

FTAMP 61.59.29

Г.А. Сулейменова¹ – негізгі автор, ©
Е.Ж. Усипбекова², А. Даулетбай³,
А.Т. Қонаров⁴, Г.А. Сейлханова⁵



¹Докторант, ²PhD, доцент м.а., ³PhD, аға ғылыми қызметкер,

⁴PhD, қауымдас. профессор, ⁵Хим. ғылым. д-ры, профессор

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0002-2338-8453> ²<https://orcid.org/0000-0001-8367-1800>

³<https://orcid.org/0000-0003-0157-1449> ⁴<https://orcid.org/0000-0001-9352-8602>

⁵<https://orcid.org/0000-0002-9939-8316>



^{1,2,5}Ал-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

^{3,4}Назарбаев Университеті, Астана, Қазақстан



²enlik.ussipbekova@gmail.com

<https://doi.org/10.55956/KNWC2804>

ЛИТИЙ-ИОНДЫ АККУМУЛЯТОРЛАР СЕПАРАТОРЛАРЫ: ҒЫЛЫМИ ШОЛУ ЖӘНЕ БОЛАШАҚ БАҒЫТТАР

Аңдатпа. Литий ионды батареялардың негізгі құрамдас бөлігі болып табылатын сепаратордың маңызды рөлі – батареялардың қауіпсіздігі мен электрохимиялық қасиеттерін қамтамасыз ету. Өйткені, сепаратор катод пен анод арасындағы қысқа тұйықталудың алдын алып, иондардың ағынын қамтамасыз ететін жұқа, кеуекті мембрана. Батарея жұмысы кезінде электрохимиялық реакцияларға қатыспаса да батареялардың қауіпсіздігі мен электрохимиялық қасиеттеріне тікелей әсер етеді. Осы себепті сепараторға қойылатын талаптар өте жоғары және оны қанағаттандыру өзекті. Соңғы онжылдықта әлем ғалымдары сепараторды әзірлеу мәселесіне ерекше назар аударғанымен, оның даму тарихы 1970 жылдардан басталады. Бұл әдеби шолуда әлемдік ғылыми әдебиеттерге сүйене отырып, сепаратор дайындаудың ғылыми кезеңдері, оның даму тарихы, негізі талаптары мен көрсеткіштері және сепаратордың негізгі түрлері талданады. Осы шолу мақалада сондай-ақ нақты сандық талдаулар жүргізіліп, көпфункционалды сепараторлар әзірлеу үшін маңызды көрсеткіштер мен өлшемдер қарастырылады.

Тірек сөздер: литий-иондық аккумулятор, сепаратор, талаптар, электрохимия, электрохимиялық көрсеткіштер, композитті материалдар.



Сулейменова, Г.А. Литий-ионды аккумуляторлар сепараторлары: ғылыми шолу және болашақ бағыттар [Мәтін] / Г.А. Сулейменова, Е.Ж. Усипбекова, А. Даулетбай, А.Т. Қонаров, Г.А. Сейлханова // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2025. – №4(90). – Б.359-380. <https://doi.org/10.55956/KNWC2804>

Кіріспе. Литий-ионды аккумуляторлар (ЛИА) жоғары энергетикалық тығыздығы, беріктігі және жылдам зарядтау қабілеті арқасында қазіргі өмірдің ажырамас бөлігі болып табылады. Олар смартфондардан бастап электромобильдерге дейінгі көптеген құрылғыларда қолданылады. Айтарлықтай артықшылықтарға қарамастан, литий-ионды батареялар қауіпсіздігі, жұмыс тұрақтылығы және зарядты тасымалдау тиімділігіне қатысты бірқатар мәселелерге

ие. Батареялардың өнімділігі мен қауіпсіздігіне әсер ететін негізгі компоненттердің бірі-сепараторлар. Сепараторлар катод пен анод арасындағы тікелей физикалық байланыстың алдын алуда және иондардың өткізгіштігін қамтамасыз етуде, қысқа тұйықталуды болдырмауда, маңызды рөл атқарады [1]. Литий-ионды аккумуляторларға арналған мембраналық сепараторлардың негізгі сипаттамалары, сепаратордың алғашқы түрлері, даму тарихы, сепараторға қойылатын негізгі талаптар, қазіргі уақыттағы оның заманауи түрлері және келешекте оны жетілдіруге арналған бағыттар жайлы шолу жоғарғы энергия жүйелері (немесе баламалы тоқ көздері) үшін маңызды ақпараттар береді.

Ғылыми зерттеулерге шолу және талдау. *Сепараторлардың даму тарихы.* Литий-ионды батарея сепараторларының даму тарихы батарея технологиясы эволюциясының маңызды құрамдас бөлігі болып табылады, себебі сепараторлар батареялардың қауіпсіздігі мен тиімділігін қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады. Батареяларға арналған алғашқы сепараторлар ағаштан жасалған болатын. Алайда, мұндай материал электролитпен жасақанда тез бұзылған. Кейін сепараторларды өндіру үшін целлюлоза, шыны талшық, полиуретан және резеңке сияқты материалдар қолданылды. Соңғы уақытта никельден жасалған батареяларда кеуекті целлофаннан, нейлоннан немесе полиолефин қабыршақтарынан жасалған сепараторлар, қорғасын-қышқылды батареяларда күкірт қышқылына батырылған шыны талшықтан жасалған сепараторлар, ал литий-ионды батареяларда полиолефин сепараторлары қолданылады. 1970 жылы алғаш рет литий органикалық электролиттері бар аккумуляторларда анод ретінде қолда бастаған кезде, француздық САФТ компаниясы тоқыма емес полипропилен сепараторын пайдаланып тәжірибелік литий-ионды батарея элементін дайындаған [2-4]. Қазіргі уақытта Honeywell компаниясы, бұрын Livingston Electronic Corporation атауымен танымал, $\text{Li}/\text{V}_2\text{O}_5$ жүйесінде [5] және Li/SO_2 жүйесінде [6] целлюлоза сепараторларын, соның ішінде сүзгі қағазы мен Celgard кеуекті полипропилен сепараторларын қолданады. 1970 жылдардың басында жасалған литий-металл батареяларының көпшілігі тоқыма емес полипропилен сепараторын пайдаланған. Сонымен қатар, кейбір жағдайларда Li/SOCl_2 [7] элементтерінде шыны талшықты қағаз сепараторы қолданылды. 1980 жылдары ғалымдар литий иондарының қабат ішінде (литий-интеркалирлеуші қосылыстар) тез қозғала алатынын анықтады [8,9]. 1991 жылы Sony компаниясы шығарған алғашқы коммерциялық литий-ионды аккумуляторлардың пайда болуы сепараторлар үшін неғұрлым тұрақты және тиімді материалдарды анықтады. Алғаш полиолефиндер, полиэтилен мен полипропилен негізінде жасалған бөлгіш сепараторлар кеңінен қолданылған, себебі олардың химиялық төзімділігі, механикалық беріктігі және жоғары температурадағы тұрақтылығы сияқты қасиеттерді сепараторлар үшін тиімді болды. Қазір батарея

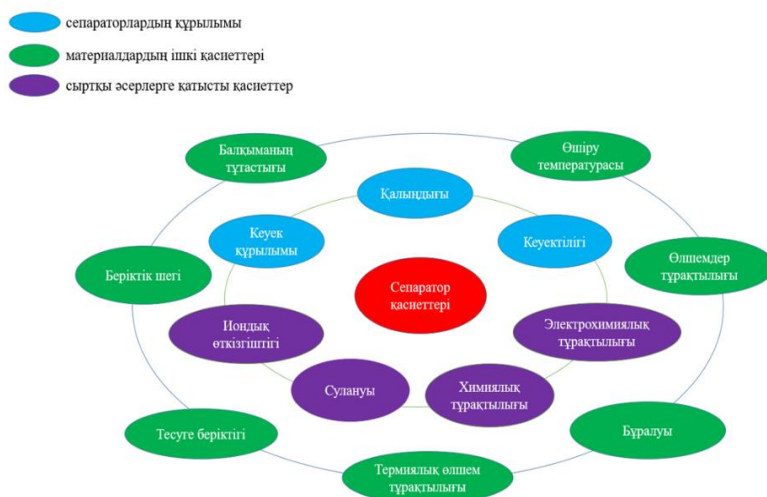
сепараторлары: микрокеукті және модифицирленген микрокеукті мембраналар, тоқыма емес материалдар, композиттік мембраналар және электролиттік мембраналар болып бес түрге бөлінеді. Оларды қабаттар санына байланысты бір қабатты және көп қабатты микрокеукті мембраналарға жіктеуге болады. Модифицирленген микрокеукті мембраналық сепараторлар – бұл плазма мен егу әдістері арқылы кәдімгі микрокеукті мембраналардан өзгертілген сепараторлар.

Сепараторға қойылатын негізгі талаптар. Үздіксіз зерттеулер мен жұмыстардың арқасында әртүрлі сепараторлар жасалып жатқанымен олардың барлығына қойылатын талап бірдей. Сепаратор литий-ионды аккумуляторлардың электрохимиялық реакциясына қатыспаса да, ол маңызды функцияларды орындайды:

1. Электродтарды бөлу: анод пен катод арасындағы тікелей байланыстың алдын алу, қысқа тұйықталуға болдырмау.

2. Иондық өткізгіштік: зарядтау және разрядтау кезінде электродтар арасында литий иондарының өтуін қамтамасыз ету.

3. Ыстыққа төзімділік: батареяның қызып кетуіне және термиялық ыдырауына қарсылық.



Сурет 1. Сепараторлардың негізгі қасиеттерінің сызбасы

Сепараторлардың литий батареяларында тиімді жұмыс істеуі үшін кейбір негізгі талаптардың орындалуын қамтамасыз ету қажет. Сепаратордың негізгі қасиеттері оның құрылымы, материалдардың ішкі қасиеттері және сепаратордың сыртқы әсерлерге қатысты қасиеттеріне тікелей байланысты (1-сурет). Осы мақалада аталған қасиеттерге жеке тоқталып, әдебиеттерде кездесетін мәліметтерге шолу жасалады.

Сепараторлардың құрылымы бойынша талаптарға оның қалыңдығы, кеуктілігі және кеуек құрылымы жатады. Жұқа сепараторлары бар батареялардың ішкі кедергісі төмен және энергия мен қуаттың тығыздығы жоғары болады деп болжануда [10]. Алайда, сепаратордың қалыңдығының төмендеуімен оның механикалық беріктігі төмендейді. Механикалық беріктігі төмен сепараторлар батареяны құрастыру және пайдалану кезінде

электродтардың тұрақты бөлінуін қамтамасыз ете алмайды. Сондықтан литий-ионды аккумулятор үшін жеткілікті механикалық беріктігі бар салыстырмалы түрде жұқа сепараторға артықшылық беріледі. Қазіргі уақытта аккумуляторлық батареяларға арналған стандартты сепараторлардың қалыңдығы 25 мкм-ден аз, бұл жоғары қуат пен меншікті қуатты қамтамасыз етеді. Сепаратордың қалыңдығы ісіну процесіне де, оның механикалық қасиеттеріне де әсер етеді. Теориялық модельдеу сепаратордың идеалды қалыңдығы 1-ден 32 мкм-ге дейін өзгеретінін көрсетті, бұл сканерлеу жылдамдығына қарамастан батареяның оңтайлы сыйымдылығын қамтамасыз етеді [11].

Сепараторлардың кеуектерінің мөлшері электрод бөлшектерінің енуіне жол бермеу үшін жеткілікті кішкентай болуы керек. Li^+ иондарының біркелкі ағынын қамтамасыз ету және литий дендриттерінің түзілуі мен өсуін тежеу үшін кеуектер біркелкі мөлшерде таралуы керек. Кеуектілігі жоғары және орамасы төмен сепараторлар ЛИА-да литий иондары үшін жеткілікті масса алмасу арналарын жасайды, нәтижесінде иондық кедергі аз болады. Герли саны арқылы көрсетілген өткізгіштік [10] мембраналық сепараторлардың иондық кедергісінің көрсеткіші ретінде қызмет етеді. Литий-ионды аккумуляторларда қолданылатын сепараторлар үшін әдетте субмикронды кеуек өлшемі 1 мкм-ден аз болса қолайлы болады [12]. Дұрыс кеуектілік сепараторларға иондық өткізгіштік үшін электролиттің едәуір мөлшерін ұстап қана қоймай, сонымен қатар жақсы механикалық өнімділікке ие болуға мүмкіндік береді. Өнеркәсіпте сепараторлар әдетте 40%-дан 50%-ға дейін кеуектілікке ие [13].

Сепаратордың кеуектің құрылымы, яғни тарылған тесіктердің мөлшері мен бұралу мөлшері маңызды параметр болып табылады (2-сурет), өйткені сепаратор оң және теріс электродтар арасындағы қысқа тұйықталуды және дендриттерден туындаған қысқа тұйықталуды болдырмау үшін сенімді оқшаулауды қамтамасыз етуі керек. 2-суретте кеуек ішкі құрылымы көрсетілген. Мембрананың кеуек құрылымы неғұрлым бұралған болса, онда литий дендриттерінің түзілуін тежейді. Кеуектілік-кеуек көлемінің сепаратор мембранасының жалпы көлеміне қатынасы келесі теңдеу (1) арқылы пайызбен көрсетуге болады [1].

$$\text{Кеуектілік (\%)} = \left(1 - \frac{p_m}{p_p}\right) \times 100 \quad (1)$$

мұндағы, p_m және p_p сәйкесінше сепаратор мен полимер мембранасының нақты тығыздығын білдіреді.



Сурет 2. Кеуектердің құрылымы

Сепараторға қойылатын келесі талаптар сыртқы әсерлерге қатысты қасиеттер болып табылады, олар: иондық өткізгіштік, сулану, химиялық және электрохимиялық тұрақтылық.

Ішкі кедергіні азайту және иондардың жылдам тасымалдануын қамтамасыз ету үшін сепараторлар электролитпен тез және толық сулануы керек. Егер сепараторлар электролитпен біркелкі немесе толығымен суланбаса, бұл литийдің бұзылуына, литий дендриттерінің пайда болуына және беттің жабылуына әкелуі мүмкін. Нашар ылғалдылық сепаратордың кедергісін арттырады, бұл цикл өнімділігіне және зарядтау/разряд тиімділігіне теріс әсер етеді [14,15]. Сондықтан оны гидрофильді ету үшін мембраналардың бетін өзгерту қажет. Жалпы әдістерге гидрофильді топтардың бетті немесе кеуекті функционализациясы немесе беттік белсенді заттармен өңдеу жатады [16,17]. Дегенмен, беттік белсенді заттарды цикл және сақтау кезінде электролитпен жууға болатынын атап өткен жөн, бұл уақытша гидрофобтылыққа әкеледі. Керісінше, гидрофильді функционалды топтарды мембраналардың бетіне тиісті газдарды қолдана отырып, термиялық бүрку арқылы егуге болады, бұл беріктікті арттырады. Мұндай топтарға гидроксил, карбонил, карбоксил, амин және сульфонил топтары жатады [18]. Ылғалдылықты сульфаттау, фторлау, полимерлеу және басқа әдістермен де жақсартуға болады [19]. Сепараторларды электролитпен сулау кеуекті құрылым және бетінің сипаттамалары (кеуектілік, кеуек мөлшері) сияқты факторларға тікелей байланысты. Ылғалдануды өлшеу үшін байланыс бұрышын және электролитті сіңіруді анықтау әдістері кеңінен қолданылады. Бұл әдістерде сепараторға электролит тамшысы қолданылады, содан кейін жанасу бұрышы (θ) өлшенеді. Кішірек θ мәні сепаратор бетінің электролитпен жақсы сулануын көрсетеді [20].

Жоғары иондық өткізгіштік сепараторларда шешуші рөл атқарады, аккумуляторлардың жоғары сыйымдылығын, беріктігін және тұрақтылығын қамтамасыз етеді, өйткені Li^+ иондарының жоғары тасымалдануы Li^+ иондарының біркелкі ағынын арттыруға және масса тасымалдау жылдамдығын арттыруға ықпал етеді, бұл иондардың локализацияланған тұндыруын азайтуға және литий дендриттерінің түзілуін тиімді тежеу арқылы батарея циклі кезінде концентрация градиентінің пайда болуына жол бермейді. Сепараторлардың иондық өткізгіштігі олардың кеуекті құрылымына, қалыңдығына және бетінің сипаттамаларына тікелей байланысты. Мембрананың оңтайлы кеуектілігі жоғары иондық өткізгіштікті қолдайтын кеуектердегі электролиттің жеткілікті мөлшерін алуға мүмкіндік береді. Керісінше, кеуектілігі төмен мембраналар электролитті аз ұстайды, бұл ішкі қарсылықтың жоғарылауына әкеледі. Алайда, шамадан тыс кеуектілік батареяның жылу қауіпсіздігіне нұқсан келтіруі мүмкін, бұл батареяның сөнуіне әкеледі [21,22]. Құрамында электролит бар сепаратордың оңтайлы иондық өткізгіштігі 10^{-3} -тен 10^{-1} $\text{См} \cdot \text{см}^{-1}$ -ге дейін болуы керек [12] әдетте 10^{-3} $\text{См} \cdot \text{см}^{-1}$ өткізгіштік ұялы телефондар сияқты төмен қуатты қосымшалар үшін жеткілікті деп саналады. Алайда, қуатты автомобильдер жоғары өткізгіштікті қажет етуі мүмкін [23].

Литий-ионды аккумулятор сепараторларының иондық өткізгіштігі әртүрлі өлшеу әдістерінде алынған эксперименттік деректерді пайдалана отырып есептеледі, мысалы, импеданс спектроскопиясы, тұрақты ток әдісі (DC поляризациясы), Варт әдісі (Warburg кедергісі), ұяшықтағы электрохимиялық тестілеу әдісі (электрлік химиялық жасуша сынағы), симметриялы ұяшықтарды пайдалану әдісі (симметриялы ұяшық әдісі), температураға тәуелді өткізгіштік өлшемдері әдісі (temperature-dependent conductivity measurements).

Иондық өткізгіштік келесі формула бойынша есептеледі (2):

$$\sigma = \frac{L}{R_{sep} \cdot A} \quad (2)$$

мұндағы: L – сепаратордың қалыңдығы; R_{sep} – өлшенген кедергі; A – сепаратордың көлденең қимасының ауданы.

Сепаратор электронды оқшаулағыш болуы қажет. Сепаратор ретінде пайдаланылатын композиттік полимерлі электролит пленкаларының электрохимиялық тұрақтылығы сызықтық вольтамметрия және циклдік вольтамметрия әдістерімен зерттеледі. Сепараторлар электродтармен де, электролиттермен де химиялық тұрақты және зарядтау және разряд кезінде күшті тотықсыздану және тотығу жағдайларына электрохимиялық төзімді болуы керек. Олардың катод пен анодқа төзімділігін бағалау үшін циклдік вольтамметрияны, сызықтық вольтамметрияны және электрохимиялық импеданс спектроскопиясын (EIS) қолдануға болады. Литийге қатысты сепараторлардың тұрақтылығын Li/Li симметриялы ұяшықтардың циклдік сипаттамаларын өлшеу арқылы талдауға болады. Сонымен қатар, химиялық және электрохимиялық тұрақтылық рентгендік фотоэлектрондық микроскопия және Фурье түрлендіретін инфрақызыл спектроскопия арқылы зарядтау/разряд процесінде сепаратордағы элементтердің химиялық күйінің өзгеруін бақылау арқылы талданды [24]. Электрохимиялық тұрақтылық электролит ерітіндісімен 2 В-тан 6 В-қа дейінгі потенциалдар диапазонында микроэлектродтық циклдік вольтамметриямен өзгереді [25].

Сепараторға қойылатын келесі талаптар-сепаратордың ішкі қасиеттері, балқыманың тұтастығы, беріктік шегі, тесуге беріктік, термиялық тұрақтылық, бұралу, өлшемдік тұрақтылық және өшіру температурасы. Сепаратордың біркелкі қалыңдығы иондардың біркелкі таралуына ықпал етеді, нәтижесінде электрод қабатында болатын белсенді материалдарды біркелкі пайдалану және жалпақ Li-металдардың түзілуін индукциялау арқылы Li-дендриттердің өсуін тежейді [10]. Өнеркәсіптік сепараторлардың қалыңдығы 20-25 мкм [26]. Жұқа сепараторлар электродтарға көбірек орын бере отырып, батареялардың қуат тұтынуын барынша арттыруға мүмкіндік береді. Алайда жұқа сепараторлар тесу мен қысқа тұйықталуға жол беруі мүмкін. Сепараторлардың тым қалың болуы да жағымды фактор емес, себебі мұндай жағдайда кедергі жоғарылап, иондық өткізгіштік төмендеп кетуі мүмкін.

Сонымен қатар сепаратор жоғары механикалық қасиетке ие болу керек. Себебі электрод сыртқы күштердің әсерінен қысылатын болса немесе кеңейетін болса, сол күштерге төтеп бере алуы керек. Оның механикалық қасиеті электролитке орналастырған кезде белгілі болады. Осылайша, жоғары тұрақтылықты сепараторларды жобалау кезінде электролит жүйесіндегі механикалық тұрақтылықты ескеру қажет. Механикалық қасиеттер созылу және тесу беріктігін өлшеумен сипатталады; сепаратордың созылу беріктігі неғұрлым жоғары болса, қаттылық соғұрлым жақсы болады. Сонымен қатар, жоғары тесуге беріктік дендриттерге төзімділікті арттырады, бұл дендриттердің өнуіне жол бермейді.

Сепараторды тесуге беріктігі қолданылатын материалға және мембрананың өндіріс технологиясына байланысты. Ең алдымен, ол тігінен (MD) және көлденең (TD) бағыттардағы беріктік көрсеткіштерімен сипатталады. Тасымалдау және құрастыру кезінде зақымдануды болдырмау және литий дендриттерінің пайда болуынан туындаған қысқа тұйықталуды болдырмау үшін мембрана кем дегенде 20 МПа созылу беріктігіне ие болуы

керек [27]. Сонымен қатар, ені кішірейіп кетпес үшін сепаратор созылған кезде айтарлықтай ұзартылмауы керек. Әдетте кеуектіліктің жоғарылауы кедергіні азайтады, бірақ беріктігін төмендетеді. Айта кету керек, бір осьтік созылу әртүрлі бағыттардағы созылу беріктігінің айырмашылығын тудыруы мүмкін, ал екі осьтік созылу тігінен және көлденең бағытта біркелкі беріктікті қамтамасыз етеді. ASTM d882-10 стандарты [28] беріктігін бағалау үшін қысқыштар арасындағы қашықтық, созылу жылдамдығы және үлгі өлшемдері сияқты шарттарды сипаттайды. ASTM d882 стандартына сәйкес, қалыңдығы 25 мкм сепараторлардың созылу беріктігінің минималды шегі 98,06 МПа құрайды.

Беріктік шегі инені пайдаланып мембрананы тесу үшін қажетті күшпен анықталады және құрастыру сияқты процестерде пайда болатын мембрананың қысқа тұйықталуға төзімділігінің көрсеткіші ретінде қызмет етеді. Өндіріс кезінде бұралу және орау, сондай-ақ аккумуляторды құрастыру, бөлшектеу және циклдік зарядтау кезіндегі механикалық әсерлер сияқты факторларды ескере отырып, мембрана тесуге, қысуға және тозуға төтеп беру үшін жеткілікті физикалық күшке ие болуы керек. Бұл тесуге төзімділікті тексеру қысқа тұйықталудың алдын алудың маңызды кезеңі. ASTM D3763 стандартына сәйкес, тесуге төзімділік 300 г күштен төмен болмауы керек. Салыстыру үшін таза полиэтилен мен ПВДФ/полиэтилен сепараторларының ену күші сәйкесінше 5,67 Н және 6,20 Н құрайтыны анықталды [29].

Сепаратордың термиялық тұрақтылығы балқыманың тұтастығымен және «өшіру функциясымен» сипатталады. Сол үшін сепараторды температураның кең диапазонында тұрақты ұстайды [30]. Балқыманың тұтастық температурасы-бұл сепаратор өзінің механикалық қасиеттерін сақтай алмайтын температура, ал балқыманың мінсіз тұтастық температурасы 200°C немесе одан жоғары [31]. Сепаратор өте жоғары температурада ериді. Осылайша, ол кеуектерді бітеп, литий-ион өткізгіштігін тежейді. Бұл процесс өшіру функциясы деп аталады. Өшіру температурасына жеткенде, полимерлі сепаратор кеуектерді ерітіп, ион ағынын блоктайды. Өшірілгеннен кейін электродтар арасындағы байланыстың алдын алу үшін механикалық тұтастықты сақтау керек [1]. Джао және оның әріптестері сепараторларды тоқтату тиімділігін өлшеді (2-сурет). Олар ПП/ПЭ/ПП және ПЭ/Полиамид (PI)/S сепараторларындағы тоқтату процесін 140°C температурада 0,5 сағат бойы бақылап және тоқтағаннан кейін кедергінің артқанын көрсеткен [32].

Иілгіштіктен сынғышқа ауысуын және балқу температурасын термогравиметриялық талдау және дифференциалды сканерлеу калориметриясы арқылы өлшеуге болады. Өшіру температурасы мен өшіру дәрежесін импеданс спектроскопиясын және сепараторы бар ұяшықтағы температураның өзгеруін өлшеу арқылы анықтауға болады [33,34].

Сепараторлардың өлшемдер тұрақтылығы мен термиялық өлшем тұрақтылығы олардың жиырылу қасиетінен байқалады. Коммерциялық сапалы сепараторлардағы жиырылуы барлық бағытта 5%-дан аз болуы керек. Жиырылу бастапқы сепаратордың аудандарын және бірнеше сағат бойы сұйық электролитпен сіңдірілген сепаратордың бөліктерін салыстыру арқылы өлшенеді. Сонымен қатар, термиялық жиырылу 90°C температурада 60 минуттан кейін 5%-дан аз болуы керек. Әдебиеттерде сепаратордың өлшемін механикалық беріктігін жақсарту арқылы жиырылуын соның ішінде термиялық жиырылуын жақсартуға болатындығы айтылған. Механикалық

беріктікті әртүрлі бейорганикалық толтырғыштар қосу арқылы жақсартуға болатыны келтіріледі. [35] жұмыста графит/ LiMn_2O_4 ұяшығында қолданылған кремний диоксиді мен полиэтилен сепараторының синтезі туралы жазылған. Кремний диоксиді сепаратордың өлшемін механикалық жақсартып, электролиттің жиырылуына/термиялық жиырылуына жол бермейді. 3-суретте әртүрлі полиэтилен (ПЭ) негізіндегі әртүрлі сепараторлардың жиырылуы көрсетілген.



Сурет 3. 1 сағатта 140°C -қа әсер еткеннен кейін әртүрлі сепараторлардың шынайы кескіндері

Сепараторлардың әмбебап болуы осы аталған талаптарды қанағаттандырған кезде ғана жүзеге асады. Аталған көрсеткіштерге қойылатын талаптардың қысқаша мазмұны 1-кестеде көрсетілді.

Кесте 1

Сепараторларға қойылатын негізгі талаптар	
Көрсеткіштер	Талаптар
Химиялық және электрохимиялық тұрақтылығы	Ұзақ мерзімді тұрақтылыққа ие болу
Ылғалдынуы	Жылдам және толық сулану
Механикалық қасиеті	кемінде 1000 кг/см ($98,06 \text{ МПа}$) болу
Қалыңдығы	$20\text{-}25 \text{ мкм}$
Кеуек өлшемі	1 мкм -ден аспау
Кеуектілігі	$40\text{-}60\%$ болу
Өткізгіштігі (Герли шкаласы бойынша)	$< 0,025 \text{ сек/мкм}$
Өлшемдер тұрақтылығы	бұралмау және тегіс жатпау
Термотұрақтылығы	90°C -та 60 минуттан кейін 5% -дан аз жиырылу
Өшіру	Батареяны жоғары температурада тиімді өшіру

Сепараторлардың негізгі түрлері.

Батарея сепараторларын бес негізгі түрге бөлуге болады:

- микрокеуекті мембраналар;
- модифицирленген микрокеуекті мембраналар;
- тоқыма емес материалдар;
- композиттік мембраналар;
- электролиттік мембраналар.

Микрокеуекті мембраналық сепараторлар микрометрлер диапазонындағы кеуек өлшемдерімен сипатталады. Оларды қабаттар санына

байланысты бір қабатты және көп қабатты микрокеукті мембраналарға жіктеуге болады. Модифицирленген микрокеукті мембраналық сепараторлар олар – қарапайым микрокеукті мембраналардың бетін түрлендіруіне, яғни плазманы қолдану арқылы егу немесе басқа полимермен жабу немесе сәулелендіру әдісі арқылы алынған мембраналар. Тоқыма емес сепараторларға балқымадан үрлеу, дымқыл төсеу және электр иіру әдістерімен алынған шатастырылған талшықтармен біріктірілген торлы құрылымдары бар мембраналар жатады. Талшықтардың кіші диаметріне байланысты тоқыма емес сепараторлар басқа типтегі сепараторларға қарағанда кеуктілігі жоғары болады. Композиттік мембраналық сепараторлар микрокеукті мембраналарды немесе тоқыма емес төсеніштерді жабу немесе бейорганикалық материалдармен толтыру арқылы жасалады. Осылайша, олар керемет термиялық тұрақтылыққа және басқа түрлерге қол жеткізе алмайтын ерекше ылғалдылыққа ие болады. Электролиттік мембраналарға қатты керамикалық электролит, қатты полимерлі электролит, гелдік полимерлі электролит және композиттік электролит жатады. Олар сепаратор және электролит ретінде жұмыс істейді және батареяның жоғары қауіпсіздігін қамтамасыз етеді. Сепаратордың әр түрі сәйкесінше алдыңғы бөлімде қарастырылған талаптарды, соның ішінде қалыңдығы, кеуктілігі, термиялық қасиеттері, сулануы, механикалық және химиялық қасиеттерді қанағаттандыратын ішкі сипаттамаларға ие болуы керек

Микрокеукті мембрана сепараторлардың ең қарапайым түрі ол *бір қабатты мембраналар*. Бір қабатты мембраналар әртүрлі полимерлі материалдардан жасалады. 2-кестеде әртүрлі бір қабатты мембраналардың құрылымдық сипаттамалары мен қасиеттері, соның ішінде материалдары, алу әдістері, иондық өткізгіштігі және электрохимиялық сипаттамалары берілген.

Кесте 2

Бір қабатты микрокеукті мембрана сепараторлар

Материал	Еріткіш	Алу әдісі	Мембрана қалыңдығы	Сұйық электролит	Иондық өткізгіштігі	Қосымша мәліметтер	Сілтеме
1	2	3	4	5	6	7	8
ПП,ПЭ		Құрғақ және ылғал процестер	13-57 мкм	LiPF ₆ -ЭК/ДМК	$0,4 \cdot 10^{-3}$ – $2,1 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Қалыңдығы жұқа, кеуктілігі жоғары және кеук өлшемі үлкен	[36]
ПЭ	Парафин майы	Сулы процесс	25 мкм	LiPF ₆ -PC	$3,0 \cdot 10^{-3}$ – $5,0 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жоғары механикалық беріктік	[37]
ПВДФ	Ацетон/этанол	Фазалық инверсия	35-50 мкм	LiPF ₆ -ЭК/ДМК/ДЭК	$3,0 \cdot 10^{-3}$ – $5,0 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Тұрақты разряд қисықтары және төмен температура көрсеткіштері	[38]
ПВДФ	NMP (N-метил-2-пирролидон)	Фазалық инверсия	35-70 мкм	LiPF ₆ -ЭК/ДМК	$0,7 \cdot 10^{-3}$ – $2,1 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы циклдік жүру қабілеті және жоғары зарядтау жылдамдығы мен жоғары сыйымдылық	[39]

2-кестенің жалғасы

1	2	3	4	5	6	7	8
ПАН	ЭК/ПК	Құю әдісі		LiClO ₄ , LiN (SO ₂ CF ₃) ₂ , LiAsF ₆ - ЭК/ПК	$2,0 \cdot 10^{-3}$ – $6,1 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы электрохимиялық тұрақтылық және литийдің жақсы айналымдылығы	[40]
ПАН/ ПММА	ЭК/ПК	Құю әдісі	50- 100 мкм	LiN (SO ₂ CF ₃) ₂ - ЭК/ДМК немесе LiClO ₄ - ЭК/ПК	$0,1 \cdot 10^{-3}$ – $1,9 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы электрохимиялық тұрақтылық	[41]

Көп қабатты мембраналармен салыстырғанда, бір қабатты мембраналарды қарапайым әдістерді қолдану арқылы алуға болады, бұл салыстырмалы түрде төмен шығындарға әкеледі. Нәтижесінде, бір қабатты мембраналар литий-ионды аккумулятор сепараторлары ретінде кеңінен қолданылады.

Микрокеуекті бір қабатты мембраналар механикалық беріктігі, термиялық беріктігі және электрохимиялық сипаттамалары бойынша оңтайлы қасиеттерге әрең жетеді. Бұл кемшілікті жеңу үшін әртүрлі полимерлерден жасалған микрокеуекті көп қабатты мембраналарға кең зерттеулер жүргізілді. Микрокеуекті көп қабатты мембраналарды әртүрлі әдістермен жасауға болады, соның ішінде батыру жабыны [42-44], ламинаттау [45-47], саңылау матрицасы [48], терең басып шығару [49], құю [50], фазалық инверсия [51] және т.б. әдістер кең қолданылады. 3-кестеде кейбір көп қабатты мембраналардың қасиеттері мен өнімділігі көрсетілген.

Кесте 3

Көп қабатты микрокеуекті мембрана сепараторлар

Материал	Субстрат	Қалыңдығы	Сұйық электролит	Иондық өткізгіштік	Қосымша мәліметтер	Сілтеме
ПП	ПЭ	12-38 мкм			Жақсартылған тесу беріктігі және жылу кедергісі	[52]
ПВДФ	ПЭТ	33 мкм	LiPF ₆ - ЭК/ДЭК/ПК	$8,9 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы сыйымдылықты сақтау және электрохимиялық тұрақтылық	[53]
ПВДФ	ПЭ	37 мкм	LiPF ₆ - ЭК/ДЭК/ПК	$1,1 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жоғары разряд сыйымдылығы және жоғары жылдамдықтағы өнімділік	[54]
ПММА	ПЭ	25 мкм	LiPF ₆ - ЭК/ДЭК	$5,2 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Разрядтың C- жылдамдығының жақсырақ өнімділігі	[55]
ПВДФ	ПММА	75 мкм	LiPF ₆ - ЭК/ДМК/ЭМК		Жоғары разряд сыйымдылығы және төмен сыйымдылықта сөнугі	[56]

Жоғарыда айтылғандай микрокеукті мембраналық сепараторлардың термиялығы салыстырмалы түрде төмен, ылғалдануы нашар және электролитте нашар сақталады. Бұл қасиеттерді жақсарту үшін микрокеукті полиолефинді мембраналық сепараторлардың құрылымын өзгертудің әртүрлі әдістерін қолдануға болады [57-59]. 4-кестеде *модифицирленген микрокеукті* мембраналық сепараторлардың қасиеттері келтірілген. Микрокеукті полиолефинді мембраналардың құрылымы мен қасиеттерін өзгертудің қарапайым және тиімді әдістерінің бірі-мембраналардың бетіне гидрофильді мономерлерді егу. Гидрофильді мономерлерді егудің әртүрлі әдістері бар, олар: плазма, ультракүлгін сәулелену және электронды бұршақ сәулеленуі. 4-кестеде микрокеукті мембраналық сепараторлардың модифицирленуі механикалық қасиеттерді, сулануды және иондық өткізгіштікті жақсартуға әкелетіндігі көрінеді. Сонымен қатар, электрохимиялық өнімділікті, әсіресе жоғары жылдамдықты, литий-ионды аккумуляторларды модификацирленген микрокеукті мембраналық сепараторларды қолдану арқылы жақсартуға болады.

Кесте 4

Модифицирленген микрокеукті мембраналық сепараторлар

Субстрат материал	Модифицирлеу әдісі	Индукциялау материалы	Мембрана қалыңдығы	Сұйық электролит	Иондық өткізгіштік	Қосымша мәліметтер	Сілтеме
1	2	3	4	5	6	7	8
ПЭ	Плазма	АН (акрилонитрил)	23 мкм	LiPF ₆ -ДЭК/ЭМК/ЭК	$1,4 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы сулану және циклдің жақсы өнімділігі	[60]
ПП	Электронды сәуле	АК, ДЭГДМ (акриловая кислота, диэтиленгликоль-диметакрилат)	50 мкм	LiAsF ₆ -ПК/ЭК/ДМЭ	$1,0 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы механикалық қасиет және жақсы сулану	[61]
ПВДФ	Гамма-сәуле	АК (акриловая кислота) және ДМАА (N,N-диметилакриламид)	80-100 мкм	LiPF ₆ -ПК/ЭК		Жылдамдықтың жақсы өнімділігі және тұрақты цикл әрекеті	[62]
ПЭ	Жабу	ПВДФ-ГФП/ПММА	22 мкм	LiClO ₄ ЭК/ДЭК	$1,69 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Кеуектілігі, иондық өткізгіштігі және циклдік өнімділігі жақсы	[63]
ПП	Егу	ПЭГ		LiPF ₆ -ДМ/ЭК/ЭМК	$1,0 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсартылған иондық өткізгіштік, жақсартылған интерфейске төзімділік және циклдік жүру өнімділігі	[64]

4-кестенің жалғасы

1	2	3	4	5	6	7	8
ПВДФ-ГФП	УФ	ПЭГДА (поли (этиленгликоль) де акрилат)	50 мкм	LiPF ₆ - ДМК/ ЭК	4,0·10 ⁻³ См·см ⁻¹	Жоғары сұйық электролиттің сақталу дәрежесі, сондай-ақ ең жақсы циклдік сипаттамалары және бөлім бетінің қасиеттері	[65]

Тоқыма емес материалдардың талшықты құрылымдары бар, олар құрылымдық тұтастық пен беріктікті бір-бірімен байланысқан талшықтар арқылы алады. Тоқыма емес материалдар әдетте кездейсоқ бағытталған талшықтарды химиялық және механикалық әдістермен желімдеу арқылы жасалады. Тоқыма емес материалдар дәстүрлі түрде балқытылған үрлеу әдісі [66-68] сияқты құрғақ әдіспен және ылғал әдісімен жасалады [69,70] және қағаз жасау әдісі [71,72] арқылы да ылғал әдіспен жасалады. Балқытылған үрлеу әдісі-бұл екі кезеңге бөлуге болатын байланыссыз процесс: талшықты торды қалыптастыру және талшықты торды желімдеу. Алдымен балқытылған полимер көптеген талшықтардан тұратын полимерлі торды қалыптастыру үшін саңылаулары бар иіргіш немесе штамп арқылы сығылады. Талшықтар созылып, жоғары жылдамдықты ыстық ауамен салқындатылады. Екінші кезеңде алынған материал орамдарға жиналады, содан кейін жеткілікті механикалық беріктігі бар тоқыма емес материал қалыптастыру үшін жоғары температура мен қысымда жабыстырылады. Екінші жағынан, ылғал процесс шайырды желім ретінде пайдаланады. Талшықты тор көптеген талшықтардан тұрады және шайыр жылу мен қысым арқылы негізгі талшықтарды байланыстыру үшін шашырайды. Құрғақ және ылғал процестер үшін дайын тоқыма емес материалдардың құрылымы мен қасиеттері полимер түрі, полимер құрамы, температура және қысым сияқты әртүрлі параметрлерге байланысты. Дәстүрлі құрғақ және ылғал түрде дайындалған тоқыма емес материалдар көбінесе қорғасын-қышқылды аккумулятор сепараторлары ретінде қолданылады. Тоқыма емес материалдардың талшықтарының диаметрі үлкен болғандықтан аккумуляторлар үшін жарамсыз болады, оның кеуек мөлшері мен диаметрін сәйкестендіру үшін электр иіру әдісі қолданылады [73]. Электр иіру басқа механикалық иіру әдістерінен түбегейлі ерекшеленеді. Әдеттегі электр иіру жоғары вольтты қуат көзінен, шприцтен, айналмалы саптамадан және жерге тұйықталған коллектордан тұрады. Шприцтегі электр иіру ерітіндісі мен жерге тұйықталған металл коллектор арасында жоғары кернеу қолданылады. Электр иіру әдісі диаметрі бірнеше микрометрден ондаған нанометрге дейінгі талшықтардан тұратын тоқыма емес материалдарды дайындаудың қарапайым және тиімді әдісі екені белгілі. Электр иіру арқылы алынған аккумулятор сепараторлары көптеген артықшылықтарға ие, соның ішінде жоғары кеуектілік, шағын кеуек өлшемі, өзара байланысты ашық кеуек құрылымы, жоғары өткізгіштік және үлкен бет ауданы т.б. 5-кестеде электр иіру әдісімен дайындалған тоқыма емес материалдардан жасалған сепараторлардың қасиеттері келтірілген.

Жоғарыда айтылғандай, электр иіру арқылы алынған тоқыма емес материалдардың көпшілігі литий-ионды аккумулятор сепараторлары ретінде

пайдалану үшін қажетті құрылым мен қасиеттерге ие. Алайда, микрокеукті мембраналармен және модифицирленген микрокеукті мембраналармен салыстырғанда, электр иіру маталары салыстырмалы түрде әлсіз және олардың механикалық қасиеттерін коммерциялық аккумуляторларды құрастыруда қолданылатын орау процесіне төтеп беру үшін жақсарту қажет. Дегенмен электр иіру әдісі өте баяу жүргендіктен, тоқыма емес материалдар дайындау үшін көп уақытты және көп шығынды қажет етеді. Сонымен қатар мұндай материалдар тек қана литийлі батареялар үшін ғана қолданылғандықтан мұндай өндіріс тиімсіз болып табылады.

Кесте 5

Тоқыма емес материалдардан жасалған сепараторлар

Материал	Еріткіш	Мембрана қалыңдығы	Талшық диаметрі	Сұйық электролит	Иондық өткізгіштік	Қосымша мәліметтер	Сілтеме
ПВДФ	Ацетон/(DMAC) Диметилацетамид	30 мкм	0,45 мкм	LiPF ₆ - ЭК/ДМК/Д ЭК	$1,0 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Тұрақты зарядтау-разрядтау және жақсы цикл өнімділігі	[74]
ПВДФ/ ПВДФ - со-ГФП	Ацетон/(DMAC) Диметилацетамид	17 мкм	0,42 мкм	LiPF ₆ - ЭК/ДМК/ ДЭК	$1,0 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы цикл өнімділігі	[75]
ПАН	ДМФ	100 мкм	0,28- 044 мкм	LiPF ₆ - ЭК/ДМК, ЭК/ДЭК ЭС/ЭМК, ПК	$2,0 \cdot 10^{-3}$ – $2,14 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы цикл өнімділігі және төмен сыйымдылықтың жоғалуы	[76]
ПАН	ДМФ	30 мкм	0,33 мкм	LiPF ₆ - ЭК/ДМК, ЭК/ЭМК, ЭК/ДЭК, ЭК/ДМК/ ДЭК	$1,0 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жоғары разряд сыйымдылығы және тұрақты циклдік өнімділік	[77]
ПВДФ/ ПАН	Ацетон/ДМФ	45 мкм	250- 400 нм	LiClO ₄ -ПК	$3,8 \cdot 10^{-3}$ - $7,8 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы анодтық тұрақтылық және жоғары электрохимиялық тұрақтылық терезесі	[78]

Аккумулятор сепараторларының физика-химиялық қасиеттерін жақсартудың маңызды әдістерінің бірі *композиттік мембраналарды* қалыптастыру үшін бейорганикалық бөлшектерді енгізу болып табылады. Бейорганикалық бөлшектер ретінде алюминий оксиді (Al₂O₃), кремний диоксиді (SiO₂) және титан диоксиді (TiO₂) сияқты оксидтерді қосу сепаратордың механикалық, термиялық қасиетін жақсартатындығы әдебиеттерде келтіріледі [79,81]. Бейорганикалық бөлшектердің сонымен қатар гидрофильдік құрылымы ылғалдануды жақсартуы және кристалдық құрылымы литий иондарының қозғалғыштығын арттыруы мүмкін. 6-кестеде композиттік мембраналық сепараторлардың қасиеттері келтірілген.

Кесте 6

Композиттік мембраналық сепараторлар

Субстрат	Байланыстырушы	Бейорганикалық бөлшек	Мембрана қалыңдығы	Сұйық электролит	Иондық өткізгіштік	Қосымша мәліметтер	Сілтеме
ПП	ПЭО/ПВДФ-ГФП	Al ₂ O ₃	26 нм	LiPF ₆ -ЭК/ДМК/ЭМК	$3,8 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы жылдамдық сыйымдылығы және циклдің тұрақтылығы	[82]
ПЭ	ПВДФ-ГФП	AlF ₃ , AlI ₃ , LiF, LiI	30 мкм	LiClO ₄ -ЭК/ДМК	$0,8 \cdot 10^{-3}$ – $1,2 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы сыйымдылықты сақтау және жоғары жылдамдықты өнімділікті жақсарту	[83]
ПЭ	ПММА	SiO ₂	28 мкм	LiPF ₆ -ЭК/ДЭК	$7,4 \cdot 10^{-4}$ См·см ⁻¹	Жақсартылған разряд сыйымдылығы және C-жылдамдық мүмкіндігі	[84]
ПММА	ПВДФ	Al ₂ O ₃	30 мкм	LiPF ₆ -ЭК/ДЭК/ЭМК	$5,3 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы сыйымдылықты сақтау және жоғары электрохимиялық тұрақтылық	[85]
ПВДФ-ГФП		LiAlO ₂ , MgO, Al ₂ O ₃	30-50 мкм	LiPF ₆ -ЭК/ДМК	$3,9 \cdot 10^{-4}$ См·см ⁻¹	Жақсы электрохимиялық тұрақтылық және сыйымдылықты жақсы сақтау	[86]
ПВДФ-ГФП		TiO ₂	50 мкм	LiPF ₆ -ЭК/ДМК	$1,7 \cdot 10^{-4}$ См·см ⁻¹	Жақсы интерфейсаралық тұрақтылық және жылдамдықты жақсарту мүмкіндігі	[87]
ПВДФ-ГФП		ZrO ₂	50-80 мкм	LiClO ₄ -ЭК/ДМК	$1,1 \cdot 10^{-2}$ См·см ⁻¹	Жоғары разряд сыйымдылығы және төмен сыйымдылық жоғалуы	[88]
ПТФЭ		CaCO ₃	175-190 мкм	LiPF ₆ -ЭК/ЭМК	$2,4 \cdot 10^{-3}$ См·см ⁻¹	Жақсы жоғары жылдамдықты өнімділік және тамаша сыйымдылық ұстап қалу	[89]
ПЭ/ПП	ПАН	Al ₂ O ₃ , SiO ₂	34 мкм	LiPF ₆ -ЭК/ДЭК		Жақсы жылдамдық және тұрақты цикл өнімділігі	[90]

Жоғарыда айтылғандай, бейорганикалық бөлшектерді қосу жоғары өнімді литий-ионды аккумулятор сепараторларын алудың перспективалық тәсілі болып табылады.

Литий-ионды аккумуляторлар үшін жоғарыда айтылған барлық сепараторлар литий иондарын электродтар арасында тасымалдау үшін сұйық электролит қажет болады. Екінші жағынан, электролиттік мембраналар иондық өткізгіш болып табылады және екі электрод арасындағы бөлгіш және

электролит ретінде әрекет ете алады. Негізінен электролиттік мембраналардың төрт түрі бар: *қатты керамикалық электролит, полимерлі қатты электролит, полимерлі гельді электролит және композиттік электролит.*

Керамикалық қатты электролиттер кристалды болғандықтан сынғыш келеді, бұл аккумуляторлар үшін қолайсыз болып табылады.

Полимерлі қатты электролиттер жоғары молекулалы полимерден және литий тұздарынан тұрады. Әдеттегі *полимерлі қатты электролиттер* қатты еріткіш ретінде әрекет етіп, литий тұзын ерітеді. Полимерлі қатты электролиттер үшін кеңінен қолданылатын полимерлер ПЭО, ПАН, ПВДФ және ПММА. Бірақ мұндай полимерлі қатты электролиттердің иондық өткізгіштігі төмен болады, өйткені полимердің кристалдық фазасы иондардың қозғалуына кері әсер етеді.

Қатты полимерлі электролиттермен салыстырғанда *гельді полимерлі электролиттердің* иондық өткізгіштігі едәуір жоғары. Олар сондай-ақ электрохимиялық кең терезеге, жоғары термиялық тұрақтылыққа және электродтармен жақсы үйлесімділікке ие. Гельді полимерлі электролиттердегі зарядты тасымалдау механизмі сұйық электролиттердегі механизмге ұқсас.

Композиттік электролиттерді полимерлі қатты электролиттерге немесе гельді полимерлі электролиттерге әртүрлі толтырғыштарды енгізу арқылы жасауға болады. Әсіресе оксидтер электролиттердің иондық өткізгіштігі мен фазааралық қасиеттерін жақсарту үшін кеңінен қолданылатын бейорганикалық толтырғыштар болып табылады.

Сонымен сепаратор қайта зарядталатын литий-ионды батареяның маңызды құрамдас бөлігі болып табылады. Сепаратордың негізгі рөлі батареяның оң және теріс электродтары арасындағы физикалық байланыстың алдын алу және ішкі қысқа тұйықталудың алдын алу болып табылады, ал ол иондардың тасымалдануын қамтамасыз ету үшін электролит резервуары ретінде қызмет етеді. Идеал сепаратор жасушаның ішкі кедергісін төмендету үшін электролиттің үлкен сіңірілуіне ие болуы керек, жоғары механикалық беріктігі бар өте жұқа болуы керек, электрохимиялық және құрылымдық тұрақты болуы керек, сонымен қатар дендритті литийдің өсуіне жол бермейтін жоғары кеуекті құрылымы болуы керек. Сонымен қатар, сепаратор батареяның қауіпсіздігі үшін қызып кеткен кезде батареяны өшіре алуы керек. Дегенмен, практикалық сепараторлар осы тамаша қасиеттердің барлығына ие бола алмайды және өнімділігі жоғары батареяларды алу үшін сепаратордың әртүрлі қасиеттерін теңестіру өте маңызды болады. Сепараторлардың құрылымы мен қасиеттеріне қойылатын нақты талаптар белгілі бір қасиеттерді қажет ететін батареяның нақты қолданылуына байланысты.

Болашақта батарея сепараторлары бірегей қасиеттерді, соның ішінде негізгі талаптарды талап етеді, өйткені жетілдірілген батареяларға сұраныс жалғасуда. Литий-ионды батареяларда қолданылатын жетілдірілген сепараторларды дайындау үшін өзін-өзі құрастыру және атомдық қабатты тұндыру сияқты бірегей әдістерді де қолдануға болады. Сондықтан тамаша өнімділігі бар жетілдірілген батареяларды жасау үшін жаңа сепаратор конструкцияларын әзірлеу үшін қосымша зерттеулер қажет.

Жоғарыдағы шолу ақпараттарына сүйене отырып болашақта баламалы ток көздері үшін тиімділігі жоғары батареяларды барлық талаптарлы ескере отырып даярлау қиынға соқпайды. Соның ішінде құрамында бейорганикалық

толтырғыштар (керамика, саз) бар батареялар жасау қауіпсіз деуге болады. Себебі, сазды материалдардың физикалық және химиялық қасиеттері (отқа төзімділігі, агрессивті ортаға тұрақтылығы) қауіпсіз батареялар жасауға толық мүмкіндік береді [91-93]. Сондықтан, болашақта саздар негізіндегі баламалы тоқ көздерін дамыту қызығушылық тудырады.

Қорытынды. Бұл шолу жұмыста литий-ионды аккумуляторлардағы негізгі және аса маңызды компоненттердің бірі – сепаратордың маңыздылығы жан-жақты талданды. Сепаратор тек қана анод пен катодты физикалық түрде бөлу қызметін атқарып қоймай, аккумулятордың қауіпсіздігі мен электрохимиялық өнімділігіне тікелей әсер ететін маңызды құрылымдық элемент ретінде қарастырылды.

Сепаратордың даму тарихы қарастырылып, әр кезеңдегі технологиялық жетістіктердің аккумулятор сипаттамаларын жетілдіруге қалай әсер еткені көрсетілді. Сонымен қатар, қазіргі таңдағы сепараторларға қойылатын негізгі талаптар (жоғары иондық өткізгіштік, термиялық және механикалық тұрақтылық, химиялық инерттілік пен минималды қалыңдық) нақты сандық көрсеткіштермен сипатталды.

Берілген шолудағы ақпаратты химиялық тоқ көздері үшін құрамында бейорганикалық толтырғыштар бар полимерлі сепараторлар алу мақсатында жасалынып жатқан ғылыми зерттеу жұмыстарына қолдана отырып, қазіргі кезде мақала авторларымен поливинилидендифторид (ПВДФ), поливинилпирролидон (ПВП), бентонит, каолин, негізінде жасалған полимерлі матрицаларға негізделген пленкалар әзірленіп, сонымен қатар оларды батареялар және конденсаторларда мембраналық сепараторлар ретінде пайдалану міндеттелуде.

Әдеби шолудағы сепараторларға қойылатын талаптар ескеріле отырып, авторлармен тиімділігі жоғары болатын заманауи аккумуляторларға (батареяларға) арналған мембрана қасиеттерін, атап айтқанда, әр түрлі қатынаста құрамы ПВДФ-ПВП-каолин негізінде алынған мембрана-сепараторлардың (қатты полимерлі электролит) тиімді құрамы, иондық өткізгіштігі, электрохимиялық, механикалық және термиялық қасиеттері зерттелінуде. Алда полимерлі сепаратордың сканерлеуші электронды микроскоп зерттеулері және инфрақызыл спектроскопия әдісімен талдауы жоспарлануда.

Сепаратордың иондық өткізгіштігі оның тоқ өткізу қабілетін бағаласа, механикалық қасиеті ұзаққа жарамдылығы мен беріктігін сипаттайды, сонымен қатар батареяларды температураны реттеу және оған шыдамды болу маңызды көрсеткіш болып табылады. Осы параметрлерді анықтай және бағалай отыра тиімділігі жоғары мембрана-сепаратор жасауға қол жеткізіледі. Алынған материалдардың электрохимиялық қасиеттерін талдау мембраналық сепаратордың циклдік тұрақтылығын бақылау арқылы композиттерді сепаратор ретінде пайдалану ықтималдығын және ток көздерінде бөлгіш ретінде тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер бойынша түрлендіргіштің мембраналы сепараторлардың қасиеттеріне әсер етуінің физика-химиялық аспектілерін мұқият зерттеу іргелі білімді одан әрі жинақтау және полимер матрицасы мен толтырғыш арасындағы өзара әрекеттесу заңдылықтарын шығару үшін маңызды болады. Бұл пайдаланушыға қажетті сипаттамалары бар мембраналық сепаратордың құрамдас бөліктерін таңдауды жеңілдетеді. Сепараторларға қойылатын негізгі талаптар қорытындылау мақсатында 1-кестеде жинақталған.

Әдебиеттер тізімі

1. Zhang S.S. A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries // *Journal of Power Sources*. – 2007. – Vol. 164. – P. 351-364.
2. Gabano, J.B. Electrochemical generator with non-aqueous electrolyte: U.S. Patent № 3 542 601. – 1970.
3. Gabano, J.B., Gerbier, G. Electrochemical generator utilizing a lithium anode, copper sulfide cathode and non-aqueous electrolytes: U.S. Patent № 3 511 716. – 1970.
4. Gabano J.B., Dechenaux V., Gerbier G., Jammet J. D-size lithium cupric sulfide cells // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1972. – Vol. 119. – P. 459.
5. Jasinski, J. High energy batteries. – New York : Plenum Press, 1967. – 700 p.
6. Maricle, D.L., Mohns, J.P. Electrochemical cell containing sulfur dioxide as the cathode depolarizer: U.S. Patent № 3 567 515. – 1971.
7. Dey A.N. Primary Li/SOCl₂ cells. I. Performance characteristics of hermetically sealed D cells // *Electrochimica Acta*. – 1976. – Vol. 21. – P. 855–860.
8. David W.I.F., Thackeray M.M., Bruce P.G., Goodenough J.B. Lithium insertion into manganese spinels // *Materials Research Bulletin*. – 1983. – Vol. 18. – P. 461–472.
9. Selman R., Agarwal R.R. Stagewise electrochemical intercalation of lithium in graphite by means of a molten salt cell // *Journal of The Electrochemical Society*. – 1985. – Vol. 62. – P. 352-370.
10. Arora P., Zhang Z. Battery separators // *Chemical Reviews*. – 2004. – Vol. 104. – P. 4419-4462.
11. Miranda D., Costa C.M., Almeida A.M., Lanceros-Méndez S. Modeling separator membranes physical characteristics for optimized lithium-ion battery performance // *Solid State Ionics*. – 2015. – Vol. 278. – P. 78-84.
12. Lee H., Yanilmaz M., Toprakci O., Fu K., Zhang X. A review of recent developments in membrane separators for rechargeable lithium-ion batteries // *Energy & Environmental Science*. – 2014. – Vol. 7. – P. 3857-3886.
13. Heidari A.A., Mahdavi H. Recent development of polyolefin-based microporous separators for Li-ion batteries: A review // *Chemical Record*. – 2020. – Vol. 20. – P. 570-595.
14. Li D., Shi D., Xia Y., Qiao L., Li X., Zhang H. Superior thermally stable and nonflammable porous polybenzimidazole membrane with high wettability for high-power lithium-ion batteries // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2017. – Vol. 9. – P. 8742-8750.
15. Jeon D.H. Wettability in electrodes and its impact on the performance of lithium-ion batteries // *Energy Storage Materials*. – 2019. – Vol. 18. – P. 139-147.
16. Zhu B., Zheng T., Xiong J., Shi X., Cheng Y.J., Xia Y. A lithium-ion battery cathode with enhanced wettability toward an electrolyte fabricated by a fast light curing of photoactive slurry // *Energy & Fuels*. – 2022. – Vol. 36. – P. 3313-3318.
17. Huang Q., Zhao C., Li X. Enhanced electrolyte retention capability of separator for lithium-ion battery constructed by decorating ZIF-67 on bacterial cellulose nanofiber // *Cellulose*. – 2021. – Vol. 28. – P. 3097-3112.
18. Zhai P., Liu K., Wang Z., Shi L., Yuan S. Multifunctional separators for high-performance lithium-ion batteries // *Journal of Power Sources*. – 2021. – Vol. 499. – Article 229973.
19. Xie Y., Zou H., Xiang H., Xia R., Liang D., Shi P., Dai S., Wang H. Enhancement on the wettability of lithium battery separator toward nonaqueous electrolytes // *Journal of Membrane Science*. – 2016. – Vol. 503. – P. 25-30.
20. Liu F., Chuan, X. Recent developments in natural mineral-based separators for lithium-ion batteries // *RSC Advances*. – 2021. – Vol. 11. – P. 16633-16644.
21. Reizabal A., Gonçalves R., Fidalgo-Marijuan A., Costa C.M., Pérez L., Vilas J.L., Lanceros-Méndez S. Tailoring silk fibroin separator membranes pore size for improving performance of lithium-ion batteries // *Journal of Membrane Science*. – 2020. – Vol. 598. – Article 117678.

22. Costa C.M., Lee Y.H., Kim J.H., Lee S.Y., Lanceros-Méndez S. Recent advances on separator membranes for lithium-ion battery applications: From porous membranes to solid electrolytes // *Energy Storage Materials*. – 2019. – Vol. 22. – P. 346-375.
23. Kim J.R., Choi S.W., Jo S.M., Lee W.S., Kim B.C. Electrochemical and spectroscopic properties of electrospun PAN-based fibrous polymer electrolytes // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2005. – Vol. 152. – P. 295.
24. Pan R., Sun R., Wang Z., Lindh J., Edström K., Strømme M., Nyholm L. Sandwich-structured nano/micro fiber-based separators for lithium metal batteries // *Nano Energy*. – 2019. – Vol. 55. – P. 316-326.
25. Nunes-Pereira J., Lopes A.C., Costa C.M., Rodrigues L.C., Silva M.M., Lanceros-Méndez S. Microporous membranes of NaY zeolite/poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) for Li-ion battery separators // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. – 2013. – Vol. 689. – P. 223-232.
26. Francis C.F., Kyratzis I.L., Best A.S. Lithium-ion battery separators for ionic-liquid electrolytes: A review // *Advanced Materials*. – 2020. – Vol. 32. – Article 1904205.
27. Deng K., Qin J., Wang S., Ren S., Han D., Xiao M., Meng Y. Effective suppression of lithium dendrite growth using a flexible single-ion conducting polymer electrolyte // *Small*. – 2018. – Vol. 14. – Article 1801420.
28. Book of ASTM standards [Electronic resource]. – 1916. – Access mode: <https://archive.org/details/bookofastmstan1916amer/page/n5/mode/2up>.
29. Wang Y., Yin C., Song Z., Wang Q., Lan Y., Luo J., Bo L., Yue Z., Sun F., Li X. Application of PVDF organic particles coating on polyethylene separator for lithium-ion batteries // *Materials*. – 2019. – Vol. 12. – Article 3125.
30. Shi C., Zhang P., Huang S., He X., Yang P., Wu D., Sun D., Zhao J. Functional separator consisted of polyimide nonwoven fabrics and polyethylene coating layer for lithium-ion batteries // *Journal of Power Sources*. – 2015. – Vol. 298. – P. 158-165.
31. Liu K., Liu W., Qiu Y., Kong B., Sun Y., Chen Z., Zhuo D., Lin D., Cui Y. Electrospun core-shell microfiber separator with thermal-triggered flame-retardant properties for lithium-ion batteries // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3. – Article e1601973.
32. Liu J., Liu Y., Yang W., Ren Q., Li F., Huang Z. Lithium-ion battery separator with high performance and high safety enabled by tri-layered SiO₂@PI/m-PE/SiO₂@PI nanofiber composite membrane // *Journal of Power Sources*. – 2018. – Vol. 396. – P. 265-275.
33. Djian D., Alloin F., Martinet S., Lignier H., Sanchez J.Y. Lithium-ion batteries with high charge rate capacity: influence of the porous separator // *Journal of Power Sources*. – 2007. – Vol. 172. – P. 416-421.
34. Ihm D.W., Noh J.G., Kim J.Y. Effect of polymer blending and drawing conditions on properties of polyethylene separator prepared for Li-ion secondary battery // *Journal of Power Sources*. – 2002. – Vol. 109. – P. 388-393.
35. Saunier J., Alloin F., Sanchez J., Caillon G. Thin and flexible lithium-ion batteries: investigation of polymer electrolytes // *Journal of Power Sources*. – 2003. – Vol. 119-121. – P. 454-459.
36. Djian D., Alloin F., Martinet S., Lignier H. Macroporous poly(vinylidene fluoride) membrane as a separator for lithium-ion batteries with high charge rate capacity // *Journal of Power Sources*. – 2009. – Vol. 187. – P. 575-580.
37. Croce F., Gerace F., Dautzenberg G., Passerini S., Appetecchi G.B., Scrosati B. Synthesis and characterization of highly conducting gel electrolytes // *Electrochimica Acta*. – 1994. – Vol. 39. – P. 2187-2194.
38. Appetecchi G.B., Croce F., Scrosati B. High-performance electrolyte membranes for plastic lithium batteries // *Journal of Power Sources*. – 1997. – Vol. 66. – P. 77-82.
39. Kang S.M., Ryou M.H., Choi J.W., Lee H. Mussel- and diatom-inspired silica coating on separators yields improved power and safety in Li-ion batteries // *Chemistry of Materials*. – 2012. – Vol. 24. – P. 3481-3485.

40. Janmey, R.M. Electrochemical cell with reinforced separator: U.S. Patent 6828061. – 2004.
41. Arrance, F.C., Mesa, C. Battery separator: U.S. Patent 3542596. – 1970.
42. Taskier, H.T. Hydrophilic polymer coated microporous membranes capable of use as a battery separator: U.S. Patent 4359510. – 1982.
43. Hashimoto, T., Totsuka, H., Takahata, M., Takanashi, M., Oota, Y., Sano, K. Separator for power storage device: U.S. Patent 20100316912. – 2010.
44. Carlson, S.A. Microporous separators: U.S. Patent 20040185335. – 2004.
45. Ying, Q., Carlson, S.A., Skotheim, T.A. Protective coating for separators for electrochemical cells: U.S. Patent 6194098. – 2001.
46. Lang, C.D., Faircloth, T.J. Apparatus and method for solution coating thin layers: U.S. Patent 20110086164. – 2011.
47. Kim, J.H., Yu, J.S., Choi, J.H. Rechargeable lithium battery using separator partially coated with gel polymer: U.S. Patent 8003263. – 2011.
48. Jeong H.S., Kim J.H., Lee S.Y. A novel poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene)/poly(ethylene terephthalate) composite nonwoven separator with phase inversion-controlled microporous structure for a lithium-ion battery // *Journal of Materials Chemistry*. – 2010. – Vol. 20. – P. 9180-9187.
49. Jeong H.S., Choi E.S., Kim J.H., Lee S.Y. Potential application of microporous structured poly(vinylidene fluoride-hexafluoropropylene)/poly(ethylene terephthalate) composite nonwoven separators to high-voltage and high-power lithium-ion batteries // *Electrochimica Acta*. – 2011. – Vol. 56. – P. 5201-5206.
50. Yu, W.C., Hux, S.E. Method of making a trilayer battery separator: U.S. Patent 5952120. – 1999.
51. Lee Y.M., Kim J.W., Choi N.S., Lee J.A., Seol W.H., Park J.K. Novel porous separator based on PVdF and PE non-woven matrix for rechargeable lithium batteries // *Journal of Power Sources*. – 2005. – Vol. 139. – P. 235-241.
52. Lee Y.M., Choi N.S., Lee J.A., Seol W.H., Cho K.Y., Jung H.Y., Kim J.W., Park J.K. Electrochemical effect of coating layer on the separator based on PVdF and PE non-woven matrix // *Journal of Power Sources*. – 2005. – Vol. 146. – P. 431-436.
53. Park J.H., Park W., Kim J.H., Ryoo D.J., Kim H.S., Jeong Y.U., Kim D.W., Lee S.Y. Close-packed poly(methyl methacrylate) nanoparticle arrays-coated polyethylene separators for high-power lithium-ion polymer batteries // *Journal of Power Sources*. – 2011. – Vol. 196. – P. 7035-7038.
54. Zhang H.P., Zhang P., Li Z.H., Sun M., Wu Y.P., Wu H.Q. A novel sandwiched membrane as polymer electrolyte for lithium-ion battery // *Electrochemistry Communications*. – 2007. – Vol. 9. – P. 1700-1703.
55. Tanaka, T., Yamaguchi, H., Takimoto, N., Yamashita, M., Hamamoto, S. Battery separator, process for producing the same, and alkaline battery: U.S. Patent 6821680. – 2004.
56. Takeuchi, Y., Kawabe, M., Yamazaki, H., Kaneko, M., Anan, G., Sato, K. Sulfur containing atomic group introduced porous article: U.S. Patent 6171708. – 2001.
57. Kim J.Y., Lim D.Y. Surface-modified membrane as a separator for lithium-ion polymer battery // *Energies*. – 2010. – Vol. 3. – P. 866-872.
58. Tanaka, M., Yamazaki, H., Kondo, Y., Takahashi, K., Takase, T., Oota, S. Battery separator: U.S. Patent 6586137. – 2003.
59. Kim J.Y., Lee Y., Lim D.Y. Plasma-modified polyethylene membrane as a separator for lithium-ion polymer battery // *Electrochimica Acta*. – 2009. – Vol. 54. – P. 3714-3719.
60. Gineste J.L., Pourcelly G. Pyrogallol acid-coated polypropylene membrane as separator for lithium-ion batteries // *Journal of Membrane Science*. – 1995. – Vol. 107. – P. 155-160.
61. Jarvis C.R., Macklin W.J., Macklin A.J., Mattingley N.J., Kronfli E. Use of grafted PVdF-based polymers for lithium batteries // *Journal of Power Sources*. – 2001. – Vol. 97. – P. 664-668.

62. Sohn J.Y., Im J.S., Shin J., Nho Y.C. PVDF-HFP/PMMA-coated PE separator for lithium-ion battery // *Journal of Solid State Electrochemistry*. – 2012. – Vol. 16. – P. 2551-2557.
63. Fang L.F., Shi J.L., Ku B., Zhu L.P. Facile introduction of polyether chains onto polypropylene separators and its application in lithium-ion batteries // *Journal of Membrane Science*. – 2013. – Vol. 448. – P. 143-150.
64. Song M.K., Kim Y.T., Cho B.W., Popov B.N., Rhee H.W. Thermally stable gel polymer electrolytes // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2003. – Vol. 150. – P. A439-A444.
65. Zucker, J. Melt blown battery separator: U.S. Patent 6692868. – 2004.
66. Sudou, Y., Suzuki, H., Nagami, S., Ikuta, K., Yamamoto, T., Okijima, S., Suzuki, S., Ueshima, H. Separator for battery and lithium ion battery using the same: U.S. Patent 20060073389. – 2006.
67. Schortmann, W.E. Nonwoven laminate with wet-laid barrier fabric and related method: U.S. Patent 5204165. – 1993.
68. Tanaka, M., Tokutake, N. Alkaline battery separator and process for producing the same: U.S. Patent 6030727. – 2000.
69. Ashida, T., Tsukuda, T. Nonwoven fabric for separator of non-aqueous electrolyte battery and non-aqueous electrolyte battery using the same: U.S. Patent 6200706. – 2001.
70. Mathur, A. Recyclable thermoplastic moldable nonwoven liner for office partition and method for its manufacture: U.S. Patent 6517676. – 2003.
71. Locquet J.P., Perret J., Fompeyrine J., Machler E., Seo J.W., Van Tendeloo G. Doubling the critical temperature of $\text{La}_{1.9}\text{Sr}_{0.1}\text{CuO}_4$ using epitaxial strain // *Nature*. – 1998. – Vol. 394. – P. 453-456.
72. Croce F., Curini R., Martinelli A., Persi L., Ronci F., Scrosati B., Caminiti R. Physical and chemical properties of nanocomposite polymer electrolytes // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 1999. – Vol. 103. – P. 10632-10638.
73. Kim J.R., Choi S.W., Jo S.M., Lee W.S., Kim B.C. Electrospun PVdF-based fibrous polymer electrolytes for lithium-ion polymer batteries // *Electrochimica Acta*. – 2004. – Vol. 50. – P. 69-75.
74. Lee S.W., Choi S.W., Jo S.M., Chin B.D., Kim D.Y., Lee K.Y. Electrochemical properties and cycle performance of electrospun poly(vinylidene fluoride)-based fibrous membrane electrolytes for Li-ion polymer battery // *Journal of Power Sources*. – 2006. – Vol. 163. – P. 41-47.
75. Raghavan P., Manuel J., Zhao X., Kim D.S., Ahn J.H., Nah C. Preparation and electrochemical characterization of gel polymer electrolyte based on electrospun polyacrylonitrile nonwoven membranes for lithium batteries // *Journal of Power Sources*. – 2011. – Vol. 196. – P. 6742-6749.
76. Choi S.W., Kim J.R., Jo S.M., Lee W.S., Kim Y.R. Electrochemical and spectroscopic properties of electrospun PAN-based fibrous polymer electrolytes // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2005. – Vol. 152. – P. A989-A995.
77. Gopalan A., Santhosh P., Manesh K., Nho J., Kim S., Hwang C., Lee K. Development of electrospun PVdF-PAN membrane-based polymer electrolytes for lithium batteries // *Journal of Membrane Science*. – 2008. – Vol. 325. – P. 683-689.
78. Khalil A.M., Kenawy S.H. Hybrid membranes based on clay-polymer for removing methylene blue from water // *Acta Chimica Slovenica*. – 2020. – Vol. 67, No. 1. – P. 96-104.
79. Aoues A., Merdoud O., Boulakradeche M.O., Arous O., Abdessemed D.J. Preparation and characterization of polymer inclusion membranes based on biodegradable cellulose/Algerian clay for heavy metals removal from wastewater // *Cellulose Chemistry and Technology*. – 2024. – Vol. 58, No. 7–8. – P. 891-899.
80. Liao Y.H., Li X.P., Fu C.H., Xu R., Zhou L., Tan C.L., Hu S.J., Li W.S. Polypropylene-supported and nano- Al_2O_3 -doped PEO-PVdF-HFP-based gel electrolyte for lithium-ion batteries // *Journal of Power Sources*. – 2011. – Vol. 196. – P. 2115-2121.

81. Eo S.M., Cha E., Kim D.W. Effect of an inorganic additive on the cycling performances of lithium-ion polymer cells assembled with polymer-coated separators // Journal of Power Sources. – 2009. – Vol. 189. – P. 766-770.
82. Park J.H., Cho J.H., Park W., Ryoo D., Yoon S.J., Kim J.H., Jeong Y.U., Lee S.Y. Close-packed SiO₂/poly(methyl methacrylate) binary nanoparticles-coated polyethylene separators for lithium-ion batteries // Journal of Power Sources. – 2010. – Vol. 195. – P. 8306-8312.
83. Kim M., Han G.Y., Yoon K.J., Park J.H. Preparation of a trilayer separator and its application to lithium-ion batteries // Journal of Power Sources. – 2010. – Vol. 195. – P. 8302-8305.
84. Prosini P.P., Villano P., Carewska M. A novel intrinsically porous separator for self-standing lithium-ion batteries // Electrochimica Acta. – 2002. – Vol. 48. – P. 227-233.
85. Miao R., Liu B., Zhu Z., Liu Y., Li J., Wang X., Li Q. PVDF-HFP-based porous polymer electrolyte membranes for lithium-ion batteries // Journal of Power Sources. – 2008. – Vol. 184. – P. 420-426.
86. Subramania A., Kalyana Sundaram N.T., Sathiya Priya A.R., Vijaya Kumar G. Preparation of a novel composite microporous polymer electrolyte membrane for high-performance Li-ion battery // Journal of Membrane Science. – 2007. – Vol. 294. – P. 8-15.
87. Zhang S.S., Xu K., Jow T.R. Alkaline composite film as a separator for rechargeable lithium batteries // Journal of Solid State Electrochemistry. – 2003. – Vol. 7. – P. 492-499.
88. Cho T.H., Tanaka M., Ohnishi H., Kondo Y., Yoshikazu M., Nakamura T., Sakai T. Composite nonwoven separator for lithium-ion battery: development and characterization // Journal of Power Sources. – 2010. – Vol. 195. – P. 4272-4277.
89. Feriancova A., Dubec A., Pagacova J., Pajtasova M. Modification of the filler based on kaolin and its use in the polymer composites // MATEC Web of Conferences. – 2022. – Vol. 357. – Article 07004.
90. Zou D., Fan W., Xu J., Drioli E., Chen X., Qiu M., Fan Y. One-step engineering of low-cost kaolin/fly ash ceramic membranes for efficient separation of oil–water emulsions // Journal of Membrane Science. – 2021. – Vol. 621. – Article 118954.
91. Aloulou H., Aloulou W., Duplay J., Baklouti L., Dammak L., Aman R.B. Development of ultrafiltration kaolin membranes over sand and zeolite supports for the treatment of electroplating wastewater // Membranes. – 2022. – Vol. 12. – No. 11. – Article 1066.
92. Ali M., Mir S., Atanase L.I., Abid O., Kazi M. Chitosan–PVA–PVP/nano-clay composite: a promising tool for controlled drug delivery // RSC Advances. – 2024. – Vol. 14. – P. 15777-15790.
93. Lee H., Lee D. Composite membrane containing titania nanofibers for battery separators used in lithium-ion batteries // Membranes. – 2023. – Vol. 13. – Article 499.

Материал редакцияға 28.04.25 түсті, 17.12.25 қабылданды.

Г.А. Сүлейменова¹, Е.Ж. Усипбекова¹, А. Даулетбай², А.Т. Қонаров², Г.А. Сейлханова¹

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Назарбаев Университет, Астана, Казахстан

СЕПАРАТОРЫ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ: НАУЧНЫЙ ОБЗОР И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Аннотация. Сепаратор, являясь одним из ключевых компонентов литий-ионных аккумуляторов, играет важную роль в обеспечении их безопасности и

электрохимических характеристик. Он представляет собой тонкую пористую мембрану, предотвращающую короткое замыкание между катодом и анодом, а также обеспечивающую транспорт ионов. Хотя сепаратор непосредственно не участвует в электрохимических реакциях во время работы аккумулятора, он оказывает прямое влияние на его безопасность и эксплуатационные характеристики. В связи с этим требования к сепараторам чрезвычайно высоки и продолжают оставаться предметом активных исследований. Несмотря на то, что, за последнее десятилетие внимание исследователей к разработке новых сепараторов значительно возросло, история их создания восходит к 1970-м годам. В настоящем литературном обзоре на основе мировой научной литературы рассмотрены этапы развития технологий изготовления сепараторов, их эволюция, основные требования и характеристики, а также современные типы сепараторов. Особое внимание уделено количественному анализу и рассмотрению ключевых показателей и критериев, важных для разработки multifunctional сепараторов следующего поколения.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, сепаратор, требования, электрохимия, электрохимические показатели, композитные материалы.

G.A. Suleimenova¹, Ye.Zh. Ussipbekova¹, A. Dauletbay², A.T. Konarov², G.A. Seilkhanova¹

¹*al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

²*Nazarbaev University, Astana, Kazakhstan*

LITHIUM-ION BATTERY SEPARATORS: SCIENTIFIC REVIEW AND PROMISING AREAS OF DEVELOPMENT

Abstract. The separator, being one of the key components of lithium-ion batteries, plays an important role in ensuring their safety and electrochemical characteristics. It is a thin porous membrane that prevents a short circuit between the cathode and the anode, as well as providing ion transport. Although the separator is not directly involved in electrochemical reactions during battery operation, it has a direct impact on its safety and performance. In this regard, the requirements for separators are extremely high and continue to be the subject of active research. Despite the fact that researchers' attention to the development of new separators has increased significantly over the past decade, the history of their creation dates back to the 1970s. Based on the world scientific literature, this literary review examines the stages of development of separator manufacturing technologies, their evolution, basic requirements and characteristics, as well as modern types of separators. Special attention is paid to the quantitative analysis and consideration of key indicators and criteria important for the development of multifunctional separators of the next generation.

Keywords: lithium-ion battery, separator, requirements, electrochemistry, electrochemical parameters, composite materials.