

NEFT-KIMYO JARAYONLARIDA ISHLATILADIGAN ION SUYUQLIKLAR ASOSIDAGI KATALIZATORNING SINTEZI VA SAMARADORLIGINI O'RGANISH

Eshqurbonov Furqat Bozorovich k.f.d.,prof.

Termiz iqtisoiyot va servis universiteti Tabiiy fanlar kafedrası mudiri, k. f. d., proff.

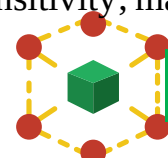
Polatova Hamida Jolmurod qizi.

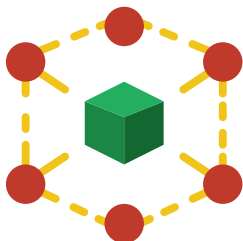
Termiz davlat muhandislik va agrotexnologiyalar unversiteti magistranti

Annotatsiya. Ushbu maqolada neft-kimyo va neftni qayta ishlash jarayonlarida qo'llanilayotgan ion suyuqliklar asosidagi katalitik tizimlarning ilmiy asoslari, sintez usullari, kislotalik tabiati, fazaviy xossalari va katalitik samaradorligi tahlil qilindi. Asosiy model tizim sifatida triethylammoniy xlorid–alyuminiy xlorid ($\text{Et}_3\text{NHCl}-\text{AlCl}_3$) xloralyuminat ion suyuqligi tanlandi. Mazkur katalizatorni quruq inert muhitda sintez qilish, $\text{AlCl}_3/\text{Et}_3\text{NHCl}$ molyar nisbatini boshqarish orqali Lewis kislotaligini sozlash, FTIR/Raman, NMR, viskozimetriya va kislotalik tahlillari bilan tavsiflash metodikasi yoritildi. Isobutan–buten alkillash, aromatik uglevodorodlarni alkillash, izomerizatsiya hamda desulfurizatsiya kabi jarayonlarda ion suyuqliklarning qo'llanish istiqbollari ko'rib chiqildi. Adabiyot ma'lumotlarining qiyosiy tahlili ion suyuqlik katalizatorlarida yuqori konversiya va selektivlikka erishish mumkinligini, biroq namlikka sezgirlik, massa almashinuvi, korroziya, katalizator deaktivatsiyasi va regeneratsiya masalalari sanoat miqyosida hal qiluvchi omil bo'lib qolayotganini ko'rsatdi. Ion suyuqliklarni avtomatik ravishda “yashil” katalizator deb baholash o'rniga ularning to'liq hayotiy sikli, toksikologik profili va regeneratsiya xarajatlarini hisobga olish zarurligi asoslandi.

Kalit so'zlar: ion suyuqlik, katalizator, xloralyuminat, $\text{Et}_3\text{NHCl}-\text{AlCl}_3$, neft-kimyo, alkillash, izomerizatsiya, desulfurizatsiya, konversiya, selektivlik, regeneratsiya.

Abstract. This article analyzes the scientific foundations, synthesis methods, nature of acidity, phase properties, and catalytic efficiency of ionic liquid-based catalytic systems used in petrochemical and oil refining processes. The triethylammonium chloride–aluminum chloride ($\text{Et}_3\text{NHCl}-\text{AlCl}_3$) chloroaluminate ionic liquid was selected as the primary model system. Methodologies were outlined for synthesizing this catalyst in a dry inert atmosphere, tuning its Lewis acidity by controlling the $\text{AlCl}_3/\text{Et}_3\text{NHCl}$ molar ratio, and characterizing it using FTIR/Raman spectroscopy, NMR, viscometry, and acidity analysis. The prospects for applying ionic liquids in processes such as isobutane–butene alkylation, alkylation of aromatic hydrocarbons, isomerization, and desulfurization were examined. A comparative analysis of literature data demonstrated that while high conversion and selectivity can be achieved with ionic liquid catalysts, issues regarding moisture sensitivity, mass





transfer, corrosion, catalyst deactivation, and regeneration remain critical factors for industrial-scale application. The necessity of considering the full life cycle, toxicological profile, and regeneration costs of ionic liquids—rather than automatically classifying them as "green" catalysts—was substantiated.

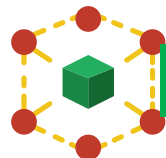
Keywords: ionic liquid, catalyst, chloroaluminate, $\text{Et}_3\text{NHCl-AlCl}_3$, petrochemistry, alkylation, isomerization, desulfurization, conversion, selectivity, regeneration.

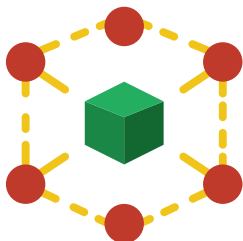
Аннотация. В данной статье анализируются научные основы, методы синтеза, природа кислотности, фазовые свойства и каталитическая эффективность каталитических систем на основе ионных жидкостей, используемых в нефтехимических процессах и нефтепереработке. В качестве основной модельной системы выбрана ионная жидкость на основе хлоралюмината триэтиламмония хлорида – хлорида алюминия ($\text{Et}_3\text{NHCl-AlCl}_3$). Описаны синтез этого катализатора в сухой инертной среде, регулирование кислотности Льюиса путем контроля молярного соотношения $\text{AlCl}_3/\text{Et}_3\text{NHCl}$, а также его характеристика с помощью ИК/рамановской спектроскопии, ЯМР-спектроскопии, вискозиметрии и анализа кислотности. Рассмотрены перспективы применения ионных жидкостей в таких процессах, как алкилирование изобутана-бутена, алкилирование ароматических углеводородов, изомеризация и десульфуризация. Сравнительный анализ литературных данных показал, что с помощью катализаторов на основе ионных жидкостей можно достичь высокой степени конверсии и селективности, однако проблемы чувствительности к влаге, массопереноса, коррозии, деактивации катализатора и регенерации остаются критическими факторами в промышленном масштабе. Вместо автоматической оценки ионных жидкостей как «зеленых» катализаторов было оправдано рассмотрение их полного жизненного цикла, токсикологического профиля и стоимости регенерации.

Ключевые слова: ионная жидкость, катализатор, хлоралюминат, $\text{Et}_3\text{NHCl-AlCl}_3$, нефтехимия, алкилирование, изомеризация, десульфуризация, конверсия, селективность, регенерация.

KIRISH

Neftni qayta ishlash va neft-kimyo sanoatining zamonaviy rivojlanishi yuqori selektiv, energiya tejamkor, xavfsiz va qayta ishlatiladigan katalitik tizimlarni yaratishni talab etmoqda. Alkillash, izomerizatsiya, oligomerizatsiya, aromatik uglevodorodlarni funksionallashtirish, desulfurizatsiya va denitrogenatsiya kabi jarayonlarda an'anaviy kuchli mineral kislotalar yoki uchuvchan organik erituvchilardan foydalanish texnologik samaradorlik bilan bir qatorda korroziya, zaharlilik, chiqindi hosil bo'lishi va ishlab chiqarish xavfsizligi bilan bog'liq muammolarni yuzaga keltiradi. Masalan, isobutan va $\text{C}_3\text{-C}_5$ olefinlarni alkillashda HF va H_2SO_4 katalizatorlari sanoatda yuqori faollik





ko'rsatadi, ammo ularning yuqori korrozivligi va xavfliligi alternativ katalitik tizimlarga ehtiyojni kuchaytirgan [1–3].

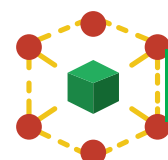
Ion suyuqliklar — odatda 100 °C dan past haroratda suyuq holatda mavjud bo'ladigan organik kation va organik yoki noorganik anionlardan tashkil topgan tuzlardir. Ularning bug' bosimi nihoyatda past, qutbliligi va ion muhiti keng diapazonda boshqariladi, ko'plab tizimlarda yuqori termik barqarorlik kuzatiladi. Eng muhim jihati shundaki, kation va anion tuzilishini o'zgartirish orqali eruvchanlik, kislotalik, asosiylik, koordinatsion qobiliyat, gidrofillik-gidrofoblik va viskozlik kabi xossalarni maqsadga muvofiq sozlash mumkin. Shu sababli ion suyuqliklar faqat erituvchi emas, balki bevosita katalizator, kokatalizator, katalitik faza yoki faol komponentni immobilizatsiya qiluvchi muhit sifatida qo'llanadi [4,5].

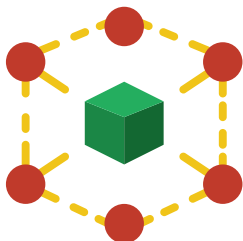
Neft-kimyo jarayonlari nuqtai nazaridan ayniqsa Lewis va Brønsted kislotali ion suyuqliklar katta qiziqish uyg'otadi. $AlCl_3$, $FeCl_3$, $ZnCl_2$, $SnCl_2$ kabi metall galogenidlari bilan xloridli organik tuzlarning kombinatsiyasi kuchli kislotali ion muhitini hosil qiladi. Xloralyuminat tizimlarda $AlCl_3$ miqdori ortishi bilan $AlCl_4^-$ va $Al_2Cl_7^-$ kabi anion komplekslar nisbati o'zgaradi; aynan $Al_2Cl_7^-$ va undan hosil bo'ladigan kislotali turlar ko'plab alkillash reaksiyalarida yuqori Lewis kislotaligini ta'minlaydi [6]. Biroq yuqori faollik bilan birga suvga sezgirlik ham kuchayadi. Shuning uchun "ko'proq kislotalik — doimo yaxshiroq kataliz" degan soddalashtirilgan yondashuv noto'g'ri: optimal tarkib reaksiya kinetikasi, selektivlik, fazalararo massa almashinuvi va katalizatorning xizmat muddatini birgalikda hisobga olgan holda tanlanishi kerak.

Ushbu maqolaning maqsadi neft-kimyo jarayonlarida qo'llaniladigan ion suyuqliklar asosidagi katalizatorlarning sintez va tavsiflash usullarini tizimlashtirish, $Et_3NHCl-AlCl_3$ model katalizatori misolida tarkib-xossa-faollik bog'liqligini tahlil qilish va katalitik samaradorlikni baholash mezonlarini ishlab chiqishdan iborat. Maqola tajriba natijalarini uydirmasdan, nashr etilgan ilmiy ma'lumotlarni qiyosiy tahlil qilish va laboratoriya sharoitida amalda bajarish mumkin bo'lgan metodologiyani shakllantirishga asoslangan.

MATERIALLAR VA TADQIQOT USULLARI

Model ion suyuqlik sifatida triethylammoniy xlorid va suvsiz alyuminiy xloriddan olinadigan $Et_3NHCl-AlCl_3$ tizimi tanlanadi. Bu tanlov ikki sabab bilan asoslanadi: birinchidan, xloralyuminat ion suyuqliklar neft-kimyo alkillash reaksiyalarida eng ko'p o'rganilgan katalitik sinflardan biridir; ikkinchidan, Et_3NHCl asosidagi tizimlarda kation tuzilishi nisbatan sodda bo'lib, $AlCl_3$ miqdorini o'zgartirish orqali anion spetsiasiyasi va kislotalikni nazorat qilish mumkin. 2025-yilda e'lon qilingan fizik-kimyoviy tadqiqotlarda $AlCl_3/Et_3NHCl$ molyar nisbatining 0,7–1,95 oralig'ida Raman spektrlari, zichlik, viskozlik va fazaviy xossalar sistematik o'rganilgan hamda kislotali sohada $Al_2Cl_7^-$ ulushining ortishi ko'rsatilgan [7].





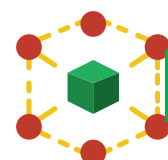
Sintezda ishlatiladigan Et_3NHCl avval vakuumda quritiladi. Adabiyot metodikasida triethylamine hydrochloride $80\text{ }^\circ\text{C}$ da vakuum sharoitida quritilib, suvsiz AlCl_3 sublimatsiya orqali tozalanadi; keyin AlCl_3 $70\text{ }^\circ\text{C}$ da quruq azot atmosferasida Et_3NHCl ga sekin qo'shiladi. Sanoat C_4 alkillash katalizatori uchun $\text{AlCl}_3:\text{Et}_3\text{NHCl} = 2:1$ molyar nisbatdan foydalanilgan [8]. Bunday rejimning asosiy maqsadi AlCl_3 gidrolizini oldini olishdir. Suvning iz miqdori ham $\text{Al}-\text{Cl}$ komplekslarini parchalaydi, HCl hosil bo'lishiga va faol Lewis-kislota markazlarining kamayishiga olib keladi. Shu sababli sintez quruq glovebox yoki quruq inert gaz bilan ta'minlangan germetik reaktorda bajarilishi kerak.

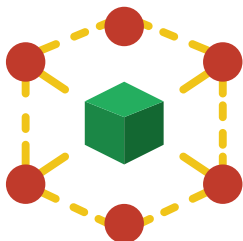
Laboratoriya sintezi quyidagi ketma-ketlikda tashkil etiladi: 1) Et_3NHCl $70\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$ da vakuumda 8–12 soat quritiladi; 2) suvsiz AlCl_3 va quritilgan tuz quruq azot yoki argon atmosferasiga olinadi; 3) Et_3NHCl $60\text{--}75\text{ }^\circ\text{C}$ gacha isitilib, mexanik yoki magnit aralashtirish yoqiladi; 4) AlCl_3 kichik porsiyalarda qo'shiladi; 5) bir jinsli suyuq faza hosil bo'lgach, aralashtirish 30–60 daqiqa davom ettiriladi; 6) namuna namlikdan himoyalangan idishda saqlanadi. Tadqiqot uchun $\text{AlCl}_3/\text{Et}_3\text{NHCl}$ molyar nisbatlari 1,2; 1,5; 1,8 va 2,0 bo'lgan qator namunalar tayyorlash maqsadga muvofiq. Bu qator kislotalikning katalitik natijalarga ta'sirini aniqlash imkonini beradi.

Sintezlangan ion suyuqlikni faqat tashqi ko'rinish yoki erish holati bilan baholash yetarli emas. Raman spektroskopiyasi AlCl_4^- va Al_2Cl_7^- turlarini ajratishda eng informativ usullardan biridir. FTIR spektrlari kation va anion o'zaro ta'siri, shuningdek, regeneratsiyadan keyingi organik qoldiqlarni aniqlashda qo'llanadi. ^{27}Al NMR alyuminiy komplekslarining koordinatsion holati haqida ma'lumot beradi. Viskozlik va zichlik o'lchovlari fazalararo massa almashinuvi va reaktor gidrodinamikasi uchun muhim. Hammett funksiyasi yoki indikator usullari kislotalikni qiyosiy baholashda ishlatilishi mumkin. Namlik Karl Fisher titrlashi bilan nazorat qilinishi kerak, chunki xloralyuminat tizimlarda suv konsentratsiyasi katalitik faollikning yashirin boshqaruvchi parametridir.

Katalitik samaradorlikni baholash uchun model reaksiya sifatida isobutan–2-buten alkillash tanlanishi mumkin. Ushbu jarayon yuqori oktanli, past aromatik va oltingugurtli alkilat benzin komponentini olishda muhimdir [2,3]. Sinov bosimli, aralashtiriladigan zanglamaydigan po'lat reaktorda amalga oshiriladi. Adabiyotdagi sanoatga yaqin laboratoriya tadqiqotida isobutan:2-buten molyar nisbati 11:1, aralashtirish tezligi 800 rpm bo'lgan [8]. Tajriba dizaynida katalizator miqdori, harorat, reaksiya vaqti, isobutan/olefin nisbati hamda aralashtirish tezligi mustaqil omillar sifatida o'zgartiriladi. Mahsulotlar GC-FID yoki GC-MS bilan tahlil qilinib, buten konversiyasi, C_8 selektivligi, trimetilpentan/dimetilgeksan nisbati va og'ir C_9^+ yon mahsulotlar ulushi aniqlanadi.

Konversiya $X = (n_0 - n)/n_0 \times 100\%$ tenglama bilan, bunda n_0 — boshlang'ich olefin miqdori, n — reaksiya yakunidagi olefin miqdori. C_8 selektivlik $S(\text{C}_8) = n(\text{C}_8)/\Sigma n(\text{mahsulotlar}) \times 100\%$ ko'rinishida baholanadi. Katalizatorning qayta ishlatilish samarasi esa $R_n = X_n/X_1 \times 100\%$





koeffitsiyent orqali ifodalanadi. Bunda X_1 birinchi sikldagi, X_n esa n -sikldagi konversiya. Faqat konversiya yuqori bo'lishi yetarli ko'rsatkich emas; yuqori konversiya oligomerlanish va kraking hisobiga ham yuz berishi mumkin. Shu sababli yuqori sifatli katalizator bir vaqtning o'zida yuqori olefin konversiyasi, yuqori C_8 selektivlik, TMP/DMH nisbati, past C_9^+ hosil bo'lishi va barqaror qayta foydalanish ko'rsatkichiga ega bo'lishi kerak.

TAJRIBA DIZAYNI VA MA'LUMOTLARNI QAYTA ISHLASH

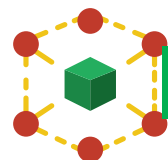
Tajriba dizaynini faqat bir omilni ketma-ket o'zgartirish usulida tashkil etish katalizatorning haqiqiy optimal sharoitini topishda yetarli emas, chunki harorat, kislotalik, katalizator miqdori va aralashtirish tezligi o'zaro ta'sir qiladi. Shu sababli dastlabki skrining uchun to'liq yoki qisqartirilgan faktorli reja, keyingi optimallashtirish uchun response surface methodology qo'llanishi maqsadga muvofiq. Masalan, $AlCl_3/Et_3NHCl$ molyar nisbati, reaksiya harorati va ion suyuqlik/uglevodorod fazasi massaviy nisbati uch asosiy faktor sifatida tanlanib, javob funksiyalari sifatida buten konversiyasi, C_8 selektivligi va C_9^+ ulushi olinadi. Bunday dizayn faqat eng yuqori konversiyani emas, yuqori selektivlik va past yon mahsulot hosil bo'lishini birgalikda optimallashtirish imkonini beradi.

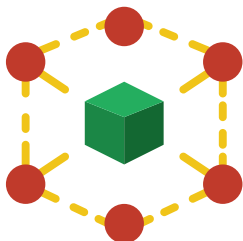
Analitik natijalarning ishonchliligi uchun har bir asosiy tajriba kamida uch takrorlikda bajarilishi, o'rtacha qiymat va standart og'ish ko'rsatilishi kerak. GC tahlilida kalibrlash egri chizig'i, ichki standart va mass-balance nazorati kiritilishi lozim. Uglevodorodli mahsulotlar bo'yicha umumiy uglerod balansi 95–105% oralig'ida bo'lmasa, konversiya va selektivlik bo'yicha xulosalar qayta tekshirilishi kerak. Katalizator qayta ishlatilganda esa faqat sikl sonini ko'rsatish yetarli emas: har bir sikldagi massa yo'qotilishi, suv miqdori, kislotalik va spektral o'zgarishlar qayd etilishi kerak. Shu tarzda deaktivatsiya mexanizmi "faollik pasaydi" darajasidan molekulyar sabablar darajasiga olib chiqiladi.

Sintez va katalitik sinovlarning xavfsizlik qismi alohida nazorat talab qiladi. Suvsiz $AlCl_3$ havodagi namlik bilan tez reaksiyaga kirishadi, xloralyuminat ion suyuqlik esa suv bilan kontakt qilganda HCl ajratishi mumkin. Shuning uchun $AlCl_3$ bilan barcha manipulyatsiyalar tortma shkaf va inert atmosfera sharoitida bajarilishi, ko'z va terini himoya qiluvchi vositalar qo'llanishi, reaktor ochilishidan oldin bosim xavfsiz darajaga tushirilishi kerak. Isobutan va buten yonuvchan bosimli gazlar bo'lgani sababli reaktor, gaz liniyalari va ventilyatsiya portlash-xavfsiz talablarga mos bo'lishi zarur. Bu talablar tajribaning texnik qo'shimchasi emas, balki takrorlanuvchan va sanoatga ko'chiriladigan metodologiya bir qismidir.

NATIJALAR VA MUHOKAMA

Ion suyuqlik katalizatorlarining samaradorligini belgilovchi birinchi fundamental omil — ion tarkibi va kislotalikdir. Xloralyuminat tizimda ekvimolyar yoki asosiy tarkibda $AlCl_4^-$ turi ustun bo'lsa,





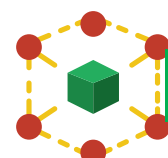
AlCl_3 ortiqcha bo'lgan kislotali kompozitsiyada Al_2Cl_7^- va undan murakkab poliyadroli xloralyuminat turlarining ulushi ortadi. Bu o'zgarish karbokation mexanizmi orqali kechadigan alkillash va izomerizatsiya reaksiyalarida elektrofil faollikni oshiradi. 2025-yilgi Raman tadqiqoti $\text{Et}_3\text{NHCl}-\text{AlCl}_3$ tizimida molyar nisbat ortishi bilan kislotali anionlar spektral ulushi oshishini ko'rsatgan [7]. Demak, katalizator tarkibini " AlCl_3 qancha ko'p bo'lsa, shuncha yaxshi" tamoyiliga ko'ra emas, kerakli anion spetsiasiyasini hosil qiladigan optimal interval bo'yicha tanlash kerak.

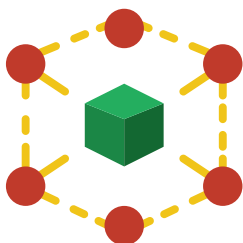
Isobutan–buten alkillashda reaksiyaning maqsadli yo'li butenning protonlanishi yoki Lewis-kislota bilan faollanishidan hosil bo'lgan karbokationning isobutan bilan gidrid almashinuvi va zanjirli reaksiyalar orqali C_8 izoparafinlarga aylanishidir. Agar olefinning lokal konsentratsiyasi yuqori bo'lsa yoki fazalar yetarli aralashmasa, olefin–olefin reaksiyalari kuchayib oligomerlar va og'ir yon mahsulotlar hosil qiladi. Ion suyuqliklarning ko'pincha uglevodorod fazasi bilan cheklangan aralashuvchanligi shu nuqtada ham afzallik, ham kamchilikdir. Afzalligi — mahsulot fazasi katalizatoridan oson ajraladi; kamchiligi — massa almashinuvi reaksiyaning umumiy tezligini cheklashi mumkin. Shu sababli reaktorning aralashtirish rejimi kimyoviy tarkib kabi muhim texnologik parametr hisoblanadi [2,9].

Adabiyot ma'lumotlari $\text{Et}_3\text{NHCl}-\text{AlCl}_3$ tizimining yuqori faolligini bir necha reaksiyada ko'rsatadi. Sanoat C_4 alkillashga bag'ishlangan tadqiqotda 2:1 $\text{AlCl}_3/\text{Et}_3\text{NHCl}$ tarkibli ion suyuqlik sintezlanib, katalizatorning barqarorligi, deaktivatsiyasi va AlCl_3 qo'shish orqali regeneratsiyasi o'rganilgan [8]. Bundan tashqari, 2024-yilda naftalinni n-okten bilan alkillashda turli ammoniy tuzlariga asoslangan AlCl_3 ion suyuqliklari solishtirilib, $\text{Et}_3\text{NHCl}-\text{AlCl}_3$ tizimi qayta foydalanish nuqtai nazaridan afzal natija ko'rsatgani qayd etilgan; vakuum/dekompressiya ishlovi deaktivatsiyalangan tizimning siklik barqarorligini yaxshilagan [10]. Bu natijalar Et_3NH^+ kationi faqat "passiv" qarshi ion emas, balki substrat bilan o'zaro ta'sir va protonlanish muvozanatiga ta'sir qiluvchi komponent ekanini ko'rsatadi.

Ion suyuqliklarning neft-kimyo alkillashdagi yana bir ustunligi kislotalikni modulyatsiya qilish imkonidir. An'anaviy H_2SO_4 yoki HF da kislota tabiatini molekulyar darajada keng intervalda o'zgartirish qiyin. Ion suyuqliklarda esa kation, anion, metall galogenid, promotor va Brønsted kislota qo'shimchasini alohida tanlash mumkin. Shu asosda metallga asoslangan Lewis-kislotali, Brønsted–Lewis kislotali, metall bo'lmagan Brønsted-kislotali va tashuvchiga immobilizatsiyalangan ion suyuqlik katalizatorlari rivojlangan [3]. Biroq bu "sozlanish" imkoniyati optimallashtirish muammosini ham murakkablashtiradi: bir xil yuqori kislotalik turli viskozlik, faza muvozanati va korrozivlik bilan birga kelishi mumkin.

Neftni qayta ishlashda ion suyuqliklar alkillashdan tashqari desulfurizatsiya va denitrogenatsiyada ham qo'llanadi. Bu jarayonlarda ion suyuqlik ko'pincha ekstragent va katalitik muhit funksiyalarini





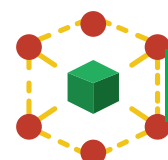
birlashtiradi. Aromatik oltingugurt birikmalari, xususan dibenzotiofenlarning ion suyuqlik fazasiga selektiv o'tishi oksidlovchi desulfurizatsiya bilan kombinatsiyalanganda chuqur tozalash imkonini beradi. Review tadqiqotlari ion suyuqliklar yordamidagi desulfurizatsiya, denitrogenatsiya va alkillashni neftni qayta ishlash uchun eng istiqbolli uch yo'nalish sifatida ko'rsatadi, lekin yuqori viskozlik, narx, mass transfer, regeneratsiya va jarayon simulyatorlarida ishonchli termodinamik modellarning yetishmasligi sanoat joriy etilishini sekinlashtirmoqda [1].

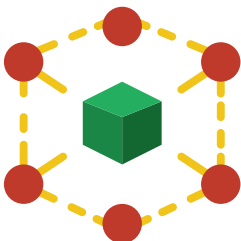
Izomerizatsiyada kislotali ion suyuqliklar n-parafinlarni yuqori oktanli izoparafinlarga aylantirish uchun karbokation mexanizmini qo'llab-quvvatlaydi. Bu yerda ham katalizatorning vazifasi faqat kislotalik yaratishdan iborat emas; ion muhiti oraliq karbokationlarning barqarorligi va gidrid almashinuvi tezligiga ta'sir qiladi. O'ta kuchli kislotalik krakingni kuchaytirishi, yetarli bo'lmagan kislotalik esa konversiyani pasaytirishi mumkin. Demak, neft-kimyo jarayonlari uchun ion suyuqlikni tanlashda maqsad "maksimal kislotalik" emas, "maqsadli reaksiya yo'li uchun optimal kislotalik va transport xossalari" bo'lishi kerak.

Katalizator samaradorligining ikkinchi kritik omili — deaktivasiyadir. Xloralyuminat ion suyuqliklar namlik, kislorodli aralashmalar, metanol, efirlar va ayrim azotli birikmalarga sezgir. Suv $AlCl_3$ faol turlarini gidrolizlaydi; kislorodli donorlar esa Lewis kislota markazlari bilan kompleks hosil qilib, ularni reaksiyadan chiqaradi. 2026-yilda e'lon qilingan neftni qayta ishlashdagi ion suyuqliklar sharhida aynan suv va xomashyo aralashmalariga sezgirlik, deaktivasiyaning tezlashishi va tor optimal operatsion oynasi alkillash texnologiyasining asosiy cheklovlari qatorida ko'rsatilgan [11]. Shu sababli katalizatorni ishlab chiqish bilan birga feed pretreatment — xomashyoni quritish va aralashmalardan tozalash tizimi ham loyihaning ajralmas qismi bo'lishi kerak.

Deaktivasiyaning yana bir sababi organik og'ir fraksiyalarning ion suyuqlik fazasida to'planishidir. Polyalkillangan aromatiklar, oligomerlar yoki "acid soluble oil" tipidagi mahsulotlar kislota markazlarini ekranlaydi, viskozlikni oshiradi va mass transferini yomonlashtiradi. 2024-yilgi naftalin alkillash tadqiqotida deaktivasiyaga protonlangan polialkillash mahsulotlarining ta'siri ko'rsatilgan va katalizatorni ajratishdan oldingi dekompressiya jarayoni qayta ishlatilish samaradorligini yaxshilagan [10]. Demak, regeneratsiya faqat yangi $AlCl_3$ qo'shishdan iborat bo'lmashligi kerak; uchuvchan komponentlarni chiqarish, organik qoldiqlarni ajratish va anion spetsiasiyasini qayta tiklash ham talab etiladi.

Sanoat nuqtai nazaridan uchinchi masala — materiallar mosligi va korroziya. Ion suyuqliklarning bug' bosimi past bo'lgani ularni xavfsiz qiladi degan xulosa to'liq emas. Xloralyuminat tizim namlik bilan aloqa qilganda HCl hosil qilishi va kuchli korroziv muhitga aylanishi mumkin. Shu sababli reaktor materiali, muhrlar, nasoslar va issiqlik almashgichlar ion suyuqlikning real tarkibi va suv kontaminatsiyasi sharoitida sinovdan o'tkazilishi kerak. ACS sharhida ham IL-alkillash





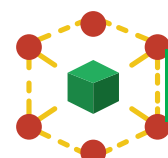
texnologiyasi uchun material compatibility, faza muvozanati va massa almashinuvi bo'yicha ma'lumotlar yetishmasligi sanoatlashtirishdagi muhim bo'shliq sifatida qayd etilgan [3].

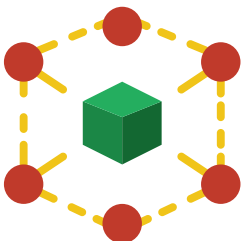
To'rtinchi masala — ion suyuqliklarning ekologik bahosi. Past bug' bosimi uchuvchan organik birikmalar emissiyasini kamaytiradi, ammo bu xususiyatning o'zi "yashil"likni isbotlamaydi. Ayrim imidazoliy ion suyuqliklar toksik yoki biologik parchalanishi sust bo'lishi mumkin. 2024-yilgi Green Chemistry sharhida an'anaviy ayrim alkilimidazoliy ion suyuqliklarda sitotoksiklik va fitotoksiklik kuzatilgani ta'kidlangan [12]. Shunday ekan, katalizatorni ekologik baholashda sintez uchun sarflangan energiya, boshlang'ich reagentlar xavfliligi, xizmat muddati, regeneratsiya soni, yo'qotishlar, chiqindi va yakuniy utilizatsiya bir butun hayotiy sikl sifatida hisoblanishi kerak.

Beshinchi masala — iqtisodiy samaradorlik. Ion suyuqliklar an'anaviy mineral kislotalarga nisbatan qimmatroq bo'lishi mumkin, lekin katalizatorning qayta ishlatilishi, past uchuvchanligi, mahsulotni fazaviy ajratish qulayligi va uskunalarning ayrim xavfsizlik xarajatlarini kamaytirish imkoniyati umumiy iqtisodiy balansni yaxshilashi mumkin. Buni faqat katalizatorning kilogramm narxi orqali baholash noto'g'ri. To'liq texnik-iqtisodiy tahlil katalizator sarfi (kg/t mahsulot), regeneratsiya reagentlari, energiya, xomashyoni quritish, korroziyaga chidamli materiallar, separator va recycling konturini qamrab olishi kerak. Review maqolalarida aynan yuqori narx, murakkab tayyorlash va sanoat simulyatsiyasiga integratsiya yetishmasligi keng joriy etishga to'sqinlik qilayotgan omillar sifatida ko'rsatilgan [1,11].

1-jadval. Neft-kimyo jarayonlarida ion suyuqlik katalizatorlarining qiyosiy tavsifi

Jarayon	Ion suyuqlik funksiyasi	Asosiy samaradorlik mezonlari	Kritik cheklov
Isobutan–buten alkillash	Lewis/Brønsted kislotali katalizator	Olefin konversiyasi, selektivlik, TMP/DMH	Namlilik, oligomerlanish, massa almashinuvi
Aromatik alkillash	Elektrofil faollashtiruvchi kislotali faza	Konversiya, monoalkillash selektivligi, qayta ishlatish	Polialkillanish va organik qoldiq bilan deaktivatsiya



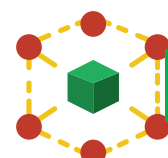


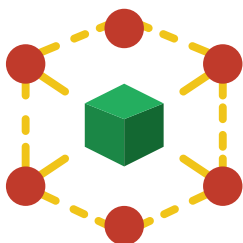
Parafin izomerizatsiyasi	Karbokation hosil qiluvchi kislotali muhit	Izomer selektivligi, oktan soni, kraking darajasi	O'ta kislotalikda kraking va koks prekursorlari
Oksidlovchi desulfurizatsiya	Ekstragent + katalitik muhit	S olib tashlash darajasi, ekstraksiya koeffitsiyenti	Viskozlik, oksidant sarfi, regeneratsiya
Denitrogenatsiya	Selektiv ekstragent/katalitik faza	N birikmalarini olib tashlash darajasi	Faza muvozanati, suv va aralashmalarning ta'siri

Qiyosiy tahlildan ko'rinadiki, ion suyuqlikning "samaradorligi" universal bitta ko'rsatkich bilan ifodalanmaydi. Alkillashda C_8 selektivlik va alkilat sifati markaziy mezon bo'lsa, desulfurizatsiyada oltingugurtni olib tashlash darajasi va ekstragentning qayta tiklanishi muhim. Izomerizatsiyada esa maqsadli izomerlar selektivligi kraking bilan raqobatlashadi. Shu sababli katalizatorni optimallashtirishda ko'p mezonli yondashuv zarur: (i) faollik; (ii) selektivlik; (iii) barqarorlik; (iv) ajratish qulayligi; (v) regeneratsiya; (vi) korroziya; (vii) xavfsizlik; (viii) ekologik va iqtisodiy ko'rsatkichlar birgalikda baholanadi.

$Et_3NHCl-AlCl_3$ uchun amaliy optimallashtirish strategiyasi ham aynan ko'p mezonli bo'lishi kerak. Birinchi bosqichda $AlCl_3/Et_3NHCl$ nisbati bo'yicha to'rtta namuna sintez qilinadi va Raman orqali $AlCl_4^-/Al_2Cl_7^-$ nisbati aniqlanadi. Ikkinchi bosqichda viskozlik va kislotalik o'lchanadi. Uchinchi bosqichda barcha namunalar bir xil isobutan/2-buten sharoitida sinovdan o'tkaziladi. To'rtinchi bosqichda eng yaxshi ikki tarkib uchun harorat, fazalar nisbati va aralashtirish tezligi optimallashtiriladi. Beshinchi bosqichda kamida besh qayta foydalanish sikli bajarilib, har bir sikldan keyin Raman yoki FTIR bilan katalizator tarkibidagi o'zgarishlar kuzatiladi. Bu dizayn "faollik ko'rsatdi" kabi yuzaki xulosadan ko'ra sababiy bog'lanishni aniqlash imkonini beradi.

Reaksiya mexanizmini chuqur tushunish uchun faqat GC tahlili bilan cheklanmaslik kerak. In situ yoki operando Raman/IR usullari kislota markazlarining reaksiya davomida qanday o'zgarishini ko'rsatishi mumkin. 2024-yilgi keng ko'lamli Chemical Reviews tahlilida ion suyuqliklarning katalizda mikro-muhit yaratishi, katalizator atrofidagi elektron va geometrik effektlarni, reagentlar aralashuvchanligini va turlarning yashash vaqtini boshqarishi ta'kidlangan [5]. Bu neft-kimyo reaksiyalarida ion suyuqlikni inert "erituvchi" emas, reaksiya mikro-muhitni loyihalovchi faol komponent sifatida ko'rish kerakligini anglatadi.





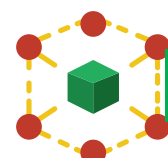
Reaktor dizayni ham katalizator kimyosidan ajralmasdir. Ion suyuqlik va uglevodorod ko‘pincha ikki suyuq faza hosil qilgani uchun dispersiya tomchilari o‘lchami, fazalararo yuza va ajratish tezligi umumiy unumdorlikni belgilaydi. 2024-yilgi isobutan alkillash bo‘yicha CFD sharhida ion suyuqlikli tizimlar uchun mixing va product separationni birlashtiruvchi reaktor konfiguratsiyalari, jumladan siklon tipidagi yechimlarning istiqboli muhokama qilingan [9]. Shuning uchun laboratoriyada yuqori rpm natija bergan katalizator sanoatda aynan shu ko‘rsatkichni takrorlaydi deb bo‘lmaydi; scale-up jarayonida gidrodinamik o‘xshashlik va mass transfer koeffitsiyentlari alohida tekshirilishi zarur.

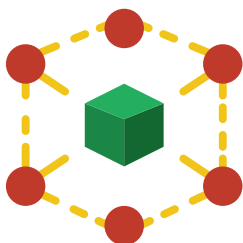
Kelajakdagi istiqbolli yo‘nalishlardan biri immobilizatsiyalangan yoki supported ionic liquid phase (SILP) katalizatorlaridir. Bunda ion suyuqlik g‘ovak tashuvchi yuzasida yupqa qatlam ko‘rinishida ushlab turilib, faol ion muhitning afzalligi saqlanadi, lekin katta hajmdagi viskoz suyuqlik bilan ishlash kamayadi. Ikkinchi yo‘nalish — metall bo‘lmagan Brønsted-kislotali ion suyuqliklar va deep eutectic solvent tipidagi arzonroq tizimlar. Uchinchi yo‘nalish — suvga chidamli, ftorlanmagan, toksikligi past ion juftlarini yaratish. To‘rtinchi yo‘nalish esa machine learning va molekulyar modellash orqali kation–anion–promotor kombinatsiyalarini eksperimental skriningdan oldin saralashdir.

Shu bilan birga, “ion suyuqliklar sanoatdagi barcha mineral kislotalarni tezda almashtiradi” degan da’vo realistik emas. H_2SO_4 va HF jarayonlari uzoq yillar davomida optimallashtirilgan, xomashyo va uskunalar infratuzilmasi shakllangan. Yangi ion suyuqlik texnologiyasi esa bir vaqtning o‘zida katalizator sintezi, feed purification, reactor hydrodynamics, product separation, catalyst recycle, material compatibility va waste management bo‘yicha ishonchli yechim talab qiladi. 2021–2026-yillardagi sharhlar ion suyuqliklarning istiqbolini yuqori baholash bilan birga aynan shu sanoat bo‘shliqlarini qayd etadi [1,3,11]. Shu sababli ilmiy natijaning haqiqiy qiymati faqat yuqori konversiyada emas, balki uzoq muddatli barqarorlik va jarayon integratsiyasida namoyon bo‘ladi.

SANOATGA JORIY ETISH MEZONLARI

Ion suyuqlik katalizatorini sanoatga tanlashda laboratoriya konversiyasidan tashqari uzluksiz ishlashga mos ko‘rsatkichlar talab etiladi. Birinchi mezon — katalizator inventari va mahsulot birligiga nisbatan yo‘qotish. Ion suyuqlik mahsulot fazasiga erib ketishi yoki mexanik entrainment orqali chiqib ketishi mumkin; bunday yo‘qotish kichik foizlarda bo‘lsa ham yillik ishlab chiqarishda katta xarajatga aylanadi. Ikkinchi mezon — regeneratsiya intensivligi. Agar katalizatorni har bir necha sikldan keyin yangi $AlCl_3$ bilan tiklash talab etilsa, $AlCl_3$ sarfi, hosil bo‘ladigan qoldiq va namlikka qarshi himoya xarajatlari katalizatorning dastlabki narxidan ham muhim bo‘lishi mumkin. Shu sababli tajribada “besh marta qayta ishlatildi” degan natijaga qo‘shimcha ravishda har siklda faol komponent sarfi va massa balansi ko‘rsatilishi lozim.





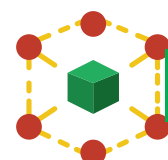
Uchinchi mezon — separator va recycle konturining ishlashi. Ikki fazali ion suyuqlik–uglevodorod tizimida yaxshi aralashtirish reaksiya uchun zarur, lekin haddan tashqari mayda dispersiya keyingi faza ajralishini sekinlashtiradi. Demak, reaktor va separatorni alohida optimallashtirish o‘rniga yagona gidrodinamik tizim sifatida ko‘rish kerak. Tomchi o‘lchami taqsimoti, fazalar zichligi va viskozligi, interfacial tension hamda residence time ma’lumotlari scale-up uchun zarur. Laboratoriya magnit aralashtirgichida olingan selektivlikni sanoat reaktoriga to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘chirish mumkin emas; Reynolds, Weber va mass-transfer mezonlari asosida o‘xshashlik tekshirilishi lozim. Shu nuqtada CFD modellari eksperimental sarfni kamaytirib, mixing va faza ajralishining kompromissini oldindan baholashga yordam beradi [9].

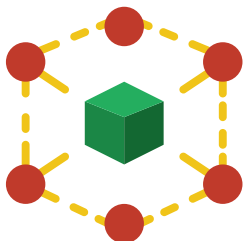
To‘rtinchi mezon — katalizatorning real xomashyo bilan chidamliligi. Model 2-buten va yuqori tozalikdagi isobutan bilan olingan natija sanoat C₄ oqimida takrorlanmasligi mumkin, chunki unda suv, kislorodli birikmalar, dienlar, oltingugurt va azot izlari mavjud bo‘ladi. Shuning uchun optimallashtirilgan ion suyuqlik avval individual impurity challenge testlarda, keyin esa real yoki sun‘iy aralash C₄ oqimida sinovdan o‘tkazilishi kerak. Har bir aralashma uchun faollikning qay darajada pasayishi va regeneratsiyadan so‘ng tiklanish foizi aniqlansa, xomashyoni oldindan tozalash blokiga qo‘yiladigan talablar miqdoriy shaklga keladi. Bu ma’lumotlarsiz katalizatorni sanoatga tayyor deb baholash erta bo‘ladi.

Beshinchi mezon — texnik-iqtisodiy va ekologik qarorni birlashtirishdir. Eng yuqori C₈ selektivlikka ega tarkib eng arzon yoki eng xavfsiz variant bo‘lmasligi mumkin. Shu sababli yakuniy tanlov uchun ko‘p mezonli baholash matritsasi tuzilishi maqsadga muvofiq: katalitik faollik va selektivlikka, qayta ishlatish soniga, sintez reagentlari narxiga, namlikka chidamlilikka, korrozivlikka, toksikologik profilga va chiqindini qayta ishlash murakkabligiga alohida vazn beriladi. Neftni qayta ishlash bo‘yicha zamonaviy sharhlar ham ion suyuqlik tanlashni faqat eruvchanlik yoki ekstraktsiya koeffitsiyenti bilan cheklamasdan, molekulyar o‘zaro ta’sir va jarayon ko‘rsatkichlarini birga baholash zarurligini ko‘rsatadi [1,11]. Shu yondashuv alkillash katalizatorlariga ham tatbiq etilishi mumkin.

XULOSA

Neft-kimyo jarayonlarida ion suyuqliklar asosidagi katalizatorlar kuchli kislotalikni boshqarish, juda past bug‘ bosimi, fazaviy ajratish imkoniyati va qayta ishlatish salohiyati tufayli an’anaviy suyuq kislota katalizatorlariga muhim alternativ hisoblanadi. Et₃NHCl–AlCl₃ xloralyuminat tizimi misolida ko‘rsatildiki, katalitik xossalar AlCl₃/organik tuz nisbatiga, AlCl₄[–] va Al₂Cl₇[–] spetsiasiyasiga, namlik darajasiga, viskozlikka va reaksiya gidrodinamikasiga bevosita bog‘liq. Katalizatorni quruq inert muhitda sintez qilish, tarkibni Raman/NMR/FTIR usullari bilan nazorat qilish va samaradorlikni konversiya bilan birga selektivlik hamda qayta ishlatilish ko‘rsatkichlari orqali baholash zarur.



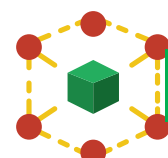


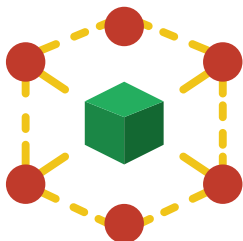
Qiyosiy adabiyot tahlili ion suyuqliklar isobutan–buten va aromatik alkillash, parafin izomerizatsiyasi, oksidlovchi desulfurizatsiya va denitrogenatsiyada yuqori imkoniyatga ega ekanini ko‘rsatadi. Biroq xloralyuminat tizimlarning suvga sezgirligi, HCl hosil bo‘lish xavfi, organik qoldiq bilan deaktivatsiya, yuqori viskozlik, fazalararo massa almashinuvi, materiallar mosligi va regeneratsiya xarajatlari sanoatlashtirishning asosiy cheklovlaridir. Demak, ion suyuqliklarni “yashil katalizator” sifatida baholash faqat past uchuvchanlikka emas, to‘liq hayotiy sikl va toksikologik ko‘rsatkichlarga asoslanishi kerak.

Amaliy tadqiqot uchun eng maqbul yo‘l — $\text{AlCl}_3/\text{Et}_3\text{NHCl}$ molyar nisbatlari qatorini sintez qilish, ularning anion tarkibi va kislotaligini aniqlash, bir xil model alkillash sharoitida katalitik natijalarni qiyoslash, keyin esa eng samarali tarkibni ko‘p siklli regeneratsiya tajribasida sinashdir. Bunday yondashuv ion suyuqlik katalizatorining nafaqat dastlabki faolligini, balki real neft-kimyo texnologiyasi uchun hal qiluvchi bo‘lgan barqarorlik, selektivlik va qayta foydalanish qobiliyatini ham obyektiv baholash imkonini beradi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Bhutto A.W., Qureshi K., Harijan K., Abro R., Abbas T., Bazmi A.A., Karim S., Yu G. Ionic liquid-assisted refinery processes – A review and industrial perspective. *Fuel*. 2022. Vol. 308. Art. 121955.
2. Arellano-García H. et al. Isobutane/butene alkylation reaction using ionic liquids as catalysts. Toward a sustainable industry. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2022. Vol. 107. P. 15–31.
3. Kore R., Kelley S.P., Aduri P., Rogers R.D. Review of Isobutane Alkylation Technology Using Ionic Liquid-Based Catalysts: Where Do We Stand? *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2020. Vol. 59, No. 36. P. 15811–15838. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c03418.
4. Welton T. Room-Temperature Ionic Liquids. Solvents for Synthesis and Catalysis. *Chemical Reviews*. 1999. Vol. 99. P. 2071–2084.
5. Hallett J.P. et al. Ionic Liquids in Metal, Photo-, Electro-, and (Bio) Catalysis. *Chemical Reviews*. 2024. DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00379.
6. Plechkova N.V., Seddon K.R. Applications of ionic liquids in the chemical industry. *Chemical Society Reviews*. 2008. Vol. 37. P. 123–150.
7. Elterman V.A. et al. Physicochemical properties of triethylamine hydrochloride-based chloroaluminate ionic liquid. *Journal of Molecular Liquids*. 2025.





8. Liu Y. et al. Stability, Deactivation, and Regeneration of Chloroaluminate Ionic Liquid as Catalyst for Industrial C4 Alkylation. *Catalysts*. 2018. Vol. 8, No. 1. Art. 7. DOI: 10.3390/catal8010007.
9. A Review of Computational Fluid Dynamics Modeling for Isobutane Alkylation: Process Optimization, Reactor Design, and Future Perspectives. *Energy & Fuels*. 2024. Vol. 38. P. 11403–11436. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c01180.
10. Insight into the catalytic behavior of ionic liquids and deactivation suppression technique in naphthalene alkylation. *Chemical Engineering Science*. 2024. Vol. 292. Art. 119993. DOI: 10.1016/j.ces.2024.119993.
11. Applications and Future Directions of Ionic Liquids in Oil Refineries. *ChemEngineering*. 2026. Vol. 10. Art. 81.
12. Progress in the applications of biocompatible ionic liquids: renewable commodity production, catalytic and pharmaceutical approaches – a review. *Green Chemistry*. 2024. Vol. 26. P. 705–719. DOI: 10.1039/D3GC03693F.
13. Zhao Z.-K. et al. Alkylation of long-chain olefins with methyl naphthalene catalyzed by ionic liquids. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2004. Vol. 222. P. 207–212.

