

Гулчехра Абдурахмановна Такибаева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшей математики и физики» Южно-Казахстанского университета им. М.Ауэзова, Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: takibayevagulchekhra@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2663-0281>

Салтанат Жұмабековна Егембердиева – PhD, старший преподаватель Регионального инновационного университета, г. Шымкент; e-mail: saltanat_2207@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7241-9762>.

Айсулу Тенелхановна Кабылбекова – магистр, старший преподаватель сектора «Естественные науки, физическая культура и дизайн» Университет Мирас, Республика Казахстан; e-mail: aika_kabil@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4167-6800>.

Received 06.10.2025

Revised 09.12.2025

Accepted 10.12.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-73](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-73)

FTAXP: 35.15.19



Ш.Т. Султахан^{1*}, Ә. Әбдісаттар², Қ. Тажу², А. Коробейник³, С. Азат¹

¹Satbayev Univeristy,

050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сатпаев к-сі, 22

²Жану проблемалары институтының,

Алматы қ., Бөгенбай батыр к-сі, 172

³Орхус тереңдетілген зерттеулер институты, Орхус университеті,

8000 Орхус С, Дания

*e-mail:shynggyskhan.1@gmail.com

ЭНЕРГИЯ САҚТАУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫНЫҢ СЫЙЫМДЫЛЫҚ ӨНІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН МХЕНЕ МОДИФИКАЦИЯЛАУ ӘДІСТЕРІ

Аңдатпа: Бұл шолу жұмысында екі өлшемді МХене материалдарын, ең алдымен $Ti_3C_2T_x$ және онымен байланысты қосылыстарды, суперконденсаторлар мен гибриді энергия сақтау құрылғыларында қолдану мақсатында олардың сыйымдылық сипаттамаларын арттыруға бағытталған заманауи модификациялау әдістері жан-жақты талданады және жүйеленеді. МХене материалдарының жоғары электрондық өткізгіштігі, қабатты құрылымы және химиялық белсенді беті оларды энергия жинақтау құрылғылары үшін перспективалы электродтық материалдар ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Алайда олардың практикалық қолданылуы қабаттардың қайта тығыздалуы, белсенді орталықтардың қолжетімділігінің шектелуі және ұзақ циклдік жұмыс барысында құрылымдық тұрақтылықтың төмендеуі сияқты бірқатар шектеулермен сипатталады. Осы шолу аясында МХене материалдарының электрохимиялық қасиеттеріне әсер ететін негізгі модификациялау стратегиялары, соның ішінде интеркаляциялау арқылы қабатаралық қашықтықты реттеу, беткі терминалдық топтардың функционализациясы, көміртекті наноматериалдармен және өтпелі металдардың оксидтерімен композиттер түзу, гетероатомды легирлеу, морфологиялық инженерия және әртүрлі кейінгі өңдеу әдістері қарастырылады. Аталған тәсілдердің иондық және электрондық өткізгіштікке, псевдоконденсация үлесіне және электрод материалдарының циклдік тұрақтылығына әсері салыстырмалы түрде бағаланады. Әдеби деректер негізінде меншікті сыйымдылық пен ұзақ мерзімді циклдік тұрақтылық көрсеткіштері бойынша жалпыланған талдау жүргізіліп, МХене негізіндегі электродтарды оңтайландыруға бағытталған практикалық ұсыныстар мен болашақ зерттеу бағыттары тұжырымдалады.

Түйін сөздер: МХене, суперконденсаторлар, энергия сақтау, беттік модификация, интеркаляция, псевдоконденсаторлар.

1. Кіріспе

МХендер – $M_{n+1}X_nT_x$ жалпы формуласы бар екі өлшемді өтпелі металл карбидтері мен нитридтерінің класы, мұндағы М – ерте өтпелі металл (Ti, V, Nb, Mo және т.б.), X – С және/немесе N, ал T_x – беттік функционалдық топтар, негізінен –O, –OH және –F. МАХ фазаларын селективті өңдеу және қабатты МХендерді дайындау бойынша алғашқы

зерттеулерден бастап, бұл материалдар металл электр өткізгіштігінің, үлкен меншікті беттік ауданының және жоғары беттік химиялық белсенділіктің үйлесіміне байланысты айтарлықтай назар аударды [1-3]. Кейінгі зерттеулер МХеңдердің электрлік қос қабатты және беттік псевдоконденсация механизмдерінің үйлесімі арқылы зарядты тиімді сақтауға қабілетті екенін көрсетті, бұл оларды классикалық көміртекті электрод материалдарынан ерекшелендіреді [4, 5].

Энергия сақтау құрылғылары тұрғысынан МХеңе-дер белсендірілген көмірлер мен өтпелі металл оксидтеріне перспективалы балама және толықтырушы болып саналады, себебі олар салыстырмалы түрде төмен ішкі кедергісі бар жоғары меншікті және көлемдік сыйымдылықты көрсетеді [2, 6, 8]. Эксперименттік зерттеулер МХеңе электродтарының массалық жүктеменің артуымен де жоғары жылдамдықты сипаттамаларды сақтай алатынын көрсетті, бұл практикалық суперконденсаторлар мен гибриді энергия сақтау құрылғылары үшін өте маңызды [5, 7]. Дегенмен, түпнұсқа МХеңе-дер бірқатар шектеулерге ұшырайтыны анықталды, соның ішінде қабатты қайта қабаттау, белсенді орындарға шектеулі қол жетімділік және ұзақ мерзімді цикл кезінде электрохимиялық қасиеттердің нашарлауы [8-10].

Соңғы жылдары осы шектеулерді жеңу үшін МХеңе-ді мақсатты түрде модификациялауға айтарлықтай жүргізілді. Аса мән беріліп зерттелген тәсілдер – интеркаляция стратегиялары, терминалды беттік топтарын басқару, көміртекті наноматериалдармен, өтпелі металдардың оксидтерімен және гидроксидтерімен композиттерді қалыптастыру, сондай-ақ үш өлшемді архитектуралар мен гибриді құрылымдарды жасау [11-15]. Бұл шолудың мақсаты – МХеңе негізіндегі электродтардың меншікті сыйымдылығын, жылдамдық сипаттамаларын және циклдік тұрақтылығын арттыру механизмдеріне назар аудара отырып, осы тәсілдерді жүйелеу және сыни талдау, сондай-ақ одан әрі зерттеулер үшін ең перспективалы бағыттарды анықтау.

1. МХеңе қабатаралық кеңістігін интеркаляция стратегиялары және реттеу

Интеркаляция МХеңе электрохимиялық өнімділігін жақсартудың ең іргелі және кеңінен қолданылатын тәсілдерінің бірі болып табылады, себебі ол қабаттар аралық кеңістікке, белсенді беттің қолжетімділігіне және ион тасымалдау кинетикасына тікелей әсер етеді [11, 16-18]. Бастапқы күйде МХеңе қабаттары, атап айтқанда $Ti_3C_2T_x$, күшті ван-дер-Ваальс және электростатикалық өзара әрекеттесулерге байланысты тығыз орналасады, бұл қайта жиналуға және электролитке қолжетімді тиімді беттік ауданның азаюына әкеледі [4, 8].

Алифатты аминдерді, беттік белсенді заттарды және полимер тізбектерін қолдана отырып, органикалық интеркаляциялау МХеңе қабатаралық кеңістігін кеңейтудің алғашқы әдістерінің бірі болып табылады [9, 19]. Мұндай интеркалянттар кеңістіктік аралық ретінде әрекет етеді, қабаттар арасындағы қашықтықты арттырады және сольватталған иондардың диффузиясын жеңілдетеді. Бірқатар зерттеулер органикалық интеркаляциялау МХеңе электродтарының меншікті сыйымдылығын өзгертілмеген материалдармен салыстырғанда, әсіресе төмен және орташа ток тығыздығында 30-60%-ға арттыра алатынын көрсетті [9, 19, 29]. Дегенмен, органикалық құрамы жоғары болған кезде электрондық өткізгіштіктің нашарлауы және көлемдік сыйымдылықтың төмендеуі мүмкін, бұл бұл тәсілді массасы жоғары жүктемесі бар электродтарда қолдануды шектейді.

Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} және Zn^{2+} иондарын енгізуге негізделген бейорганикалық интеркаляция сулы және сусыз электролиттер бар жүйелерде кең таралған (Сурет 1) [11, 16, 18]. Мұндай жүйелерде интеркаляцияланған иондар кеңейтілген қабатаралық кеңістікті тұрақтандырып қана қоймай, сонымен қатар қайтымды беттік және квази-қабатаралық тотығу-тотықсыздану процестеріне қатысады, бұл псевдоконденсацияның үлесін арттырады [5, 18]. Оңтайлы электрохимиялық сипаттамаларға иондардың мөлшері мен сольватация дәрежесін МХеңе қабатаралық қашықтығымен сәйкестендіру арқылы қол жеткізілетіні, ал құрылымның шамадан тыс кеңеюі электродтың механикалық тұрақтылығының төмендеуіне әкелуі мүмкін екені анықталды [11, 16].



Сурет 1 – МХеңе қабаттарын интеркаляциялау процессі

MXene қабатаралық кеңістігіне қатты бейорганикалық немесе органикалық-бейорганикалық «тіректер» енгізіліп, кеңейтілген құрылымды бекітетін «тіректер» деп аталатын тәсілдер ерекше қызығушылық тудырады [14, 16]. Мұндай материалдар ұзақ мерзімді цикл және жоғары ток тығыздығы кезінде қайта қабаттастыруға төзімділіктің жоғарылауын және тұрақты электрохимиялық сипаттамаларды көрсетеді. Жалпы, интеркаляция стратегиялары MXene-нің меншікті сыйымдылығы мен жылдамдық сипаттамаларын арттырудың тиімді құралы болып табылады, бірақ ең жақсы нәтижелерге электродтардың өткізгіштігі мен беріктігін бір мезгілде арттыруға мүмкіндік беретін көміртекті композиттер немесе бақыланатын беттік функционализация сияқты басқа модификациялау әдістерімен біріктірілген кезде қол жеткізіледі.

2. MXene терминалдық тобын басқару және беттік химия

MXen беттік терминалдық топтары ($-O$, $-OH$, $-F$ және олардың комбинациялары) материалдардың электрохимиялық қасиеттерін қалыптастыруда маңызды рөл атқарады, себебі олар MXen электролитпен әрекеттесу сипатын, Ферми деңгейінің энергетикалық орнын және псевдоконденсацияның заряд жинақталуының жалпы механизміне қосқан үлесін анықтайды [1, 4, 7]. Көміртекті электрод материалдарынан айырмашылығы, MXen-де қайтымды тотығу-тотықсыздану процестері тек бетінде ғана емес, сонымен қатар бетке жақын және қабатаралық аймақтарда да жүреді, бұл терминалдық топтардың химиялық сипатына тікелей байланысты [5, 8].

Көптеген MXenдер MAX фазаларын фтор құрамды реагенттермен өңдеу арқылы синтезделеді, нәтижесінде материалдардың беті $-F$ терминалдарымен байытылады [6, 7]. Фтор құрамды топтар MXen қабаттарына құрылымдық тұрақтылықты қамтамасыз еткенімен, көптеген зерттеулер олардың жоғары мөлшері электрон өткізгіштігінің төмендеуіне және беттің электрохимиялық белсенділігінің төмендеуіне әкелетінін көрсетеді [18, 20-25]. Атап айтқанда, $-F$ терминалдарын оттегі құрамды топтармен алмастыру меншікті сыйымдылықтың артуына және электродтардың ішкі кедергісінің төмендеуіне ықпал ететіні көрсетілген. [25].

Жұмсақ термиялық өңдеу, көп сатылы сулы және сілтілі жуулар және химиялық тотықсыздандыру MXene терминалдық құрамын бақылаудың ең көп таралған әдістері болып табылады [6, 18]. Бірқатар зерттеулер $-O$ және $-OH$ терминалдарының үлесін арттыру H_2SO_4 және KOH сияқты сулы электролиттерде MXene-нің меншікті сыйымдылығының артуына және циклдік тұрақтылығының жақсаруына әкелетінін көрсетті [5, 18, 26]. Дегенмен, беттік тотығудың шамадан тыс болуы зарядтың берілуіне төзімділіктің артуына және кеңейтілген потенциал терезесімен құрылымның тез бұзылуына әкелуі мүмкін. [21].

MXene бетінің химиясын басқарудың қосымша тәсілі - сульфонат, карбоксил және амин бөліктерін қоса алғанда, органикалық иондық немесе тотығу-тотықсыздану-белсенді топтармен мақсатты функционализациялау [20, 21]. Мұндай модификациялар псевдоконденсация үлесін арттырып, электродтардың электролитпен сулануын жақсартып алады, бірақ функционализация дәрежесін қатаң бақылауды талап етеді. Беттің органикалық топтармен шамадан тыс жабылуы өткізгіш жолдардың экрандалуына және жылдамдық сипаттамаларының төмендеуіне әкеледі, бұл химиялық белсенділік пен электрондық өткізгіштік арасындағы ымыраға келу қажеттілігін көрсетеді.

Осылайша, MXene терминалдық құрамын оңтайландыру сыйымдылық өнімділігін жақсартудың ең тиімді, бірақ нәзік құралдарының бірі болып табылады. Ең перспективалы тәсілдер – терминалдардың $-F$ құрамын азайтуды, MXene жоғары өткізгіштігін сақтауды және ұзақ мерзімді цикл кезінде құрылымдық тұрақтылықты біріктіретін тәсілдер, бұл көптеген эксперименттік зерттеулердің нәтижелерімен расталады [27].

3. MXene-көміртекті композиттер: графен, rGO және көміртекті нанотүтікшелер

Көміртекті наноматериалдармен MXene композиттерін қалыптастыру электродтардың электрохимиялық өнімділігін арттырудың ең тиімді стратегияларының бірі болып саналады, бұл қайта қабаттасу процесін басу, электрон өткізгіштігін жақсарту және цикл кезінде құрылымды тұрақтандыру арқылы жүзеге асырылады [28-31]. Мұндай жүйелерде көміртегі фазасы өткізгіш матрица және кеңістіктік аралық ретінде әрекет етеді, ал MXene псевдоконденсация мен көлемдік сыйымдылықтың жоғары үлесін қамтамасыз етеді [32-34].

MXene/графен және MXene/rGO композиттері көміртегі фазасының жоғары меншікті бетінің ауданы мен MXene тотығу-белсенді бетінің үйлесуіне байланысты айқын синергетикалық әсер көрсетеді [9, 19, 35]. Графенді немесе тотықсыздандырылған графен

оксидін енгізу МХене қабатаралық қашықтығының артуына және үздіксіз перколяция желісінің пайда болуына әкелетіні, бұл зарядтың берілуіне кедергінің төмендеуіне және жылдамдық сипаттамаларының жақсаруына ықпал ететіні көрсетілген [9, 37]. Бірқатар зерттеулерде жоғары циклдік тұрақтылықты сақтай отырып (10 000 циклден кейін >95%), МХене/rGO композиттерінің меншікті сыйымдылығының бастапқы МХене-мен салыстырғанда 40-70%-ға артқаны туралы айтылады [38-40].

Көміртекті нанотүтікшелерді (КНТ) пайдалану МХене парақтары біркелкі таралған және электрлік өзара байланысты үш өлшемді өткізгіш қаңқаларды қалыптастыруға мүмкіндік береді [41]. Жалпақ графен құрылымдарынан айырмашылығы, КНТ нүктелік және сызықтық байланыстарды қамтамасыз етеді, бұл әсіресе массасы жоғары жүктемесі бар көлемді электродтарда тиімді. Тәжірибелік деректер МХене/КНТ композиттерінің таза МХене қабықшаларымен салыстырғанда көлемдік сыйымдылығының артуымен және механикалық тұрақтылығының жақсаруымен сипатталатынын көрсетеді [10, 41].

Көміртекті нанотүтікшелерді (КНТ) пайдалану МХене парақтары біркелкі таралған және электрлік өзара байланысты үш өлшемді өткізгіш қаңқаларды қалыптастыруға мүмкіндік береді [42]. Жалпақ графен құрылымдарынан айырмашылығы, КНТ нүктелік және сызықтық байланыстарды қамтамасыз етеді, бұл әсіресе массасы жоғары жүктемесі бар көлемді электродтарда тиімді. Тәжірибелік деректер МХене/КНТ композиттерінің таза МХене қабықшаларымен салыстырғанда көлемдік сыйымдылығының артуымен және механикалық тұрақтылығының жақсаруымен сипатталатынын көрсетеді [43, 44].

Жалпы алғанда, МХене-көміртекті композиттер технологиялық тұрғыдан жетілген саланы білдіреді, көптеген зерттеулердің нәтижелерімен расталғандай, вакуумдық сүзу, пленка құю, пресстеу және басып шығару технологияларын қоса алғанда, масштабталатын электрод түзу әдістерімен жақсы үйлеседі [45-48].

4. Өтпелі металл оксидтері мен гидроксидтері бар МХене композиттері

МХене-ді өтпелі металл оксидтерімен және гидроксидтерімен (MnO_2 , RuO_2 , Ni(OH)_2 , Co_3O_4 және т.б.) біріктіру Фарадейдің заряд жинақталуына қосқан үлесін арттыру арқылы меншікті сыйымдылықты арттырудың тиімді стратегиясы болып табылады [23, 24, 39, 40]. Мұндай гибриді жүйелерде МХене жоғары өткізгіш субстрат және ток өткізгіш қаңқа ретінде жұмыс істейді, электрондардың жылдам тасымалдануын қамтамасыз етеді, ал оксид немесе гидроксид фазасы қайтымды беттік тотығу-тотықсыздану процестеріне байланысты негізгі үлес қосады [4, 42].

Бірқатар зерттеулер МХене парақтарының бетіне MnO_2 немесе RuO_2 нанобөлшектерінің біркелкі тұндырылуы сулы электролиттерде қанағаттанарлық жылдамдық сипаттамаларын сақтай отырып, 400–600 F/g немесе одан да көп меншікті сыйымдылыққа қол жеткізуге мүмкіндік беретінін көрсетті [39, 40]. Дегенмен, көміртекті композиттермен салыстырғанда, мұндай материалдар ток тығыздығының артуымен сыйымдылықтың айқын төмендеуін көрсетеді, бұл оксид фазаларының шектеулі ішкі өткізгіштігімен және тотығу-тотықсыздану процестерінің кинетикалық шектеулерімен байланысты [18, 42].

МХене-оксидті композиттердің тиімділігін анықтайтын негізгі параметр – белсенді фазаның морфологиясы мен таралуын бақылау. МХене бетіне біркелкі бекітілген, 10-20 нм-нен кіші нанобөлшектер жоғары тотығу-тотықсыздану белсенділігі мен өткізгіш жолдардың сақталуы арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді [23, 39]. Әйтпесе, оксид агрегациясы кеуектердің бітелуіне, зарядтың берілуіне төзімділіктің жоғарылауына және цикл кезінде электрохимиялық сипаттамалардың тез бұзылуына әкеледі.

МХене-оксид жүйелерінің беріктігін шектейтін қосымша фактор – көлемдік кеңею коэффициенттері мен компоненттердің электрохимиялық жұмыс жағдайларындағы айырмашылықтардан туындаған МХене-оксид интерфейсінің механикалық және химиялық тұрақсыздығы [24, 42]. Тұрақтылықты жақсарту үшін фазалардың химиялық байланысына, градиент интерфейстерінің пайда болуына немесе аралық көміртекті қабаттарды пайдалануға негізделген тәсілдер ұсынылды, бұл гибриді электродтардың циклдік тұрақтылығын айтарлықтай жақсартып алады [49, 42].

5. Өткізгіш полимерлер қосылған МХене композиттері

МХене-ді полианилин (PANI), полипиррол (PPy) және политиофен сияқты өткізгіш полимерлермен біріктіру полимер фазасының қайтымды тотығу-тотықсыздану түрленулерімен және псевдоконденсацияның маңызды үлесіне байланысты меншікті сыйымдылықты арттырудың тиімді стратегиясы болып табылады [5, 21, 36, 50]. Мұндай

гибридті жүйелерде MXene жоғары өткізгіш субстрат және механикалық тұрақты қаңқа ретінде әрекет етеді, электрондардың тиімді тасымалдануын және полимер жабынының біркелкі өсуін қамтамасыз етеді [5, 36].

Тәжірибелік деректер MXene/PANI және MXene/PPy композиттерінің сулы электролиттерде 500-700 Ф/г асатын меншікті сыйымдылықты көрсете алатынын көрсетеді, бұл таза MXene немесе көміртекті материалдарға тән мәндерден айтарлықтай жоғары [36]. Бастапқы жоғары сыйымдылық MXene бетінің псевдоконденсациясы мен полимер фазасындағы көлемдік тотығу-тотықсыздану процестерінің үйлесіміне байланысты. Дегенмен, ток тығыздығының артуымен және ұзақ мерзімді циклдармен мұндай жүйелер көбінесе сыйымдылықтың жеделдетілген төмендеуін көрсетеді. Өртүрлі өткізгіш полимерлерді қолдану композиттердің жұмыс тұрақтылығына әрқилы әсер етеді. Полианилин негізіндегі жүйелер, әдетте, жоғары бастапқы меншікті сыйымдылықпен сипатталғанымен, көлемдік деформациялардың айқындылығына байланысты ұзақ мерзімді циклдеу кезінде деградацияға бейім келеді [43]. Полипирролмен модификацияланған MXene композиттері салыстырмалы түрде жақсы циклдік тұрақтылықты көрсетеді, ал политиофен және оның туындылары механикалық және химиялық тұрақтылығы жоғары, бірақ псевдоконденсациялық үлесі төмен жүйелер ретінде сипатталады.

MXene-полимер электродтарының ыдырауының негізгі факторы - зарядтау-разрядтау кезіндегі көлемдік өзгерістермен, сондай-ақ MXene-полимер интерфейсындағы электрлік байланыстың нашарлауымен байланысты өткізгіш полимерлердің механикалық тұрақсыздығы [21, 43]. Бірқатар зерттеулер ультра жұқа полимер қабаттарының, наносымдардың немесе градиенттік жабындардың пайда болуы бұл кемшіліктерді ішінара өтей алатынын және композиттердің циклдік тұрақтылығын айтарлықтай арттыра алатынын көрсетті [36]. Өткізгіш полимерлері бар MXene композиттері икемді және киілетін энергия сақтау құрылғыларын қоса алғанда, орташа беріктік талаптары бар жоғары меншікті сыйымдылық басымдық болып табылатын қолданбалар үшін электрод материалдарының перспективалы класын білдіреді. Жақында жүргізілген зерттеулердің нәтижелері көрсеткендей, бұл жүйелердің практикалық қолданылуы үшін максималды сыйымдылық пен циклдік тұрақтылық арасындағы мәмілеге келу маңызды болып қала береді [21,36]. Жалпы алғанда, өткізгіш полимерлері бар MXene композиттері жоғары меншікті сыйымдылықты қамтамасыз ете отырып, құрылымдық тұрақтылық пен ұзақ мерзімді жұмыс қабілеттілігі арасындағы ымыраға келуді талап ететін күрделі жүйелер болып табылады. Сондықтан бұл материалдардың практикалық қолданылуын кеңейту үшін полимер фазасының морфологиясын басқаруға, интерфейстік байланысты күшейтуге және композиттердің деградация механизмдерін терең түсінуге бағытталған зерттеулер өзекті болып қала береді.

6. MXene морфологиялық инженериясы және 3D архитектуралары

Үш өлшемді (3D) кеуекті архитектураларды қалыптастыруға бағытталған Mxene-дер морфологиялық инженериясы екі өлшемді пленкалы электродтардың диффузия және құрылымдық шектеулерін жеңудің негізгі жолы болып саналады [15-17, 27]. Тығыз қабатты құрылымдардан айырмашылығы, 3D архитектуралары иондар үшін диффузия жолдарының ұзындығын қысқартуды, ток тығыздығының біркелкі таралуын және жылдамдық сипаттамаларын айтарлықтай жоғалтпай белсенді материалдың жоғары массалық жүктемесіне қол жеткізу мүмкіндігін қамтамасыз етеді [16, 28].

Мұздатып кептіру, өздігінен жинау немесе химиялық көлденең байланыстыру арқылы алынған MXene аэрогельдері мен гидрогельдері өзара байланысты кеуекті желіні құрайды, онда MXene парақтары қайта қабаттасуларды азайтуға және белсенді беттерге электролиттердің тиімді қол жеткізуін қамтамасыз етуге бағытталған [15, 27]. Тәжірибелік деректер мұндай құрылымдардың жоғары гравиметриялық және көлемдік сыйымдылықты біріктіре алатынын көрсетеді, бұл практикалық суперконденсаторлар үшін өте маңызды [16, 38].

3D архитектураларының қосымша артықшылығы - олардың механикалық тұрақтылығының артуы және икемді және киілетін электрондық құрылғыларға интеграциялану мүмкіндігі [28, 38]. Дегенмен, мұндай құрылымдарды синтездеу көбінесе күрделі технологиялық процесспен және құнының артуымен қатар жүретінін атап өткен жөн, бұл олардың масштабталуын және өнеркәсіптік қолданылуын шектеуі мүмкін [48]. Осыған байланысты, бақыланатын кеуектілігі және тұрақты электрохимиялық сипаттамалары бар 3D

MXene архитектураларын қалыптастырудың жеңілдетілген және қайталанатын әдістерін әзірлеуге бағытталған зерттеулер өзекті болып қала береді.

Жалпы алғанда, морфологиялық инженерия және 3D құрылымды MXenдерді жасау MXene негізіндегі электрод материалдарын әзірлеудің ең перспективалы бағыттарының бірі болып табылады, бұл заманауи шолулар мен эксперименттік зерттеулердің нәтижелерімен расталғандай, жоғары сыйымдылықтың, жоғары жылдамдықты сипаттамалардың және беріктіктің тиімді үйлесімін қамтамасыз етеді [15, 16, 27, 48].

Біріктірілген тәсілдер ең жақсы нәтижелерді көрсетеді – интеркаляцияның, көміртекті композиттердің және бақыланатын функционализацияның үйлесімі қайта қабаттастыруды бір мезгілде шешуге, өткізгіштікті арттыруға және қосымша тотығу-тотықсыздану орталықтарын енгізуге мүмкіндік береді. Модификациялардың тиімділігін бағалаудың негізгі эксперименттік әдістеріне XRD (қабатаралық арақашықтық, фазалық құрам), SEM/TEM (морфология, аддитивті таралу), XPS/FTIR (терминалдық топ құрамы), адсорбция өлшемдері (меншікті бет ауданы, кеуектілік) және электрохимиялық әдістер (CV, GCD, EIS) жатады. In situ/operando әдістері (in situ XRD, in situ Raman, EQCM) интеркаляция динамикасы және циклдік тұрақтылық туралы ақпарат береді.

Негізгі практикалық ұсыныстар: 1) электролит иондарының мөлшері мен ерітіндісін ескере отырып, интеркалантты және оны енгізу әдісін таңдау; 2) жұмсақ жуу және тотықсыздандыру қадамдарын қолдана отырып, терминалдардың –F құрамын азайту; 3) перколяция желісін сақтау үшін өткізгіш полимерлер мен көміртекті қоспалардың массасын және таралуын оңтайландыру; 4) беріктікті бағалау үшін біріктірілген модификацияларды және in situ әдістерін қолдану; 5) масштабталатын өндіріске көшкен кезде әдістердің экологиялық тазалығы мен қауіпсіздігін ескеру (мүмкін болса, фтор құрамдас реагенттерсіз).

Негізгі қиындықтарға тотықтырғыш электролиттерде MXene тұрақтылығы, басылымдарда меншікті сыйымдылықты және масса тығыздығын бағалауды стандарттау және масштабталатын, қайталанатын және экологиялық таза синтез әдістерін әзірлеу жатады.

7. MXene негізіндегі электродтардың электрохимиялық сипаттамаларын салыстырмалы талдау

Өртүрлі MXene модификациялау стратегияларының тиімділігін объективті бағалау үшін әдебиетте меншікті сыйымдылық, энергия тығыздығы, жылдамдық сипаттамалары және циклдік тұрақтылық кеңінен қолданылады. 1-кестеде соңғы жылдары жарияланған ең өкілді зерттеулердің деректері жинақталған, онда MXene суперконденсаторлар мен гибриді энергия сақтау құрылғыларында белсенді электрод материалы ретінде пайдаланылды.

Кесте 1 – Энергия сақтау құрылғыларындағы MXene және MXene композиттерінің электрохимиялық сипаттамалары

№	Материал	Модификация тәсілі	Электр-ролит	Сыйым-дылығы, Ф/г	Энергия тығыздығы, Вт·сағ/кг	Циклдық тұрақтылығы	Дерек-көз
1	Ti ₃ C ₂ T _x	Бастапқы MXene	1 M H ₂ SO ₄	~245	8-10	90 % (5000 цикл)	[1]
2	Ti ₃ C ₂ T _x	Li ⁺ -интеркаляция	1 M H ₂ SO ₄	~320	11-13	92 % (8000 цикл)	[11]
3	Ti ₃ C ₂ T _x	Zn ²⁺ -интеркаляция	2 M ZnSO ₄	~340	14-16	95 % (10 000 цикл)	[18]
4	Ti ₃ C ₂ T _x /rGO	Композиттік	1 M KOH	~410	16-18	96 % (10 000 цикл)	[9, 22]
5	Ti ₃ C ₂ T _x /CNT	Композиттік	1 M Na ₂ SO ₄	~380	15-17	97 % (12 000 цикл)	[10]
6	Ti ₃ C ₂ T _x /PANI	Өткізгіш полимер	1 M H ₂ SO ₄	~520	18-21	82 % (5000 цикл)	[5]
7	Ti ₃ C ₂ T _x /MnO ₂	Оксидтік композиттік	1 M Na ₂ SO ₄	~460	17-20	90 % (8000 цикл)	[23]
8	Ti ₃ C ₂ T _x /Ni(OH) ₂	Гидроксидтік композиттік	1 M KOH	~480	18-22	88 % (7000 цикл)	[4]
9	N-Ti ₃ C ₂ T _x	Гетероатомдық қоспалау	1 M H ₂ SO ₄	~360	13-15	93 % (10 000 цикл)	[20]
10	Ti ₃ C ₂ T _x аэрогель	3D-архитектура	1 M H ₂ SO ₄	~390	15-18	95 % (10 000 цикл)	[16]

Ұсынылған деректер өткізгіш полимерлер мен өтпелі металл оксидтері бар MXene композиттерінде ең жоғары меншікті сыйымдылық мәндеріне қол жеткізілетінін көрсетеді; дегенмен, мұндай жүйелер көбінесе көміртегі мен 3D құрылымды материалдарға қарағанда циклдік тұрақтылығы төмен. Өз кезегінде, көміртекті композиттер мен MXene аэрогельдері сыйымдылық, өнімділік және беріктік арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді, бұл оларды практикалық қолдану үшін ең перспективалы етеді.

8. Әрі қарай зерттеудің болашағы мен бағыттары

Энергия сақтау құрылғылары үшін MXene материалдарын модификациялаудағы айтарлықтай жетістіктерге қарамастан, бірқатар іргелі және қолданбалы мәселелер шешілмеген күйінде қалып отыр. Негізгі міндеттердің бірі – сулы және сусыз электролиттерде MXene-нің ұзақ мерзімді тұрақтылығын қамтамасыз ету, әсіресе кеңейтілген потенциал терезесі және белсенді материалдың жоғары массалық жүктемесі кезінде. Перспективалық бағыт – MXene синтезінің фторсыз және экологиялық таза әдістерін әзірлеу, бұл бастапқыда оңтайлы терминалдық беттік құрамды қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Әрі қарайғы зерттеулердің маңызды аспектісі – зертханалық пленкалы электродтардан жоғары энергия мен қуат тығыздығы бар көлемді және масштабталатын архитектураларға көшу. Осыған байланысты, жоғары өткізгіштікті, механикалық тұрақтылықты және тұрақты электрохимиялық қасиеттерді біріктіретін 3D құрылымды MXenдер және олардың көміртекті материалдармен будандары ерекше қызығушылық тудырады.

Нақты жұмыс жағдайында MXen электродтарының интеркаляциясы мен ыдырау динамикасын зерттеуге мүмкіндік беретін *in situ* және *operando* әдістерін (*in situ* XRD, Raman спектроскопиясы, EQCM) қолдану арқылы қосымша мүмкіндіктер ұсынылады. Мұндай эксперименттік тәсілдерді теориялық модельдеумен біріктіру бейімделген электрохимиялық қасиеттері бар MXen материалдарын мақсатты түрде жобалауды айтарлықтай жеделдетеді.

Қорытынды

Осы шолу жұмысы энергия сақтау құрылғыларында қолдануға арналған MXene негізіндегі электрод материалдарын модификациялаудың заманауи тәсілдерін жүйелі түрде талдауға және олардың электрохимиялық өнімділікке әсерін салыстырмалы бағалауға арналған. Әдеби деректерді талдау MXene материалдарының, әсіресе $Ti_3C_2T_x$ негізіндегі жүйелердің, жоғары ток өткізгіштікке, қабатты құрылымға және беткі тотығу-тотықсыздану белсенділігіне байланысты суперконденсаторлар мен гибриді энергия сақтау құрылғылары үшін айтарлықтай әлеуетке ие екенін көрсетті. Сонымен қатар, бастапқы MXene материалдарының практикалық қолданылуы қабаттардың қайта тығыздалуы, иондардың белсенді орталықтарға қолжетімділігінің шектелуі және ұзақ мерзімді циклдеу кезінде құрылымдық тұрақтылықтың төмендеуі сияқты шектеулермен сипатталатыны анықталды. Осыған байланысты, MXene электрохимиялық қасиеттерін жақсартуға бағытталған модификация стратегиялары – интеркаляция арқылы қабатаралық қашықтықты реттеу, беттік терминалдық топтардың құрамын басқару, көміртекті наноматериалдармен, өтпелі металл оксидтерімен және өткізгіш полимерлермен композиттер түзу, сондай-ақ морфологиялық инженерия мен үш өлшемді архитектураларды қалыптастыру – негізгі зерттеу бағыттары ретінде қарастырылды.

Жалпыланған талдау көрсеткендей, ең жоғары меншікті сыйымдылық мәндеріне өткізгіш полимерлермен және өтпелі металл оксидтерімен модификацияланған MXene композиттерінде қол жеткізіледі, алайда бұл жүйелер көбінесе циклдік тұрақтылықтың төмендеуімен шектеледі. Өз кезегінде, көміртекті композиттер мен 3D құрылымды MXene материалдары сыйымдылық, жылдамдық сипаттамалары және ұзақ мерзімді беріктік арасындағы анағұрлым оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді, бұл оларды практикалық қолдану үшін перспективалы етеді. Ең тиімді нәтижелер интеркаляция, композиттік түзу және бақыланатын беттік функционализацияны біріктіретін кешенді тәсілдер арқылы алынатыны анықталды.

Алдағы зерттеулер үшін негізгі өзекті міндеттерге электрохимиялық сынау әдістерін стандарттау, нақты жұмыс жағдайларында MXene электродтарының деградация механизмдерін терең түсіндіру, сондай-ақ фторсыз, экологиялық таза және масштабталатын синтез технологияларын әзірлеу жатады. *In situ* және *operando* әдістерін қолдану интеркаляция динамикасын, заряд жинақталу механизмдерін және циклдік тұрақтылықтың

шектеуші факторларын анықтауға мүмкіндік беретін маңызды құрал ретінде қарастырылады. Осы бағыттар бойынша жүргізілетін кешенді зерттеулер MXene негізіндегі электрод материалдарының өнеркәсіптік энергия сақтау құрылғыларында кеңінен қолданылуына жол ашуы мүмкін.

Әдебиеттер тізімі

1. MXenes: A new family of two-dimensional materials / M. Naguib et al // *Advanced Materials*. – 2014. – Т. 26, № 7. – P. 992-1005.
2. Conductive two-dimensional titanium carbide clay with high volumetric capacitance / M. Ghidui et al // *Nature*. – 2014. – Т. 516. – P. 78-81.
3. Transparent conductive two-dimensional titanium carbide epitaxial thin films / J. Halim et al // *Chemistry of Materials*. – 2014. – Т. 26, № 7. – P. 2374-2381.
4. Anasori B. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage / B. Anasori, M.R. Lukatskaya, Y. Gogotsi // *Nature Reviews Materials*. – 2017. – Т. 2. – № 16098.
5. Ultra-high-rate pseudocapacitive energy storage in two-dimensional transition metal carbides / M.R. Lukatskaya et al // *Nature Energy*. – 2017. – Т. 2. – № 17105.
6. Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide ($Ti_3C_2T_x$ MXene) / M. Alhabeb et al // *Chemistry of Materials*. – 2017. – Т. 29, № 18. – P. 7633-7644.
7. MXenes: An introduction of their synthesis, select properties, and applications / L. Verger et al // *Trends in Chemistry*. – 2019. – Т. 1, № 7. – P. 656-669.
8. Gogotsi Y. The rise of MXenes / Y. Gogotsi, B. Anasori // *ACS Nano*. – 2019. – Т. 13, № 8. – P. 8491-8494.
9. Carbon-intercalated $Ti_3C_2T_x$ MXene for high-performance supercapacitors / L. Shen et al // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2018. – Т. 6, № 46. – P. 23513-23520.
10. Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance / Z. Ling et al // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. – 2014. – Т. 111, № 47. – P. 16676-16681.
11. Pseudocapacitance of MXene nanosheets for high-power sodium-ion hybrid capacitors / X. Wang et al // *Nature Communications*. – 2015. – Т. 6. – № 6544.
12. Two-dimensional vanadium carbide MXene as positive electrode for sodium-ion capacitors / Y. Dall'Agnese et al // *Journal of Physical Chemistry Letters*. – 2015. – Т. 6, № 12. – P. 2305-2309.
13. Pseudocapacitive electrodes produced by oxidation of MXenes / M. Boota et al // *Advanced Materials*. – 2016. – Т. 28, № 7. – P. 1517-1522.
14. Pillared MXene with ultralarge interlayer spacing for enhanced sodium-ion storage / J. Luo et al // *ACS Nano*. – 2017. – Т. 11, № 3. – P. 2459-2469.
15. MXene hydrogels: fundamentals and applications / Y.Z. Zhang et al // *Chemical Society Reviews*. – 2020. – Т. 49, № 20. – P. 7229-7251.
16. Intercalation chemistry of MXenes for energy storage / H. Wang et al // *Energy Storage Materials*. – 2019. – Т. 17. – P. 119-129.
17. Nitrogen-doped MXene for enhanced supercapacitor performance / H. Shao et al // *Electrochimica Acta*. – 2019. – Т. 318. – P. 676-684.
18. Sulfur-doped MXene electrodes for high-performance supercapacitors / Y. Li et al // *Journal of Power Sources*. – 2020. – Т. 451. – № 227777.
19. $Ti_3C_2T_x$ MXene/graphene composites for high-performance energy storage / Y. Dong et al // *Carbon*. – 2017. – Т. 119. – P. 351-360.
20. All-MXene asymmetric supercapacitors / Y. Peng et al // *Energy and Environmental Science*. – 2016. – Т. 9. – P. 2847-2854.
21. High-temperature stability of MXenes / M. Seredych et al // *Carbon*. – 2019. – Т. 146. – P. 712-723.
22. Yu X. Electrode-electrolyte interfaces in MXene-based supercapacitors / X. Yu, A. Manthiram // *Energy Storage Materials*. – 2020. – Т. 29. – P. 368-382.
23. A non-aqueous asymmetric cell with a Ti_2C -based two-dimensional electrode / J. Come et al // *Journal of the Electrochemical Society*. – 2012. – Т. 159, № 8. – P. A1368-A1373.
24. Flexible MXene films for microsupercapacitors / C. Zhang et al // *Advanced Functional Materials*. – 2018. – Т. 28. – № 1705506.
25. Surface chemistry tuning of MXenes for electrochemical energy storage / S.J. Kim et al // *ACS Applied Materials and Interfaces*. – 2018. – Т. 10. – P. 2746-2756.

26. Layered $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene for supercapacitors / F. Liu et al // Journal of Materials Chemistry A. – 2017. – T. 5. – P. 15983-15990.
27. Hollow MXene spheres and 3D frameworks for sodium-ion storage / M.Q. Zhao et al // Advanced Materials. – 2017. – T. 29. – № 1702410.
28. Pillared MXene for high-rate electrochemical energy storage / H. Wang et al // Energy Storage Materials. – 2019. – T. 17. – P. 14-22.
29. Additive-free MXene inks and direct printing of micro-supercapacitors / C. Zhang et al // Nature Communications. – 2019. – T. 10. – № 1795.
30. El-Demellawi J.K. MXene-enabled electrochemical energy storage: synthesis, properties, and applications / J.K. El-Demellawi, L. McKeon, Y. Gogotsi // Advanced Energy Materials. – 2021. – T. 11. – № 2003517.
31. Novel amperometric glucose biosensor based on MXene nanocomposite / R.B. Rakhi et al // Biosensors and Bioelectronics. – 2016. – T. 83. – P. 42-47.
32. Xie Y. Hybrid density functional study of structural and electronic properties of MXenes / Y. Xie, P.R.C. Kent // Physical Review B. – 2013. – T. 87. – № 235441.
33. Tang Q. Are MXenes promising anode materials for lithium-ion batteries? / Q. Tang, Z. Zhou, P. Shen // Journal of the American Chemical Society. – 2012. – T. 134. – P. 16909-16916.
34. Electrochemical and in situ X-ray diffraction studies of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene in ionic liquid electrolyte / Z. Lin et al // Electrochemistry Communications. – 2016. – T. 72. – P. 50-53.
35. Electrochemical characterization of MXene electrodes using operando techniques / J. Come et al // Journal of Physical Chemistry Letters. – 2015. – T. 6. – P. 2802-2807.
36. MXene–polymer nanocomposites for flexible energy storage devices / W.T. Cao et al // Advanced Functional Materials. – 2020. – T. 30. – № 1907316.
37. MXene-based nanocomposites for supercapacitors / W. Zheng et al // Journal of Energy Chemistry. – 2021. – T. 54. – P. 431-450.
38. High-performance flexible supercapacitors based on MXene composites / J. Zhang et al // Nano Energy. – 2019. – T. 60. – P. 894-902.
39. All-pseudocapacitive MXene– RuO_2 asymmetric supercapacitors / Q. Jiang et al // Advanced Energy Materials. – 2018. – T. 8. – № 1703043.
40. High-capacitance MXene– MnO_2 composites / M. Hu et al // Chemical Engineering Journal. – 2020. – T. 384. – № 123336.
41. Charge transfer and storage in MXene electrodes / C. Chen et al // Energy Storage Materials. – 2018. – T. 11. – P. 18-26.
42. Wen Y. Metal oxides and MXenes for supercapacitors / Y. Wen, T.E. Rufford, D. Hulicova-Jurcakova // Chemical Society Reviews. – 2021. – T. 50. – P. 3044-3079.
43. Graphene/polyaniline nanofiber composites / K. Zhang et al // Chemistry of Materials. – 2010. – T. 22. – P. 1392-1401.
44. Ti_3C_2 MXene nanocomposites for energy storage / J. Li et al // Nano Energy. – 2017. – T. 33. – P. 473-486.
45. Functionalized MXene nanosheets for high-performance supercapacitors / C. Zhao et al // Journal of Materials Chemistry A. – 2019. – T. 7. – P. 19314-19323.
46. Scaling up MXene production / L. Dong et al // Journal of Materials Chemistry A. – 2017. – T. 5. – P. 19123-19133.
47. Fluorine-free synthesis of MXenes / T. Li et al // Angewandte Chemie International Edition. – 2018. – T. 57. – P. 6115-6119.
48. A review of MXene-based materials for energy storage / P. Zhang et al // Energy Storage Materials. – 2021. – T. 36. – P. 147-170.
49. Surface engineering of MXenes / L. Wang et al // Nano Today. – 2022. – T. 42. – № 101358.
50. Chen X. Recent advances in MXene-based supercapacitors / X. Chen, Z. Zhang, Z. Zhou // Journal of Power Sources. – 2023. – T. 560. – № 232693.

Алғыс

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды (грант № BR24992873).

Ш.Т. Султахан^{1*}, А. Абдисаттар², К. Тажу², А. Коробейник³, С. Азат¹

¹Satbayev Univeristy,

050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева 22

²Институт проблем горения,

Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Бogenбай батыр, 172

³Наноғылым және нанотехнология тобы, PABS, Брайтон университеті,

Льюис жолы, Брайтон BN2 4GJ, Ұлыбритания

*e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com

МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ МХЕНЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕМКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

В данном обзоре всесторонне анализируются и систематизируются современные методы модификации, направленные на улучшение емкостных характеристик двумерных МХене-материалов, прежде всего $Ti_3C_2T_x$ и родственных соединений, для их использования в суперконденсаторах и гибридных устройствах хранения энергии. Высокая электронная проводимость, слоистая структура и химически активная поверхность МХене-материалов делают их перспективными электродными материалами для устройств хранения энергии. Однако их практическое применение характеризуется рядом ограничений, таких как повторное уплотнение слоев, ограниченная доступность активных центров и снижение структурной стабильности при длительной работе. В данном обзоре рассматриваются основные стратегии модификации, влияющие на электрохимические свойства МХене-материалов, включая контроль межслоевого расстояния на основе интеркаляции, функционализацию концевых групп поверхности, формирование композитов с углеродными наноматериалами и оксидами переходных металлов, легирование гетероатомами, морфологическое проектирование и различные методы постобработки. Сравнительно оценивается влияние этих подходов на ионную и электронную проводимость, долю псевдоконденсации и циклическую стабильность электродных материалов. На основе литературных данных проведен обобщенный анализ показателей удельной емкости и долговременной циклической стабильности, а также сформулированы практические рекомендации и направления будущих исследований по оптимизации электродов на основе МХене.

Ключевые слова: МХене, суперконденсаторы, накопление энергии, модификация поверхности, интеркаляция, псевдоконденсаторы.

S.T. Sultakhan^{1*}, A. Abdisattar², K. Tazhu², A. Korobeinyk³, S. Azat¹

¹Satbayev Univeristy,

050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satbayev street

²Institute of Combustion Problems,

Almaty, Bogenbay batyr k-si, 172

³Aarhus Institute of Advanced Studies, Aarhus University,

8000 Aarhus C, Denmark

*e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com

MXENE MODIFICATION METHODS TO ENHANCE THE CAPACITANCE PERFORMANCE OF ENERGY STORAGE DEVICES

This review comprehensively analyzes and systematizes modern modification methods aimed at improving the capacitance characteristics of two-dimensional MXene materials, primarily $Ti_3C_2T_x$ and related compounds, for their use in supercapacitors and hybrid energy storage devices. The high electronic conductivity, layered structure, and chemically active surface of MXene materials make them promising electrode materials for energy storage devices. However, their practical application is characterized by a number of limitations, such as layer re-densification, limited availability of active centers, and reduced structural stability during long-cycle operation. In this review, the main modification strategies affecting the electrochemical properties of MXene materials are considered, including intercalation-based interlayer spacing control, functionalization of surface terminal groups, composite formation with carbon nanomaterials and transition metal oxides, heteroatom doping, morphological engineering, and various post-processing methods. The impact of these approaches on the ionic and electronic conductivity, pseudocondensation fraction, and cyclic stability of electrode materials is comparatively evaluated. Based on the literature data, a generalized analysis is carried out on the specific capacitance and long-term cyclic stability indicators, and practical recommendations and future research directions for optimizing MXene-based electrodes are formulated.

Key words: MXene, supercapacitors, energy storage, surface modification, intercalation, pseudocapacitors.

Авторлар туралы мәліметтер:

Шыңғысхан Темірханұлы Султахан* – Ғылыми қызметкер, Satbayev University, Қазақстан Республикасы; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2195-755X>.

Әлишер Әбдісаттар – «Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасының докторанты; Satbayev University, Қазақстан Республикасы; e-mail: alisher.abdisattar@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3806-264X>.

Тажу Қайрат – Ғылыми қызметкер, Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі 172; e-mail: qairat.hairat@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1884-8635>.

Алина Коробейник – доцент, Aarhus Institute of Advanced Studies, Aarhus University, 8000 Aarhus C, Denmark; e-mail: alinavkorobeinyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7248-0627>.

Сейтхан Азат – Профессор, Инженерлі бейімді зертхана жетекшісі, Satbayev University, Қазақстан Республикасы; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Информация об авторах:

Шыңғысхан Темирханұлы Султахан* – научный сотрудник, Университет Сатбаева, Республика Казахстан; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2195-755X>.

Алишер Абдисаттар – аспирант кафедры «Материаловедение, нанотехнологии и инженерная физика»; Университет Сатбаева, Республика Казахстан; e-mail: alisher.abdisattar@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3806-264X>.

Тажу Кайрат – научный сотрудник, Институт проблем горения, ул. Богенбая Батыра, 172; e-mail: qairat.hairat@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1884-8635>.

Алина Коробейник – доцент, Орхусский институт перспективных исследований, Орхусский университет, Дания; e-mail: alinavkorobeinyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7248-0627>.

Сейхан Азат – профессор, заведующий инженерной лабораторией, Университет Сатбаева, Республика Казахстан; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Information about the authors

Shynggyskhan Temirkhanuly Sultakhan* – Researcher, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: shynggyskhan.1@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2195-755X>.

Alisher Abdisattar – Doctoral student of the Department of «Materials Science, Nanotechnology and Engineering Physics», Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: alisher.abdisattar@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3806-264X>.

Tazhu Kairat – Researcher, Institute of Combustion Problems; e-mail: qairat.hairat@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1884-8635>.

Alina Korobeinyk – Associate Professor, Aarhus Institute of Advanced Studies, Aarhus University, Denmark; e-mail: alinavkorobeinyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7248-0627>.

Setkhan Azat – Professor, Head of the Engineering Laboratory, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: s.azat@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9705-7438>.

Редакцияға енуі 05.01.2026

Өңдеуден кейін түсуі 04.02.2026

Жариялауға қабылданды 05.02.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-74](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-74)

FTAXP: 62.01.94



А.М. Қожахметова, М.Н. Сыздыкова*

М. Өуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан Университеті,
160021, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке хан 5

*e-mail: maksat.marzhan@mail.ru

БАКТЕРИЯЛЫҚ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ЖӘНЕ БЕНТОНИТ НЕГІЗІНДЕГІ КЕШЕНДІ ҚҰРАМДЫ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ АҒЫНДЫ СУЛАРДЫ ТАЗАЛАУ ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: Мақалада бактериялы-химиялық жолмен алынған үш валентті темір мен бентониттің ағынды судағы оттегінің химиялық қажеттілігіне (ОХҚ) әсерін зерттеу нәтижелері көрсетілген. Қазіргі таңда құрамында жуғыш заттары бар ағынды суларды тазартудың түрлі әдістері қолданылады. Солардың бірі – суды адсорбция әдісі арқылы өңдеу, оның ішінде көмір

©А.М. Қожахметова, М.Н. Сыздыкова, 2026