



UDK:621.355.9:546.47

**Muxlisa SA'DULLAYEVA,**  
Magistrant O'zbekiston Milliy universiteti, Toshkent, O'zbekiston  
Email: smuxlisa20@gmail.com

**Sardor TULAGANOV,**  
PhD, Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, Toshkent, O'zbekiston

**Mirtemir KURBANOV,**  
Texnika fanlari doktori (DSc), professor,  
Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti, Toshkent, O'zbekiston

O'zFA Energetika muammolari instituti katta ilmiy xodimi, PHD U.Hoshimov taqrizi asosida

### AQUEOUS ZINC-ION BATTERIES: ANODE-ELECTROLYTE INTERFACE, MECHANISMS AND DEGRADATION ISSUES

Annotation

Aqueous zinc-ion batteries are considered promising safe and cost-effective energy storage systems; however, their practical application is constrained by the interfacial stability of the zinc anode. Ion transport inhomogeneity at the anode-electrolyte interface leads to dendrite formation, hydrogen evolution reaction, and passivation. This work analyzes  $Zn^{2+}$  solvation, ion flux distribution, local current density, and plating/stripping kinetics in relation to degradation mechanisms. Interfacial stabilization strategies are systematically summarized from a mechanistic perspective, and a conceptual model aimed at enhancing long-term anode stability is proposed.

**Keywords:** anode-electrolyte interface, dendrites, degradation, hydrogen evolution reaction (HER), interface, zinc anode.

### ВОДНЫЕ ЦИНК-ИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ: ИНТЕРФЕЙС АНОД-ЭЛЕКТРОЛИТ, МЕХАНИЗМЫ И ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ

Аннотация

Водные цинк-ионные аккумуляторы являются перспективными системами накопления энергии, однако их применение ограничено стабильностью интерфейса цинкового анода. Неравномерный ионный транспорт на границе анод-электролит вызывает дендритообразование, реакцию выделения водорода и пассивацию. В работе анализируются сольватация  $Zn^{2+}$ , распределение ионного потока и кинетика осаждения/растворения в связи с механизмами деградации. С механистической позиции обобщены стратегии стабилизации и предложена концептуальная модель повышения стабильности анода.

**Ключевые слова:** интерфейс анод-электролит, дендриты, деградация, реакция выделения водорода (HER), интерфейс, цинковый анод.

### SUVLI RUX-ION AKKUMULYATORLARDA ANOD-ELEKTROLIT INTERFEYSI: MEXANIZM VA DEGRADATSIYA MUAMMOLARI

Annotatsiya

Suvli rux-ion akkumulyatorlar xavfsiz va iqtisodiy energiya saqlash tizimlari sifatida istiqbolli bo'lsa-da, ularning amaliy qo'llanilishi rux anodining interfeys barqarorligi bilan cheklanadi. Anod-elektrolit interfeysida ion transport nomuvozanati dendrit hosil bo'lishi, vodorod ajralishi va passivatsiyaga olib keladi. Mazkur maqolada  $Zn^{2+}$  solvatsiyasi, ion fluksi taqsimoti, lokal tok zichligi va plating/stripping kinetikasi degradatsiya mexanizmlari bilan integrallashgan holda tahlil qilinadi. Interfeysni barqarorlashtirish strategiyalari mexanizm asosida umumlashtirilib, anod barqarorligini oshirishga qaratilgan konseptual model taklif etiladi.

**Kalit so'zlar:** anod-elektrolit interfeysi, dendrit, degradatsiya, vodorod ajralishi reaksiyasi (HER), interfeys, rux anod.

**Kirish.** Mamlakatimizda ilm-fan va innovatsion faoliyatni rivojlantirishga qaratilgan islohotlar, jumladan, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2025-yil 27-dekabrda PQ-390-son qarorida fundamental va amaliy tadqiqotlar samaradorligini oshirish hamda natijalarni amaliyotga joriy etish ustuvor yo'nalish sifatida belgilangan. Ushbu vazifalar doirasida xavfsiz va iqtisodiy jihatdan maqbul energiya saqlash texnologiyalarini yaratish dolzarb ilmiy masala hisoblanadi.

Qayta tiklanuvchi energiya manbalarining jadal rivojlanishi xavfsiz va barqaror energiya saqlash tizimlariga ehtiyojni kuchaytirdi [1]. Suvli rux-ion akkumulyatorlar (ZIB) yuqori xavfsizlik darajasi va past narxi sababli istiqbolli alternativ hisoblanadi [1,10]. Bunda katod materiallari, xususan marganets asosidagi tizimlar keng o'rganilmoqda [4]. Biroq ularning amaliy qo'llanilishi rux anodining uzoq muddatli barqarorligi bilan cheklanadi.

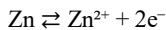
Plating/stripping jarayonlarida anod yuzasida notekis rux cho'kishi dendrit hosil bo'lishiga olib keladi [6,7]. Ion fluksining notekis taqsimlanishi va lokal tok zichligining ortishi dendrit evolyutsiyasini tezlashtirib, qisqa tutashuv xavfini oshiradi. Bundan tashqari, vodorod ajralishi reaksiyasi (HER), korroziya va passiv qatlamlar rux anodining samaradorligini pasaytiradi [9].

So'nggi tadqiqotlar suvli Zn tizimlarida interfeys kimyoviy potensialini boshqarish redoks jarayonlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishini ko'rsatmoqda [2]. Mazkur degradatsiya jarayonlari asosan anod-elektrolit interfeysida shakllanadi. Interfeysning fizik-kimyoviy xususiyatlari ion almashinuvi va sirt kinikasini belgilab, anod barqarorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi [7,9].  $Zn^{2+}$

ionlarining solvatsiyasi, elektrolit tarkibi va qo'shimchalar interfeys jarayonlarini boshqaradi [8]. Shu bois interfeys muhandisligi — elektrolit modifikatsiyasi, additivlar, sun'iy himoya qatlamlari va anod arxitekturasini optimallashtirish – rux anodini barqarorlashtirishning asosiy yo'nalishidir [5-8].

Ushbu maqolada suvli ZIBlarda anod-elektrolit interfeysida kechadigan mexanizmlar tizimli ravishda tahlil qilinadi, degradatsiya jarayonlari sabab–natija bog'lanishlari asosida umumlashtiriladi hamda interfeys barqarorligini oshirishga qaratilgan konseptual model taklif etiladi [10].

**Zn anodida asosiy elektrokimyoviy mexanizmlar.** Suvli rux-ion akkumulyatorlarda energiya saqlash mexanizmi rux metall anodida sodir bo'ladigan qaytariluvchi redoks reaksiyaga asoslanadi:



Razryad jarayonida rux oksidlanib eritmaga o'tadi (stripping), zaryad vaqtida esa  $\text{Zn}^{2+}$  ionlari anod yuzasiga qayta cho'kadi (plating). Ideal sharoitda jarayon yuqori qaytariluvchanlikka ega bo'lishi lozim, biroq kinetik cheklovlar va sirt notekisliklari sababli cho'kish bir tekis kechmaydi [3].

Plating nukleatsiya va kristall o'sish bosqichlarini o'z ichiga oladi. Ion fluksining notekis taqsimlanishi va lokal tok zichligining ortishi ignasimon morfologiyada o'sishga olib kelib, dendrit hosil bo'lishini keltirib chiqaradi [6,7]. Elektr maydon konsentratsiyasi ("tip effect") protrusionlar atrofida ion oqimini kuchaytirib, o'z-o'zini tezlashtiruvchi o'sish mexanizmini shakllantiradi. Stripping jarayonida ruxning to'liq erimasligi "o'lik rux" (dead Zn) hosil bo'lishiga sabab bo'lib, faol massa yo'qolishi va Coulomb samaradorligining pasayishiga olib keladi [3,6,7].

Suvli muhitda plating jarayoni vodorod ajralishi reaksiyasi (HER) bilan raqobatlashadi. HER anod potensialiga yaqin sharoitlarda faollashadi [9]. Zn anod barqarorligini oshirish bo'yicha umumiy mexanistik strategiyalar batafsil tahlil qilingan [10]. Shu bois plating/stripping jarayoni sof elektrokimyoviy emas, balki interfeysning fizik-kimyoviy holati bilan integrallashgan tizimdir [10].

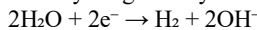
Zn anodining morfologik barqarorligi ion transport bilan chambarchas bog'liq.  $\text{Zn}^{2+}$  ionlari diffuziya va migratsiya orqali harakatlanadi, ion fluksining konsentratsiyalanishi esa tezlashtirilgan cho'kishni keltirib chiqaradi. Nazariy modellar ion fluksi va tok zichligi bir tekis taqsimlanganda qatlamlari rux cho'kishi kuzatilishini ko'rsatadi.

Suvli elektrolitda  $\text{Zn}^{2+}$  ionlari odatda gidratlangan kompleks —  $[\text{Zn}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  — shaklida mavjud [8]. Plating jarayonida qisman desolvatsiya zarur bo'lib, yuqori desolvatsiya energiyasi zaryad uzatilish qarshiligini oshiradi va nukleatsiya kinetikasiga ta'sir ko'rsatadi. Solvatsiya tuzilmasini elektrolit konsentratsiyasi yoki qo'shimchalar orqali boshqarish ion transport, sirt kinetikasi va dendrit hosil bo'lish ehtimolini bevosita belgilaydi [8]. Shu bois solvatsiya kimyosi Zn anod barqarorligini mexanistik tushunishda markaziy omil hisoblanadi.

**Anod–elektrolit interfeysida degradatsiya jarayonlari.** Suvli rux-ion akkumulyatorlarda anod–elektrolit interfeysi degradatsiyaning markaziy hududi hisoblanadi. Aynan shu zonada zaryad uzatilishi va ion almashuvi sodir bo'lib, interfeysning fizik-kimyoviy barqarorligi buzilganda dendrit hosil bo'lishi, vodorod ajralishi (HER) va korroziya faollashadi hamda sikllanish barqarorligi cheklanadi [10].

Dendrit hosil bo'lishi nukleatsiya bosqichidan boshlanadi. Zaryad vaqtida  $\text{Zn}^{2+}$  ionlari anod yuzasida metall rux sifatida cho'kadi, biroq sirt energiyasi heterogenligi yoki ion ta'minoti cheklanishi nukleatsiyani lokal hududlarda intensivlashtiradi [6,7]. Elektr maydon konsentratsiyasi yuqori bo'lgan protrusionlarda ion oqimi kuchayib, ignasimon yoki daraxtsimon strukturalar shakllanadi. Ushbu "lokal tok zichligi effekti" o'z-o'zini kuchaytiruvchi mexanizm hosil qilib, dendritlarning separatormi teshib o'tish xavfini oshiradi [6,7].

Interfeys degradatsiyasining muhim komponenti vodorod ajralishi reaksiyasidir:



HER anod potensialiga yaqin sharoitlarda, ayniqsa lokal overpotential ortganda faollashadi va Zn plating bilan raqobatlashadi [10]. Gaz pufakchalari hosil bo'lishi tok taqsimotini notekislashtirib, sirt degradatsiyasini kuchaytiradi [9]. pH va potensial sharoitlari HER kinetikasiga bevosita ta'sir ko'rsatadi [9].

Korroziya jarayonlari ham anod barqarorligini pasaytiradi. Suvli elektrolit bilan kontakt natijasida ZnO yoki  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  passiv qatlamlari hosil bo'ladi [10]. Ularning notekis yoki g'ovak tuzilishi ion transportini cheklab, elektron aloqani buzadi. Stripping jarayonida to'liq erimagan rux yoki passiv qatlam bilan qoplangan hududlar "o'lik rux" (dead Zn) fenomenini yuzaga keltirib, faol massa kamayishiga va Kulon samaradorligining pasayishiga olib keladi [3,6,7].

Shunday qilib, dendrit evolyutsiyasi, HER va korroziya o'zaro bog'liq jarayonlar bo'lib, interfeys degradatsiyasining kompleks mexanizmini tashkil etadi [10]. Ularni mexanistik darajada tushunish interfeysni barqarorlashtirish strategiyalarini ishlab chiqish uchun asos yaratadi [5–7].

**Interfeysni barqarorlashtirish strategiyalari.** Anod–elektrolit interfeysida yuzaga keladigan degradatsiyani cheklash uchun so'nggi yillarda turli muhandislik yondashuvlari taklif etilgan. Ushbu strategiyalar ion transportini optimallashtirish, lokal tok zichligini kamaytirish,  $\text{Zn}^{2+}$  solvatsiya tuzilmasini boshqarish va sirt reaksiyalarini nazorat qilishga qaratilgan [6–8].

Elektrolit modifikatsiyasi eng keng qo'llaniladigan usullardan biri bo'lib, ion o'tkazuvchanligi, pH muvozanati va suv faolligini boshqarish orqali interfeys kinetikasini tartibga soladi [8,10]. Anion turi va ion kuchi  $\text{Zn}^{2+}$  ionlarining desolvatsiya energiyasi hamda plating kinetikasiga bevosita ta'sir qiladi, bu esa dendrit hosil bo'lishi va HERni kamaytirishga xizmat qiladi [8].

Additivlar Zn anod yuzasida adsorbsiyalanib, interfaol himoya qatlamini shakllantiradi [5]. Ular nukleatsiya markazlarini ko'paytirib, bir tekis cho'kishini ta'minlaydi hamda sirt energiyasini pasaytirib yoki HER kinetikasini bostirib plating barqarorligini oshiradi [5–7].

Yuqori konsentratsiyali elektrolitlar, jumladan "water-in-salt" tizimlari, suv faolligini kamaytirish orqali HERni cheklaydi va  $\text{Zn}^{2+}$  solvatsiya qobig'ini qayta tashkil etadi [11]. Natijada desolvatsiya kinetikasi optimallashtirib, plating bir tekis kechadi. Biroq ion transport viskozligi oshishi mumkinligi sababli optimal konsentratsiya muhimdir [11].

Sun'iy himoya qatlamlari (artificial interphase) Zn yuzasida ion o'tkazuvchi, elektron izolyatsiyalovchi barqaror qatlam hosil qilib, yon reaksiyalarni cheklaydi [5]. Bunday qoplamalar lokal tok zichligini bir tekislashtirib, dendrit o'sishini mexanik va elektrostatik jihatdan cheklaydi [7].

3D anod arxitekturasi sirt maydonini kengaytirib, tok zichligini kamaytiradi va ion fluksini bir tekis taqsimlaydi [6,7]. Bu protrusion hosil bo'lish ehtimolini kamaytirib, mexanik barqarorlikni oshiradi [6,7].

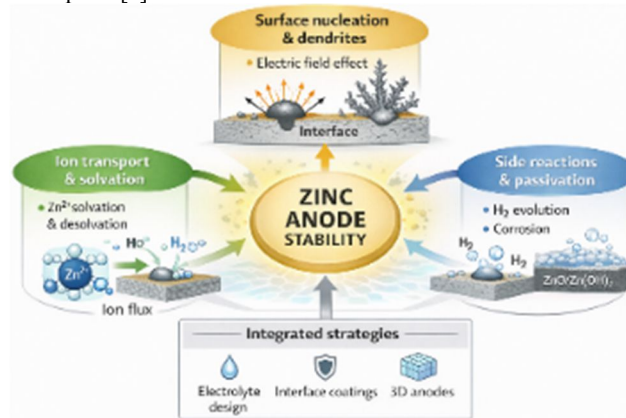
Umuman, interfeysni barqarorlashtirish kompleks yondashuvni talab qiladi. Elektrolit dizayni, additivlar, himoya qatlamlari va strukturaviy muhandislik integratsiyalashganda ion transport va sirt kinetikasi boshqarilib, degradatsiya jarayonlari samarali cheklanadi [5–7,11].

**Mexanizm–muammo–yechim korrelyatsiyasi.** Suvli rux-ion akkumulyatorlarda anod–elektrolit interfeysida sodir bo'ladigan jarayonlar o'zaro bog'liq sabab–natija zanjirini tashkil etadi. Plating/stripping kinetikasi, ion fluksi taqsimoti va  $Zn^{2+}$  solvatsiya barqarorligi interfeys degradatsiyasini belgilovchi asosiy mexanizmlardir [10].

Ion transport heterogenligi yoki sirt energiyasi notekisligi lokal tok zichligining ortishiga olib keladi, bu esa notekis nukleatsiya va dendrit evolyutsiyasini boshlaydi [6,7]. Protrusionlarda elektr maydon konsentratsiyasi kuchayishi dendrit o'sishini o'z-o'zini tezlashtiruvchi jarayonga aylantiradi [6].

HER suv faolligi va anod potensialiga bog'liq holda kuchayadi hamda Zn plating bilan raqobatlashadi [9]. Yuqori konsentratsiyali yoki solvatsiya tuzilmasini boshqaruvchi elektrolit tizimlari suv reaktivligini kamaytirib, HER kinetikasini bostiradi [11].

Korroziya va passivatsiya jarayonlari Zn yuzasida ZnO yoki Zn(OH)<sub>2</sub> qatlamlari hosil bo'lishi bilan bog'liq bo'lib, ion transportni cheklaydi va faol massa yo'qolishiga olib keladi [9]. Sun'iy himoya qatlamlari esa barqaror ion o'tkazuvchi interfeys hosil qilib, sirt reaksiyalarini nazorat qiladi [5].



**1-rasm.** Suvli rux-ion akkumulyatorlarda anod–elektrolit interfeysi orqali rux anod barqarorligini boshqarish mexanizmlarini ko'rsatuvchi konseptual model.

1-rasmda ko'rsatilganidek, suvli rux-ion akkumulyatorlarda rux anod barqarorligi uchta o'zaro bog'liq interfeys moduli orqali boshqariladi. Taklif etilayotgan konseptual model ion transport va solvatsiya jarayonlari [8], sirt energetikasi va nukleatsiya mexanizmlari [6,7] hamda yon reaksiyalar va passivatsiya jarayonlarini [5,9] yagona sabab–natija tizimida integratsiyalashgan holda ifodalaydi.

Ion transport va solvatsiya moduli  $Zn^{2+}$  ionlarining interfeysga yetib kelishi, desolvatsiya kinetikasi va ion fluksi taqsimotini belgilaydi [8]; sirt energetikasi moduli nukleatsiya zichligi hamda dendrit evolyutsiyasini aniqlaydi [6,7]; yon reaksiyalar moduli esa HER, korroziya va passiv qatlam shakllanishi orqali plating/stripping samaradorligiga ta'sir ko'rsatadi [5,9,10]. Mazkur bloklar integrallashgan holda boshqarilganda ion fluksi bir tekis taqsimlanadi, lokal tok zichligi kamayadi va degradatsiya zanjiri uziladi [6,7]. Natijada Zn anodining uzoq muddatli sikllanish barqarorligi ta'minlanadi [10].

**Kelajak yo'nalishlari.** Suvli rux-ion akkumulyatorlarda anod–elektrolit interfeysini barqarorlashtirish bo'yicha sezilarli yutuqlarga erishilgan bo'lsa-da, fundamental darajada ilmiy bo'shliqlar saqlanib qolmoqda. Xususan,  $Zn^{2+}$  ionlarining real ish sharoitidagi solvatsiya–desolvatsiya dinamikasi va sirt bilan o'zaro ta'siri to'liq aniqlashtirilmagan [8]. Ko'plab tadqiqotlar makroskopik elektrokimyaviy natijalarga tayanadi, biroq atomistik mexanizmlar, ayniqsa metastabil nukleatsiya bosqichi va uning kristall o'sishga ta'siri yetarlicha yoritilmagan.

Interfeys degradatsiyasi ko'pincha alohida omillar bilan izohlanadi, holbuki dendrit evolyutsiyasi, HER va passivatsiya o'zaro bog'liq dinamik jarayonlardir [9]. Ularni bir vaqtning o'zida kuzatish uchun multimodal yondashuvlar zarur. Operando va in situ spektroskopik hamda mikroskopik metodlar ion transport, lokal tok zichligi va sirt morfologiyasi o'rtasidagi bog'liqlikni real vaqt rejimida aniqlash imkonini beradi [8].

Interfeys muhandisligi ham ko'pincha alohida strategiyalar doirasida o'rganiladi. Kelajakda elektrolit dizayni, sun'iy himoya qatlamlari va 3D anod arxitekturasini integratsiyalash ion transport va sirt reaksiyalarini kompleks boshqarish imkonini beradi [5–7,9]. Bunday tizimli yondashuv sabab–natija zanjirini bir necha bosqichda uzishga xizmat qiladi [9,10].

Nazariy modellash va hisoblash kimyosini eksperimental ma'lumotlar bilan uyg'unlashtirish ham dolzarb yo'nalishdir. Multifizik modellar ion migratsiyasi, elektr maydon taqsimoti va sirt kinetikasini birgalikda tavsiflab, interfeys barqarorligini prognoz qilish imkonini beradi [9].

Umuman, kelajak tadqiqotlarining asosiy maqsadi interfeys jarayonlarini chuqur mexanistik tushunish va integratsiyalashgan muhandislik yondashuvlari orqali degradatsiyani tizimli ravishda cheklashdan iborat. Bu suvli rux-ion akkumulyatorlarning uzoq muddatli barqarorligi va sanoat miqyosida qo'llanilishi uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega [9–11].

**Xulosa.** Suvli rux-ion akkumulyatorlarda anod–elektrolit interfeysi tizim barqarorligini belgilovchi markaziy zona hisoblanadi.  $Zn \rightleftharpoons Zn^{2+}$  plating/stripping qaytariluvchanligi, ion fluksi taqsimoti va  $Zn^{2+}$  solvatsiya xususiyatlari aynan interfeys darajasida integrallashgan holda namoyon bo'ladi [8]. Shu bois interfeysning fizik-kimyoviy holati ZIB tizimining sikllanish barqarorligi va xavfsizligini belgilaydi.

Dendrit hosil bo'lishi, vodorod ajralishi (HER), korroziya va passivatsiya o'zaro bog'liq degradatsiya mexanizmlaridir [9,10]. Ion transport nomuvozanati lokal tok zichligini oshirib dendrit evolyutsiyasini tezlashtiradi, HER va passivatsiya esa faol massa yo'qolishiga olib keladi. Natijada interfeys degradatsiyasi zanjirli xarakter kasb etadi.

Shu sababli suvli ZIBlarda barqarorlikni oshirish mexanizmga asoslangan kompleks yondashuvni talab qiladi. Elektrolit dizayni, sun'iy himoya qatlamlari va strukturaviy muhandislik integrallashgan holda qo'llanilganda anod barqarorligi sezilarli yaxshilanadi [5]. Interfeys jarayonlarini chuqur tushunish va boshqarish rux anodning uzoq muddatli barqarorligini ta'minlashning asosiy shartidir.

#### ADABIYOTLAR

1. Xin, S., Zhang, X., Wang, L. et al. Roadmap for rechargeable batteries: present and beyond. *Sci. China Chem.* 67, 13–42 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11426-023-1908-9>
2. Sun, W., Bi, J., Zhou, M. et al. Interfacial chemical potential modulation stabilizes manganese oxide redox in mild aqueous zinc batteries. *Sci. China Chem.* (2026). <https://doi.org/10.1007/s11426-025-3066-4>
3. Zhuang, Y., Liang, Y., Zhang, W. et al. Rational Electrolyte Structure Engineering for Highly Reversible Zinc Metal Anode in Aqueous Batteries. *Nano-Micro Lett.* 18, 102 (2026). <https://doi.org/10.1007/s40820-025-01950-7>
4. Luo, H., Zhang, H.J., Tao, Y. et al. Advances in manganese-based cathode electrodes for aqueous zinc-ion batteries. *Front. Energy* 19, 260–282 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11708-025-0983-7>
5. Shen, Q., Chen, T., Li, X. et al. Self-assembled electrode-electrolyte interphase enabling highly reversible Zn metal anode for aqueous zinc batteries. *Sci. China Mater.* 67, 2266–2276 (2024). <https://doi.org/10.1007/s40843-023-2912-5>
6. Tong, C. (2025). Flexible Zinc-Ion Batteries. In: *Advanced Energy Materials for Flexible Batteries*. Springer Series in Materials Science, vol 349. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-83971-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-83971-9_6)
7. Hao, Z., Fu, Y., He, Z. et al. Open frameworks materials towards stable aqueous zinc-ion batteries. *Ionics* 31, 10075–10088 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11581-025-06649-8>
8. Jiang, P., Chen, J., Chen, K. et al. Solvation regulation with Janus solvates for sustainable aqueous Zn ion batteries. *Sci. China Mater.* (2026). <https://doi.org/10.1007/s40843-025-3808-x>
9. Song, Yx., Zhong, Zy., Chen, Mj. et al. Interfacial optimization enabling reversible and stable aqueous zinc metal batteries under harsh conditions. *J. Cent. South Univ.* 31, 4536–4548 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11771-024-5832-z>
10. Han, Y., Xu, N., Yin, Y. et al. Recent advances in stabilization strategies for zinc anodes in aqueous zinc-ion batteries. *Front. Energy* 19, 862–883 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11708-025-0999-z>
11. Zhong, W., Tan, C., Li, L. et al. Regulation of aqueous electrolyte interface via electrolyte strategies for uniform zinc deposition. *Nano Res.* 17, 8678–8693 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12274-024-6591-8>