ortiqcha bo'lsa, turbulentlik va koalesensiya kuchayadi. Shu sababli (2)-tenglamadagi to'yinganlik shakli fizik ma'noga ega bo'lib, DAF/IGF tizimlari uchun «ko'proq havo — doimo yaxshiroq» yondashuvini rad etadi.

Sarran va hammualliflarning natijalarida oqim tezligi kamayganda q_e ning 46,6% ga ortishi diffuziya uchun ko'proq vaqt ajratilishi, qatlam balandligi oshganda esa faol markazlar va massa almashinish zonasi ko'payishi bilan izohlanadi. Yuqori boshlang'ich konsentratsiya q_e ni oshirgan bo'lsa-da, yorib chiqishning 73,7% ga tezlashishi q_e va t_b javoblarini birgalikda optimallashtirish zarurligini ko'rsatadi.

Xulosa. Sorbsiya va mikropufakchali flotatsiyani yagona kinetik tizim sifatida ko'rish ko'p fazali neftli oqova suvlarni tozalash uchun asosli: sorbsiya tomchi/agregat sirtini o'zgartiradi, flotatsiya esa hosil bo'lgan ifloslantiruvchi fazani tez ajratadi.

Nashr etilgan Fe₃O₄ bentonit ma'lumotlari qayta hisobida oqimni 3,8 dan 3,0 mL/min gacha kamaytirish q_e ni 46,6%, qatlamni 2 dan 4 cm gacha oshirish 29,4% ko'paytirdi; 200→1000 mg/L boshlang'ich konsentratsiya q_e ni 122,2% oshirgan holda yorib chiqish vaqtini 73,7% qisqartirdi.

Nanopufakcha o'lchami, ion kuchi, reagent miqdori va kontakt vaqti uchun maksimal emas, optimal oraliq mavjud. Shu bois sanoat rejimi tozalash talabini bajaradigan minimal yetarli havo va reagent sarfi hamda unumdorlikni cheklamaydigan kontakt vaqtiga asoslanishi kerak.

Ilmiy yangilik birinchi tartibli flotatsiya va psevdokkinchi tartibli sorbsiya kinetikasini yagona massa balansi orqali bog'lash hamda rejimni RSM/desirability mezonlari asosida tanlashdan iborat. Keyingi bosqichda model real neftni qayta ishlash oqova suvida CCD/RSM tajribasi orqali identifikatsiya qilinishi va sanoat sharoitida validatsiyadan o'tkazilishi zarur.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Wang, W., Zhao, X., Bai, X., Ma, X. L., Lin, W., & Yu, J. Y. (2024). Investigation of factors affecting oil-water separation efficiency in micro-bubble micro-cyclonic flow air flotation. *Journal of Water Process Engineering*, 67, 106094.
- [2] Liang, Y., et al. (2024). Oil-water separation process based on microbubble air flotation membrane device and scale-up research. *Desalination and Water Treatment*, 318, 100312.
- [3] Ding, G., Chen, J., Kong, X., Cai, X., Ji, Y., He, Q., & Wang, G. (2023). Structure design and industrial experiment of compact flotation unit for refinery wastewater treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, 194, 842–853.
- [4] Shen, W., et al. (2022). Microbubble and nanobubble-based gas flotation for oily wastewater treatment: A review. *Environmental Reviews*.
- [5] Piccioli, M., Aanesen, S. V., Zhao, H., Dudek, M., & Øye, G. (2020). Gas flotation of petroleum produced water: A review on status, challenges, and prospects. *Energy & Fuels*.
- [6] Li, Y., et al. (2025). Microbubbles enhance oil-in-water emulsion separation in fibrous coalescers. *Water Research*, 268, 122573.
- [7] Sarrañ, M. A., et al. (2024). Oily wastewater treatment by using Fe_3O_4 /bentonite in fixed-bed adsorption column. *ChemEngineering*, 8, 92.
- [8] Tleuova, S. T., Userbayeva, B. A., Tleuov, A. S., Yeskendirova, M. M., Yakubova, R. R., & Kerimbayeva, K. Z. (2021). Kinetic study of oil-containing wastewater treatment with the use of natural sorbents. *Journal of Water and Land Development*, 49, 252–258.
- [9] Alias, N. H., Abdullah, L. C., Yaw, T. C. S., Jamil, S. N. A. M., Ting, T. M., Asis, A. J., Lee, C. L., & Adeyi, A. A. (2025). Esterification of Kenaf core fiber as a potential adsorbent for oil removal from palm oil mill effluent (POME). *Processes*, 13, 463.
- [10] Al-Dulaimi, S. L., & Al-Yaqoobi, A. M. (2021). Separation of oil/water emulsions by microbubble air flotation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1076, 012030.
- [11] Medeiros, A. D. L. M., et al. (2022). Oily wastewater treatment: Methods, challenges, and trends. *Processes*, 10, 743.
- [12] Ewis, D., Benamor, A., Ba-Abbad, M. M., Nasser, M., El-Naas, M., & Qiblawey, H. (2020). Removal of oil content from oil-water emulsions using iron oxide/bentonite nano adsorbents. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101583.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Tangirov, J. M., Xabibullayev, S. S., Amirq ulov, N. S., & Muradullayev, D. M. (2026). Neft konlarida foydalaniladigan texnik suvni tozalashda sorbsion-flotatsion jarayonlar kinetikasi va texnologik parametrlarini optimallashtirishning ilmiy asoslari. *Sanoatda raqamli texnologiyalar*, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.15>
