

Erik Serikovich Merkibayev – PhD, senior lecturer, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: e.merkibayev@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3869-6835>.

Taras Yanko – PhD, Chief Scientific Officer at UNDERSLAB LTD OOD, Burgas, Bulgaria, e-mail: titanlab3@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2217-4290>.

Alexander Zolotov – PhD, Associate Professor, Shakarim University, Semey. Kazakhstan; e-mail: azol64@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9751-8161>.

Поступила в редакцию 27.07.2025
Поступила после доработки 08.09.2025
Принята к публикации 11.09.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-68](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-68)



FTAXP: 61.13.19

**А.Т. Табынбаева¹, М.Е.Сулейменова¹, К.Т. Тастамбек^{1,2}, Н.Ш. Акимбеков^{1,2},
Ж.Т. Тауанов^{1,2*}**

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,

050038, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Аль-Фараби д.71

²Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,

Түркістан қ., Қазақстан, пр. Б.Саттарханова, 29

*e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.kz

МХЕНЕ ЖӘНЕ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗАНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ ЖӘНЕ ҚОЛДАНУ ӘЛЕУЕТІ

Аңдатпа: Қазіргі заманда ғылым мен техника қарқынды дамып, қоршаған орта мен табиғи ресурстарды сақтау мәселесі өзекті бола түсуде. Бұл тұрғыда экологиялық таза, жаңартылатын және жоғары тиімділігі бар материалдарға сұраныс артып келеді. МХене және наноцеллюлоза – соңғы онжылдықта үлкен ғылыми қызығушылық тудырған екі перспективті наноматериал. Бұл материалдардың құрылымдық ерекшеліктері, химиялық және физикалық қасиеттері, сондай-ақ көпфункционалы қолдану мүмкіндіктері оларды әртүрлі салаларда тиімді пайдалануға жол ашады.

МХене – МАХ-фазалардың селективті травмалау нәтижесінде алынатын екіөлшемді материал. Оның жоғары өткізгіштігі, гидрофильділігі, термиялық және химиялық тұрақтылығы, сондай-ақ модификацияға икемділігі арқасында ол су тазарту, энергия сақтау, электроника, сенсорлар мен биомедицина салаларында кеңінен зерттеліп келеді. Наноцеллюлоза – өсімдік тектес целлюлозадан алынатын экологиялық таза және биологиялық ыдырайтын материал. Ол жоғары механикалық беріктігі, беттік ауданы және химиялық тұрақтылығы арқылы медицина, тағам өнеркәсібі, орау технологиясы және нанокөпозиттер өндірісінде үлкен әлеуетке ие.

Бұл мақалада екі материалдың алыну әдістері (мысалы, МХене үшін HF немесе LiF/HCl арқылы күйдірмелеу, ал наноцеллюлоза үшін қышқылдық гидролиз, механикалық және ферментативті өңдеу), морфологиялық және құрылымдық сипаттамалары жан-жақты талданады. Сонымен қатар, олардың жеке және біріктірілген түрде қолданылу мүмкіндіктері, әсіресе нанокөпозиттер мен мембраналық құрылымдарда қолдану жолдары қарастырылады. Зерттеу нәтижелері бұл материалдардың өзара үйлесімділігі мен жоғары функционалдығын көрсете отырып, оларды келешектегі экологиялық және техногендік мәселелерді шешуге бағытталған жасыл технологиялардың ажырамас бөлігі ретінде қолдануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: МХене, наноцеллюлоза, синтез, нанотехнология, көпозиттер, экологиялық материалдар, су тазалау.

1 МХене мембраналық технологияның перспективті материалы ретінде

1.1 МХене құрылымы және қасиеттері

МХене – бұл екі өлшемді материалдар класы, олар қабатталған карбидтерден, нитридтерден немесе карбонитридтерден түзіледі және олардың бастапқы МАХ-фазаларынан селективті күйдірмелеу әдісі арқылы алынады.

МХене-нің прекурсорының жалпы химиялық формуласы $M_{n+1}AX_n$ түрінде болады, мұнда М – өтпелі металды, А – Периодтық жүйенің 13–15-топ элементін, ал Х – көміртек немесе азотты білдіреді. «МАХ» атауы осы үш негізгі құрамдас бөліктің атауларынан алынған.

Графен мен өтпелі металл дихалькогенидтері негізінен ван-дер-ваальстік байланыстар арқылы біріктірілген қабаттардан тұратын болса, МХене құрылымы мүлде басқа ерекшеліктерге ие. Бұл материалда М – А байланысы анағұрлым берік болып табылады, ал М – Х байланысы металдық, коваленттік немесе иондық сипат көрсетуі мүмкін. МХене материалдары селективті күйдірмелеу (ойылту) процесі арқылы түзіледі, оның химиялық формуласы $M_{n+1}X_nT_x$ түрінде көрсетіледі. Мұнда Т – беткі қабатта орналасқан функционалдық топтарды (F, OH, Cl немесе O) білдіреді, ал х – осы топтардың санын сипаттайды. Жалпы, «n» мәні жоғары МХене құрылымдары термодинамикалық тұрғыдан тұрақты болып келеді. Бұл олардың қабатаралық байланысының беріктігіне, құрылымдық үйлесімділігіне және сыртқы ортаның әсеріне төзімділігіне тікелей байланысты. Сонымен қатар, функционалдық топтардың құрамы мен концентрациясы МХене-нің электрондық, механикалық және химиялық қасиеттерін айтарлықтай өзгерте алады, бұл олардың әртүрлі технологиялық қолдану мүмкіндіктерін арттырады [1]. 1-кестеде МХене материалдарының физикалық және химиялық қасиеттері келтірілген. Бұл қасиеттер олардың мембраналық құрылымдарда қолданылу әлеуетін бағалауға мүмкіндік береді.

Кесте 1 – МХене-нің физика-химиялық қасиеттері

Физика-химиялық қасиет	Ерекшеліктері	Дереккөз
Құрылым	Қабыршақты, 2D – наноқабаттар, жоғары меншікті беткі ауданға ие	[2]
Беттік топтар	Синтездеу әдісіне байланысты – OH, –O, –F топтарымен функционалданады	[3]
Жоғары механикалық беріктік	$Ti_3C_2T_x$ монокабаты үшін Юнг модулі $0,484 \pm 0,013$ ТПа құрайды, бұл теориялық мәнге (0,502 ТПа) өте жақын.	[4]
Электрөткізгіштік	$Ti_3C_2T_x$ монокабатының электр-өткізгіштігі $11\,000\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ дейін жетеді, бұл оны жоғары ток өткізгіштікке ие материал ретінде көрсетеді	[5]
Гидрофильділік	Терминальды топтардың болуына байланысты жоғары гидрофильдік қасиет көрсетеді	[6]
Беттік заряд	Теріс беттік заряд (ортаның рН-на және терминальды топтарға байланысты)	[7]
Тұрақтылық	Тотығуға бейім (әсіресе сулы суспензияларда ұзақ уақыт сақтағанда)	[8]

Қазіргі уақытта әртүрлі электронды, физикалық және электро-химиялық қасиеттері бар 30-дан астам эксперименталды түрде алынған стехиометриялық МХене және 100-ден астам (беткі ұштарын есептемегенде) теориялық болжамды қосылыстар бар. Сонымен қатар, М және Х жақтарында қатты ерітінділер болуы мүмкін және бірнеше дара (O, Cl, F, S және т.б.) болуы мүмкін.) немесе аралас (O/OH/F) беттік ұштары МХене-ді 2D материалдарының үлкен және әртүрлі тобына айналдырады [3].

1.2 МХене синтездеу әдістері

МХене көп жағдайда жоғарыдан төмен әдіспен алынады. Бұл бөлім дәстүрлі түрде «МХене синтез әдістері» деп белгіленгенімен, бұл классикалық синтез туралы емес, бастапқы МАХ фазасының трансформация процестері туралы. Қарапайым прекурсорлардан материал жасауды көздейтін толыққанды синтезден айырмашылығы, МХене жағдайында біз МАХ фазасының құрылымдық элементтерінің бірін селективті алып тастаумен айналысамыз

МХене синтездеу үшін негізінен МАХ-фазаларынан HF немесе LiF/HCl ерітінділерінде күйдірмелеу әдісі қолданылады. Бұл әдіс металдық қабаттарды аралықтан алып тастау арқылы МХене түзуге мүмкіндік береді [1].

Негізгі синтездеу әдістері:

Химиялық күйдірмелеу – HF немесе HCl/LiF қолдану. МХене алу үшін кеңінен қолданылатын тәсілдердің бірі – химиялық күйдірмелеу. Бұл әдісте МАХ – фазадағы А – элемент (мысалы, алюминий) арнайы реагенттердің көмегімен таңдамалы түрде жойылады. Бастапқыда бұл үшін фторсутек (HF) қышқылы пайдаланылған. Алайда оның уыттылығы мен қауіптілігіне байланысты кейінгі зерттеулер экологиялық қауіпсіз әрі тиімді балама әдістерге

бағытталды. Солардың бірі - Льюис қышқылдарына негізделген күйдірмелеу, яғни $ZnCl_2$, $CuCl_2$ немесе $FeCl_3$ секілді металдардың тұздары арқылы МАХ-фазаны өңдеу. Бұл реагенттер алюминиймен әрекеттесіп, оны ерітіндіге шығарып тастайды, нәтижесінде M_n+1X_n құрылымы қалыптасып, МХеңе түзіледі [9].

Электрохимиялық күйдірмелеу – жұмсақ жағдайларда МХеңе алу әдісі. Дәстүрлі HF негізіндегі әдістер қауіпті және экологиялық тұрғыдан тиімсіз болғандықтан, зерттеушілер балама, қауіпсіз және тиімді жолдарын іздестіруде. Liu және әріптестері ұсынылған жұмыстарында Ti_2C түріндегі МХеңе материалын алу үшін балқытылған тұзды ортада ($LiCl/KCl$) бір сатылы электрохимиялық күйдірмелеу әдісін қолдануды ұсынды.

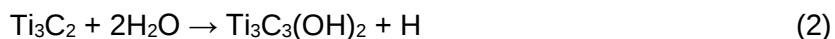
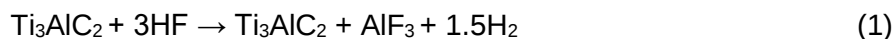
Бұл әдісте бастапқы МАХ фазасы (Ti_2AlC) Ti , Al және көміртегі (КНТ немесе rGO) элементтерінен дайындалып, кейіннен $500\text{ }^{\circ}C$ температурада 1.3 В тұрақты кернеу кезінде электрохимиялық түрде күйдірмелеу жүргізілді. Осы процесте алюминий атомдары Al^{3+} иондарына дейін тотығып, тұз ортасында ұшпа $AlCl_3$ қосылысын түзіп, Ti_2C негізіндегі МХеңе бетінде Cl топтарының пайда болуына мүмкіндік жасайды. Бұл фторсыз және металл қоспаларсыз әдіс ретінде экологиялық және құрылымдық тұрғыдан тиімді жол екендігі көрсетілді. Қосымша өңдеу ретінде $(NH_4)_2S_2O_8$ ерітіндісімен өңдеу жүргізіліп, беткі қабатта оттегі бар топтардың (O -containing terminations) түзілуіне қол жеткізілді. Бұл оттекті топтар электрохимиялық қасиеттерді едәуір жақсартып, псевдокапацитивті реакцияны белсендіріп, жоғары қуатты литий-ионды аккумуляторлар үшін перспективті анод материалы ретінде қолдануға мүмкіндік береді [10].

Механохимиялық әдіс – механикалық ұнтақтау арқылы синтез. Бұл әдіс қатты фазадағы материалдарда механикалық күштің әсерінен химиялық реакцияларды іске қосады. Механохимиялық өңдеу кезінде, әдетте, МАХ-фазалар немесе олардың прекурсорлары жоғары энергиялы шарлы диірмендерде тиісті реактивтермен бірге өңделеді. Бұл процесс нәтижесінде А элементінің қабаттар арасынан бөлініп, МХеңе құрылымы түзіледі.

Механохимиялық әдістің негізгі артықшылықтарына оның қарапайымдылығы, еріткішсіз немесе аз мөлшерде еріткішпен жүргізілуі, энергия мен уақытты үнемдеу, экологиялық қауіпсіздігі жатады. Сонымен қатар, бұл әдіс арқылы алынған МХеңе-нің беткі функционалды топтарын ($-OH$, $-F$, $-O$) тиімді басқаруға және қабатаралық арақашықтықты арттыруға болады, бұл өз кезегінде электродтық және адсорбциялық қасиеттерін жақсартады. Мысалы, $Ti_3C_2T_x$ МХеңе үлгісі механикалық өңдеуден кейін химиялық әдісімен синтезделіп, суперконденсатор ретінде жоғары меншікті сыйымдылық көрсетті – 146.3 Ф/г , сондай-ақ 5000 циклдан кейін де тұрақтылығын сақтап қалды. Сонымен қатар, жаңа бірсатылы механикалық эксфолиация әдісі арқылы жоғары тұрақты және органикалық еріткіштерде жақсы дисперсияланатын МХеңе материалдары алынған [11].

Сондай-ақ, МХеңе-ді төменнен жоғары әдістермен алуға болады. Di Wang, Chenkun Zhou және басқалар жүргізген зерттеуде бу фазасынан химиялық тұндыру әдісімен МХеңе алу әдістемесі ұсынылды. Дәстүрлі МАХ фазалық селективті күйдірмелеу әдісінен айырмашылығы, бұл әдіс МХеңе-ді көміртегі, метан немесе азоттың қатысуымен металдар мен металл галогенидтері сияқты бастапқы компоненттерден тікелей синтездеуге мүмкіндік береді. Бұл материалдың морфологиясы мен құрылымын бақылаудың жаңа мүмкіндіктерін ашады, бұл осы тәсілді берілген қасиеттері бар МХеңе құруға перспективалы етеді [12].

2011 жылы МХеңе отбасының бірінші мүшесі, $Ti_3C_2T_x$, оның алдындағы Ti_3AlC_2 -ден Al қабатын химиялық жолмен алу үшін концентрлі HF ерітіндісінің әсерінен кейін синтезделді. М-А байланыс энергиясы М-Х байланыс энергиясынан төмен болғандықтан, дәйекті ою реакциялары біртіндеп жүруі мүмкін [13]. Мысал ретінде Ti_3Al_2 алайық:



1-суреттегі сызбанұсқада МАХ-фаза синтезінің кезеңдері көрсетілген. Алдымен М (ауысатын металл), А (мысалы, Al , Si) және Х (C немесе N) элементтері стехиометриялық қатынаста араластырылып, жоғары температурада инертті атмосферада күйдіріледі. Нәтижесінде қабаттық кристалды құрылым түзіледі: М және Х қабаттары кезектесіп орналасып, А-қабаттары араларында болады. Осыдан кейін МАХ-фаза қышқыл (HF) немесе

LiF/HCl ерітіндісімен өңделіп, А-қабаттар ерітіндіге өтеді. Қалған көпқабатты құрылым – МХене – түзіледі. Қосымша ультрадыбыстық немесе механикалық өңдеу арқылы бұл құрылым жұқа екіөлшемді МХене нанопластикаларына бөлінеді.



Сурет 1 – МХене алу сызбанұсқасы

2 Наноцеллюлозаның классификациясы, қасиеттері және түзілу механизмдері

2.1 Наноцеллюлоза түрлері

Целлюлоза микромасштабан наномасштабға дейін өзгеретін иерархиялық құрылымға ие. Оны 2 суреттегі сызбанұсқадан анық байқауға болады.

Целлюлоза қалпына келу, қол жетімділік, адам үшін қауіпсіздігі, тірі организмдермен үйлесімділік және ылғалды сіңіру қабілеті сияқты құнды қасиеттерге ие. Осы қасиеттерінің арқасында ол әртүрлі салаларда, соның ішінде қағаз, косметика, тамақ, орау, тоқыма және дәрі-дәрмек өндірісінде кеңінен қолданылады. Целлюлозаның ерекше табиғи сипаттамалары оның негізінде наноматериалдар жасауға мүмкіндіктер ашты.

Целлюлоза β -D-глюкопиранозадан тұратын негізгі қайталанатын бірліктерден – β -1,4-глюкозидті байланыстар арқылы құралады. Целлюлозаның полимерлену дәрежесі бірнеше жүзден бірнеше мыңға дейін өзгеріп отырады. Наноцеллюлоза – бұл целлюлозаның бір өлшемі (ұзындығы, диаметрі немесе биіктігі) наноөлшемде болатын материал, бұл қасиет оның көзіне немесе өндіріс әдісіне байланысты емес [14].

β -d-глюкопираноза (целлобиоздық) бірліктері – глюкозаның димері, ол глюкоза бірліктерінің C_4 және C_1 көміртек атомдарындағы ОН топтары арасында гликозидті байланыстар арқылы ковалентті байланысқан. Целлюлоза полисахаридінің тізбегі C_1 атомында бос полуацетальды немесе альдегидті топпен қалпына келетін ұшымен және C_4 атомында бос спиртті топпен қалпына келмейтін ұшымен құралады [15].

Наноцеллюлозаның жоғары беткі ауданы, экологиялық тазалығы, биосыйымдылығы және жақсы механикалық қасиеттері оны қазіргі замандағы көптеген жаңа материалдар мен технологияларда қолдануға мүмкіндік береді, атап айтқанда су тазалау және микробты фильтрация жүйелерінде [16].

Наноцеллюлоза жалпы үш негізгі түрге бөлінеді:

Бактериалды наноцеллюлоза (БНЦ). Бактериалды наноцеллюлоза туралы алғаш рет 1886 жылы Адриан Браун айтқан. Ол қазіргі кезде *Glucanacetobacter xylinus* деп аталатын бактерияларды зерттеп, олардың наноцеллюлоза өндіре алатынын анықтады. Жоғарыдан төмен әдістері арқылы алынған наноцеллюлозамен салыстырғанда, бактериялық наноцеллюлоза құрамында лигнин мен гемицеллюлоза болмайтындықтан, тазалығы жоғары [17].

Бактериалды наноцеллюлоза (БНЦ) – бактериялар шығаратын микробтық целлюлоза, Мысалы, *Acetobacter xylinum*. Бактериялық целлюлоза өсімдік целлюлозасынан ерекшеленеді, өйткені ол жеке молекула түрінде болады және пектин, лигнин және гемицеллюлоза сияқты қоспаларды кетіру үшін одан әрі өңдеу қажет емес. Оның өсімдік целлюлозасына қарағанда көптеген артықшылықтары бар, өйткені ол өте таза, сұйықтық пен газдарға тамаша өткізгіштігі, кеуектілігі, суды жоғары сіңіруі және тамаша механикалық қасиеттері бар [18].

Кристалды наноцеллюлоза (КНЦ). Бұл ұзындығы 200-500 нм және диаметрі 3-35 нм аралығында болатын, таяқша тәрізді нанобөлшектер. Олар целлюлозаның жоғары реттелген

кристалдық аймақтарынан қышқыл гидролиз әдісі арқылы алынады. Бұл процесте аморфты целлюлозаға әсер ету үшін концентрлі күкірт қышқылы қолданылады. Нәтижесінде, 90%-ға дейінгі тазалығы және мінсіз кристалдылығы бар өзек тәрізді құрылым түзіледі. ЦНК жоғары кристалдылық деңгейімен, қаттылығымен, үлкен меншікті беткі ауданымен және жоғары механикалық беріктігімен ерекшеленеді. Осы қасиеттерінің арқасында олар адсорбциялық қабілеті жоғары биосорбент ретінде кеңінен қолданыс табуда [19, 20].

КНЦ құрамындағы гидроксил топтарының көп болуы оның бетін әртүрлі функционалды топтармен модификациялауға жағдай жасайды, бұл оны бояғыштар мен ауыр металдарды (мысалы, Cr^{3+}) адсорбциялауда тиімді етеді. Сонымен қатар, КНЦ басқа наноматериалдармен (мысалы, графен оксиді, МОК, Fe_3O_4) біріктіріліп, композитті құрылымдар жасау үшін кеңінен қолданылады. Мұндай материалдар суды тазарту саласында жоғары тиімділік [20].

Фибриллярлы наноцеллюлоза (ФНЦ). Фибриллярлы наноцеллюлоза – диаметрі 5-тен 50 нм-ге дейін және ұзындығы бірнеше микрометр болатын сызықты фибриллдерден тұратын целлюлоза наноматериалдары. ФНЦ бір талшықтағы аморфты және кристалды аймақтарды қамтиды және механикалық өңдеу, химиялық өңдеу және механикалық және химиялық өңдеу комбинациясы сияқты үш түрлі процесті қолдану арқылы целлюлоза талшықтарынан алынуы мүмкін. Механикалық өңдеу Кезінде ФНЦ целлюлоза целлюлозасының суспензиясын жоғары қысыммен ұнтақтау арқылы синтезделеді, сондықтан нанофибрилдердің күшті шатастырылған желілері түзіледі [18].

2.2 Наноцеллюлозаны алу әдістері

Химиялық әдістер

Химиялық әдістер наноцеллюлозаны алу үшін жиі қолданылады және олардың арасында қышқыл гидролизі, тотықтырғыштық өңдеу (TEMPO тотығу) және сілтілік өңдеу ерекше орын алады.

TEMPO арқылы тотығу. Барлық химиялық алдын ала өңдеулердің ішінде TEMPO арқылы тотығу әлі де ең тиімді және селективті химиялық алдын ала өңдеулердің бірі болып саналады. Бұл алдын ала өңдеу әдісі катализатор ретінде 2,2,6,6-тетраметил-1-пиперидинилоксиді (TEMPO), сокатализатор ретінде натрий бромиді (NaBr) және тотықтырғыш ретінде натрий гипохлориті (NaClO) қолданылады. Процесс целлюлозаның C_6 гидроксил топтарының тотығуына негізделген, алдымен альдегидке дейін, содан кейін карбоксил топтарына дейін, рН 10-11 және бөлме температурасында.

TEMPO көмегімен карбоксил топтарын енгізу фибриллалар арасындағы электростатикалық итеруді күшейтеді, бұл олардың одан әрі механикалық босатылуын айтарлықтай жеңілдетеді. Дегенмен, жоғары шығындар мен қоршаған ортаға ықтимал теріс әсер бұл әдісті өнеркәсіптік ауқымда қолдану мүмкіндігін шектейді [21]. TEMPO әдісінің артықшылығы – алынған наноцеллюлозаның жоғары тұрақтылығы мен біркелкілігі. Бұл әдісті жетілдіру үшін экологиялық таза тотықтырғыш жүйелер зерттелуде [22].

Қышқылдық гидролиз. Қышқыл гидролизі кеңінен қолданылатын әдістердің бірі болып табылады. Бұл процесте күкірт немесе тұз қышқылы қолданылады, нәтижесінде жоғары кристалдылыққа ие наноцеллюлоза түзіледі. Бұл әдістің басты артықшылығы – алынған наноцеллюлозаның механикалық беріктігі және тұрақтылығы. Гидролиз процесі аморфты целлюлозаны ыдыратып, кристалды құрылымды сақтап қалуға мүмкіндік береді. Дегенмен, бұл әдіс бейтараптандыру мен жуу сатыларын қажет ететіндіктен, өнеркәсіптік деңгейде күрделілік тудырады [23].

Сілтілік гидролиз. Сілтілік өңдеу – бұл өсімдік биомассасынан целлюлозалық наноталшықтарды алудың тиімді тәсілдерінің бірі. Asem тобының зерттеуінде бұл әдіс қант қамысының багассасынан целлюлоза құрылымын бөліп алу үшін пайдаланылды. Сілтілік ортада жүргізілген өңдеу лигнин мен гемицеллюлоза сияқты қоспаларды тиімді түрде жояды, бұл өз кезегінде талшықтардың босап шығуына және кейінгі механикалық немесе қышқылдық өңдеуге жақсы бейімделуіне мүмкіндік береді. Бұл кезең материалдың беттік морфологиясын жақсартып, гидрофильді қасиеттерін арттырады [24].

Механикалық әдістер

Механикалық әдіс негізінен жоғары қысымды гомогенизацияны, механикалық-химиялық ұнтақтауды, ультрадыбыстық өңдеуді қамтиды.

Механикалық әдістердің өзіндік құны бар болса да, олар күрделі жағдайларды қажет етпейді және ластану проблемаларын тудырмайды, бұл оларды индустрияландыруды жеңілдетеді [25].

Жоғары қысымда гомогенизация. Жоғары қысымды гомогенизация әдісі целлюлоза талшықтарын жоғары қысымда механикалық дисперсиялау арқылы ұсақтайды. Бұл әдістің тиімділігі қысым деңгейіне және өңдеу циклдарының санына тәуелді. Гомогенизация кезінде алынған наноцеллюлоза тұрақты және біртекті бөлшектерден тұрады [26].

Әдістің артықшылығы – химиялық реагенттерді қажет етпеуі және экологиялық қауіпсіздігі. Алайда, жоғары энергия шығыны мен жабдықтың тозуы оның ауқымды өндірісте қолданылуын шектейді. Гомогенизация әдісін жетілдіру үшін ультрадыбыстық өңдеу сияқты басқа тәсілдермен біріктіру ұсынылады [27].

Ультрадыбыстық өңдеу. Ультрадыбыстық өңдеу – экологиялық тұрғыдан тиімді әдістердің бірі, өйткені ол аз энергия жұмсайды және химиялық реагенттерді қажет етпейді. Бұл әдісте жоғары жиілікті дыбыс толқындарының әсерінен целлюлоза талшықтары ұсақ бөлшектерге ыдырайды. Нәтижесінде, алынған наноцеллюлоза бөлшектері біркелкі болып, жақсы дисперсиялық тұрақтылыққа ие болады [28].

Алайда, өңдеу параметрлері дұрыс таңдалмаса, алынған бөлшектердің қасиеттері өзгеруі мүмкін, сондықтан бұл әдісті басқа тәсілдермен біріктіріп қолдану ұсынылады. Ультрадыбыстық өңдеу жоғары қысымды гомогенизациямен біріктірілгенде, алынған наноцеллюлозаның қасиеттері айтарлықтай жақсарады [26].

Биологиялық әдістер

Наноцеллюлозаны алу үшін қолданылатын биологиялық әдістер микроорганизмдер мен ферменттерді пайдалану негізінде жүзеге асырылады. Олар өздерінің тиімділігі мен соңғы өнімнің қасиеттерін бақылауға мүмкіндік беруі арқасында кеңінен қолданылуда.

Ферментативті әдіс. Ферментативті әдіс целлюлазалық ферменттердің әсерінен целлюлозаны таңдамалы гидролиздеу арқылы наноцеллюлоза алуға негізделген. Бұл әдіс механикалық және химиялық өңдеулерге қарағанда жұмсақ, себебі целлюлоза құрылымын сақтай отырып, оның нанодеңгейдегі дисперсиясын қамтамасыз етеді. Wang өз зерттеуінде ферментативті әдіспен алынған наноцеллюлозаның құрылымдық және механикалық қасиеттерін зерттеп, ферменттердің комбинациясы мен олардың әсер ету шарттарының өнім сапасына ықпалын анықтаған. Нәтижелер көрсеткендей, ферментативті гидролиз өнімнің жоғары дәрежелі дисперсиясын қамтамасыз етіп, оның термиялық тұрақтылығын арттырады [29].

Ферментативті әдісті одан әрі жетілдіру мақсатында биоинженерлік тәсілдерді қолдану арқылы ферменттердің тиімділігін арттыру жолдарын қарастырылып жатыр. Сонымен қатар, ультрадыбыстық және механикалық әдістермен біріктірілген ферментативті өңдеу тәсілдерінің өнімділікті арттыратыны белгілі болды [30]. Ферменттерді тиімді қолдану үшін ферменттік коктейльдердің әртүрлі құрамдарын зерттеп, олардың целлюлоза талшықтарын деградациялау қабілетін салыстырылады. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ферменттік коктейльдердің оңтайлы құрамын таңдау наноцеллюлозаның сапасына тікелей әсер етеді, ал ферментативті әдіспен алынған наноталшықтар жоғары механикалық және термиялық тұрақтылыққа ие болады [31].

Бактериалды әдіс. Бұл әдісте белгілі бір бактериялар түрлері целлюлоза талшықтарын синтездейді, нәтижесінде жоғары тазалықтағы және құрылымдық біртектілігі жоғары наноцеллюлоза түзіледі. БНЦ бактериялардың белгілі бір түрлерін, соның ішінде *Acetobacter* (*Komagataeibacter* ретінде қайта жіктелген), *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Alcaligenes* сияқты грам оң түрлерді, сондай-ақ *sarcina ventriculi* сияқты түрлерді ашыту арқылы өндіріледі. Бактериялық целлюлозаның ең тиімді өндірісі *Acetobacter*-ден келеді, мысалы, *A.xylinum*, *A.hansenii*, *A.pasteurianus* және *Komagataeibacter europaeus* [17].

El-Naggar және оның әріптестері жүргізген зерттеулер бактериялық целлюлозаның синтезін оңтайландыруға бағытталған. Олар бактериялық дақылдардың өсуіне қолайлы коректік орта құрамы мен ферментация шарттарын зерттей отырып, өнім шығымын арттыруға болатындығын көрсеткен. Сонымен қатар, алынған бактериялық наноцеллюлозаның физикалық-химиялық қасиеттері толық сипатталған [32].

Бактериялық целлюлозаның сапасын жақсарту үшін гендік инженерия мен биокатализ әдістерін қолдану арқылы бактериялардың өнімділігін арттыру жолдары қарастырылып жатыр. Сонымен қатар, бактериялық наноцеллюлозаның жараларды емдеу, тін инженериясы және биосенсорлар сияқты биомедициналық қолдану салаларындағы әлеуеті жоғары [33]. 2-

кестеде наноцеллюлозаны алу әдістерінің салыстырмалы сипаттамасы келтірілген. Онда әр әдістің артықшылықтары мен кемшіліктері көрсетіліп, қолдану саласына байланысты тиімділігі бағаланады

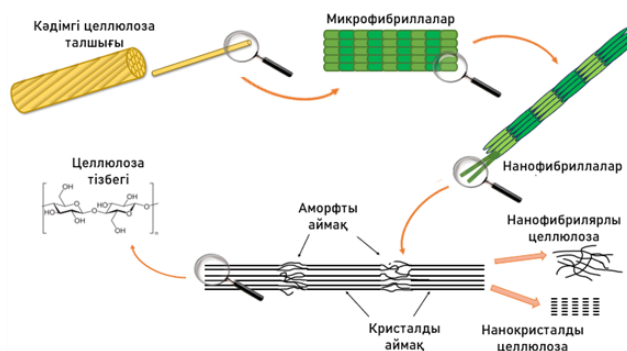
Кесте 2 – Наноцеллюлозаны алу әдістеріне салыстырмалы талдау

Әдіс	Алынатын НЦ түрі	Артықшылықтары	Кемшіліктері	Мақала
Сілтілік гидролиз	ФНЦ	Материалдың механикалық қасиеттері жақсарады	Экологиялық таза емес, құрылым бұзылуы мүмкін	[34]
Қышқылдық гидролиз	КНЦ	Жоғары кристалды, тұрақты материал алынады	Агрессивті қышқылдарды қолдану	[35]
Бактериалды синтез	БНЦ	Экологиялық таза, қоспасыз таза материал	Ұзақ уақыт (7-14 күн)	[17]
Ферментативті гидролиз	КНЦ, ФНЦ	Экологиялық таза, жұмсақ синтез, материал сапасы	Арнайы фермент-терді қажет етеді, ұзақ уақыт	[36]
Механикалық ұнтақтау	ФНЦ	Қарапайым, химиялық реагенттер қолданылмайды	Құрылғылар бағасы, энергия шығындары	[25]
Ультрадыбыстық өңдеу	ФНЦ	Экологиялық таза, жоғары дәрежеде диспергілеу	Құрылғылар бағасы, талшық бұзылуы мүмкін	[37]
Гомогенизация	ФНЦ	Біртекті талшықтар алынады	Алдын ала өңдеуді қажет етеді, энергия шығындары	[38]
TEMPO	ФНЦ	Бақыланатын әдіс, жоғары дисперстілік	Жоғары бағалы реагенттерді қолдану	[39]

Наноцеллюлозаны бөліп алу процесінің тиімділігін арттыру мақсатында бұл әдістер көбіне бір-бірімен үйлестіріле қолданылады. Мысалы, химиялық өңдеуге дейін шикізат алдын ала механикалық тәсілмен дайындалады, бұл кейінгі реакцияның жылдамдығын және өнім шығымын арттыруға ықпал етеді.

2.3 Наноцеллюлозаның түзілу механизмдері

Тізбектер арасындағы сутектік байланыстар целлюлозаны берік және тұрақты полимерге айналдырады, ал наноцеллюлоза ось бойымен жоғары қаттылық береді. Бұл байланыстар сонымен қатар целлюлоза құрылымын қалыптастыруда маңызды рөл атқарады, оның өзін-өзі құрастыру қабілетін, кристалдылық дәрежесін, қол жетімділігі мен химиялық белсенділігін анықтайды. Егер сутектік байланыстар көп болса, молекулалар тығыз қосылып, кристалды аймақтар түзе бастайды, ал қалғандары аморфты болып қалады. Нәтижесінде целлюлоза микрофибриллалары реттелген (кристалды) және реттелмеген (аморфты) аймақтардан тұрады және олардың қатынасы өсімдік шикізатының көзіне байланысты. Мысалы, мақта целлюлозасының кристалдылығы ағаш целлюлозасымен салыстырғанда 80%-ға жетуі мүмкін [40]. Целлюлозаның наноөлшемді құрылымдарға айналу процесі бірнеше кезеңнен тұрады (сурет 2).



Сурет 2 – Наноцеллюлозаның түзілу механизмі

Бастапқыда целлюлоза ірі макроскопиялық талшық түрінде көрінеді, оның құрамында микрофибриллалар болады. Арнайы өңдеу нәтижесінде бұл құрылымдар біртіндеп ұсақталып, алдымен микрофибриллаларға, кейін наноөлшемді фибриллаларға айналады.

Целлюлоза молекуласы глюкозалық бірліктерден тұратын ұзын тізбекті құрайды. Бұл тізбекте кристалды (реттелген, берік) және аморфты (ретсіз, реакцияға бейім) аймақтар болады. Осы құрылымға негізделі отырып, екі негізгі түрдегі наноцеллюлоза алуға болады: фибриллярлы (кристалды және аморфты аймақтарды қамтитын) және кристалды (тек кристалды бөліктерден тұратын). Целлюлозаның осындай құрылымдық ерекшеліктері оны түрлі наноматериалдар мен технологиялар үшін құнды шикізат етеді.

Қорытынды

МХене және наноцеллюлоза сияқты наноқұрылымды материалдар қазіргі мембраналық технологияларды жетілдіруде маңызды рөл атқарады. Бұл материалдар жоғары гидрофильділікке, механикалық беріктікке, үлкен меншікті беткі ауданға және модификацияға бейімділікке ие. Олар суды тиімді тазартуға арналған мембраналар үшін аса қолайлы.

МХене екі өлшемді құрылымы мен электрөткізгіштік қасиетінің арқасында ауыр металдарды адсорбциялау мен иондық селективтілікке қабілетті. Наноцеллюлоза болса, жаңартылатын табиғи көздерден алынатын экологиялық таза және биологиялық ыдырайтын материал ретінде мембраналардың құрылымдық тұрақтылығын арттырады. Бұл екі материалдың комбинациясы жоғары өнімді композитті мембраналар алуға мүмкіндік береді.

Мақалада аталған материалдарды синтездеу және оларды мембраналық жүйелерге бейімдеу әдістері қарастырылды. Жинақталған мәліметтер наноцеллюлоза мен МХене негізіндегі мембраналардың суды тазарту, тұщыту және ластағыштарды бөлу процестерінде қолданылу әлеуетін дәлелдейді. Бұл бағыттағы зерттеулер қоршаған ортаға қауіпсіз, тиімді су тазарту технологияларын дамытуға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі

1. Akhter R. MXenes: A comprehensive review of synthesis, properties, and progress in supercapacitor applications / R. Akhter, S.S. Maktedar // Journal of Materiomics. – 2023. – vol. 9, № 6. – P. 1196-1241. <https://doi.org/10.1016/J.JMAT.2023.08.011>.
2. Facile Fabrication of Densely Packed Ti3C2MXene/Nanocellulose Composite Films for Enhancing Electromagnetic Interference Shielding and Electro-/Photothermal Performance / Z. Zhou et al // ACS Nano. – 2021. – vol. 15, № 7. – P. 12405-12417. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c04526>.
3. Gogotsi Y. MXenes: Two-Dimensional Building Blocks for Future Materials and Devices / Y. Gogotsi, Q. Huang // ACS Nano. – 2021. – vol. 15, № 4. – P. 5775-5780. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c03161>.
4. Elastic properties and tensile strength of 2D Ti3C2Tx MXene monolayers / C. Rong et al. // Nat Commun. – 2024. – vol. 15, № 1. – P. 1566. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45657-6>.
5. High electrical conductivity and breakdown current density of individual monolayer Ti3C2T MXene flakes / A. Lipatov et al. // Matter. – 2021. – vol. 4, № 4. – P. 1413-1427. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.01.021>.
6. Transforming Ti3C2Tx MXene's intrinsic hydrophilicity into superhydrophobicity for efficient photothermal membrane desalination / B. Zhang et al. // Nat Commun. – 2022. – vol. 13, № 1. – P. 3315. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31028-6>.
7. Role of Surface Terminations for Charge Storage of Ti 3 C 2 T x MXene Electrodes in Aqueous Acidic Electrolyte / L. Liu et al // Angewandte Chemie International Edition. – 2024. – vol. 63, № 14. <https://doi.org/10.1002/anie.202319238>.
8. Understanding the Chemical Degradation of Ti 3 C 2 T x MXene Dispersions: A Chronological Analysis / K.P. Marquez et al. // Small Science. – 2024. <https://doi.org/10.1002/smssc.202400150>.
9. Harja M. Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste / M. Harja, G. Buema, D. Bucur // Sci Rep. – vol. 12, № 1. – P. 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10093-3>.

10. In Situ Synthesis of MXene with Tunable Morphology by Electrochemical Etching of MAX Phase Prepared in Molten Salt / L. Liu et al // *Adv Energy Mater.* – 2023. – vol. 13, № 7. <https://doi.org/10.1002/aenm.202203805>.
11. Advancements in MXenes and mechanochemistry: exploring new horizons and future applications / S. Iravani et al // *Mater Adv.* – 2024. – vol. 5, № 21. – P. 8404-8418. <https://doi.org/10.1039/D4MA00775A>.
12. Direct synthesis and chemical vapor deposition of 2D carbide and nitride Mxenes / D. Wang et al. // *Science.* – 2023. – vol. 379, № 6638. – P. 1242-1247. <https://doi.org/10.1126/science.add9204>.
13. Huang L. MXene-Based Membranes for Separation Applications / L. Huang, L. Ding, H. Wang // *Small Science.* – 2021. – vol. 1, № 7. <https://doi.org/10.1002/smsc.202100013>.
14. Cellulose nanofibrils manufactured by various methods with application as paper strength additives / J. Zeng et al // *Sci Rep.* – 2021. – vol. 11, № 1. – P. 1-16. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91420-y>.
15. A review of nanocellulose as a new material towards environmental sustainability / K. Dhali et al // *Science of The Total Environment.* – 2021. – vol. 775. – P. 145871. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.145871>.
16. Emerging developments regarding nanocellulose-based membrane filtration material against microbes / M.N.F. Norrrahim et al // *Polymers (Basel).* – 2021. – vol. 13, № 19. <https://doi.org/10.3390/polym13193249>.
17. Barja F. Bacterial nanocellulose production and biomedical applications / F. Barja // *J Biomed Res.* – 2021. – vol. 35, № 4. – P. 310-317. <https://doi.org/10.7555/JBR.35.20210036>.
18. Production of nanocellulose from lignocellulosic biomass and its potential applications: A review / M. N. Khan et al // *Global Nest Journal.* – 2024. – vol. 26, № 4. <https://doi.org/10.30955/gnj.005604>.
19. Production of nanocellulose from lignocellulosic biomass and its potential applications: A review / M.N. Khan et al // *Global Nest Journal.* – 2024. – vol. 26, № 4. <https://doi.org/10.30955/gnj.005604>.
20. A comprehensive review of cellulose nanomaterials for adsorption of wastewater pollutants: focus on dye and heavy metal Cr adsorption and oil/water separation / Y. Yang et al // *Collagen and Leather.* – 2024. – vol. 6, № 1. – P. 1-25. <https://doi.org/10.1186/s42825-024-00179-1>.
21. Recycling of TEMPO-mediated oxidation medium and its effect on nanocellulose properties / H. Xu et al // *Carbohydr Polym.* – 2023. – vol. 319. – P. 121168. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2023.121168>.
22. Preparation and characterization of nanocellulose obtained by TEMPO-mediated oxidation of organosolv pulp from reed stalks / V.A. Barbash et al // *Appl Nanosci.* – 2022. – vol. 12, № 4. – P. 835-848. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01749-z>.
23. Nanocrystalline cellulose isolation via acid hydrolysis from non-woody biomass: Importance of hydrolysis parameters / A.Q. Almashhadani et al // *Carbohydr Polym.* – 2022. – vol. 286. – P. 119285. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.119285>.
24. Entangled cellulose nanofibers produced from sugarcane bagasse via alkaline treatment, mild acid hydrolysis assisted with ultrasonication / M. Asem et al // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences.* – 2023. – vol. 35, № 1. – P. 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.003>.
25. Cellulose nanofibrils (CNFs) produced by different mechanical methods to improve mechanical properties of recycled paper / F. Hu et al // *Carbohydr Polym.* – 2021. – vol. 254. – P. 117474. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.117474>.
26. Preparation of cellulose nanofibers from potato residues by ultrasonication combined with high-pressure homogenization / X. Liu et al // *Food Chem.* – 2023. – vol. 413. – P. 135675. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2023.135675>.
27. Samsalee N. Rice husk nanocellulose: Extraction by high-pressure homogenization, chemical treatments and characterization / N. Samsalee, J. Meerasri, R. Sothornvit // *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications.* – 2023. – vol. 6. – P. 100353. <https://doi.org/10.1016/J.CARPTA.2023.100353>.

28. Ultrasonic cavitation: An effective cleaner and greener intensification technology in the extraction and surface modification of nanocellulose / D.Y. Hoo et al // Ultrason Sonochem. – 2022. – vol. 90. – P. 106176. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2022.106176>.
29. Preparation and characterization of nanocellulose fiber (CNF) by biological enzymatic method," / J. Wang et al // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2024. – vol. 37, № 3. – P. 1223-1241. <https://doi.org/10.1177/08927057231180479>.
30. Pradhan D. Emerging technologies for the production of nanocellulose from lignocellulosic biomass / D. Pradhan, A.K. Jaiswal, S. Jaiswal // Carbohydr Polym. – 2022. – vol. 285. – P. 119258. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.119258>.
31. Cellulose nanostructures obtained using enzymatic cocktails with different compositions / T.J. Bondancia et al // Int J Biol Macromol. – 2022. – vol. 207. – P. 299-307. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2022.03.007>.
32. Exploration of a novel and efficient source for production of bacterial nanocellulose, bioprocess optimization and characterization / N.E.-A. El-Naggar et al // Sci Rep. – 2022. – vol. 12, № 1. – P. 18533. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22240-x>.
33. Bacterial nanocellulose: Optimized synthesis and biomedical applications / Y. Zhou et al // Ind Crops Prod. – vol. 205. – P. 117589. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2023.117589>.
34. Synthesis of Nanocellulose as a Sustainable Construction Material from Waste Paper Using the Alkaline Method at Low Temperature / P. Suanto et al // Civil Engineering and Architecture. – 2025. – vol. 13, № 1. – P. 175-192. <https://doi.org/10.13189/cea.2025.130110>.
35. Bacha E.G. Extraction and Characterization of Nanocellulose from Eragrostis Teff Straw / E.G. Bacha, H.D. Demsash // Journal of cellulose. – 2021.
36. Nanocellulose from oil palm biomass to enhance microbial fermentation of butanol for bioenergy applications / N. Hastuti et al // Bioresources. – 2019. – vol. 14, № 3. – P. 6936-6957. <https://doi.org/10.15376/biores.14.3.6936-6957>.
37. S. Głowniak and B. Szcz Recent Developments in Sonochemical Synthesis of Nanoporous Materials. – 2023.
38. Cellulose nanofibrils (CNFs) produced by different mechanical methods to improve mechanical properties of recycled paper / F. Hu et al // Carbohydr Polym. – 2021. – vol. 254. – P. 117474. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.117474>.
39. A comprehensive review of cellulose nanomaterials for adsorption of wastewater pollutants: focus on dye and heavy metal Cr adsorption and oil/water separation / Y. Yang et al // Collagen and Leather. – 2024. – vol. 6, № 1. – P. 1-25. <https://doi.org/10.1186/s42825-024-00179-1>.

Алғыс

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитетінің, BR24992814 «Оңтүстік Қазақстан облысының тұрақты дамуы үшін инновациялық технологияларды дамыту және заманауи инфрақұрылым құру» қолдауымен орындалды.

А.Т. Табынбаева¹, М.Е. Сулейменова¹, К.Т. Тастамбек^{1,2}, Н.Ш. Акимбеков^{1,2}, Ж.Т. Тауанов^{1,2*}

¹Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби,
050038, Республика Казахстан, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71

²Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави,
161200, Республика Казахстан, г. Туркестан, пр. Б.Саттарханова, 29

*e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.kz

СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА МХЕНЕ И НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ПОТЕНЦИАЛ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

В современную эпоху стремительного развития науки и технологий вопросы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов приобретают особую актуальность. В этом контексте возрастает интерес к экологически чистым, возобновляемым и высокоэффективным материалам. МХене и наноцеллюлоза - два перспективных наноматериала, вызвавших большой научный интерес за последнее десятилетие. Их структурные особенности, химико-физические свойства и многофункциональность открывают широкие возможности применения в различных отраслях.

МХене – двумерный материал, получаемый путём селективного травления МАХ-фаз. Благодаря высокой проводимости, гидрофильности, термической и химической стабильности, а

также способности к модификации, он активно исследуется в таких областях, как очистка воды, хранение энергии, электроника, сенсоры и биомедицина. Наноцеллюлоза – экологически чистый и биоразлагаемый материал растительного происхождения. Её высокая механическая прочность, большая удельная поверхность и химическая устойчивость делают её востребованной в медицине, пищевой промышленности, упаковке и производстве нанокompозитов.

В статье подробно рассматриваются методы получения этих материалов (например, травление HF или LiF/HCl для синтеза MXene и кислотный гидролиз, механическая и ферментативная обработка для наноцеллюлозы), а также их морфологические и структурные характеристики. Особое внимание уделяется перспективам их совместного применения в виде нанокompозитов и мембранных структур. Результаты анализа показывают, что благодаря высокой совместимости и функциональности, данные материалы имеют потенциал стать ключевыми компонентами зелёных технологий, направленных на решение экологических и техногенных проблем будущего.

Ключевые слова: MXene, наноцеллюлоза, синтез, нанотехнология, композиты, экологические материалы, очистка воды.

A.T. Tabynbayeva¹, M.E.Suleimenova¹, K.T. Tastambek^{1,2}, N.S. Akimbekov^{1,2}, Z.T. Tauanov^{1,2*}

¹Al-Farabi Kazakh National University,

050038, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi av,71

²Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University,
161200, Republic of Kazakhstan, Turkestan, B.Sattarkhanov Ave., 29

*e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.kz

STRUCTURAL PROPERTIES OF MXENE AND NANOCELLULOSE AND THEIR APPLICATION POTENTIAL

In the modern era of rapid scientific and technological advancement, the preservation of the environment and natural resources has become increasingly important. In this context, there is growing interest in environmentally friendly, renewable, and highly efficient materials. MXene and nanocellulose are two promising nanomaterials that have attracted considerable scientific attention over the past decade. Their unique structural, chemical, and physical properties, as well as their multifunctionality, make them applicable across a wide range of fields.

MXene is a two-dimensional material derived from the selective etching of MAX phases. Due to its high conductivity, hydrophilicity, thermal and chemical stability, and tunability, it is widely studied in water purification, energy storage, electronics, sensors, and biomedical applications. Nanocellulose, a bio-based, biodegradable material obtained from plant cellulose, offers high mechanical strength, a large surface area, and chemical stability, making it a valuable material in medicine, food packaging, and nanocomposites.

This article provides a detailed review of synthesis methods for these materials (e.g., HF or LiF/HCl etching for MXene, and acid hydrolysis, mechanical, and enzymatic treatment for nanocellulose), along with their morphological and structural characteristics. It also explores their individual and combined application potentials, particularly in nanocomposites and membrane systems. The analysis shows that due to their compatibility and high functionality, these materials may serve as essential components in future green technologies aimed at solving ecological and technogenic challenges.

Key words: MXene, nanocellulose, synthesis, nanotechnology, composites, eco-friendly materials, water purification.

Авторлар туралы мәліметтер

Айдана Талгатовна Табынбаева – магистрант, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, «Химиялық физика және материалтану» кафедрасы; e-mail: aidanatabynbaeva1@gmail.com.

Мадина Ержанқызы Сулейменова – химиялық технология магистрі, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, химиялық физика және материалтану кафедрасының ғылыми қызметкері; e-mail: madekas.semey@gmail.com.

Куаныш Талғатұлы Тастамбек – PhD, директор, Экология және биоресурстар тұрақтылығы ҒЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті; e-mail: kuanyshtastambek@kaznu.edu.kz.

Нұралы Шардарбекұлы Акимбеков – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, «Экология және биоресурстардың тұрақтылығы» ҒЗИ профессоры; e-mail: akimbeknur@gmail.com.

Жандос Турегулович Тауанов* – PhD, доцент-зерттеуші, Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті; e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.edu.kz.

Сведения об авторах

Айдана Талгатовна Табынбаева – магистрант, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, кафедра «Химической физики и материаловедения»; e-mail: aidanatabynbaeva1@gmail.com.

Мадина Ержанкызы Сулейменова – магистр химической технологии, научный сотрудник кафедры химической физики и материаловедения Казахского национального университета имени аль-Фараби; e-mail: madekas.semey@gmail.com.

Куаныш Талгатович Тастамбек – PhD, директор, НИИ Устойчивости экологии и биоресурсов, Казахский национальный университет имени аль-Фараби; e-mail: kuanysh.tastambek@kaznu.edu.kz.

Нуралы Шардарбекович Акимбеков – PhD, профессор Казахского национального университета имени аль-Фараби, НИИ «Экология и устойчивость биоресурсов»; email: akimbeknur@gmail.com.

Жандос Турегулович Тауанов* – PhD, ассоциированный профессор-исследователь, Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави; e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.edu.kz.

Information about the authors

Aidana Tabynbayeva – Master's student, Department of Chemical Physics and Materials Science, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: aidanatabynbaeva1@gmail.com.

Madina Suleimenova – Master of Chemical Technology, Researcher at the Department of Chemical Physics and Materials Science, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: madekas.semey@gmail.com.

Kuanysh Tastambek – PhD, director, SRI Sustainability of ecology and bioresources, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: kuanysh.tastambek@kaznu.edu.kz.

Nuraly Akimbekov – PhD, Al-Farabi Kazakh National University, professor of the research institute «Ecology and sustainability of Bioresources»; e-mail: akimbeknur@gmail.com.

Zhandos Tauanov* – PhD, associate professor-researcher, Khoja Akhmet Yassawi International Kazakh-Turkish University; e-mail: tauanov.zhandos@kaznu.edu.kz.

Редакцияға енуі 16.06.2025

Өңдеуден кейін түсуі 29.08.2025

Жариялауға қабылданды 08.09.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3\(19\)-69](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-3(19)-69)

IRSTI: 31.25.01



R.N. Tuleyeva^{1,2,3*}, N.N. Gizatullina^{1,2}, R.A. Turganova^{1,2}, A.M. Belkozhaev¹, G.Toleutay^{1,4}

¹Satbayev University,

050043, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Satbayev str.

²Research Institute of Advanced Materials,

040000, Republic of Kazakhstan, Almaty

³Al-Farabi Kazakh National University,

050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 71 Al-Farabi Avenue

⁴University of Tennessee,

Knoxville, TN 37996, USA

*e-mail: rysgultuleyeva@gmail.com

POLYSACCHARIDE-BASED BIOPLASTICS FOR SUSTAINABLE PACKAGING: ROLE OF NONCOVALENT INTERACTIONS AND TRANSESTERIFICATION

Abstract: The growing accumulation of plastic waste in ecosystems has catalyzed a global search for environmentally responsible packaging materials. Among biodegradable polymers, bioplastics derived from polysaccharides – especially from plant-based cellulose and its microbial analogue, bacterial cellulose (BC) – have attracted significant interest due to their renewability, biodegradability, and desirable mechanical attributes. Nevertheless, their practical application is frequently constrained by challenges such as hydrophilicity and vulnerability to environmental stressors. To overcome these issues, recent studies have explored structural modifications involving both noncovalent interactions (e.g., hydrogen bonding, ionic crosslinking) and covalent strategies such as transesterification. These approaches have been shown to improve mechanical integrity, flexibility and water resistance. This review discusses recent progress in