

**AKKUMULYATORLAR ISHLAB CHIQRISHDAN
UTILIZATSIYAGACHA: EKOLOGIK YO‘L**

Tursunova Firuza

OrCID: 0009-0005-4232-7102

Tel.: +998 97-432-20-15

Annotatsiya: Ushbu maqolada litiy-ion akkumulyatorlarning butun hayotiy siklidagi xomashyo qazib olishdan tortib, ishlab chiqarish, foydalanish va utilizatsiyagacha bo‘lgan bosqichlardagi ekologik ta’siri tahlil qilingan. Ochiq statistik manbalar va ilmiy nashrlar asosida solishtirma issiqxona gazlari chiqindisi ($\text{kg CO}_{2,\text{ekv}}/\text{kW}\cdot\text{soat}$), energiya sarfi hamda materiallarni qayta qoplash darajalari bo‘yicha miqdoriy hisob-kitoblar amalga oshirildi. 60 kW·soatlik elektromobil akkumulyatorini ishlab chiqarish misolida CO_2 chiqindisi va energiya balansi hisoblab chiqilgan, shuningdek, litiyni qazib olish va qayta ishlash orqali olishning solishtirma ekologik samaradorligi ko‘rsatib berilgan. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, akkumulyatorlarni qayta ishlash xomashyoni birlamchi qazib olishga nisbatan issiqxona gazlari chiqindisini o‘rtacha 70-75% ga kamaytiradi, biroq dunyo bo‘yicha qayta ishlash darajasi hozircha past (taxminan 5-20%) bo‘lib qolmoqda.

Kalit so‘zlar: litiy-ion akkumulyator, hayotiy sikl, issiqxona gazlari, qayta ishlash, utilizatsiya, ekologik barqarorlik, uglerod izi.

KIRISH

So‘nggi o‘n yillikda elektromobillar, quyosh va shamol energetikasidagi akkumulyator stansiyalari hamda ko‘chma elektronika tufayli litiy-ion akkumulyatorlarga bo‘lgan talab keskin oshdi. Xalqaro Energetika Agentligi (XEA) prognozlariga ko‘ra, global litiy-ion batareya bozori 2030-yilga borib 1800 GW·soatga yetishi mumkin. Bu o‘shish, bir tomondan, transport va energetika sohasini uglerodsizlantirishga xizmat qilsa, ikkinchi tomondan, akkumulyatorlarning butun hayotiy sikli - litiy, kobalt, nikel kabi metallarni qazib olishdan tortib, ishlab chiqarish va oxir-oqibat utilizatsiya qilishgacha bo‘lgan bosqichlarda jiddiy ekologik yuk yaratadi.

Muammoning dolzarbligi shundaki, akkumulyator ishlab chiqarish jarayonining o‘zi ancha energiya talab qiladi va issiqxona gazlari chiqindisi bilan bog‘liq, ayniqsa ishlab chiqarishda ko‘mirga asoslangan elektr energiyasi ishlatilganda. Shu bilan birga, dunyo bo‘yicha ishlatilgan akkumulyatorlarning katta qismi hozircha qayta ishlanmay, poligonlarga tushmoqda yoki noaniq holatda saqlanmoqda, bu esa og‘ir metallarning tuproq va suvga sizib chiqishi xavfini keltirib chiqaradi.

Material va metodlar

Tadqiqotda ikkilamchi ma’lumotlar tahlili usulidan foydalanildi. Asosiy ma’lumotlar manbai sifatida quyidagilar tanlandi: nufuzli ilmiy jurnallarda (ScienceDirect, Nature Energy) chop etilgan hayotiy sikl baholash (Life Cycle Assessment, LCA) tadqiqotlari, Xalqaro Energetika Agentligi (IEA) hisobotlari, Yevropa Ittifoqining Batareyalar

reglamenti (EU Battery Regulation, 2023), Xitoy Xalq Respublikasining batareya qayta ishlash me'yoriy hujjatlari, shuningdek sanoat va bozor tahlili agentliklarining ochiq statistik ma'lumotlari.

Hisob-kitoblar quyidagi formulalar asosida amalga oshirildi:

1) Ishlab chiqarish bosqichidagi CO₂ chiqindisi: $G_{CO_2} = C \cdot k$,

bu yerda:

G_{CO_2} - jami CO₂ chiqindisi [kg]

C - batareya sig'imi [kW·soat],

k - solishtirma chiqindi ko'effitsiyenti [kg CO_{2.ekv}/kW·soat].

2) Qayta ishlash orqali tejaladigan chiqindi:

$$\Delta G = (k_{qaz} - k_{qayta}) \cdot m$$

bu yerda:

k_{qaz} va k_{qayta} - mos ravishda birlamchi va ikkilamchi (qayta ishlangan) xomashyo olishning solishtirma chiqindisi

m - mahsulot massasi.

3) Qayta ishlash darajasidagi ssenariy hisobi:

$$R = W \cdot r$$

bu yerda:

R - qayta ishlangan chiqindi hajmi;

W - jami kutilayotgan chiqindi hajmi;

r - qayta ishlash darajasi (%).

Barcha hisob-kitoblarda 60 kW·soatlik litiy-ion akkumulyator (o'rtacha elektromobil uchun tipik ko'rsatkich) shartli baza sifatida qabul qilindi. Manbalardagi qiymatlar oralig'i (masalan, 41–89 kg CO_{2.ekv}/kW·soat) ko'rsatilgan holatlarda o'rtacha arifmetik qiymat hisob-kitob uchun asos sifatida olindi. Tahlil tavsiflovchi statistika va oddiy miqdoriy taqqoslash usullari yordamida o'tkazildi; murakkab statistik modellashtirish ushbu ishning doirasidan tashqarida qoldi.

Natijalar

Ishlab chiqarish bosqichidagi issiqxona gazlari chiqindisi. Turli tadqiqotlar litiy-ion akkumulyator ishlab chiqarishning solishtirma CO₂ chiqindisi bo'yicha sezilarli farqlanuvchi qiymatlarni keltiradi — bu ishlab chiqarish hududi, elektr energiyasi manbai va batareya kimyoviy tarkibiga bog'liq. 1-jadvalda asosiy manbalardan olingan ko'rsatkichlar jamlangan.

Manba / tadqiqot	CO ₂ chiqindisi, kg [CO _{2.ekv} /kW·soat]	Hudud / sharoit	Yil
Degen va boshq. (prognoz LCA)	41 - 89	Xitoy, AQSH, Yel	2020
Degen va boshq. (prognoz, 2050)	10 - 45	Kam uglerodli energetika	2050 (prognoz)
Thunder Said Energy	100	O'rtacha global	2024
Dai va boshq.	72,9	AQSH, NMC111	2019

XAA (IEA) baholovi	150 - 200	Ko‘mirga asoslangan energiya	2025
--------------------	-----------	------------------------------	------

Jadvaldan ko‘rinib turibdiki, ko‘rsatkichlar 10 dan 221 kg $CO_{2,ekv}/kW \cdot soat$ gacha keng oraliqni tashkil etadi. Bunday katta farqning asosiy sababi - ishlab chiqarish jarayonida ishlatiladigan elektr energiyasining manbai: ko‘mirga asoslangan energetikada chiqindi yuqori (150–200 kg $CO_{2,ekv}/kW \cdot soat$), qayta tiklanuvchi yoki past uglerodli energiyada esa sezilarli darajada past bo‘ladi.

60 kW·soatlik akkumulyator misolida hisob-kitob. Tipik elektromobil akkumulyatori (60 kW·soat sig‘imli) uchun 2020-yilgi o‘rtacha ko‘rsatkich (70 kg $CO_{2,ekv}/kW \cdot soat$) asosida hisoblanganda, ishlab chiqarish bosqichida taxminan 4,2 tonna $CO_{2,ekv}$ chiqindi hosil bo‘ladi. Kam uglerodli energetikaga o‘tish stsenariysida (2050-yilga prognoz, taqriban 27,5 kg $CO_{2,ekv}/kW \cdot soat$) bu ko‘rsatkich 1,65 tonnagacha, ya’ni taxminan 61% ga kamayishi mumkin. Shuningdek, ishlab chiqarish energiya sig‘imi bo‘yicha baholash (175 kW·soat energiya / 1 kW·soat sig‘im me’yorida) shuni ko‘rsatadiki, bunday akkumulyatorni ishlab chiqarish uchun jami 10 500 kW·soat elektr energiyasi sarflanadi - bu o‘rtacha oilaning bir necha oylik elektr energiyasi iste’moliga teng.

Ko‘rsatkich	2020 yil sharoiti	2050 yil prognozi
Solishtirma chiqindi, kg CO_2 -ekv/kWh	70 (41–89 oralig‘i)	27,5 (10–45 oralig‘i)
60 kW·soatlik batareya uchun jami chiqindi	4 200 kg (4,2 t) CO_2	1 650 kg (1,65 t) CO_2
Ishlab chiqarish uchun sarflanadigan energiya (175 kW·soat/kW·soat me’yorida)	10 500 kW·soat	-
Kutilayotgan kamayish (2020→2050)	-	61%

Qazib olingan va qayta ishlangan litiyning ekologik samaradorligi. Litiy gidroksidi monogidratini ($LiOH \cdot H_2O$) olishning ikki usuli - an’anaviy qazib olish va gidrometallurgik qayta ishlash — solishtirilganda katta farq kuzatiladi. Minviro kompaniyasining hayotiy sikl baholash (LCA) tadqiqotiga ko‘ra, 1 kg mahsulot uchun birlamchi qazib olishda 12,7 kg $CO_{2,ekv}$, qayta ishlashda esa atigi 3,3 kg $CO_{2,ekv}$ chiqindi hosil bo‘ladi.

Jarayon	CO_2 , kg/kg $LiOH \cdot H_2O$	1 tonna uchun, [t CO_2]
An’anaviy qazib olish va qayta ishlash	12,7	12,7
Akkumulyatorlarni qayta ishlash (gidrometallurgik usul)	3,3	3,3
Tejaladigan chiqindi (farq)	9,4	74% kamayish

20-Iyul, 2026-yil

Bu ko‘rsatkichni amaliy miqyosga ko‘chirsak: 100 000 dona elektromobil akkumulyator to‘plami uchun zarur litiyni qayta ishlash yo‘li bilan olish, an’anaviy qazib olishga nisbatan, taxminan 40 570 tonna $CO_{2,ekv}$ chiqindining oldini olish imkonini beradi — bu taxminan 300 ta ko‘k kit vaznidagi CO_2 hajmiga teng.

Materiallarni qayta qoplash darajalari va me‘yoriy talablar. Hozirgi kunda turli mamlakat va hududlarda akkumulyator materiallarini qayta qoplash bo‘yicha turlicha me‘yoriy talablar joriy etilgan. Yevropa Ittifoqi 2023-yilda qabul qilingan Batareyalar reglamentida bosqichma-bosqich qattiq talablarni belgilagan, Xitoyda esa allaqachon yuqori standartlar amal qilmoqda.

Me‘yoriy hujjat / mamlakat	Litiy	Kobalt	Nikel
YEI reglamenti, 2028-yil	50%	90%	90%
YEI reglamenti, 2032-yil	80%	95%	95%
Xitoy me‘yori (amaldagi)	$\geq 85\%$	$\geq 98\%$	$\geq 98\%$
XAA — amaldagi global daraja, 2023-yil	20%	>40%	>40%

Ko‘rinib turibdiki, hozirgi global amaliyot (litiy uchun 20%, nikel va kobalt uchun 40% dan kam) me‘yoriy talablardan (2028–2032 yillarga mo‘ljallangan 50-95%) hali ancha orqada qolmoqda. Bu farq - sohaning yaqin 5-10 yil ichida jiddiy texnologik va infratuzilmaviy rivojlanishga muhtojligini ko‘rsatadi.

Global chiqindi hajmi va qayta ishlash stsenariylari. Patent tahlili va sanoat hisobotlariga ko‘ra, hozirda dunyo bo‘yicha ishlatilgan litiy-ion akkumulyator-larning taxminan 5% i qayta ishlanadi (yiliga 70 ming tonna), 2017–2030 yillar oralig‘ida esa jami 11 million tonnadan ortiq akkumulyator chiqindisi kutilmoqda. (Izoh: ba’zi mutaxassislar, xususan H.E.Melin, ushbu «5%» ko‘rsatkichini haddan tashqari umumlashtirilgan deb hisoblaydi, chunki Yevropa kabi rivojlangan yig‘ish tizimiga ega hududlarda amaldagi ko‘rsatkich sezilarli yuqori bo‘lishi mumkin. Shunga qaramay, global miqyosda past qayta ishlash darajasi muammosi tan olingan haqiqatdir.) Quyidagi jadvalda ikki ssenariy - joriy holat va YEI maqsadlariga erishilgan holat solishtirilgan.

Ssenariy	Qayta ishlash darajasi	2030-yilgacha qayta ishlanadigan hajm
Joriy holat saqlansa	5%	0,55 mln t
YEI maqsadlariga muvofiq (o‘rtacha 65%)	65%	7,15 mln t
Farq (qo‘shimcha tejalgan xomashyo)	-	6,6 mln t

Hisob-kitoblar shuni ko‘rsatadiki, agar global qayta ishlash darajasi joriy 5% dan YEI belgilagan maqsadlarga yaqin 65% ga oshirilsa, 2030-yilgacha qo‘shimcha ravishda taxminan 6,6 million tonna akkumulyator materiali qayta muomalaga qaytarilishi, demak,

shunga mos ravishda birlamchi xomashyo qazib olish va u bilan bog‘liq ekologik yuk sezilarli kamayishi mumkin.

Qayta ishlash bozorining iqtisodiy dinamikasi. Ekologik samaradorlik bilan bir qatorda, akkumulyator qayta ishlash sohasi jadal iqtisodiy o‘shishni ham namoyish etmoqda. Turli tahliliy agentliklarning ma’lumotlariga ko‘ra, global litiy-ion batareya qayta ishlash bozori 2024-yilda taxminan 7,3 milliard AQSH dollarini tashkil etgan bo‘lib, 2030-yilga borib 23,9 milliard dollarga yetishi (yillik o‘shish sur‘ati - 21,9%) kutilmoqda. Bu, oddiy hisoblashda, olti yil ichida bozor hajmining o‘rtacha yiliga 2,77 milliard dollarga o‘shishini anglatadi. Bunday jadal o‘shish qayta ishlash texnologiyalariga sarmoya kiritish va infratuzilmani rivojlantirish uchun qulay iqtisodiy sharoit yaratilayotganidan dalolat beradi.

MUHOKAMA

Olingan natijalar akkumulyatorlarning ekologik izi ularning butun hayotiy sikli davomida bir tekis taqsimlanmasligini ko‘rsatadi: eng katta yuk ishlab chiqarish bosqichiga, xususan xomashyo qazib olish va energiya sarfiga to‘g‘ri keladi. Shu sababli, akkumulyator ishlab chiqarishni past uglerodli elektr energiyasiga o‘tkazish (taxminan 61% chiqindi kamayishi) - yaqin muddatda eng samarali ekologik chora bo‘lib qolmoqda.

Ikkinchi muhim natija - qayta ishlashning ekologik ustunligi aniq isbotlangan: litiyni qayta ishlash orqali olish birlamchi qazib olishga nisbatan taxminan 74% kam CO₂ chiqindisi bilan amalga oshiriladi. Bu ko‘rsatkich boshqa metallar (kobalt, nikel, mis) uchun ham o‘xshash tendensiyanı tasdiqlaydi, chunki qazib olish va boyitish jarayonlari odatda eng energiya talab qiluvchi bosqichlardir.

Shu bilan birga, yuqorida ko‘rsatilgan farq - me‘yoriy talablar bilan amaldagi holat o‘rtasidagi katta tafovut - sohaning asosiy muammosini ochib beradi: texnologik salohiyat mavjud bo‘lsa-da (masalan, Xitoyda nikel-kobalt uchun 98% gacha qoplash erishilgan), global miqyosda yig‘ish va qayta ishlash infratuzilmasi hali yetarlicha rivojlanmagan. Bu, ayniqsa, rivojlanayotgan mamlakatlarda dolzarb, chunki ular ko‘pincha «qora massa» eksport qilishga majbur bo‘lib, qo‘shimcha qiymatni o‘z ichida qayta ishlab qololmaydi.

Iqtisodiy nuqtai nazardan, qayta ishlash bozorining jadal o‘shishi ekologik va tijorat manfaatlarining bir-biriga mos kelayotganidan dalolat beradi - bu holat davlat siyosati (masalan, YeI reglamenti kabi majburiy me‘yorlar) bilan birgalikda sohani yanada tezroq rivojlantirishga zamin yaratadi.

Tadqiqotning cheklovlari ham mavjud: hisob-kitoblar ochiq manbalardagi o‘rtacha va taxminiyl ko‘rsatkichlarga asoslangan bo‘lib, aniq zavod yoki mintaqaviy sharoitlarni to‘liq aks ettirmasligi mumkin. Shuningdek, akkumulyatorning transport va foydalanish bosqichlaridagi ekologik ta’siri ushbu maqola doirasida chuqur tahlil qilinmadi - bu keyingi tadqiqotlar uchun istiqbolli yo‘nalish bo‘lishi mumkin.

XULOSA

O‘tkazilgan tahlil va hisob-kitoblar asosida quyidagi asosiy xulosalarga kelindi:

- litiy-ion akkumulyator ishlab chiqarishning solishtirma CO₂ chiqindisi 10 dan 221 kg CO_{2,ekv}/kW·soatgacha o‘zgaradi va bu, birinchi navbatda, ishlab chiqarishda ishlatiladigan elektr energiyasi manbaiga bog‘liq;

- 60 kW·soatlik elektromobil akkumulyatorini ishlab chiqarish taxminan 4,2 tonna CO_{2,ekv} chiqindi va 10 500 kW·soat energiya talab qiladi; past uglerodli energetikaga o‘tish bu ko‘rsatkichni 61% ga kamaytirishi mumkin;

- litiyni qayta ishlash orqali olish birlamchi qazib olishga nisbatan taxminan 74% kam issiqxona gazi chiqindisi bilan amalga oshiriladi, bu qayta ishlashning ekologik ustunligini aniq tasdiqlaydi;

- global miqyosda amaldagi qayta ishlash darajasi (litiy uchun 20%, umumiy yig‘ish darajasi taxminan 5%) me‘yoriy maqsadlardan (2032-yilga 80–95%) sezilarli orqada qolmoqda, bu esa infratuzilma va siyosatni rivojlantirish zaruratini ko‘rsatadi;

- qayta ishlash bozorining jadal iqtisodiy o‘shishi (2024–2030 yillarda 3 barobar) ekologik va tijorat manfaatlarining uyg‘unlashib borayotganidan dalolat beradi.

Amaliy tavsiya sifatida quyidagilarni taklif etish mumkin: akkumulyator ishlab chiqaruvchi korxonalarni qayta tiklanuvchi energiya manbalariga o‘tkazishni rag‘batlantirish; ishlatilgan batareyalarni majburiy yig‘ish va tayyorlab qayta ishlashga topshirish tizimini joriy etish; qayta ishlash texnologiyalarini (ayniqsa gidrometallurgik usullarni) mahalliy sharoitda rivojlantirishga sarmoya yo‘naltirish. Bunday chora-tadbirlar akkumulyator sanoatining «ishlab chiqarishdan utilizatsiyagacha» bo‘lgan butun yo‘lini yanada ekologik barqaror qilishga xizmat qiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Degen F. et al. Future greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion battery cell production // Resources, Conservation and Recycling / ScienceDirect. - 2022.

2. Thunder Said Energy. Energy costs of lithium-ion batteries? - 2024. URL: <https://thundersaidenergy.com>

3. International Energy Agency (IEA). Recycling of Critical Minerals — Executive Summary. - 2024–2025. URL: <https://www.iea.org/reports/recycling-of-critical-minerals>

4. American Manganese Inc. (RecycLiCo Battery Materials). RecycLiCo Highlights CO₂ Emission Savings for Lithium Production (Minviro Ltd. LCA hisoboti). - 2022.

5. Dunn J. Mineral Recovery Rates - the Why and How for Lithium-Ion Battery Recycling Policy // Union of Concerned Scientists. - 2025.

6. Lithium-Ion Battery Recycling — Global Strategic Business Report // ResearchAndMarkets / GlobeNewswire. — 2025.

7. Melin H. E. The 5% rate and other untruths about battery recycling. - 2024.

8. Assessment of recycling methods and processes for lithium-ion batteries // PMC (National Library of Medicine). - 2022.

9. Growth of Battery Recycling being realised // Ecobatt. - 2024.

20-Iyul, 2026-yil

10. EU's recycled content targets of lithium-ion batteries are likely to compromise critical metal circularity // ScienceDirect. - 2024.