

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

FTAMP 56.17
ӘӨЖ 628.4

[DOI: 10.4411/s0031-019-367](https://doi.org/10.4411/s0031-019-367)

А.С. Утегул

*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан
(E-mail a.utegul@tttu.edu.kz)*

Энергия сақтау материалдары: Жаңа буын литий-ионды батарея электродиттерін дамыту

Жаңартылатын энергия көздері тұрақты қоғам құрудың басым құрамдас бөлігі ретінде қарастырылғанымен, оларды пайдалану энергия сақтау технологияларының тиімділігі мен тұрақтылығына байланысты. Қолжетімді және экологиялық таза химиялық/материалдары бар батареяларды сақтау технологияларын дамыту тұрақты энергетикалық технологиялардың бүкіл тұжырымдамасының ажырамас элементі ретінде қарастырылуда. Қолданыстағы қайта зарядталатын батарея технологияларының ішінде литий-ионды батареялар жұмыс өнімділігі бойынша алдыңғы қатарда. Материалдардың құнын, элементтердің көптігін және ұяшық компоненттерінің уыттылығын ескере отырып, литий-ионды батареялардың тұрақтылығына қатысты мәселелер бар. Мұнда тұрақтылық тұрғысынан қайта зарядталатын батареялардың қолданыстағы технологиялары талқыланады. Содан кейін алдымен Li⁺-иондық технологиялардың тұрақтылығын арттыруға бағытталған соңғы зерттеу стратегиялары талқыланады. Осыдан кейін литий-иондық технологиядан тыс, тұрақты химиясы мен материалдары бар жаңа батарея жүйелері ерекшеленіп, келешекте қарастырылады.

Түйін сөздер: Литий-ионды батареялар, энергия сақтау, электродиттер, тұрақты энергетика, аккумулятор технологиялары, қайта зарядталатын батареялар, экологиялық таза материалдар, энергия тығыздығы, қауіпсіздік, инновациялық батарея жүйелері.

Kipicne

Жаһандық энергия тұтыну халық санының өсуімен және жылдам индустрияландырумен үздіксіз өсіп келеді, бұл энергия өндіруде де, энергия сақтау технологияларында да тұрақты жетістіктерді талап етеді.[1] Адамзат қоғамына үлкен әл-ауқат әкеле отырып, энергияға деген сұраныстың артуы энергия ресурстарына қиындықтар туғызады және кәдімгі қазба отындарын тұтыну парниктік газдар шығарындыларының артуына себеп болады.[2] Сондықтан тұрақты энергетикалық болашақ үшін энергияны өндіруге, сақтауға, жеткізуге және тұтынуға қатысты жаңа технологиялар мен жаңа ойлау тәсілдері қажет.[3] Энергия қауіпсіздігін арттыру және қазба отындарының денсаулыққа және қоршаған ортаға тигізетін теріс әсерін азайту үшін жаңартылатын энергия көздерін зерттеуге көбірек көңіл бөлінді, олардың арасында күн, жел, толқын және толқын энергиялары қазіргі уақытта табысты секторлар болып табылады.[4] Дегенмен, жаңартылатын энергиялар әдетте бақылауға келмейтін сыртқы факторларға байланысты үздіксіз қол жетімді емес. Осы таза энергиялардың үзіліс мәселесін шешу талаптары өте қарқынды дамып келе жатқан зерттеу саласын — электр энергиясын (немесе энергияны) сақтауды тудырды.[5]

Батареяларды сақтау жүйелері энергия жүйелерінде үзіліссіз жаңартылатын энергияларды тиімді біріктірудің негізгі шешімдерінің бірі ретінде пайда болуда.[6] Қуат кабелінсіз, қайта зарядталатын батареяларды орнату қазіргі өмірімізді қолдайтын мобильді электрониканың кең түрлерін қуаттайды.[7] Жоғары қуатты және жоғары энергия тығыздығы бар қайта зарядталатын батарея технологиялары да қазіргі уақытта көлікті электрлендіру үшін қарқынды даму үстінде.[8] Коммуналдық масштабтағы батареялар артық генерацияны сақтау және жаңартылатын энергияны. Осы тұрғыдан алғанда, біз алдымен тұрақтылық тұрғысынан қазіргі уақытта бар қайта зарядталатын батарея технологияларына шолу жасаймыз. Энергияны сақтау өнімділігіне келетін болсақ, литий-

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

ионды батареялар энергияның тығыздығы мен қуат тығыздығы бойынша барлық басқа қайта зарядталатын батареялар химиясынан көш бастап тұр. Дегенмен, литий-ионды технологияның ұзақ мерзімді тұрақтылығы туралы мәселелер материалдардың уыттылығын және қарапайым ресурстардың орындылығын, құнын және қолжетімділігін зерттегенде айқын көрінеді. Соңғы зерттеулердің жетістіктеріне сүйене отырып, алдымен литий-ионды технологиялардың тұрақтылығын арттыруға бағытталған стратегиялар мен тәсілдер талқыланады. Содан кейін тұрақтылық үшін үлкен экономикалық және экологиялық ынталандыруды ұсынатын қол жетімді және уытты емес химиялық және материалдары бар литийден тыс дамып келе жатқан және ең озық батарея технологиялары бөлектеледі және перспективалы болады. шығаруды нығайту арқылы желіге жанартылатын қуат көздерінің үлкен қосылуына мүмкіндік береді деп күтілуде.[9] Тасымалданатын қуат көздерінен тасымалдау масштабындағы және желілік қолданбаларға дейін кеңейте отырып, электрохимиялық сақтау жүйелерін жобалау материалдардың құнын/көптігін, жасушалық химияның экологиялық/экологиялық тиімділігін, сондай-ақ өмірлік циклі мен қауіпсіздігін ескеруі керек. талдау.[10] Қазіргі уақытта бар бірнеше қайта зарядталатын батарея технологиялары жоғарыда аталған тұрақтылық талаптарының кейбірін қанағаттандыруы мүмкін. Дегенмен, энергия сақтау сыйымдылығының бар ішкі шектеулері немесе технологиялық кедергілер ауқымды қолданбаларға орналастыруға кедергі жасайды.[11]

Әдістер мен материалдар

Жалпы алғанда, батареялар энергияны жинақы және үнемді сақтау, жылжымалы бөлшектер мен улы құрамдас бөліктер әсер етпей портативті және ластанбай жұмыс істеу, жеткілікті жоғары қуат пен қуат тығыздығы, жоғары жалпы энергия тиімділігі, ұзақ цикл үшін тамаша шешімдерді қамтамасыз етуге арналған. қызмет ету мерзімі, жеткілікті қызмет ету мерзімі және сақтау мерзімі.[12] Бүгінгі таңда қол жетімді коммерциялық батареялар бейорганикалық немесе органикалық табиғаттағы аккумулятордың әртүрлі химиялық құрамы мен материалдарын пайдаланады.[13] Барлық батарея жүйелерін бастапқы (қайта зарядтамайтын) және қайта зарядталатын (қайта зарядталатын) жүйелер деп жіктеуге болады. Қайта зарядталмайтын батареялар электрлі көліктерге немесе желіні сақтау мақсаттарына жарамайды және бұл шолудың аясынан тыс. Тұтыну нарығындағы ондаған жылдар бойы бәсекелестік нәтижесінде қайта зарядталатын батарея технологиясының үш түрі аман қалды және қазіргі уақытта электрохимиялық энергия сақтау нарығында үстемдік етуде. Олар қорғасын-қышқылды (Pb-қышқыл) аккумуляторлар, никель-металлгидридті (Ni-MH) батареялар және литий-ионды батареялар.[14]

Батарея технологияларының тұрақтылығын бағалау үшін пайдалануға болатын тұжырымдамалық бағалау жүйесі 1-суретте көрсетілген, онда негізгі критерийлер қоршаған ортаға және әлеуметтік әсер санаттарына сәйкес анықталған. 2-суретте қазіргі уақытта нарықта үстемдік ететін үш батареяның жан-жақты жұмыс сипаттамалары мен тұрақтылық деңгейлері көрсетілген. Жұмыс параметрлері бойынша Li⁺-иондық аккумуляторлар Pb-қышқылды және Ni-MH батареяларына қарағанда көптеген көрсеткіштер бойынша айтарлықтай артықшылық көрсетеді (2-сурет), бұл ұяшық жүйесіне үлкен коммерциялық және академиялық қызығушылықты түсінуді жеңілдетеді.

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

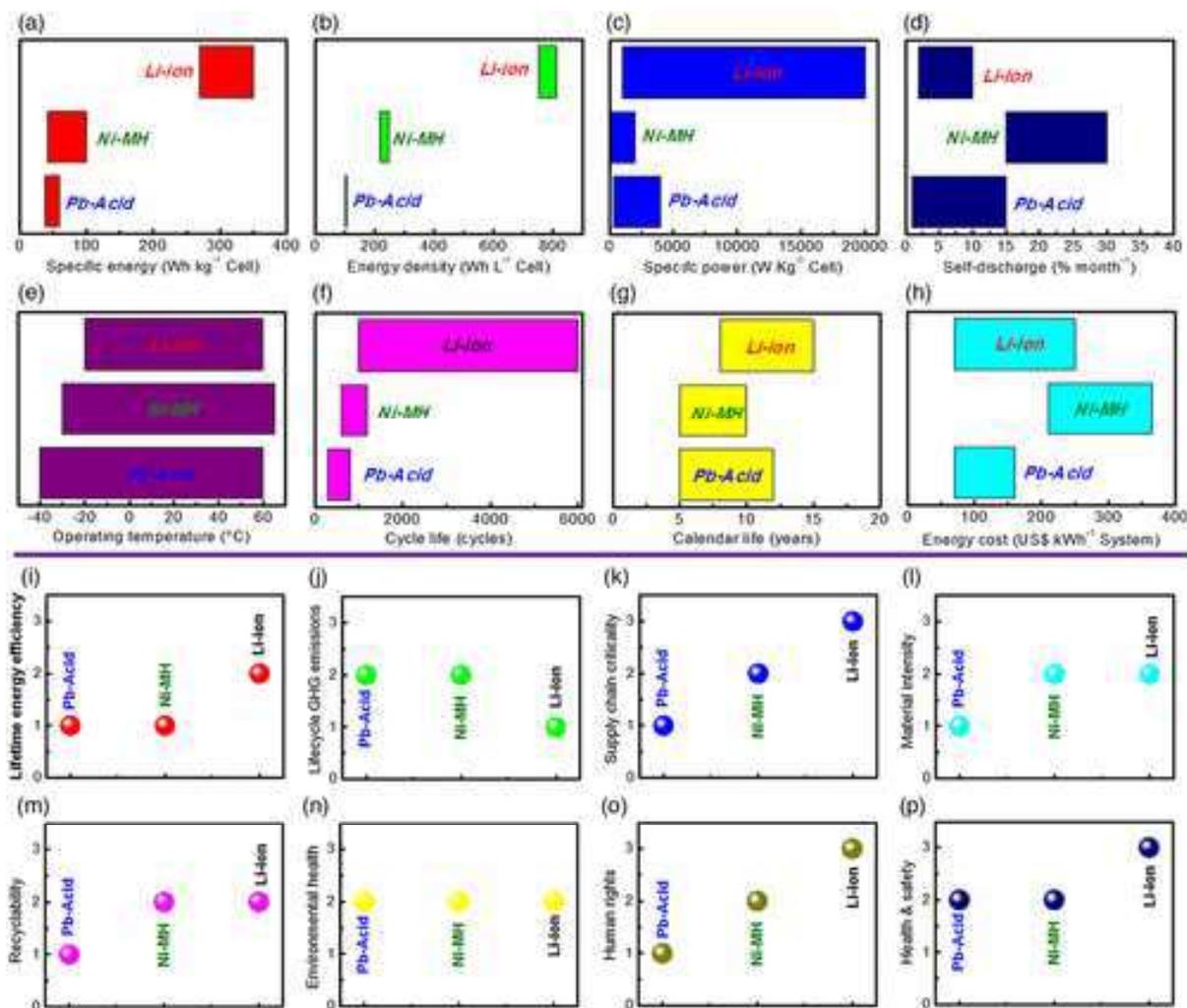


Сурет 1. Батарея технологияларының тұрақтылығын анықтау үшін тұжырымдамалық бағалау негізі. Критерийлер қоршаған ортаға және әлеуметтік әсерлерге қатысты анықталған.

Pb-қышқылды аккумуляторлар қазіргі уақытта бүкіл әлемде ең көп қолданылатын қайта зарядталатын батареялар болып табылады, өйткені олардың жоғары бағасы төмен.[15] Pb-қышқылды аккумуляторлардың басқа артықшылықтарына төмен өздігінен разрядтау жылдамдығы және төмен температурада жұмыс жатады.[16] Тұрақтылық тұрғысынан Pb-қышқылды аккумуляторлар материалдардың қолжетімділігі мен үнемділік талаптарына сәйкес келеді. Дегенмен, қорғасын улы элемент ретінде белгілі, ал күкірт қышқылы әдетте қауіпті материал ретінде қарастырылады. Улы элементтер мен қауіпті күкірт қышқылын пайдалану Pb-қышқылды аккумуляторларды іштей тұрақсыз ететініне қарамастан, батареялардың бұл түрлері ғасырдан астам уақыт бойы қолданылып келеді және бүгінде жолдағы әрбір дерлік көлікте қолданылады.[17] Ол Pb-қышқылды аккумуляторлар жаһандық деңгейде 99%-дан астам қалпына келтіру және қайта өңдеу көрсеткіштеріне қол жеткізгендіктен, осы уақытқа дейін іс жүзінде күрделі және төзгісіз экологиялық тұрақтылық проблемасын тудырған жоқ.[18] Pb-қышқылды аккумуляторлар бойынша жүргізіліп жатқан зерттеу жұмыстарының көпшілігі олардың қызмет ету мерзімін ұзартуға, зарядтау жылдамдығын арттыруға және басқа жұмыс параметрлерін жақсартуға бағытталған.[19] Бірақ олардың материалды уыттылық мәселесі ішкі болып табылады және оны технологиялық инновациялар арқылы жеңу мүмкін емес.

Ni-MH батареялары 1989 жылы коммерциялық түрде ұсынылды және көптеген санаттардағы Pb-қышқылды аккумуляторларға жоғары жұмыс өнімділігін ұсына алады (2-суретте көрсетілгендей).[20] Дегенмен, жоғары қымбат гидридті сақтайтын металл қорытпалары Ni-MH жүйелерін қымбат етеді. Гидридті сақтайтын материалдардың кейбір элементтері табиғатта азырақ кездеседі. Li⁺-иондық аккумуляторлардың құнының төмендеуімен Ni-MH батареялары қазіргі уақытта үш басым қайта зарядталатын батарея технологиясының ішіндегі ең қымбаты болып табылады.[21] Li⁺-иондық аккумуляторлар жоғарырақ энергия тығыздығын ұсынатындықтан және Pb-қышқылды батареялар арзанырақ болғандықтан, Ni-MH батареялары жаңадан пайда болатын желі энергиясын сақтау үшін маңызды көрсеткіштерді көрсетпейді.

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»



Сурет 2. Ағымдағы қайта зарядталатын батарея технологияларының жұмыс өнімділігі мен тұрақтылығын бағалау. а–h) Қазіргі уақытта басым қайта зарядталатын батареялардың: қорғасын-қышқылды (Pb-қышқыл), никель-металл гидридті (Ni-MH) және литий-ионды аккумуляторлардың негізгі энергия сақтау қасиеттерін және жұмыс сипаттамаларын салыстыру. Нәтижелер өнеркәсіптік деректердің көптеген ресурстарынан жинақталған. i–p) Pb-қышқыл, Ni-MH және Li⁺-ионды батареялардың әртүрлі критерийлер бойынша тұрақтылығын жалпы әсерді бағалау. Тапсырыстар келесідей анықталады: 1: төмен, 2: орташа, 3: жоғары.

Дегенмен, Ni-MH жұбы жасыл жасушалық химияны білдіреді, өйткені қолданылған улы материалдар жоқ.[22] Сонымен қатар, төмен реактивті электродтық материалдарды және су негізіндегі электролиттерді пайдалану Pb-қышқыл және Li⁺-ион жүйелеріне қарағанда Ni-MH батареяларын табиғи түрде қауіпсіз етеді.[23] Олардың қауіпсіз жұмыс істеу артықшылықтары оларды қауіпсіздік жоғары талап етілетін арнайы орындарда пайдалану мүмкіндіктерін ұсынады. Алдыңғы талқылауға сүйенсек, Pb-қышқылдың да, Ni-MH батареяларының да ұзақ мерзімді тұрақтылыққа қатысты өзіндік шектеулері бар. Li⁺-иондық батареялардың тұрақтылық мәселелері келесі бөлімде талқыланады.

Нәтижелер мен пікірталас

Жүргізілген зерттеу нәтижелері көрсеткендей, литий-ионды батареялар жоғары энергия тығыздығы мен тиімділігі бойынша қазіргі нарықтағы басқа қайта зарядталатын батареялардан басым түседі. Алайда, олардың ұзақ мерзімді тұрақтылығы материалдардың уыттылығы, ресурстардың шектеулігі,

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

жоғары өндіріс құны, термиялық тұрақсыздық және қайта өңдеу қиындықтары сияқты бірқатар мәселелерге тап болуда.

Зерттеу барысында төмендегі негізгі бағыттар анықталды:

1. **Электролит құрамының өзгеруі** – Жаңа электролит материалдарын қолдану арқылы литий-ионды батареялардың қызмет ету мерзімі мен қауіпсіздігін арттыру мүмкіндігі анықталды. Фторид негізіндегі және қатты күйдегі электролиттерді қолдану арқылы жану қаупін төмендету, сондай-ақ циклдық тұрақтылықты арттыру жолдары зерттелді.

2. **Жаңа катод және анод материалдары** – Кобальтсыз және никельсіз электрод материалдарын қолдану батареяның экологиялық тұрақтылығын жақсартып қана қоймай, оның өндіріс құнын төмендетуге көмектеседі. Кремний негізіндегі анодтар және темір-фосфат (LFP) катодтары сияқты материалдар энергия тығыздығы мен қызмет ету мерзімін жақсарту мүмкіндігіне ие екені анықталды.

3. **Балама батарея технологиялары** – Литий-ионды технологияны алмастыра алатын жаңа жүйелердің әлеуеті зерттелді. Олардың ішінде:

- **Натрий-ионды батареялар** – Шикізаттың арзандығы мен экологиялық қауіпсіздігі тұрғысынан тартымды балама.

- **Магний-ионды батареялар** – Жоғары теориялық сыйымдылығы бар, бірақ қазіргі таңда электролиттік тұрақтылық мәселелері бар жүйе.

- **Қатты күйдегі батареялар** – Қауіпсіздігі жоғары, жаңа буын энергия сақтау технологиясы ретінде перспективалы бағыт.

- **Сутек және отын элементтері** – Ұзақ мерзімді сақтау және электр көліктеріне арналған балама шешім ретінде қарастырылуда.

4. **Батареяларды қайта өңдеу және тұрақты өндіріс** – Литий-ионды батареяларды қайта өңдеу технологиялары әлі де толық дамымаған, бұл экологиялық әсерді азайтуға және сирек кездесетін металдардың тапшылығын шешуге кедергі келтіруде. Осыған байланысты, катодтық материалдарды қалпына келтіру және қайта өңдеу процестерін жетілдіру қажеттілігі айқындалды.

5. **Өндірістік масштабтау және экономикалық тиімділік** – Литий-ионды батареяларды жаппай өндіру кезінде шығындарды төмендету және энергия тиімділігін арттыру жолдары зерттелді. Жаңа өндірістік әдістер, соның ішінде экологиялық таза еріткіштерді қолдану және шикізатты қайта өңдеу процестері маңызды рөл атқарады.

Зерттеу нәтижелері литий-ионды батареяларды одан әрі дамыту үшін олардың тұрақтылығын, қауіпсіздігін және өндірістік тиімділігін арттыру қажет екенін көрсетеді. Жаңа материалдар мен технологиялардың енгізілуі, сондай-ақ балама батарея жүйелерін дамыту болашақта энергия сақтау жүйелерінің экологиялық таза және экономикалық тиімді болуына мүмкіндік береді.

Қорытынды

Жаңа буын литий-ионды батареяларын дамыту үшін тұрақты, экологиялық қауіпсіз және жоғары өнімді материалдарды енгізу маңызды. Электролиттердің құрамын оңтайландыру және ресурстық тиімді материалдарды қолдану арқылы батареялардың ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз етуге болады. Сонымен қатар, литий-ионды жүйелерден тыс, қауіпсіз әрі экологиялық таза балама технологияларды зерттеу болашақта энергия сақтау жүйелерін жетілдірудің негізгі бағыты болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Manthiram, A. Nat. Commun. 2020, 11, 1550.
- 2 Liu, J. G.; Hull, V.; Godfray, H. C. J.; Tilman, D.; Gleick, P.; Hoff, H.; Pahl-Wostl, C.; Xu, Z. C.; Chung, M. G.; Sun, J.; Li, S. X. Nat. Sustainable 2018, 1, 466.
- 3 Comello, S.; Reichelstein, S. Nat. Commun. 2019, 10, 2038.
- 4 Boudet, H. S. Nat. Energy 2019, 4, 446.
- 5 Schiermeier, Q. Nature 2016, 535, 212.
- 6 Crabtree, G. Nature 2015, 526, S92.
- 7 Yu, X. W.; Manthiram, A. Adv. Funct. Mater. 2020, 30, 2004084.

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

- 8 Li, W. D.; Erickson, E. M.; Manthiram, A. *Nat. Energy* 2020, 5, 26.
- 9 Gogotsi, Y. *Nature* 2014, 509, 568.
- 10 Larcher, D.; Tarascon, J. M. *Nat. Chem.* 2015, 7, 19.
- 11 Gur, T. M. *Energy Environ. Sci.* 2018, 11, 2696.
- 12 Cano, Z. P.; Banham, D.; Ye, S. Y.; Hintennach, A.; Lu, J.; Fowler, M.; Chen, Z. W. *Nat. Energy* 2018, 3, 279.
- 13 Manthiram, A.; Yu, X. W.; Wang, S. F. *Nat. Rev. Mater.* 2017, 2, 16103.
- 14 Lindley, D. *Nature* 2010, 463, 18.
- 15 Yang, J.; Hu, C.; Wang, H.; Yang, K.; Liu, J. B.; Yan, H. *Int. J. Energy Res.* 2017, 41, 336.
- 16 Schmidt, O.; Hawkes, A.; Gambhir, A.; Staffell, I. *Nat. Energy* 2017, 2, 17110.
- 17 Yu, Y. X.; Mao, J. S.; Chen, X. X. *Sci. Total Environ.* 2020, 746, 140763.
- 18 Nemati, S.; Pircheraghi, G. *Thermochim. Acta* 2020, 693, 178781.
- 19 Moseley, P. T.; Rand, D. A. J.; Peters, K. J. *Power Sources* 2015, 295, 268.
- 20 Cheng, Q. H.; Sun, D. L.; Yu, X. B. *J. Alloy Compd* 2018, 769, 167.
- 21 Al-Thyabat, S.; Nakamura, T.; Shibata, E.; Iizuka, A. *Miner. Eng.* 2013, 45, 4.
- 22 Zhou, W. H.; Zhu, D.; He, J.; Li, J. C.; Chen, H.; Chen, Y. G.; Chao, D. L. *Energy Environ. Sci.* 2020, 13, 4157.
- 23 Zielinski, M.; Cassayre, L.; Floquet, P.; Macouin, M.; Destrac, P.; Coppey, N.; Foulet, C.; Biscans, B. *Waste Manage.* 2020, 118, 677.

A.C. Утегул

Материалы для хранения энергии: Разработка электролитов литий-ионных батарей нового поколения

Хотя возобновляемые источники энергии считаются доминирующим компонентом построения устойчивого общества, их использование зависит от эффективности и устойчивости технологий хранения энергии. Разработка технологий хранения аккумуляторов с доступными и экологически чистыми химическими/материалами рассматривается как неотъемлемый элемент всей концепции устойчивых энергетических технологий. Среди существующих технологий перезаряжаемых батарей литий-ионные батареи находятся на переднем крае производительности. Учитывая стоимость материалов, обилие элементов и токсичность компонентов элементов, существуют проблемы со стабильностью литий-ионных аккумуляторов. Здесь обсуждаются существующие технологии перезаряжаемых батарей с точки зрения устойчивости. Затем сначала обсуждаются последние исследовательские стратегии, направленные на повышение устойчивости Li⁺-ионных технологий. После этого, помимо литий-ионной технологии, выделяются и рассматриваются в будущем новые аккумуляторные системы со стабильным химическим составом и материалами.

Ключевые слова: Литий-ионные батареи, хранение энергии, электролиты, устойчивая энергетика, аккумуляторные технологии, аккумуляторные батареи, экологически чистые материалы, плотность энергии, безопасность, инновационные аккумуляторные системы.

A.S.Utegul

Energy Storage Materials: Development of Next Generation Lithium-Ion Battery Electrolytes

Although renewable energy sources are considered a dominant component in building a sustainable society, their utilization depends on the efficiency and stability of energy storage technologies. The development of battery storage technologies with accessible and environmentally friendly chemicals/materials is viewed as an integral element of the entire concept of sustainable energy technologies. Among existing rechargeable battery technologies, lithium-ion batteries are at the forefront of performance. Given the material costs, element abundance, and component toxicity, there are challenges with the stability of lithium-ion batteries. This article discusses existing rechargeable battery technologies from a sustainability perspective. Then, the latest research

Раздел 5. «Химические и фармацевтические технологии. Безопасность жизнедеятельности»

strategies aimed at enhancing the sustainability of Li⁺-ion technologies are discussed. Following this, in addition to lithium-ion technology, future new battery systems with stable chemical compositions and materials are highlighted and considered.

Key words: Lithium-ion batteries, energy storage, electrolytes, sustainable energy, battery technologies, rechargeable batteries, environmentally friendly materials.

References

- 1 Manthiram, A. *Nat. Commun.* 2020, 11, 1550.
- 2 Liu, J. G.; Hull, V.; Godfray, H. C. J.; Tilman, D.; Gleick, P.; Hoff, H.; Pahl-Wostl, C.; Xu, Z. C.; Chung, M. G.; Sun, J.; Li, S. X. *Nat. Sustainable* 2018, 1, 466.
- 3 Comello, S.; Reichelstein, S. *Nat. Commun.* 2019, 10, 2038.
- 4 Boudet, H. S. *Nat. Energy* 2019, 4, 446.
- 5 Schiermeier, Q. *Nature* 2016, 535, 212.
- 6 Crabtree, G. *Nature* 2015, 526, S92.
- 7 Yu, X. W.; Manthiram, A. *Adv. Funct. Mater.* 2020, 30, 2004084.
- 8 Li, W. D.; Erickson, E. M.; Manthiram, A. *Nat. Energy* 2020, 5, 26.
- 9 Gogotsi, Y. *Nature* 2014, 509, 568.
- 10 Larcher, D.; Tarascon, J. M. *Nat. Chem.* 2015, 7, 19.
- 11 Gur, T. M. *Energy Environ. Sci.* 2018, 11, 2696.
- 12 Cano, Z. P.; Banham, D.; Ye, S. Y.; Hintennach, A.; Lu, J.; Fowler, M.; Chen, Z. W. *Nat. Energy* 2018, 3, 279.
- 13 Manthiram, A.; Yu, X. W.; Wang, S. F. *Nat. Rev. Mater.* 2017, 2, 16103.
- 14 Lindley, D. *Nature* 2010, 463, 18.
- 15 Yang, J.; Hu, C.; Wang, H.; Yang, K.; Liu, J. B.; Yan, H. *Int. J. Energy Res.* 2017, 41, 336.
- 16 Schmidt, O.; Hawkes, A.; Gambhir, A.; Staffell, I. *Nat. Energy* 2017, 2, 17110.
- 17 Yu, Y. X.; Mao, J. S.; Chen, X. X. *Sci. Total Environ.* 2020, 746, 140763.
- 18 Nemati, S.; Pircheraghi, G. *Thermochim. Acta* 2020, 693, 178781.
- 19 Moseley, P. T.; Rand, D. A. J.; Peters, K. J. *Power Sources* 2015, 295, 268.
- 20 Cheng, Q. H.; Sun, D. L.; Yu, X. B. *J. Alloy Compd* 2018, 769, 167.
- 21 Al-Thyabat, S.; Nakamura, T.; Shibata, E.; Iizuka, A. *Miner. Eng.* 2013, 45, 4.
- 22 Zhou, W. H.; Zhu, D.; He, J.; Li, J. C.; Chen, H.; Chen, Y. G.; Chao, D. L. *Energy Environ. Sci.* 2020, 13, 4157.
- 23 Zielinski, M.; Cassayre, L.; Floquet, P.; Macouin, M.; Destrac, P.; Coppey, N.; Foulet, C.; Biscans, B. *Waste Manage.* 2020, 118, 677