HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

KIMYOVIY JARAYONLAR ASOSIDA SANOAT OQOVA SUVLARINI TOZALASH TEXNOLOGIYALARI: FIZIK-KIMYOVIY USULLAR VA ULARNING SAMARADORLIGI

Akbaraliyeva Gulyuzraxon Farxodjon qizi
Farg‘ona davlat texnika universiteti, Kimyo muhandisligi yo‘nalishi talabasi
E-mail: akbaraliyevagulyuzra@gmail.com
Xakimova Nigora Alisher qizi
Andijon davlat universiteti magistranti
E-mail: nigora00074@gmail.com
Isomiddinov Ibrohimjon Tojiddin o‘g‘li
Andijon davlat universiteti, Kimyo yo‘nalishi talabasi
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.24140014

Annotatsiya: Mazkur maqolada sanoat korxonalarida hosil bo‘ladigan oqova suvlarni kimyoviy jarayonlar asosida tozalashning zamonaviy fizik-kimyoviy usullari, ularning ishlash mexanizmlari va samaradorligiga ta’sir etuvchi omillar tahlil qilingan. Sanoat oqova suvlarining tarkibi ishlab chiqarish turi, texnologik jarayonlar va foydalaniladigan reagentlarga bog‘liq ravishda o‘zgarishi, ularning tarkibida og‘ir metall ionlari, organik birikmalar, neft mahsulotlari, bo‘yoqlar, muallaq zarrachalar va boshqa ifloslantiruvchi moddalar mavjud bo‘lishi yoritilgan. Koagulyatsiya-flokulyatsiya, kimyoviy cho‘ktirish, adsorbsiya, oksidlanish, ilg‘or oksidlanish jarayonlari, elektrokimyoviy tozalash hamda membranali texnologiyalarning nazariy asoslari o‘rganilgan. Har bir usulning afzalliklari, cheklovlari va sanoat sharoitida qo‘llash imkoniyatlari qiyosiy baholangan. Tahlil natijasida oqova suvlarni tozalashda yagona usuldan foydalanish har doim ham yetarli natija bermasligi, ifloslantiruvchi moddalar xususiyatiga mos ravishda bir nechta fizik-kimyoviy texnologiyalarni ketma-ket yoki kombinatsiyalangan holda qo‘llash maqsadga muvofiqligi asoslangan.

Kalit so‘zlar: sanoat oqova suvlari, fizik-kimyoviy tozalash, koagulyatsiya, flokulyatsiya, adsorbsiya, kimyoviy cho‘ktirish, oksidlanish, elektrokimyoviy jarayonlar, membranali texnologiyalar, suv resurslarini qayta ishlatish.

Аннотация: В статье анализируются современные физико-химические методы очистки промышленных сточных вод на основе химических процессов, механизмы их действия и основные факторы, влияющие на эффективность. Рассматриваются особенности состава сточных вод различных промышленных предприятий, содержащих ионы тяжелых металлов, органические соединения, нефтепродукты, красители и взвешенные частицы. Изучены теоретические основы коагуляции и флокуляции, химического осаждения, адсорбции, окисления, передовых окислительных процессов, электрохимической очистки и мембранных технологий. Проведено сравнительное рассмотрение преимуществ и ограничений указанных методов с точки зрения их применения в промышленных условиях. Обоснована целесообразность комплексного использования нескольких физико-химических методов с учетом состава загрязняющих веществ и требуемого качества очищенной воды.

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

Ключевые слова: промышленные сточные воды, физико-химическая очистка, коагуляция, флокуляция, адсорбция, химическое осаждение, окисление, электрохимические процессы, мембранные технологии, повторное использование воды.

Abstract: This article analyzes modern physicochemical methods for treating industrial wastewater through chemical processes, focusing on their mechanisms and the main factors affecting treatment efficiency. The characteristics of wastewater generated by different industrial sectors are discussed, including the presence of heavy metal ions, organic compounds, petroleum products, dyes, and suspended particles. The theoretical principles of coagulation-flocculation, chemical precipitation, adsorption, oxidation, advanced oxidation processes, electrochemical treatment, and membrane technologies are reviewed. The advantages and limitations of these methods are comparatively evaluated in terms of their industrial applicability. The analysis demonstrates that a single treatment method may not always provide sufficient purification and that the combined application of several physicochemical technologies, selected according to wastewater composition and required effluent quality, is often more appropriate.

Keywords: industrial wastewater, physicochemical treatment, coagulation, flocculation, adsorption, chemical precipitation, oxidation, electrochemical processes, membrane technologies, water reuse.

KIRISH

Suv resurslaridan oqilona foydalanish va ularni sanoat faoliyati natijasida yuzaga keladigan ifloslanishdan muhofaza qilish zamonaviy ekologik va texnologik muammolarning muhim yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Sanoat korxonalarida suv xomashyoni qayta ishlash, mahsulotlarni yuvish, sovitish, eritmalar tayyorlash, texnologik uskunalarni tozalash va boshqa ko‘plab jarayonlarda ishlatiladi. Natijada tarkibi va ifloslanish darajasi turlicha bo‘lgan oqova suvlar hosil bo‘ladi. Ularning kimyoviy tarkibi ishlab chiqarish sohasi, foydalanilgan reagentlar, texnologik rejim va xomashyo xususiyatlariga bevosita bog‘liq [1].

Kimyo, neft-gaz, metallurgiya, to‘qimachilik, oziq-ovqat, farmatsevtika, sellyuloza-qog‘oz va boshqa sanoat tarmoqlarining oqova suvlari o‘ziga xos ifloslantiruvchi moddalar bilan tavsiflanadi. Masalan, metallurgiya va galvanik ishlab chiqarish oqova suvlarida mis, rux, nikel, xrom va boshqa metall ionlari uchrashi mumkin. To‘qimachilik sanoati oqova suvlarida sintetik bo‘yoqlar, sirt-faol moddalar va organik birikmalar mavjud bo‘ladi. Neftni qayta ishlash korxonalarida esa neft mahsulotlari, fenollar, sulfidlar va boshqa organik ifloslantiruvchilar uchraydi [1, 2]. Sanoat oqova suvlarini yetarli darajada tozalamasdan tabiiy suv havzalariga chiqarish suvning fizik-kimyoviy xususiyatlarini o‘zgartirishi, suv ekotizimlariga salbiy ta’sir ko‘rsatishi va suv resurslaridan qayta foydalanish imkoniyatlarini cheklashi mumkin. Shu sababli oqova suvlarni tozalashda ifloslantiruvchi moddalarni faqat mexanik ajratish emas, balki ularning kimyoviy holatini o‘zgartirish, eruvchanligini kamaytirish, oksidlash yoki maxsus sorbentlar yordamida bog‘lashga asoslangan texnologiyalar muhim ahamiyat kasb etadi. So‘nggi yillarda sanoat oqova suvlarini tozalash bo‘yicha olib borilgan ilmiy izlanishlarda koagulyatsiya-flokulyatsiya, adsorbsiya, membranali ajratish, Fenton jarayoni, fotokatalitik oksidlanish va elektrokimyoviy texnologiyalarga alohida e’tibor qaratilmoqda[3,4]. Ushbu usullarning

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

samaradorligi oqova suvning boshlang‘ich tarkibi, pH muhiti, reagent miqdori, harorat, kontakt vaqti, elektr energiyasi sarfi va texnologik qurilmalarning konstruktiv xususiyatlariga bog‘liq.

Maqolaning maqsadi — sanoat oqova suvlarini tozalashda qo‘llaniladigan asosiy fizik-kimyoviy usullarning nazariy asoslarini o‘rganish, ularning samaradorligiga ta’sir qiluvchi omillarni tahlil qilish hamda sanoat sharoitida kompleks tozalash texnologiyalaridan foydalanishning ilmiy-amaliy ahamiyatini asoslashdan iborat.

Ushbu maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar belgilandi:

- sanoat oqova suvlarining asosiy ifloslantiruvchi komponentlari va ularning xususiyatlarini tahlil qilish;
- fizik-kimyoviy tozalash usullarining mexanizmlari hamda qo‘llanish imkoniyatlarini o‘rganish;
- usullarning afzalliklari, cheklovlari va samaradorligiga ta’sir etuvchi texnologik omillarni qiyosiy baholash.

MATERIALLAR VA METODLAR

Maqola sanoat oqova suvlarini fizik-kimyoviy tozalashga oid ilmiy adabiyotlar, zamonaviy sharh maqolalari va tadqiqot natijalarining tahliliga asoslangan. Tadqiqot jarayonida qiyosiy tahlil, ilmiy umumlashtirish, tasniflash va texnologik jarayonlarning nazariy mexanizmlarini o‘rganish usullaridan foydalanildi. Adabiyotlarni tahlil qilishda sanoat oqova suvlarini tozalash, kimyoviy cho‘ktirish, koagulyatsiya-flokulyatsiya, adsorbsiya, ilg‘or oksidlanish jarayonlari, elektrokimyoviy tozalash va membranali texnologiyalarga oid ilmiy manbalar asos qilib olindi. Xususan, Kato va Kansha (2024), Ahmed va hammualliflar (2022), Lucas va hammualliflar (2025), shuningdek, og‘ir metallarni oqova suvlardan ajratish bo‘yicha zamonaviy sharh tadqiqotlari o‘rganildi [1–4].

Fizik-kimyoviy tozalash samaradorligini baholashda ifloslantiruvchi moddaning boshlang‘ich va yakuniy konsentratsiyasi, kimyoviy kislorod sarfi (COD), muallaq moddalar miqdori, pH ko‘rsatkichi, loyqa darajasi, sorbsiya sig‘imi va texnologik xarajatlar kabi ko‘rsatkichlar nazariy jihatdan tahlil qilindi. Ifloslantiruvchi moddaning chiqarib tashlanish samaradorligi quyidagi formula orqali ifodalanadi:

[\eta=\frac{C_0-C_t}{C_0}\times100%]

Bu yerda:

- (\eta) — tozalash samaradorligi, %;
- (C_0) — oqova suvdagi moddaning boshlang‘ich konsentratsiyasi;
- (C_t) — tozalashdan keyingi modda konsentratsiyasi.

Adsorbsiya jarayonining muvozanat holatidagi sorbsiya sig‘imi esa quyidagi tenglama bilan aniqlanishi mumkin:

[q_e=\frac{(C_0-C_e)V}{m}]

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

Bu yerda (q_e) — muvozanatdagi adsorbsiya sig‘imi (mg/g), (C_0) va (C_e) — moddaning boshlang‘ich va muvozanatdagi konsentratsiyasi (mg/L), (V) — eritma hajmi (L), (m) — adsorbent massasi (g). Mazkur formulalar tozalash jarayonlarini tajriba asosida baholash uchun qo‘llaniladi. Ushbu maqolada mualliflar tomonidan bajarilgan laboratoriya tajribalariga oid natijalar keltirilmagan; samaradorlik ko‘rsatkichlari adabiyotlarda e’lon qilingan tadqiqotlar doirasida sharhlangan.

NATIJALAR

Sanoat oqova suvlarining tarkibi va ifloslantiruvchi moddalar xususiyatlari- Sanoat oqova suvlarining tarkibi ishlab chiqarish jarayoniga qarab sezilarli darajada farqlanadi. Ularning tarkibida erigan va muallaq noorganik moddalar, organik birikmalar, metall ionlari, yog‘lar, neft mahsulotlari, bo‘yoqlar, tuzlar hamda kolloid zarrachalar mavjud bo‘lishi mumkin. Ifloslantiruvchi moddalarning kimyoviy tabiati ularni ajratish va zararsizlantirish uchun qo‘llaniladigan texnologiyani belgilaydi.

1-jadval. Turli sanoat tarmoqlarida hosil bo‘ladigan oqova suvlarning asosiy ifloslantiruvchi komponentlari

Sanoat tarmog‘i	Asosiy ifloslantiruvchi moddalar	Tavsiya etiladigan fizik-kimyoviy yondashuv
Metallurgiya va galvanika	Cu^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}, Cr^{3+}/Cr^{6+}, kislota va ishqorlar	Kimyoviy cho‘ktirish, ion almashinish, membranali ajratish
To‘qimachilik	Sintetik bo‘yoqlar, sirt-faol moddalar, organik birikmalar	Koagulyatsiya, adsorbsiya, oksidlanish
Neftni qayta ishlash	Neft mahsulotlari, fenollar, sulfidlar, organik moddalar	Flotatsiya, adsorbsiya, oksidlanish
Oziq-ovqat sanoati	Yog‘lar, oqsillar, uglevodlar, muallaq moddalar	Koagulyatsiya, flotatsiya, membranali filtrlash
Kimyo va farmatsevtika	Organik reagentlar, erituvchilar, qiyin parchalanadigan birikmalar	Adsorbsiya, ilg‘or oksidlanish, membranali texnologiyalar
Sellyuloza-qog‘oz sanoati	Lignin hosilalari, rang beruvchi moddalar, organik birikmalar	Koagulyatsiya, oksidlanish, adsorbsiya

Jadvaldan ko‘rinadiki, sanoat oqova suvlarini tozalashda barcha ishlab chiqarish tarmoqlari uchun bir xil texnologiyani qo‘llash maqsadga muvofiq emas. Masalan, metall ionlari bilan ifloslangan oqova suvlarni tozalashda kimyoviy cho‘ktirish va ion almashinish samarali yondashuvlardan hisoblansa, rangli va organik birikmalarga boy oqova suvlar uchun koagulyatsiya, adsorbsiya hamda oksidlanish jarayonlari muhim ahamiyatga ega [1, 2].

Koagulyatsiya va flokulyatsiya jarayonlari- Koagulyatsiya-flokulyatsiya sanoat oqova suvlaridagi kolloid va mayda muallaq zarrachalarni yirik agregatlarga birlashtirishga asoslangan fizik-kimyoviy jarayondir. Oqova suv tarkibidagi kolloid zarrachalar ko‘pincha bir xil elektr zaryadiga ega bo‘lib, ular o‘zaro itarilish natijasida uzoq vaqt davomida muallaq holatda saqlanishi mumkin. Koagulyatsiya

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

jarayonida alyuminiy yoki temir tuzlari kabi reagentlardan foydalaniladi. Ular suvda gidrolizlanib, metall gidroksidlari va turli gidroliz mahsulotlarini hosil qiladi. Ushbu birikmalar kolloid zarrachalarning zaryadini neytrallash, ularni beqarorlashtirish va yirik agregatlarga birlashtirishda ishtirok etadi.

Masalan, alyuminiy ionlarining gidrolizlanishi quyidagi soddalashtirilgan tenglama bilan ifodalanadi:

[Al^{3+}+3H_2O\rightleftharpoons Al(OH)_3\downarrow+3H^+]

Hosil bo‘lgan alyuminiy gidroksid cho‘kmasi ifloslantiruvchi zarrachalarni o‘z yuzasiga adsorbsiyalashi va ularni yirik floklar tarkibiga biriktirishi mumkin.

Flokulyatsiya bosqichida polimer tabiatli flokulyantlar qo‘llanilib, mayda zarrachalarning yirik va cho‘kishi oson bo‘lgan agregatlarga birlashishi tezlashtiriladi. Keyinchalik hosil bo‘lgan floklar tindirish, flotatsiya yoki filtrlash orqali ajratiladi. Lucas va hammualliflarining 2025-yildagi sharh maqolasida koagulyatsiya-flokulyatsiya jarayonlarining turli sanoat oqova suvlarini tozalashdagi imkoniyatlari, koagulyantlar turlari va optimal texnologik sharoitlarning ahamiyati batafsil tahlil qilingan [3].

Ushbu usulning asosiy afzalliklari — texnologik jihatdan nisbatan sodda bo‘lishi, loyqalik va muallaq zarrachalarni kamaytirishi hamda ayrim organik va noorganik ifloslantiruvchilarni ajratishga yordam berishidir. Biroq reagent sarfi, pH muhitiga sezgirlik va hosil bo‘ladigan cho‘kmani qayta ishlash zarurati uning asosiy cheklovlari hisoblanadi.

Kimyoviy cho‘ktirish usuli

Kimyoviy cho‘ktirish sanoat oqova suvlaridagi erigan ionlarni kam eruvchan birikmalarga aylantirish orqali ajratishga asoslanadi. Mazkur usul, ayniqsa, og‘ir metall ionlari bilan ifloslangan oqova suvlarni tozalashda muhim ahamiyatga ega. Metall ionlarini gidroksid shaklida cho‘ktirish uchun oqova suvga ishqoriy reagentlar, jumladan, natriy gidroksid yoki kalsiy gidroksid qo‘shilishi mumkin. Natijada metall gidroksidlari hosil bo‘ladi:

[M^{2+}+2OH^-\rightarrow M(OH)_2\downarrow]

Bu yerda (M^{2+}) — ikki valentli metall ionini ifodalaydi.

Hosil bo‘lgan cho‘kma tindirish yoki filtrlash orqali suvdan ajratiladi. Jarayonning samaradorligi metall turiga, eritmaning pH qiymatiga, boshlang‘ich konsentratsiyaga, kompleks hosil qiluvchi moddalar mavjudligiga va cho‘kmaning fizik xususiyatlariga bog‘liq. Ayrim metall ionlari turli pH qiymatlarida cho‘kadi. Shu sababli bir nechta metall ionlari mavjud bo‘lgan oqova suvlarni tozalashda pH ni bosqichma-bosqich boshqarish talab etilishi mumkin. Bundan tashqari, xrom kabi ayrim elementlarning oksidlanish darajasini hisobga olish lozim. Masalan, Cr(VI) birikmalarini bevosita gidroksid shaklida cho‘ktirishdan oldin ularni tegishli sharoitda Cr(III) holatiga qaytarish talab qilinishi mumkin. Kimyoviy cho‘ktirishning afzalligi uning nisbatan sodda qurilmalar yordamida amalga oshirilishi va og‘ir metall ionlarini ajratishda qo‘llanishidir. Asosiy cheklovi esa hosil bo‘ladigan metall saqlovchi cho‘kmani xavfsiz yig‘ish, suvsizlantirish va utilizatsiya qilish zaruratidir [2, 4].

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

Adsorbsiya jarayoni va sorbentlarning qo‘llanilishi

Adsorbsiya — eritmadagi moddalarning qattiq jism yuzasida to‘planishi bilan bog‘liq fizik-kimyoviy jarayon. Sanoat oqova suvlarini tozalashda faollashtirilgan ko‘mir, tabiiy mineral sorbentlar, bentonit, zeolit, silika asosidagi materiallar, biochar va turli modifikatsiyalangan adsorbentlardan foydalanish mumkin. Adsorbsiya jarayoni fizik yoki kimyoviy tabiatga ega bo‘ladi. Fizik adsorbsiyada adsorbat va adsorbent o‘rtasidagi ta’sirlashuv asosan molekulalararo kuchlar bilan belgilanadi. Kimyoviy adsorbsiyada esa adsorbent yuzasidagi faol markazlar bilan ifloslantiruvchi modda o‘rtasida kimyoviy bog‘lanish yoki kuchli o‘zaro ta’sirlashuv yuzaga kelishi mumkin.

Adsorbsiya samaradorligiga quyidagi omillar ta’sir ko‘rsatadi:

- adsorbentning solishtirma sirt yuzasi va g‘ovaklar tuzilishi;
- oqova suvning pH qiymati;
- adsorbent miqdori;
- ifloslantiruvchi moddaning boshlang‘ich konsentratsiyasi;
- kontakt vaqti va harorat;
- eritmada raqobatlashuvchi ionlar va organik birikmalarning mavjudligi.

Kato va Kansha (2024) sanoat oqova suvlarini tozalash bo‘yicha olib borgan keng qamrovli tahlilida adsorbsiya usulining organik va noorganik ifloslantiruvchilarni ajratishdagi ahamiyatini, shuningdek, adsorbent turi va texnologik sharoitlarning jarayon samaradorligiga ta’sirini ko‘rsatgan [1]. Adsorbsiya usulining muhim afzalligi — ayrim past konsentratsiyali ifloslantiruvchilarni ham ajratish imkoniyatidir. Biroq ishlatilgan adsorbentni regeneratsiya qilish, uning sorbsiya sig‘imi kamayishini nazorat qilish va to‘plangan ifloslantiruvchilarni xavfsiz boshqarish zarur.

Kimyoviy oksidlanish va ilg‘or oksidlanish jarayonlari

Sanoat oqova suvlarida ayrim organik moddalar biologik parchalanishga chidamli bo‘lishi mumkin. Bunday birikmalarni parchalash yoki ularning kimyoviy tuzilishini o‘zgartirishda oksidlanish jarayonlari qo‘llaniladi. Kimyoviy oksidlanishda ozon, vodorod peroksid, xlorli oksidlovchilar va boshqa reagentlardan foydalanilishi mumkin. Ilg‘or oksidlanish jarayonlari (Advanced Oxidation Processes — AOPs) yuqori reaktivlikka ega gidroksil radikallari (•OH) yoki sulfat radikallari ($SO_4^{\bullet -}$) kabi faol zarrachalarni hosil qilishga asoslanadi. Ushbu radikallar ko‘plab organik ifloslantiruvchilar bilan reaksiyaga kirishib, ularning molekulyar tuzilishini o‘zgartiradi va ayrim hollarda chuqur oksidlanishiga olib keladi.

Fenton jarayonining asosiy reaksiyasi quyidagicha ifodalanadi:

$$Fe^{2+}+H_2O_2\rightarrow Fe^{3+}+OH^-+\cdot OH$$

Hosil bo‘ladigan gidroksil radikali yuqori oksidlovchilik xususiyatiga ega. Fenton jarayonining samaradorligi temir ionlari va vodorod peroksid konsentratsiyasi, pH, harorat, kontakt vaqti hamda oqova suv tarkibidagi boshqa komponentlarga bog‘liq.

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

Ilg‘or oksidlanish usullariga quyidagilar kiradi:

- ozonlash;
- ozon-vodorod peroksid jarayoni;
- UV/H_2O_2 fotokimyoviy oksidlanish;
- Fenton va foto-Fenton jarayonlari;
- yarimo‘tkazgich fotokataliziga asoslangan texnologiyalar;
- persulfat faollashtirishga asoslangan oksidlanish jarayonlari.

Ahmed va hammualliflarining 2022-yildagi tadqiqotida Fenton asosidagi jarayonlar, membranali texnologiyalar, adsorbsiya va gibrid tizimlar xavfli ifloslantiruvchilarni ajratish nuqtayi nazaridan tahlil qilingan [2]. Lucas va hammualliflarining 2025-yilgi sharhida esa koagulyatsiya-flokulyatsiya jarayonlarini ilg‘or oksidlanish texnologiyalari bilan birgalikda qo‘llash imkoniyatlari yoritilgan [3]. Oksidlanish jarayonlarining afzalligi — biologik parchalanishi qiyin bo‘lgan ayrim organik birikmalarga ta’sir ko‘rsatishidir. Biroq reagent va energiya sarfi, oraliq mahsulotlar hosil bo‘lishi, pH ni nazorat qilish va jarayon xavfsizligi kabi masalalar alohida e’tibor talab qiladi. Shu sababli oksidlanishdan keyin hosil bo‘ladigan mahsulotlarning tarkibini ham nazorat qilish kerak.

Elektrokimyoviy tozalash texnologiyalari- Elektrokimyoviy tozalash oqova suv orqali elektr toki o‘tkazish va elektrodlar yuzasida sodir bo‘ladigan oksidlanish-qaytarilish reaksiyalaridan foydalanishga asoslangan. Ushbu yo‘nalishda elektrokoagulyatsiya, elektroflotatsiya, elektrooksidlanish va elektrodializ kabi jarayonlar qo‘llaniladi. Elektrokoagulyatsiya jarayonida temir yoki alyuminiydan tayyorlangan eruvchan anodlar ishlatilishi mumkin. Elektr toki ta’sirida anoddan metall ionlari eritmaga o‘tadi, katodda esa qaytarilish reaksiyalari sodir bo‘ladi. Hosil bo‘lgan metall gidroksidlari ifloslantiruvchi zarrachalarni biriktirib, ularni floklar tarkibida ajratishga yordam beradi.

Elektrokimyoviy usullarning muhim afzalliklari quyidagilardan iborat:

- koagulyant moddalarni bevosita elektrod materialidan hosil qilish imkoniyati;
- ayrim kolloid va muallaq zarrachalarni ajratish;
- metall ionlari va organik ifloslantiruvchilarni turli mexanizmlar orqali kamaytirish;
- jarayonni avtomatlashtirish va texnologik parametrlarni boshqarish imkoniyati.

Shu bilan birga, elektrodlarning passivlanishi, elektrod materialining sarflanishi, elektr energiyasi iste’moli va hosil bo‘ladigan cho‘kmani ajratish kabi cheklovlar mavjud. Shuning uchun elektrokimyoviy texnologiyani tanlashda oqova suvning elektr o‘tkazuvchanligi, ion tarkibi va kerakli tozalash darajasi hisobga olinishi kerak [1, 2]. Membranali texnologiyalar va ularning fizik-kimyoviy jarayonlar bilan integratsiyasi- Membranali texnologiyalar suv tarkibidagi zarrachalar, kolloidlar, makromolekulalar va ayrim erigan ionlarni yarim o‘tkazuvchan membranalar yordamida ajratishga asoslangan. Membrana jarayonlari bosim, konsentratsiya yoki elektr potensiali farqi ta’sirida amalga oshirilishi mumkin.

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

Membranali filtrlashning asosiy turlari:

- mikrofiltratsiya (MF);
- ultrafiltratsiya (UF);
- nanofiltratsiya (NF);
- teskari osmos (RO).

Mikrofiltratsiya asosan yirik muallaq zarrachalar va ayrim mikroorganizmlarni, ultrafiltratsiya kolloidlar va makromolekulalarni ajratishda qo‘llanadi. Nanofiltratsiya ayrim ko‘p valentli ionlar va kichik molekulali organik birikmalarni ushlab qolishi mumkin. Teskari osmos esa yuqori bosim ostida suvni erigan tuzlar va ko‘plab ionlardan ajratishga yordam beradi. Ahmed va hammualliflarining sharh maqolasida teskari osmos va nanofiltratsiya yordamida ayrim metall ionlarini ajratish bo‘yicha tadqiqotlar keltirilgan. Jumladan, muayyan laboratoriya sharoitlarida Cu^{2+} va Cd^{2+} ionlarini ajratishda teskari osmos uchun mos ravishda 98% va 99% natijalar, nanofiltratsiya uchun esa har ikkala ion bo‘yicha taxminan 90% ko‘rsatkich qayd etilgan [2]. Ushbu qiymatlar aniq tadqiqot sharoitlariga tegishli bo‘lib, barcha sanoat oqova suvlari uchun universal samaradorlik ko‘rsatkichi sifatida talqin qilinmasligi kerak.

Membranali texnologiyalarning asosiy muammolaridan biri membrana yuzasida ifloslantiruvchi moddalar to‘planishi, ya’ni fouling hodisasidir. Buning oldini olish uchun membranali filtrlashdan avval koagulyatsiya, flokulyatsiya yoki boshqa dastlabki tozalash bosqichlarini qo‘llash maqsadga muvofiq. Shu tariqa membrananing ishlash muddati va jarayonning barqarorligini oshirish mumkin [2].

MUHOKAMA

O‘rganilgan ilmiy manbalar sanoat oqova suvlarini tozalashda fizik-kimyoviy usullarning har biri muayyan turdagi ifloslantiruvchi moddalarni ajratishga yo‘naltirilganligini ko‘rsatadi. Shu sababli texnologiya tanlashda faqat usulning nazariy samaradorligiga emas, balki oqova suvning haqiqiy tarkibi, ifloslantiruvchi moddalar konsentratsiyasi, ishlab chiqarish quvvati va tozalangan suvdan keyingi foydalanish maqsadiga ham e’tibor qaratish zarur. Koagulyatsiya-flokulyatsiya muallaq va kolloid zarrachalarni ajratishda, kimyoviy cho‘ktirish esa ayrim metall ionlarini kam eruvchan birikmalarga aylantirishda muhim o‘rin tutadi. Adsorbsiya eritmada qolgan ayrim organik va noorganik ifloslantiruvchilarni ajratish uchun qo‘llanilishi mumkin. Ilg‘or oksidlanish jarayonlari biologik parchalanishi qiyin bo‘lgan organik moddalarni kimyoviy o‘zgartirishga xizmat qiladi. Membranali texnologiyalar esa yuqori darajadagi ajratish talab etiladigan bosqichlarda qo‘llanadi.

2-jadval. Sanoat oqova suvlarini tozalashning fizik-kimyoviy usullarini qiyosiy baholash

Tozalash usuli	Asosiy mexanizmi	Qo‘llanish sohasi	Asosiy afzalligi	Cheklovlari
Koagulyatsiya-flokulyatsiya	Kolloid zarrachalarni beqarorlashtirish va flok hosil qilish	Rangli, loyqa va muallaq moddali oqova suvlar	Jarayonning nisbatan soddaligi	Reagent sarfi va cho‘kma hosil bo‘lishi

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

Kimyoviy cho‘ktirish	Erigan ionlarni kam eruvchan birikmaga aylantirish	Og‘ir metall ionlari	Metall ionlarini ajratish imkoniyati	pH nazorati va metall saqlovchi cho‘kma
Adsorbsiya	Moddalarni sorbent yuzasida to‘plash	Organik moddalar, ayrim metall ionlari va rang beruvchi birikmalar	Past konsentratsiyali moddalarni ajratish imkoniyati	Sorbent regeneratsiyasi va sarfi
Kimyoviy oksidlanish va AOP	Faol oksidlovchi zarrachalar yordamida organik moddalarni o‘zgartirish	Qiyin parchalanadigan organik ifloslantiruvchilar	Organik birikmalarni chuqur oksidlash imkoniyati	Energiya va reagent sarfi, oraliq mahsulotlar
Elektrokimyoviy tozalash	Elektrod reaksiyalari va elektr toki ta’siri	Metall ionlari, kolloidlar va ayrim organik moddalar	Jarayonni boshqarish va avtomatlashtirish imkoniyati	Elektr sarfi va elektrodlarning eskirishi
Membranali texnologiyalar	Yarim o‘tkazuvchan membrana orqali selektiv ajratish	Tuzlar, ionlar, kolloidlar va organik moddalar	Yuqori darajadagi ajratish imkoniyati	Membrana ifloslanishi va konsentrat hosil bo‘lishi

Jadvaldagi qiyosiy tahlil shuni ko‘rsatadiki, fizik-kimyoviy usullarni tanlashda tozalash maqsadi va oqova suvning tarkibi hal qiluvchi ahamiyatga ega. Masalan, metall ionlari yuqori bo‘lgan oqova suvlar uchun kimyoviy cho‘ktirishni adsorbsiya yoki membranali ajratish bilan birlashtirish mumkin. Bo‘yoqlar va qiyin oksidlanuvchi organik moddalar mavjud bo‘lgan oqova suvlar uchun esa dastlabki koagulyatsiya, keyingi oksidlanish va yakuniy adsorbsiya bosqichlaridan foydalanish texnologik jihatdan asosli yondashuv bo‘lishi mumkin.

Kompleks tozalash texnologiyasining umumiy ketma-ketligi quyidagicha ifodalanadi:

Sanoat oqova suvi → dastlabki mexanik ajratish → pH ni me’yorlashtirish → koagulyatsiya-flokulyatsiya → tindirish yoki flotatsiya → adsorbsiya yoki oksidlanish → membranali filtrlash → sifat nazorati. Bunda barcha bosqichlarni har bir sanoat oqova suviga bir xil tartibda qo‘llash shart emas. Texnologik sxema ifloslantiruvchi moddalarning turi va konsentratsiyasiga qarab ishlab chiqilishi lozim.

Fizik-kimyoviy tozalash samaradorligini baholashda birgina ko‘rsatkich bilan cheklanib qolish ham to‘g‘ri emas. Masalan, kimyoviy kislorod sarfining kamayishi oqova suv tarkibidagi oksidlanuvchi moddalarning umumiy miqdori pasayganini ko‘rsatadi, biroq bu barcha toksik birikmalar to‘liq yo‘q qilinganini anglatmaydi. Xuddi shuningdek, og‘ir metall ionlarining kamayishi hosil bo‘lgan cho‘kmaning xavfsizligini avtomatik ravishda kafolatlamaydi. Shu sababli tozalashdan keyingi

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

suvning kimyoviy tarkibi, qoldiq reagentlar, metall ionlari, organik moddalar va boshqa me'yoriy ko'rsatkichlari alohida nazorat qilinishi kerak. Sanoat korxonalari uchun texnologiyani tanlashda iqtisodiy samaradorlik ham muhim mezon hisoblanadi. Reagentlar narxi, elektr energiyasi sarfi, qurilmalarning xizmat muddati, cho'kma va konsentratlarni utilizatsiya qilish xarajatlari hamda tozalangan suvni qayta ishlatish imkoniyati umumiy texnologik samaradorlikni belgilaydi. Shu nuqtayi nazardan, oqova suvni tozalashni faqat ekologik majburiyat sifatida emas, balki suv resurslarini tejash va ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirishga xizmat qiluvchi texnologik jarayon sifatida baholanadi

XULOSA

Sanoat oqova suvlarini kimyoviy jarayonlar asosida tozalashda fizik-kimyoviy usullar muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega. O'tkazilgan adabiyotlar tahlili asosida quyidagi xulosalarga kelindi:

1. Sanoat oqova suvlarining kimyoviy tarkibi ishlab chiqarish tarmog'i va texnologik jarayonlarga bog'liq bo'lib, ularda og'ir metall ionlari, organik birikmalar, neft mahsulotlari, bo'yoqlar va muallaq zarrachalar uchrashi mumkin. Shu sababli tozalash texnologiyasini tanlashdan oldin oqova suvning fizik-kimyoviy tarkibini aniqlash zarur.
2. Koagulyatsiya-flokulyatsiya, kimyoviy cho'ktirish va adsorbsiya jarayonlari turli ifloslantiruvchi moddalarni ajratishda muhim o'rin tutadi. Ushbu usullarning samaradorligi reagent turi, pH, kontakt vaqti, sorbent xususiyatlari va boshlang'ich konsentratsiya kabi omillarga bog'liq.
3. Ilg'or oksidlanish va elektrokimyoviy texnologiyalar ayrim qiyin parchalanadigan organik birikmalar hamda murakkab tarkibli oqova suvlarni tozalashda istiqbolli yondashuvlar hisoblanadi. Biroq ularni qo'llashda energiya va reagent sarfi, oraliq mahsulotlar hamda texnologik xavfsizlik masalalari hisobga olinadi.
4. Membranali texnologiyalar suvni chuqur tozalash va qayta foydalanishga tayyorlash imkonini beradi. Shu bilan birga, membrana ifloslanishining oldini olish uchun dastlabki fizik-kimyoviy tozalash bosqichlarini tashkil etish maqsadga muvofiq.
5. Sanoat oqova suvlarini samarali tozalashning istiqbolli yo'nalishi — oqova suv tarkibiga moslashtirilgan kombinatsiyalangan texnologik sxemalarni ishlab chiqishdir. Bunday yondashuv ifloslantiruvchi moddalarni bosqichma-bosqich kamaytirish, tozalash jarayonining barqarorligini oshirish va suv resurslaridan qayta foydalanish imkoniyatlarini kengaytirishga yordam beradi.

Umuman olganda, sanoat oqova suvlarini fizik-kimyoviy usullar yordamida tozalash kimyo va kimyo muhandisligi fanlarining o'zaro integratsiyasiga asoslangan muhim ilmiy-texnologik yo'nalishdir. Kimyoviy reaksiyalar mexanizmlarini chuqur o'rganish, optimal texnologik sharoitlarni aniqlash va energiya hamda reagent sarfini kamaytiruvchi qurilmalarni takomillashtirish kelgusidagi tadqiqotlarning ustuvor vazifalaridan biri bo'lib qoladi.

HSR (LONDON),
HOUGHTON STREET REVIEW JOURNAL
ISSN: 2058-5519|Impact factor-15.9
http://houghtonstreetreview.com/index.php/hsr

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Kato S., Kansha Y. Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2024. – Vol. 31. – P. 51064–51097. – DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0.
2. Ahmed M., Mavukkandy M.O., Giwa A., Elektorowicz M., Katsou E., Khelifi O., Naddeo V., Hasan S.W. Recent developments in hazardous pollutants removal from wastewater and water reuse within a circular economy // *npj Clean Water*. – 2022. – Vol. 5. – Article 12. – DOI: https://doi.org/10.1038/s41545-022-00154-5.
3. Lucas M.S., Teixeira A.R., Jorge N., Peres J.A. Industrial Wastewater Treatment by Coagulation–Flocculation and Advanced Oxidation Processes: A Review // *Water*. – 2025. – Vol. 17, No. 13. – Article 1934. – DOI: https://doi.org/10.3390/w17131934.
4. Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, No. 23. – Article e40370. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40370.
5. Advanced oxidation process for the treatment of industrial wastewater: A review on strategies, mechanisms, bottlenecks and prospects // *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 345. – Article 140473. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140473.
6. A comparative study of advanced oxidation-based hybrid technologies for industrial wastewater treatment: An engineering perspective // *Chemical Engineering Science*. – 2024. – Vol. 286. – Article 119675. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119675.
7. Yan H., Lai C., Wang D., Liu S., Li X., Zhou X., Yi H., Li B., Zhang M., Li L., Liu X., Qin L., Fu Y. In situ chemical oxidation: peroxide or persulfate coupled with membrane technology for wastewater treatment // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2021. – Vol. 9. – P. 11944–11960. – DOI: https://doi.org/10.1039/D1TA01063H.