

6D072300 - «Техникалық физика» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін диссертациялық зерттеу

АНДАТПА

Елеуов Мухтар Аuezович

Кеуекті көміртекті материалдар мен өтпелі металл оксидтерін электрохимиялық энергияны сақтау үшін синтездеу және зерттеу

Жұмыстың жалпы сипаттамасы. Диссертациялық зерттеу графенге ұқсас кеуекті көміртекке және өтпелі металдардың нанокұрылымды оксидтеріне негізделген электродтық материалдарды әзірлеу мен зерттеуге, сондай-ақ суперконденсаторлар мен гибриді энергия жинақтау құрылғыларының меншікті сыйымдылығын, энергия тиімділігі және қуаттық сипаттамаларын арттыруға бағытталған.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі. Электр энергиясын жинақтау жүйелері бойынша жаһандық индустрия жоғары өнімді әрі экологиялық тұрғыдан тұрақты материалдарға деген сұраныстың артуына байланысты елеулі қиындықтарға тап болуда. Қайта жаңғыртылатын энергия көздеріне жедел көшу, электр көліктері мен портативті электрониканың кеңінен таралуы энергияны сақтау бойынша жаңа әрі тиімді технологияларды әзірлеуді қажет етеді.

Өртүрлі электрохимиялық энергия жинақтау құрылғыларының ішінде суперконденсаторлар жоғары қуат тығыздығы мен ұзақ қызмет ету мерзімі арқасында ерекше назар аударады. Алайда бұл артықшылықтарына қарамастан, суперконденсаторлар әлі де салыстырмалы түрде төмен энергия тығыздығы мен өндіріс құнының жоғарылығымен шектелуде. Бұл шектеудің басты себебі – қажетті электрохимиялық сипаттамаларды қамтамасыз ететін белсенді электродтық материалдарды алудың технологиялық үдерістері жеткілікті деңгейде жетілдірілмегендігі.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі электрохимиялық жолмен энергияны жинақтауға арналған жаңа, тұрақты және экологиялық қауіпсіз материалдарды, әсіресе биоқалдықтарды қайта өңдеу арқылы алынатын жоғары меншікті беткі аумағы бар графенге ұқсас кеуекті көміртекті материалдарды әзірлеу қажеттілігімен айқындалады. Сонымен қатар, нанокұрылымды өтпелі метал оксидтеріне негізделген, графен қабаттарына отырғызылып, жаңа үшөлшемді кеуекті металл қаңқасымен біріктірілген суперконденсаторға арналған гибриді электродтарды жасау ғылыми тұрғыдан ерекше қызығушылық тудырады. Мұндай көпкомпонентті құрылым метал оксидтерінің жоғары электрохимиялық белсенділігін, графеннің тамаша электрөткізгіштігін және 3D-никель қаңқасының механикалық тұрақтылығын біріктіретін синергетикалық әсер береді. Бұл меншікті сыйымдылықтың едәуір артуына, циклдік тұрақтылықтың жақсаруына және энергия жинақтау құрылғыларының энергиялық сипаттамаларының күшеюіне алып келеді, соның нәтижесінде бұл бағыт

заманауи электрохимиялық энергетиканы дамыту үшін айрықша перспективалы болып табылады. Сонымен қатар, суперконденсаторларға арналған электродтарды әзірлеуде өтпелі металл оксидтерінің нанокұрылымды қабаттарын графенмен қапталған, үшөлшемді кеуекті металл архитектурасымен біріктіру арқылы гибриді құрылымдар жасау ерекше маңызды бағыт болып отыр. Мұндай көпкомпонентті құрылым синергетикалық әсер туындатып, металл оксидтерінің жоғары электрохимиялық белсенділігін, графеннің тамаша өткізгіштігін және 3D-никель қаңқасының механикалық тұрақтылығын үйлестіреді. Бұл өз кезегінде меншікті сыйымдылықтың едәуір артуына, циклдік тұрақтылықтың жақсаруына және энергия сақтау құрылғыларының жалпы сипаттамаларының жақсаруына ықпал етеді. Осыған байланысты бұл зерттеу бағыты қазіргі заманғы электрохимиялық энергетиканы дамыту үшін аса маңызды болып табылады.

Зерттеудің мақсаты – суперконденсатор электродтарына арналған графенге ұқсас кеуекті көміртекті және өтпелі металдардың нанокұрылымды оксидтерін синтездеу мен модификациялаудың қайталанатын және масштабталатын әдістерін әзірлеу; электродтық материалдардың меншікті сыйымдылығын арттыру және олардың ұзақмерзімді тұрақтылығын қамтамасыз ететін синтез және модификация параметрлерін таңдаудың ғылыми негіздемесін жасау; синтез параметрлері мен құрылымдық-морфологиялық ерекшеліктер арасындағы себеп-салдарлық байланыстарды және олардың жасушалардың электрохимиялық сипаттамаларына жиынтық әсерін айқындау; электрохимиялық энергия жинақтау құрылғыларында технологиялық іске асыруға жарамды электрод композициялары мен архитектураларының оңтайлы нұсқаларын анықтау.

Зерттеу міндеттері:

- био-шикізаттан кеуекті көміртектен алу және өтпелі метал оксидтерін суперконденсатор электродтық материалдарына интеграциялау бойынша заманауи тәсілдерді жүйелеу және талдау;

- әртүрлі биомасса түрлерінен арнайы құрастырылған қондырғыны пайдалана отырып, термохимиялық белсендіру арқылы электродтық сападағы графенге ұқсас кеуекті көміртекті материалды (GLPC) алудың қайталанатын (тұрақты алудың) әдісін әзірлеу;

- алынған GLPC материалының құрылымын, текстурасын және беткі химиясын зерттеу, сондай-ақ оның электродтық материал ретінде жарамдылығын циклдық вольтамперометрия (CV), гальваностаттық заряд-разряд (GCD), электрохимиялық импедансдық спектроскопия (EIS) әдістері арқылы кешенді электрохимиялық сынақтар негізінде (меншікті сыйымдылық, импеданс, циклдік тұрақтылық) растау;

- GLPC-ті сыйымдылық үлесін арттыру мақсатында никель гидроксидімен модификациялау тәсілін негіздеу және іске асыру; $\text{Ni}(\text{OH})_2$ мөлшері мен оның таралуының морфологиялық ерекшеліктерге және материалдың электрохимиялық сипаттамаларына әсерін талдау;

- иерархиялық ашық құрылымды үшөлшемді кеуекті металл токөткізгішін (3D- токөткізгіш) әзірлеу; кедергі шығындарды азайту және механикалық тұрақтылықты арттыру мақсатында оның құрамын, қалыптастыру әдісін және термиялық өңдеу режимдерін таңдауды негіздеу;

- үшөлшемді кеуекті металл токөткізгішпен химиялық бу фазасынан тұндыру (CVD) әдісімен графен жабынымен модификациялау және оның бетінде электроосаждение арқылы нанокұрылымды марганец диоксидінің (MnO_2) белсенді қабатын түзу арқылы гибриді электродтар жасау;

- гибриді электродтардың көпкомпонентті архитектурасының суперконденсаторлардың меншікті сыйымдылығына, энергиялық сипаттамаларына және жұмыс тұрақтылығына тигізетін әсерін бағалау.

Зерттеу нысаны – биомассадан алынған графенге ұқсас кеуекті көміртекті және өтпелі метал оксидтеріне негізделген, үшөлшемді кеуекті металл токөткізгішпен интеграцияланған электрохимиялық энергия жинақтау құрылғысының электродтары.

Зерттеу пәні – графенге ұқсас кеуекті көміртекті материалдар мен өтпелі металл оксидтері негізіндегі электродтық материалдардың физика-химиялық және электрохимиялық қасиеттері.

Зерттеу әдістері. Диссертациялық жұмысты орындау барысында келесі әдістер қолданылды:

Материалдарды синтездеу және модификациялау: термохимиялық белсендіру; химиялық тұндыру; бу фазасынан химиялық тұндыру (CVD); электрлік шөгу.

Физика-химиялық сипаттама: сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM); өткізгіш электрондық микроскопия (TEM); энергия-дисперсиялық рентген спектроскопиясы (EDX); рентгенфазалық талдау (XRD); Раман спектроскопиясы; меншікті беткі ауданын анықтау әдісі (БЭТ әдісі).

Электрохимиялық әдістер: циклдік вольтамперометрия (CV); гальваностатикалық заряд-разряд (GCD); электрохимиялық импеданстық спектроскопия (EIS).

Диссертациядағы қорғалатын ғылыми қағидалар:

1. Зертханалық жағдайларда биомасса мен басқа да көміртеқұрамды прекурсорларды термохимиялық белсендіруге арналған арнайы құрастырылған қондырғы әзірленіп, өндіріске енгізілді. Бұл қондырғы биоқалдықтардан (әсіресе жаңғақ қабығы) электродтық сападағы графенге ұқсас кеуекті көміртекті (GLPC) бақыланатын түрде синтездеуге мүмкіндік береді, KOH:көміртек массалық қатынасы 4:1 және белсендіру температурасы 850^0C режимінде өңдеу нәтижесінде меншікті беті $2800\text{ м}^2/\text{г}$ -қа дейін, меншікті сыйымдылығы 263 Ф/г және ток тығыздығы 1000 мА/г кезінде кулондық тиімділігі $99,4\%$ болатын материал алынды.

2. Никель гидроксидімен модификацияланған графенге ұқсас кеуекті көміртек ($\text{Ni}(\text{OH})_2\text{--GLPC}$) дайындалды, ол материалдың псевдосыйымдылық үлесінің айтарлықтай артуын көрсетеді: 9% $\text{Ni}(\text{OH})_2$ қосылған жағдайда ток тығыздығы 50 мА/г кезінде электродтық материалдың меншікті сыйымдылығы 236 Ф/г -тан 300 Ф/г -қа дейін өседі. Күріш қауызын пиролиз

және сілтілік термохимиялық белсендіру ($\text{KOH}:\text{көміртек} = 4:1$) арқылы 850°C температурада, аргон атмосферасында синтезделген базалық GLPC материалы $3292\text{ м}^2/\text{г}$ меншікті бетімен және жақсы дамыған кеуекті құрылымымен сипатталады.

3. Никель негізіндегі суспензияны және кеуектендіргіш қоспаларды металл фольга бетіне жағып, кейін 800°C температурада Ar/H_2 (95:5) атмосферасында термиялық өңдеу арқылы алынған үшөлшемді кеуекті ток өткізгіш, әрі қарай CVD-графен жабынымен және электрохимиялық тұндырылған нанокұрылымды MnO_2 қабатымен модификацияланғаннан кейін, ток тығыздығы 250 мА/г кезінде 297 Ф/г меншікті сыйымдылық көрсетеді және 5000 заряд-разряд циклінен кейін сыйымдылығының 98 %-ын сақтайды.

Зерттеудің негізгі нәтижелері. Зерттеу кеуекті көміртекті материалдарды және өтпелі метал оксидтерінің нанокұрылымды түрлерін синтездеу мен модификациялаудың ғылыми-технологиялық тұрғыдан негізделген тәсілдерін әзірлеуге, сондай-ақ өтпелі метал оксидтеріне негізделген электродтарды қалыптастыру үшін негіз ретінде үшөлшемді кеуекті металл ток өткізгіштерін пайдалануға бағытталған. Алынған материалдар энергияны электрохимиялық жолмен жинақтау жүйелерінде, атап айтқанда суперконденсаторларда қолдануға арналған. Зерттеу жоғары меншікті сыйымдылыққа, көп мәрте циклдеу кезінде тұрақтылыққа және технологияларды ауқымдауға әлеуеті бар функционалдық электродтық құрылымдарды жасауға бағдарланған.

Бірінші кезеңде биомассаны және басқа да көміртекқұрамды прекурсорларды термохимиялық белсендіруге арналған, арнайы құрастырылған зертханалық қондырғы әзірленіп, енгізілді. Бұл қондырғы графенге ұқсас кеуекті көміртекті (GLPC) электродтық сапада бақыланатын синтездеуді қамтамасыз етеді. Аталған қондырғыны пайдалана отырып, биомасса қалдықтарынан (атап айтқанда, жаңғақ қабығы мен күріш қауызы) $\text{KOH}:\text{көміртек} = 4:1$ массалық қатынасында және 850°C белсендіру температурасында GLPC алынды. Алынған материалдың меншікті беті $2800\text{ м}^2/\text{г}$ -қа дейін, меншікті сыйымдылығы 263 Ф/г және ток тығыздығы 1000 мА/г кезінде Кулондық тиімділігі 99,4 % құрады. Арнайы жобаланған қос цилиндрлі реактор тораптары (AISI 304L, AISI 316L, AISI 321 маркалы тот баспайтын болаттар) процестің жоғары тазалығын қамтамасыз етіп, қоспалық ластануларды азайтады және нәтижелердің қайталанушылығын арттырады. Әзірленген әдіс әмбебап болып табылады және түрлі биомасса түрлеріне, сондай-ақ басқа көміртекқұрамды материалдарға бейімдеуге мүмкіндік береді, бұл құрылымдық және электрохимиялық сипаттамалары басқарылатын жоғары сапалы көміртекті материалдар алуға жағдай жасайды және оларды энергияны жинақтау жүйелерінде қолдану үшін перспективалы етеді.

Жұмыстың екінші бөлімінде графен-текстес кеуекті көміртекті материалдың функционалдық сипаттамаларын арттыру мақсатында никель гидроксидін химиялық тұндыру әдісімен модификациялау зерттелді.

Модификация нәтижесінде меншікті сыйымдылықтың едәуір артатыны көрсетілді: 50 мА/г ток тығыздығында 236 Ф/г-тан 300 Ф/г-қа дейін өседі, сонымен қатар циклдік жүктемелер кезіндегі тұрақтылығы жақсарады. Морфологиялық және электрохимиялық зерттеулер белсенді фазаның біркелкі бөлінгенін, композиттің жеткілікті өткізгіштігін және оны гибриді энергия жинақтау құрылғыларында қолдануға жарамды екенін растады.

Жұмыстың үшінші бағыты ретінде иерархиялық ашық кеуекті құрылымы бар үшөлшемді ток өткізгіштерді әзірлеу қарастырылды. Мұндай ток өткізгіштер никель суспензиясын кеуін түзуші қоспалармен бірге металл негізге жағу және одан кейінгі термиялық өңдеу арқылы алынды. Бетті химиялық будан тұндыру (CVD) әдісімен модификациялау нәтижесінде біркелкі графен қабаты қалыптастырылды, ал оның үстіне электрохимиялық тұндыру жолымен нанокұрылымды MnO_2 -тің белсенді псевдосыйымдылық қабаты алынды. Осындай архитектура жоғары электрөткізгіштікті, дамыған белсенді бетті және иондардың тиімді тасымалын қамтамасыз етеді, бұл өз кезегінде меншікті сыйымдылықтың айтарлықтай артуына, энергия сипаттамаларының жақсаруына және циклдік тұрақтылықтың жоғарылауына алып келеді.

Осылайша, диссертациялық зерттеу биоқалдықтардан алынған көміртекті материалдан бастап, жоғары меншікті сыйымдылығы мен ұзақмерзімді тұрақтылығы бар көпкомпонентті гибриді электродтар әзірлеуге дейінгі толық циклді қамтиды. Алынған ғылыми және тәжірибелік нәтижелер заманауи энергия жинақтау жүйелері үшін перспективалы материалдарды ауқымда өндірісте қолдануға негіз қалайды және экологиялық бағдарланған технологияларды дамытуға ықпал етеді.

Алынған нәтижелердің ғылыми жаңалығы.

Диссертациялық жұмысты орындау барысында келесі ғылыми нәтижелер алынды:

- Биомасса (жаңғақ қабығы мен күріш қауызы) негізінде графенге ұқсас кеуекті көміртекті материалды GLPC алудың әмбебап әдісі әзірленді. Бұл әдіс арнайы жасалған, AISI 304L, AISI 316L және AISI321 маркалы тот баспайтын болаттан жасалған реакторлары бар қондырғыда іске асырылып, жоғары тазалықтағы және қайталанатын (тұрақты) нәтижелерді қамтамасыз етеді;

- Зерттеу барысында GLPC-ты биомассадан алу арқылы суперконденсаторлар үшін тиімді электродтық материал ретінде қолдануға болатыны тәжірибе жүзінде дәлелденді. Алынған материал жоғары меншікті беткі аумақпен ($2800\text{--}3292\text{ м}^2/\text{г}$), дамыған микро- және мезокеуекті құрылыммен және графенге ұқсас қабаттармен сипатталады, бұл оның электрохимиялық қасиеттерін едәуір жақсартады. Электрохимиялық сынақтар нәтижесінде GLPC негізіндегі электродтар 263 Ф/г меншікті сыйымдылық және 99,4 % кулондық тиімділік көрсетті (ток тығыздығы А/г кезінде) және 5000 циклдан кейін де жоғары тұрақтылықты сақтап қалды;

- GLPC-ты никель гидроксидімен химиялық тұндыру арқылы модификациялау әдісі ұсынылды, бұл материалдың меншікті сыйымдылығы мен циклдік тұрақтылығын едәуір арттыруға мүмкіндік берді;

- Үшөлшемді кеуекті никель токөткізгіштерін иерархиялық ашық құрылыммен қалыптастыру технологиясы әзірленді. Бұл технология металл негізге ұнтақ түріндегі никель суспензиясын кеуектендіргіш белсенді қоспалармен бірге жағып, кейін термиялық өндеуден өткізу арқылы іске асырылды;

- Алғаш рет үшөлшемді кеуекті токөткізгіштің бетіне CVD әдісімен графен қабатын тұндыру жүзеге асырылды. Бұл біркелкі графен жамылғысын қамтамасыз етіп, материалдың өткізгіштік қасиеттерін жақсартты;

- CVD-графенмен қапталған үшөлшемді токөткізгіштің бетіне электрохимиялық тұндыру арқылы MnO_2 нанокұрылымды қабаты қалыптастырылған гибриді электродтар алынды. Бұл электродтар меншікті сыйымдылығы 297 Ф/г (ток тығыздығы 250 мА/г кезінде) және 5000 циклдан кейін сыйымдылықтың 98 %-ын сақтау қабілетімен ерекшеленді.

Алынған нәтижелердің практикалық маңыздылығы.

Диссертациялық жұмыстың практикалық маңыздылығы суперконденсаторлар мен басқа да энергия жинақтау жүйелерінде қолдануға арналған жоғары тиімді электродтық материалдарды жасауға бағытталған технологиялық шешімдерді әзірлеу және енгізу арқылы айқындалады. Зерттеу барысында келесі техникалық және технологиялық шешімдер әзірленіп, тәжірибелік түрде іске асырылды: көміртеққұрамды материалдарды (биомассаны) термохимиялық белсендіруге арналған қондырғы; үшөлшемді кеуекті токөткізгіштерді алу жүйесі мен технологиясы, сондай-ақ бу фазасынан химиялық тұндыру (CVD) әдісі арқылы графен қабатын жағу әдістемесі; CVD-модификацияланған токөткізгіштердің бетінде нанокұрылымды марганец диоксидін (MnO_2) қалыптастыру технологиясы.

Ұсынылған технологиялар мен жабдықтар экологиялық қауіпсіз әрі экономикалық тұрғыда тиімді энергия жинақтау материалдарын жасауға мүмкіндік береді және тұрақты даму қағидаттарына сәйкес келеді. Зерттеу нәтижелерін өндірістік ауқымда енгізуге, сондай-ақ материалтану мен инженерлік физика (техникалық физика) салаларында мамандар даярлау барысында ғылыми-білім беру үдерісінде қолдануға болады.

Алынған нәтижелердің дұрыстығы мен негізділігі

Диссертациялық зерттеуде алынған нәтижелердің дұрыстығы заманауи физика-химиялық зерттеу әдістерінің кешені арқылы алынған деректердің өзара үйлесімділігімен дәлелденеді. Ғылыми-зерттеу жұмыстары жетекші ғылыми ұйымдарда, соның ішінде КЕАҚ «Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ», ЖШС «Bes Saiman Group», КЕАҚ «әл Фараби атындағы ҚазҰУ», РМК «Жану проблемалары институты» және Хьюстон университетінде (АҚШ) сынды жетекші ғылыми мекемелердің зертханаларында жүргізілді.

Ғылыми-зерттеу жұмыстарымен және мемлекеттік бағдарламалармен байланысы

Диссертациялық зерттеу материалтану мен энергетика салаларын дамытудың басым бағыттарына толық сәйкес келеді және ғылыми-зерттеу жұмыстары мен мемлекеттік бағдарламалар аясында, ғылыми жобалардың жеке тіркеу нөмірлері (ИРН) мен орындалу мерзімдері көрсетілген түрде орындалды, соның ішінде:

1) AP05133792 – «Разработка и создание суперконденсаторов на основе нанопористых углеродных материалов, полученных из отходов растительного сырья» РГП «Институт проблем горения». (2018-2020);

2) NATO project – Valorization of biomass waste into high efficient materials for CBRN protection (reference G5636) (2020-2021);

3) AP05132875 – «Теоретическое и экспериментальное исследование излучательных процессов в наноструктурированных углеродсодержащих объектах». Satbayev University. (2018-2020);

4) AP08856683 – «Разработка гибридных суперконденсаторных электродов на основе наност-ных оксидов переходных металлов/графен/3D-пористый металл» РГП на ПХВ «ИПГ». (2020-2022)

5) AP14869581 – «Разработка рентабельного и масштабируемого метода синтеза графеноподобных структур из отходов биомассы для электрохимических накопителей энергии» РГП на ПХВ «ИПГ». (2022-2024)

Докторанттың әрбір жарияланымды дайындаудағы жеке үлесі. Диссертациялық зерттеу аясында 11 ғылыми жұмыс жарияланды, олардың ішінде: 3 мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі жанындағы Білім және ғылым саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті (ҚОКСНВО) ұсынған басылымдарда, философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін; 5 мақала Web of Science және Scopus деректер базасына енгізілген халықаралық ғылыми журналдарда жарияланды; Сонымен қатар, 3 патент алынды. Әрбір жұмыс бойынша докторанттың қосқан үлесі: зерттеулерді бастамалау, әдістеме мен эксперименттік қондырғыларды әзірлеу, материалдарды синтездеу және модификациялау, физика-химиялық және электрохимиялық сипаттамалар жүргізу, деректерді талдау, нәтижелерді визуализациялау, қолжазбаны дайындау және рецензенттердің ескертулеріне жауап беру, сондай-ақ нәтижелерді патенттеу.

Ғылыми жариялымдар

Web of Science және Scopus халықаралық ғылыми деректер базасына кіретін басылымдарда жарияланған мақалалар:

1. **Yeleuov, M.**, Daulbayev, C., Taurbekov, A., Abdisattar, A., Ebrahim, R., Kumekov, S., ... & Batyrzhan, K. (2021). Synthesis of graphene-like porous carbon from biomass for electrochemical energy storage applications. *Diamond and Related Materials*, 119, 108560. DOI:10.1016/j.diamond.2021.108560. (CiteScore: 6, Q2, Impact Factor: 4.3).

2. **M. Yeleuov**, C. Seidl, T. Temirgaliyeva, A. Taurbekov, N. Prikhodko, B. Lesbayev, F. Sultanov, C. Daulbayev, and S. Kumekov . Modified Activated Graphene-Based Carbon Electrodes from Rice Husk for Supercapacitor Applications // *Energies* 2020, 13, 4943, P. 1–10.; DOI:10.3390/en13184943, (CiteScore: 3.86, Q3, Impact Factor: 3).

3. Abdisattar, A., **Yeleuov, M.**, Daulbayev, C., Askaruly, K., Tolynbekov, A., Taurbekov, A., & Prikhodko, N. (2022). Recent advances and challenges of current collectors for supercapacitors. *Electrochemistry Communications*, 107373. DOI:10.1016/j.elecom.2022.107373 (Wof Science: IF 4.7, Q1, и Scopus: Cite Score – 8.5, 86-й процентиль).

4. Prikhodko, N., **Yeleuov, M.**, Abdisattar, A., Askaruly, K., Taurbekov, A., Tolynbekov, A., ... & Daulbayev, C. (2023). Enhancing supercapacitor performance through graphene flame synthesis on nickel current collectors and active carbon material from plant biomass. *Journal of Energy Storage*, 73, 108853. DOI:10.1016/j.est.2023.108853 (Q1 Web of Science, Impact Factor (2023): 9.4).

5. Sultanov, F., Zhumasheva, N., Dangaliyeva, A., Zhaisanova, A., Baikalov, N., Tatykayev, B., **Yeleuov M.**, ... & Mentbayeva, A. (2024). Enhancing lithium-sulfur battery performance with biomass-derived graphene-like porous carbon and NiO nanoparticles composites. *Journal of Power Sources*, 593, 233959. DOI:10.1016/j.jpowsour.2023.233959 (Q1 Web of Science, Impact Factor (2023): 8.41);

ҚОКСНВО ұсынған басылымдардағы мақалалар:

1. **Елеуов, М.А.**, Сейтжанова, Д.И. Ченчик, А.Т. Таурбеков, Ж.К. Елемесова, Ж.А. Супиева, З.А. Мансуров. Получение многослойных графенов из рисовой шелухи и скорлупы грецкого ореха. М.А. // Горение и плазмохимия. – 2018. – Т. 16. – №. 1. – С. 8-14.

2. Атаманова Т.С., **Елеуов М.**, Таурбеков А., Атаманов М.К. Разработка гибких электродов без применения полимерных связующих на основе активированных углей и углеродных нанотрубок // Горение и плазмохимия. – 20. – (2022). – 239-246.

3. Приходько Н.Г., **Елеуов М.А.**, Аскарулы К., Толынбеков А.Б., Таурбеков А.Т., Әбдісаттар Ә.Ә., Атаманов М.К. Исследование исходной растительной биомассы для объемного получения графеноподобных структур // Горение и плазмохимия. – 20. – (2022). – 221-231.

Алынған патенттер:

1. USA patent. Ebrahim, Rabi, **Mukhtar Yeleuov**, and Alex Ignatiev. Porous solid oxide fuel cell anode with nanoporous surface and process for fabrication. Application No. 16/709,016. Date of Patent : Jan. 28 , 2020;

2. Патент № 6564 РК. Способ изготовления пористого токосъемника для гибридных суперконденсаторов / **Елеуов М.А.** Әбдісаттар Ә.Ә., Приходько Н.Г., Таурбеков А.БТ., Толынбеков А.Б. Ақарұлы Қ. // – Оpubл. 22.10.2021.

3. Патент № 5404 РК. Способ получения графена и устройство для его осуществления / **Елеуов М.А.**, Мансуров З.А., Таурбеков А.Т., Лесбаев Б.Т., Смагулова Г.Т., Приходько Н.Г. // – Оpubл. 02.10.2020.

Жұмыстың апробациясы. Диссертациялық зерттеу нәтижелері халықаралық және республикалық ғылыми форумдарда, сондай-ақ бейіндік ғылыми семинарларда және кафедралар мен институттардың отырыстарында баяндалып, талқыланды.