

YASHIL KIMYO VA EKOLOGIK XAVFSIZLIK

Islomova Odina Ravshan qizi*"Jizzax shahar 2-son politexnikasi"**davlat muassasasida Kimyo o'qituvchisi*

Annotatsiya: Ushbu tezisning maqsadi yashil kimyo tamoyillari asosida sanoat va laboratoriya jarayonlarini ekologik xavfsizlik talablariga mos optimallashtirish yo'llarini ilmiy asoslashdir. Ishda atom iqtisodiyoti, xavfsiz erituvchilar, kataliz va energiya samaradorligi ko'rsatkichlari tahlil qilinadi. Metodologiya sifatida hayotiy sikl tahlili, E-faktor va xavf baholash yondashuvlari qo'llanadi. Ilmiy yangilik sifatida O'zbekiston sharoitida "yashil metrikalar"ni amaliy mezonlarga bog'lash taklif etiladi.

Аннотация: Настоящий тезис направлен на научное обоснование применения принципов «зелёной химии» для повышения экологической безопасности химических процессов в лаборатории и промышленности. Рассматриваются атомная экономия, безопасные растворители, катализ и энергоэффективность как ключевые показатели. Методологическую основу составляют анализ жизненного цикла, E-фактор и процедуры оценки риска. Научная новизна связана с адаптацией «зелёных метрик» к практическим критериям для условий Узбекистана.

Annotation: This thesis aims to substantiate how green chemistry principles can enhance environmental safety in laboratory and industrial chemical processes. Atom economy, safer solvents, catalysis, and energy efficiency are analyzed as core performance indicators. The methodology combines life cycle assessment, the E-factor metric, and risk assessment procedures. Scientific novelty is associated with linking green metrics to practical decision criteria tailored to Uzbekistan's technological and regulatory context.

Kalit so'zlar: yashil kimyo; ekologik xavfsizlik; atom iqtisodiyoti; E-faktor; hayotiy sikl tahlili; kataliz; xavfni baholash

Ключевые слова: зелёная химия; экологическая безопасность; атомная экономия; E-фактор; анализ жизненного цикла; катализ; оценка риска

Keywords: green chemistry; environmental safety; atom economy; E-factor; life cycle assessment; catalysis; risk assessment

Yashil kimyo tushunchasi ekologik xavfsizlikning kimyoviy-texnologik asosi sifatida reagenti, erituvchini, energiyani va chiqindini bir butun tizimda ko'radigan ilmiy-amaliy yo'nalishdir. Ushbu ta'rifning mexanizmi shundan iboratki, jarayonning dastlabki dizayn bosqichidayoq xavfli moddalarning hosil bo'lishi va tarqalishi kamaytiriladi, ya'ni "tozalash"dan ko'ra "oldini olish" strategiyasi ustuvor bo'ladi. Masalan, oksidlanish reaksiyalarida stoixiometrik xrom(VI) oksidlovchilari o'rniga

kislorod yoki vodorod peroksididan foydalanish nafaqat toksiklikni, balki og'ir metall chiqindilarini ham keskin kamaytiradi. Statistika sifatida xalqaro kimyo sanoatida ayrim nozik organik sintez yo'nalishlarida E-faktor (1 kg mahsulotga to'g'ri keladigan chiqindi massasi) 25–100 diapazonga chiqishi qayd etiladi, katalitik va erituvchisiz yo'llar esa ko'pincha bu ko'rsatkichni bir necha baravar pasaytiradi [1]. Ilmiy izoh shuki, yashil kimyo ekologik xavfsizlikni faqat emissiya nazorati bilan emas, balki modda oqimlari va reaksiya yo'llari termodinamikasi hamda kinetikasini optimallashtirish orqali ta'minlaydi, bu esa 02.00.10 doirasida kimyoviy texnologiya va jarayonlar xavfsizligi integratsiyasini talab qiladi.

Ekologik xavfsizlik kimyoviy ishlab chiqarish va iste'mol zanjirida inson salomatligi hamda ekotizimlarga zarar yetkazish ehtimolini maqbul darajagacha tushirish holati sifatida talqin qilinadi. Bunday xavfsizlikning mexanizmi xavfni aniqlash, ekspozitsiyani baholash, doza-ta'sir bog'lanishini hisobga olish va riskni boshqarish choralari tanlash bosqichlaridan tashkil topadi. Misol tariqasida, uchuvchi organik birikmalar (VOC) bilan ishlovchi bo'yoq-lak jarayonlarida erituvchi sifatida aromatik uglevodorodlar o'rniga suvli dispersiyalar yoki past bug'lanishli alternatalarga o'tish ishchi zona havosida konsentratsiyani pasaytiradi va yong'in xavfini ham cheklaydi. Raqamiy ko'rsatkich sifatida ko'plab texnologik reglamentlarda ishchi zona uchun ppm darajasidagi yo'l qo'yiladigan konsentratsiyalar belgilanishi, shu limitlar oshganda kasbiy xavf va atmosferaga tashlama ortishi kuzatiladi; amaliyotda erituvchini almashtirish VOC emissiyasini o'nlab foizlarga kamaytirishi mumkin [2]. Ilmiy izoh shundan iboratki, ekologik xavfsizlik "xavf" va "risk" farqini aniq ajratadi: moddaning inherent toksikligi xavf bo'lsa, real sharoitdagi tarqalish va ta'sir ehtimoli riskni belgilaydi, yashil kimyo esa aynan inherent xavfni kamaytirishga yo'naltiriladi.

Yashil kimyoda metrikalar tizimi jarayon "yashilligi"ni o'lchab, taqqoslash imkonini beradigan miqdoriy mezonlar majmuasi sifatida aniqlanadi. Uning mexanizmi mahsulotga nisbatan xomashyo sarfi, chiqindi, energiya va xavflilik ko'rsatkichlarini bir vaqtning o'zida baholash hamda qaror qabul qilishda kompromisslarni ko'rishdan iborat. Masalan, atom iqtisodiyoti reaksiya tenglamasidagi atomlarning mahsulotga o'tish ulushini ko'rsatadi: etilenning polimerlanishi $C_2H_4 \rightarrow (C_2H_4)_n$ reaksiyasida atom iqtisodiyoti nazariy jihatdan juda yuqori bo'lsa, qo'shimcha boshlovchi va yon jarayonlar amaliy natijani pasaytirishi mumkin. Raqam sifatida atom iqtisodiyoti foizda ifodalanib, selektivlik pasaysa chiqindi ortishi va E-faktor yomonlashishi kuzatiladi; shu bois ko'plab ishlab chiqarishlarda katalizator tanlovi 5–10 foizlik selektivlik o'zgarishi bilan ham sezilarli iqtisodiy va ekologik samara beradi [1]. Ilmiy izoh shuki, metrikalar "bir ko'rsatkichga qaramlik" xatosini kamaytiradi: masalan, atom iqtisodiyoti yaxshi bo'lsa ham, erituvchi toksik bo'lsa yoki energiya sarfi yuqori bo'lsa, umumiy ekologik natija qoniqarsiz bo'lishi mumkin.

Kataliz yashil kimyoning markaziy mexanizmi bo'lib, u reaksiya yo'lini energetik jihatdan qulaylashtirish orqali resurs va chiqindi yukini kamaytiradigan jarayon sifatida ta'riflanadi. Mexanizm nuqtayi nazaridan katalizator aktiv markazlari oraliq komplekslar hosil qilib, faollanish energiyasini pasaytiradi, natijada past harorat va bosimda yuqori selektivlikka erishiladi. Masalan, selektiv gidrogenatsiyada Ni, Pd yoki Ru asosli katalizatorlar qo'llanib, alkenlarni kerakli darajada to'yingan mahsulotga aylantirishda ortiqcha yon reaksiyalar cheklanadi; bu jarayonda H₂ kabi "toza" reduktor ishlatilishi ham chiqindini kamaytiradi. Raqamiy jihatdan, bir xil mahsulot uchun reaksiya haroratini 20–30 °C ga pasaytirish ko'pincha energiya sarfini sezilarli kamaytiradi, ayniqsa yirik hajmli reaktorlarda issiqlik almashinuvi yo'qotishlari hisobga olinsa [3]. Ilmiy izoh shundan iboratki, kataliz ekologik xavfsizlikni ikki yo'l bilan kuchaytiradi: birinchidan, yon mahsulotlar kamayishi bilan toksik aralashmalar oqimi qisqaradi; ikkinchidan, yumshoq sharoitlar avariya ehtimolini pasaytirib, texnogen riskni ham kamaytiradi.

Erituvchilarni "yashillashtirish" erituvchi tanlovini toksikologik profil, uchuvchanlik, qayta tiklanish va energiya sarfi mezonlari asosida optimallashtirish sifatida belgilanadi. Mexanizm shuki, erituvchi ko'pincha massa balansining asosiy qismini tashkil etadi va uning bug'lanishi, yonuvchanligi yoki parchalanishi ekologik xavfning katta ulushini beradi; shu sababli erituvchi almashtirilsa, jarayonning umumiy xavf indeksi keskin o'zgaradi. Masalan, ekstraksiya va tozalash jarayonlarida xlorlangan erituvchilar o'rniga etil asetat, 2-metiltetrahidrofuran yoki suvli tizimlardan foydalanish chiqindi klassini yengillashtirishi hamda tiklashni osonlashtirishi mumkin. Raqam sifatida, farmatsevtik va nozik kimyo amaliyotida erituvchilar umumiy chiqindining 50–80 foizigacha ulush berishi ko'rsatiladi; demak, erituvchini qayta aylantirish yoki hajmini kamaytirish E-faktorni birinchi navbatda yaxshilaydi [1; 4]. Ilmiy izoh shuki, "xavfsiz erituvchi" tushunchasi nisbiy bo'lib, u faqat toksiklik bilan cheklanmaydi: masalan, past toksik, ammo yuqori uchuvchan erituvchi atmosferega ko'proq tarqalib, regional fotokimyoviy smog hosil bo'lishida ishtirok etishi mumkin, shuning uchun kompleks baholash zarur.

Energiya samaradorligi yashil kimyoda mahsulot birligiga to'g'ri keladigan issiqlik va elektr sarfini kamaytirish orqali iqlim va resurs xavfsizligiga xizmat qiladigan ko'rsatkich sifatida ta'riflanadi. Mexanizm reaksiya sharoitini intensivlashtirish, issiqlik integratsiyasi, mikroreaktorlar, kataliz hamda past haroratli yo'llarni tanlash orqali energiya oqimini optimallashtirishdan iborat. Masalan, oqim (flow) kimyosi texnologiyalarida issiqlik chiqaruvchi reaksiyalarni kichik kanallarda olib borish issiqlikni tez chiqarishga imkon beradi va "qochib ketuvchi reaksiya" xavfini pasaytiradi, bu ekologik xavfsizlikning avariyaaviy komponenti uchun muhimdir. Raqamiy jihatdan, issiqlik almashinuvi samaradorligi oshishi bilan reaktor hajmiga nisbatan yuzaning ortishi natijasida jarayon xavfsizligi ko'rsatkichlari yaxshilanadi va energiya yo'qotishlari qisqaradi; amaliy muhandislik hisoblarida bu farq sezilarli

iqtisodiy tejamga olib keladi [5]. Ilmiy izoh shundan iboratki, energiya sarfi ko'pincha beyosita CO₂ ekvivalent emissiyasiga bog'liq bo'ladi, shu bois energiya samaradorligi ekologik xavfsizlikning iqlimga ta'sir kanalini ham boshqaradi.

Hayotiy sikl tahlili ekologik xavfsizlikni "xomashyo qazib olishdan tortib utilizatsiyagacha" bo'lgan bosqichlar bo'yicha miqdoriy baholovchi metod sifatida aniqlanadi. Mexanizmida inventarizatsiya (modda va energiya oqimlari), ta'sir kategoriyalariga ajratish (global isish, eutrofikatsiya, toksiklik) va natijalarni talqin qilish bosqichlari bajariladi, bu esa bir bosqichdagi yutuqning boshqa bosqichdagi zararga aylanishini aniqlaydi. Masalan, "biomassa asosli" xomashyo tanlovi nazariy jihatdan qayta tiklanuvchan bo'lsa-da, agrotexnika, suv sarfi va o'g'itlardan keladigan N₂O emissiyasi hisobga olinmasa, umumiy ekologik yuk ortishi ehtimoli mavjud. Raqam sifatida, hayotiy sikl yondashuvida odatda CO₂-ekv/kg mahsulot kabi birliklar qo'llanadi va turli texnologiyalar shu birlikda taqqoslanadi; natijada "yashil" deb qabul qilingan yechimning haqiqiy afzalligi yoki cheklovi ochiladi [4; 5]. Ilmiy izoh shuki, LCA yashil kimyo tamoyillarini verifikatsiya qiladi: agar atom iqtisodiyoti yuqori bo'lsa-yu, energiya manbai karbon intensiv bo'lsa, LCA yakuniy xulosada ekologik xavfsizlik darajasini past baholashi mumkin, demak qarorlar ko'p mezonli bo'lishi shart.

Yashil kimyo va ekologik xavfsizlikni sanoat sharoitida joriy etish texnologik, iqtisodiy va me'yoriy omillar uyg'unligini talab qiladigan amaliy tizim sifatida talqin etiladi. Mexanizm jihatdan korxona darajasida xomashyo tanlovi, jarayon parametrlari, qayta ishlash bloklari, monitoring va audit tizimlari yagona boshqaruv konturiga birlashtiriladi, bunda "yashil metrikalar" texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlar bilan bog'lanadi. Masalan, chiqindini kamaytirish bo'yicha qaror qabul qilinayotganda, nafaqat utilizatsiya xarajati, balki xavfli chiqindi saqlash talablari, avariya ehtimoli va reputatsion risk ham hisobga olinadi; bu yondashuv ekologik xavfsizlikni iqtisodiy barqarorlik bilan uyg'unlashtiradi. Raqamiy ko'rsatkich sifatida, chiqindi oqimining hatto 10–15 foizga kamayishi yirik ishlab chiqarishda yiliga katta moliyaviy tejam berishi, shuningdek, suv tozalash va gaz tozalash inshootlarining yuklamasini pasaytirishi mumkin [2; 6]. Ilmiy izoh shuki, yashil transformatsiya "bir martalik modernizatsiya" emas, balki doimiy takomillashtirish sikli bo'lib, u laboratoriya darajasidagi sinovlardan boshlab, pilot o'lcham va to'liq quvvatli ishlab chiqarishgacha bo'lgan bosqichlarda xavf tahlilini muntazam yangilashni talab qiladi.

Ushbu tezis doirasida yashil kimyo yechimlarini tanlashda qo'llaniladigan solishtirma tahlil jadvali konseptual mezonlarni bir joyga jamlaydigan analitik vosita sifatida beriladi. Mexanizm sifatida jadval har bir texnologiya uchun atom iqtisodiyoti; E-faktor, energiya sarfi, erituvchi xavfliligi va avariya riski kabi ko'rsatkichlarni bir xil mantiqda baholash imkonini yaratadi. Masalan, stoixiometrik oksidlovchi bilan boradigan oksidlanish yo'li va kislorodli katalitik yo'l bir xil mahsulotni bersa ham, chiqindi tarkibi va xavf klassi bo'yicha keskin farqlanadi, bu jadvalda ochiq ko'rinadi. Raqamiy ifoda sifatida, E-faktor, selektivlik foizi va energiya birligi ko'rsatkichlaridan

foydalanish texnologiyalarni miqdoriy taqqoslashga yordam beradi va sub'ektiv bahoni kamaytiradi [1; 3]. Ilmiy izoh shuki, ko'p mezonli jadval yondashuvi qaror qabul qilishda "eng yaxshi" yechimni emas, balki "eng maqbul" yechimni tanlashga xizmat qiladi, chunki ekologik xavfsizlikda ko'pincha bir ko'rsatkichni yaxshilash boshqasini yomonlashtirishi mumkin.

Taqqoslama tahlil jadvali quyidagi ko'rinishda ifodalanadi va u yashil kimyo mezonlarini ekologik xavfsizlik talablari bilan bog'laydi. Mexanizm jadval satrlarida texnologik variantlar, ustunlarida esa metrikalar keltiriladi, natijada korxona yoki laboratoriya maqsadiga mos profil tanlanadi. Masalan, "Variant A: stoixiometrik oksidlanish" va "Variant B: katalitik oksidlanish" taqqoslanganda, chiqindi massasi, toksiklik va energiya sarfi bir vaqtda ko'riladi. Raqamli misol sifatida shartli qiymatlar keltiriladi, ular metodik solishtirishni ko'rsatadi va real loyiha uchun eksperimental ma'lumotlar bilan almashtirilishi mumkin. Ilmiy izoh shuki, jadvalning kuchi aynan shaffoflikda: har bir ustun yakuniy ekologik xavfsizlik profiliga qanday ta'sir qilayotgani ko'rinadi va bu OAK talablari nuqtayi nazaridan metodik izchillikni ta'minlaydi.

Kimyoviy formulalar va reaksiya sxemalar yashil kimyodagi resurs va xavf oqimlarini aniq ko'rsatadigan ilmiy til sifatida talqin qilinadi. Mexanizm nuqtayi nazaridan formula massa saqlanishi va stoixiometriya orqali atom iqtisodiyotini hisoblashga, reaksiya mahsulotlari va yon mahsulotlarni aniqlashga imkon beradi. Masalan, karbonat angidridni bog'lash yo'nalishida karbamid sintezi $2\text{NH}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow (\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ ko'rinishida beriladi, bunda CO_2 xomashyo sifatida jalb etiladi, biroq suv ajralishi jarayonning qaytar va muvozanatga bog'liqligini ko'rsatadi. Raqamiy jihatdan, muvozanatni siljitish uchun bosim va haroratni tanlash energiya sarfiga ta'sir qiladi, shuning uchun CO_2 -utilizatsiya loyihalarida energiya manbai va umumiy emissiya balansini LCA bilan tekshirish zarur [5]. Ilmiy izoh shuki, formulalar faqat "kimyoviy to'g'rilik"ni emas, balki ekologik xavfsizlikning mantiqiy asosini ham beradi: qaysi atomlar mahsulotda qoladi, qaysilari chiqindiga aylanadi, qaysi bosqichlar xavfli oraliq modda hosil qiladi, bularning barchasi reaksiya yozuvida aks etadi.

Xulosa sifatida, yashil kimyo ekologik xavfsizlikni ta'minlashda jarayonni dizayn bosqichida qayta qurishga imkon beradigan ilmiy paradigma ekanligi asoslandi. Atom iqtisodiyoti, E-faktor, kataliz, erituvchi tanlovi va energiya samaradorligi bir-birini to'ldiruvchi metrikalar bo'lib, ularni hayotiy sikl tahlili bilan bog'lash jarayonning haqiqiy ekologik profilini ochib beradi. Taklif etilgan ko'p mezonli taqqoslash yondashuvi O'zbekiston sharoitida texnologik variantlarni tanlashda shaffof va tekshiriladigan metodik asos yaratadi. Natijada chiqindi va xavf oqimlari qisqarishi, avariya riski pasayishi hamda resurslardan oqilona foydalanish orqali ekologik xavfsizlikning barqaror yaxshilanishi ta'minlanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. Anastas P. T., Warner J. C. Green Chemistry: Theory and Practice. New York: Oxford University Press, 1998. 152 p.
2. Varfolomeev S. D., Kolesov V. V. Ekologicheskaya biotekhnologiya. Moskva: Akademiya, 2004. 400 s.
3. Sheldon R. A. The E Factor: Fifteen years on. Green Chemistry. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2007. Vol. 9. P. 1273–1283.
4. Hauschild M. Z., Rosenbaum R. K., Olsen S. I. Life Cycle Assessment: Theory and Practice. Cham: Springer, 2018. 1216 p.
5. Baikov I. R., Kolesnikov V. A. Khimicheskaya tekhnologiya i promyshlennaya bezopasnost. Sankt-Peterburg: Khimizdat, 2016. 368 s.
6. Saidov A. A., Karimov B. R. Kimyoviy texnologiyada chiqindisiz va kam chiqindili jarayonlar. Toshkent: O'zbekiston, 2019. 240 b.