

ХҒТАР 29.19.16; 29.19.22
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2026-156-3-235-247>

Графен оксидімен модификацияланған хитозан негізіндегі биоүйлесімді композиттік трек мембраналарын дайындау және олардың құрылымын, биоүйлесімділігі мен тасымалдау қасиеттерін кешенді зерттеу

Жумабаев А.М.* , Ракишева С.Р. , Есенғалиева Н.Б. , Бабенова А.М. ,
Қойшыбайқызы Т. , Иванов И.А. , Шокаев А.М. 

¹ Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің
Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан.

E-mail: *a.zhumabayev@inp.kz, s.rakisheva@inp.kz, n.esengalieva@inp.kz,
aigerimbabenova@gmail.com, tkoishybaikyzy04@gmail.com, i.ivanov@inp.kz, ,
aibek.shokayev@gmail.com

Аңдатпа. Хитозан негізінде графен оксидімен (GO) модификацияланған биоыдырайтын композиттік тректік мембраналар дайындалды. SRIM әдісі арқылы ауыр иондармен сәулелендірудің қажетті параметрлері анықталды. Одан кейін химиялық өңдеу жағдайларын оңтайландыру шарттары таңдалып, толық өтетін кеуекті құрылым қалыптастырылды. Қалыптастырылған мембраналардың құрылымы мен құрамын зерттеу үшін РФЭС және СЭМ әдістері қолданылды, ал олардың термиялық қасиеттері термогравиметриялық талдау арқылы зерттелді. Зерттеу нәтижелері мембраналардың графен оксидімен жақсы модификацияланғанын, тректік кеуектердің түзілгенін және композиттердің термиялық тұрақтылығының артқанын растады. Биоүйлесімділікті зерттеу нәтижесінде 1,0 мг/мл концентрацияда мембрана экстракттарының жасушаларға деген кері әсері байқалмады. Электрохимиялық импеданстық спектроскопия зерттеуіне сәйкес, графен оксидін қосу мембрананың көлемдік кедергісін төмендетіп, иондық өткізгіштігін арттырғаны анықталды. Оның ең жоғарғы мәні GO мөлшері 0,5 масс.%. болған кезде байқалды. Зерттеу барысында мембраналарды дайындау, олардың құрылымын сипаттау, биоүйлесімділігін бағалау және электрохимиялық қасиеттерін анықтау кезеңдері бірізді түрде жүргізілді. Бұл зерттеу мембраналардың әртүрлі қасиеттерін жүйелі түрде сипаттауға мүмкіндік берді. Дайындалған мембраналарды толық қатты күйдегі суперконденсаторларға арналған гель-полимерлі электролиттердің матрицалары ретінде қолданудың келешегі зор.

Жіберілді 24.08.2026. Өзгертілді 9.09.2026. Қабылданды 10.09.2026. Онлайн қол жетімді 30.09.2026.

*Хат-хабар авторы

Түйін сөздер: трек мембраналары; хитозан; графен оксиді; биоүйлесімділік; гель-полимерлі электролит; толық қатты күйдегі суперконденсаторлар.

Кіріспе

Тасымалды электронды құрылғылардың, иілгіш сенсорлар мен имплантацияланатын медициналық құрылғылардың қарқынды дамуы энергияны жинақтауға арналған жинақы, қауіпсіз және механикалық тұрғыдан иілгіш жүйелерге деген сұранысты арттыруда. Ең перспективалы шешімдердің бірі ретінде жоғары меншікті қуатымен, жылдам зарядталуымен, ұзақ қызмет ету мерзімімен және сұйық электролиттің болмауына байланысты жоғары қауіпсіздік деңгейімен сипатталатын толық қатты күйдегі суперконденсаторлар қарастырылуда [1,2]. Мұндай құрылғылардың маңызды бөліктерінің бірі — иондардың тасымалдануын, құрылғы беріктігінің сақталуын және электродтардың бір-бірінен бөлінуін қатар қамтамасыз ететін гель-полимерлі электролиттер.

Табиғи биоыдырайтын полимерлер гель-полимерлі электролиттердің матрицалары ретінде барған сайын үлкен қызығушылық тудыруда. Хитозан биоүйлесімділігімен және үлдір түзу қабілетімен және уытсыздығымен ерекшеленеді. Сонымен қатар оның құрамында химиялық модификация жүргізуге мүмкіндік беретін амин және гидроксил топтары көп болғандықтан, перспективалы материалдардың бірі болып саналады [3]. Дегенмен, хитозанның ісінуі жоғары, механикалық беріктігі төмен және иондық өткізгіштігі салыстырмалы түрде аз. Бұл қасиеттері оның практикалық қолданысын шектейді. Осыған байланысты хитозан негізіндегі композиттік материалдарды жасауға қызығушылық артып отыр [4].

Хитозанды модификациялаудың тиімді тәсілдерінің бірі — меншікті бетінің ауданы жоғары және құрамында оттегі бар функционалдық топтары көп графен оксидін (GO) енгізу [5,6]. Осы қасиеттерінің арқасында GO-ны хитозан құрамына енгізу полимер арасындағы өзара әрекеттесуді күшейтіп, материалдың механикалық қасиеттерін жақсартуға және иондардың қозғалысын жеңілдетуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, тректік өңдеу әдісін қолдану арқылы мембранада реттелген кеуектер түзіп, оның тасымалдау қасиеттерін жақсартуға болады. Бұл әдіс кеуектерінің өлшемі мен тығыздығы бақыланатын мембраналарды алуға мүмкіндік береді [7]. Хитозан-графенді композиттерге деген қызығушылық жоғары болғанымен, олардан тректік мембраналар алу бойынша зерттеулер әлі де аз.

Осыған байланысты бұл жұмыстың мақсаты - графен оксидімен модификацияланған хитозан негізіндегі биоыдырайтын композиттік тректік мембраналарды әзірлеу, оларды қалыптастыру жағдайларын оңтайландыру, сондай-ақ, құрылымын, термиялық тұрақтылығын, биоүйлесімділігі мен тасымалдау қасиеттерін кешенді зерттеп, гель-полимерлі электролиттердің матрицалары ретінде қолдану мүмкіндігін бағалау.

Әдістеме

Зерттеу барысында молекулалық массасы 150-350 кДа болатын хитозан (Ch) (Sisco Research Laboratories Pvt. Ltd, Үндістан), 2-5 қабатты графен оксиді (GO) (Nanografi, Түркия), сондай-ақ Sigma Aldrich (Германия) өндірісіндегі сірке қышқылы, мочеви́на және натрий гидроксиді қолданылды. Барлық ерітінділерді дайындау үшін деиондалған су пайдаланылды.

Хитозан негізінде ТМ алу

Үлдірлерді дайындау үшін массасы 0,5 г бастапқы хитозан ұнтағы 2%-дық сірке қышқылының 25 мл сулы ерітіндісінде ерітілді. Қоспа полимер толық ерігенге дейін 40 °C температурада шейкерде 12 сағат бойы ұсталды. Алынған ерітінді шыны субстратқа құйылып, TMAX-MS-ZN320B жайылғыш машинасының көмегімен қажетті қалыңдыққа дейін жайылды. Кейін үлгілер бөлме температурасында 24 сағат бойы кептірілді.

Композиттік үлгілерді дайындау кезінде бастапқы хитозан ерітіндісіне ерітінді құрамындағы GO 0,1 масс.%, 0,2 масс.%, 0,5 масс.%, 1 масс.% болатындай мөлшерде графен оксиді қосылды. GO кон-

центрациясының (0,1–1,0 масс.%) диапазоны әдебиет деректері мен алдын ала жүргізілген тәжірибелер бойынша таңдалды. Бұл таңдалған аралық GO-тің шамадан тыс агрегациялануын болдырмай, оның хитозан матрицасында таралуын бағалауға мүмкіндік береді. Қоспаның гомогенділігін арттыру үшін дайындалған ерітінділер шейкерде 5 тәулік бойы араластырылды, бұл хитозанның ерітіндіде толық гидратациялануына және GO бөлшектерінің біркелкі таралуына жағдай жасады. Араластырудан кейін GO нанобөлшектерінің дисперсиясын жақсарту үшін ерітінділерге қосымша ультрадыбыстық өңдеу жүргізілді.

SRIM есептеулерінің (1-кесте) нәтижелерін ескере отырып, қалыңдығы 15–20 мкм болатын хитозан үлдірлері ДЦ-60 үдеткішінде ауыр иондармен сәулелендірілді. Үлдірлер 1,75 МэВ/нуклон энергиясы бар үдетілген $^{84}\text{Kr}^{15+}$ иондарының шоғырымен сәулелендірілді, ал сәулелендіру флюенсі $1,5 \times 10^7 - 5,0 \times 10^7$ ион/см² аралығында өзгертілді.

Сәулелендіруден кейінгі кеуектердің тығыздығы Marker бағдарламасының көмегімен ПЭТФ негізіндегі бақылау үлдірлерін пайдалану арқылы анықталды. Талдау барысында сәулелендірілген бақылау үлгілерінің ені мен ұзындығы бойынша кемінде 5 үлгі қарастырылды. Нәтижесінде ГПЭ ТМ-дегі кеуектердің тығыздығы $4,12 \times 10^7$ пор/см² құрады.

Сәулелендірілген үлдірлерді химиялық өңдеу мочевины (Urea) мен натрий гидроксиді негізіндегі ерітіндіде жүргізілді [8,9]. Химиялық өңдеу ерітіндісіндегі компоненттердің қатынасы келесі аралықта өзгертіліп отырды: NaOH:Urea, M= 2:1; 2:1,5; 1:1. Өңдеу температурасы -15-тен 0 °C-қа дейін өзгертілді. Химиялық өңдеуден кейін үлдірлердің pH мәні бейтарап деңгейге жеткенге дейін деиондалған сумен бірнеше рет жуылып кейін 20 °C температурада вакуумдық кептіру шкафында 12 сағат бойы кептірілді. Зерттелетін мембраналардың кеуек өлшемі Хагена–Пуазейль теңдеуін (1) пайдалана отырып, манометриялық әдіспен анықталды. Әрбір үлгі үшін кемінде үш тәуелсіз өлшеу жүргізілді.

$$Q = \frac{8\pi}{6MRT} \sqrt{\frac{n \cdot r^2}{\Delta p \cdot l}} \quad (1)$$

мұндағы, Δp – құралдағы қысымдар айырмасы, МПа; M – газдың молекулалық массасы, дин×см⁻²; R – әмбебап газ тұрақтысы, эрг/(моль К); n – мембрананың 1 см² ауданындағы кеуектердің тығыздығы, кеуек/; l – мембрананың қалыңдығы, см; T – температура, К.

ТМ құрылымы мен құрамын талдау

Бет морфологиясы мен кеуектер құрылымын зерттеу үшін сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) әдісі қолданылды. СЭМ кескіндері Phenom ProX үстел үсті сканерлеуші электрондық микроскопының (Thermo Scientific, Массачусетс, АҚШ) көмегімен үдеткіш кернеуі 15 кэВ болғанда және 1000 есе ұлғайтуда алынды.

Химиялық құрам рентгендің фотоэлектрондық спектроскопия (РФЭС) әдісімен Thermo Scientific K-Alpha (Уолтем, Массачусетс, АҚШ) Al K α (1486,6 эВ) монохроматтық сәулелену көзін пайдалана отырып зерттелді. Жалпы шолу спектрлері мен жоғары ажыратымдылықтағы спектрлер сәйкесінше 200 және 30 эВ өткізу энергиясында 1,0 және 0,1 эВ қадаммен тіркелді. Өлшеулер 100 мс экспозиция уақытында, 90° шолу бұрышында, $\leq 2 \times 10^{-9}$ Тор қысымында және 400 мкм дақ өлшемінде жүргізілді.

ТМ биологиялық үйлесімділігін зерттеу

Эксперименттік үлгілер екі жағынан 30 минуттан ультракүлгін сәулемен стерильдендірілді. Экстракттарды алу үшін үлгілер сарысуы DMEM ортасында (200 мг/мл) 37°C температурада 24 сағат бойы инкубацияланды. Центрифугалаудан кейін (20 000 g, 40 мин) супернатантқа соңғы концентрациясы 10% болатындай фетальді бұқа сарысуы (FBS) қосылды. Жұмыс ерітінділері материалдың 1,0 және 5,0 мг/мл концентрацияларында дайындалды.

Зерттеуде NIH3T3 (CRL-1658, ATCC) тышқан фибробласттарының жасушалық желісі пайдаланылды. Жасушалар құрамында 10% FBS және 1% пенициллин/стрептомицин бар DMEM (Gibco) қоректік ор-

тасында 37°C температурада және 5% CO₂ атмосферасында өсірілді.

Жасушалардың өміршеңдігі талдау.

Жасушалардың өміршеңдігі Cell Counting Kit-8 (ССК-8, Sigma-Aldrich) әдісімен бағаланды. NIH3T3 жасушалары 96 ұяшықты планшеттерге (1×10^4 жасуша/ұяшық) себіліп, үлгілердің экстракттарымен 24 сағат бойы инкубацияланды. Одан кейін әрбір ұяшыққа 10 мкл ССК-8 реагенті қосылып, 1 сағат бойы инкубацияланды. Содан соң Synergy Hybrid H1 микропланшеттік ридерінде (BioTek, АҚШ) 450 нм толқын ұзындығында оптикалық тығыздық өлшенді. Жасушалардың өміршеңдігі 100% деп қабылданған бақылау үлгісіне қатысты есептелді.

Барлық эксперименттер үш тәуелсіз қайталанымда ($n = 3$) жүргізілді. Нәтижелер орташа мән $\pm$ стандартты ауытқу ($M \pm SD$) түрінде ұсынылды. Айырмашылықтардың статистикалық маңыздылығы $p \leq 0,05$ кезінде Стьюденттің тәуелсіз таңдауларға арналған t-критерийі арқылы бағаланды.

Электрохимиялық талдау

Барлық өлшеулер бөлме температурасында VersaSTAT 3 потенциостатының (AMETEK Scientific Instruments, АҚШ) көмегімен жүргізілді.

Электрохимиялық импеданстық спектроскопия (ЭИС) заряд тасымалдануының көлемдік кедергісін Ω бағалау және гель-полимерлі электролиттердің меншікті иондық өткізгіштігін Ω есептеу үшін қолданылды. ЭИС өлшеулері 100 кГц-тен 0,1 Гц-ке дейінгі жиілік диапазонында жүргізілді. Ол үшін қатты күйдегі өлшеулер кезінде тығыз жанасуды қамтамасыз ететін тот баспайтын болаттан жасалған арнайы екі электродты ұяшық-ұстағыш пайдаланылды.

Диаметрі 16 мм болатын дискілер түрінде кесіп алынған үлгілердің иондық өткізгіштігі (2) формула бойынша анықталды:

$$\sigma = \frac{L}{A \times R} \quad (2)$$

мұндағы, L — үлдір қалыңдығы (см); A — жанасу ауданы (см²); иондық өткізгіштікті есептеу үшін $R=R_b$ — Найквист диаграммасынан анықталатын көлемдік кедергі қолданылады.

Нәтижелер мен талқылау

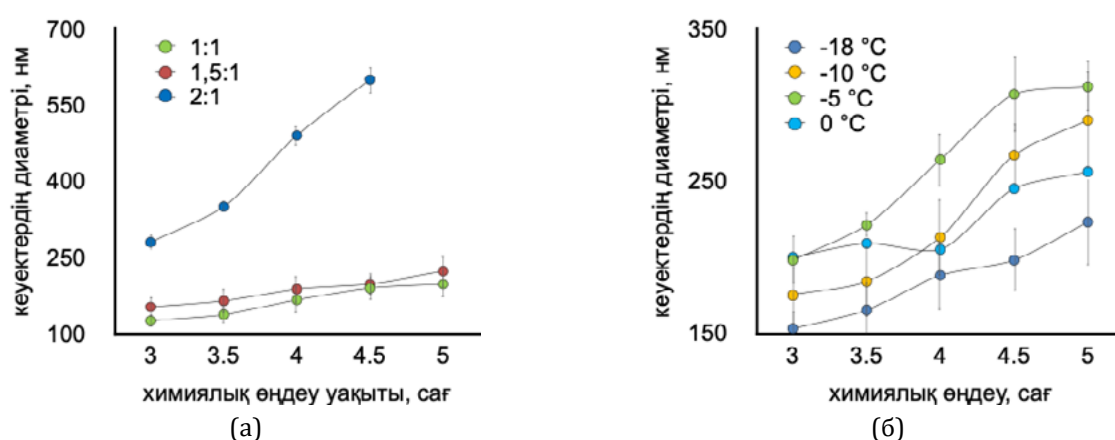
1. Ch₂OG TM алу және оларды химиялық өңдеудің оңтайлы шарттарын анықтау.

Қосымша ақпарат файлында ұсынылған SRIM есептеу нәтижелерін талдау графен оксидінің хитозан матрицасындағы мөлшерінің өзгеруі үдетілген ауыр криптон иондарының материалмен өзара әрекеттесу сипатына іс жүзінде әсер етпейтінін көрсетті. GO мөлшері 0-ден 1,0 масс.% дейін артқан кезде электрондық энергия шығындарының (dE/dx) мәні аз ғана өзгереді: 147 МэВ энергия кезінде ол 57,08–57,03 кэВ/мкм аралығын құрайды, ал ядролық тежеудің үлесі шамамен 0,11 кэВ/мкм деңгейінде сақталады. Бұл латентті тректердің түзілу процесі негізінен электрондық тежелумен анықталатынын және графен толтырғышының аз мөлшерінде іс жүзінде тәуелді еместігін көрсетеді. Ұқсас заңдылық иондардың жалпы жүру қашықтығы үшін де байқалады: 147 МэВ энергия кезінде бұл көрсеткіш 24,80 мкм-ден 24,57 мкм-ге дейін ғана өзгереді. Графен оксиді мөлшерінің артуына байланысты иондардың жүру қашықтығының, сондай-ақ, жүргізілген есептеулер барысында бойлық және көлденең стрэгглинг мәндерінің аздап төмендеуі байқалды. Мұны композит құрамына GO енгізілуіне байланысты материалдың орташа тығыздығының шамалы өсуімен байланыстыруға болады. Дегенмен, аталған өзгерістердің шамасы 1-2%-дан аспайды, сондықтан олар латентті тректердің түзілуіне айтарлықтай ықпал етпейді. Осыған байланысты GO мөлшерінің өзгеруі қолданылатын сәулелендіру жағдайларын қайта қарауды қажет етпейді және барлық зерттелген үлгілерді бірдей параметрлерде сәулелендіруге мүмкіндік береді.

SRIM бағдарламасында жүргізілген есептеу нәтижелерінің негізінде кейінгі тректік мембраналарды қалыптастыру үшін 1,75 МэВ/нуклон (147 МэВ) энергиясы бар ⁸⁴Kr¹⁵⁺ иондары таңдалды. Бұл энергия

иондардың шамамен 25 мкм толық жүру қашықтығын қамтамасыз етеді. Осы көрсеткішке сәйкес мембраналардың қалыңдығы 15-20 мкм болатын үлдірлер дайындалды, бұл ауыр иондардың материалдың бүкіл қалыңдығы арқылы өтуіне және өтпелі латентті тректердің түзілуіне қолайлы жағдай жасайды.

Хитозанның сілтілі ерітінділердің басым бөлігіндегі жоғары ерігіштігі бүкіл полимерлік матрицаның тез бұзылуына әкеледі, соның салдарынан латентті тректерді селективті түрде өңдеу іс жүзінде мүмкін болмайды. Осыған байланысты хитозан негізіндегі тректік мембраналарды алуға арналған зерттеулердің саны әлі де өте шектеулі болып отыр. Әдебиет деректерін талдау негізінде натрий гидроксиді мен мочевиінаға (NaOH/Urea) негізделген өңдеу жүйесі таңдалды [8,9], бұл жүйе полимер матрицасының жалпы еруін баяулата отырып, радиациялық зақымданған аймақтарды өңдеуге мүмкіндік береді. Химиялық өңдеу жағдайларын анықтау кезінде NaOH пен мочевиінаның қатынасы, ерітінді температура-сы және өңдеу уақыты негізгі өзгермелі параметрлер ретінде қарастырылды. Осы параметрлердің кеуек түзілу процесіне әсері зерттелді. (1) теңдеу бойынша есептелген кеуектердің орташа диаметрінің өзгеру нәтижелері 1-суретте көрсетілген.



1-сурет. Ch_OG TM кеуектерінің диаметрінің NaOH:Urea өңдеу ерітіндісі компоненттерінің арақатынасына тәуелділігі (температура -18,0 °C, химиялық өңдеу уақыты - 4 сағат) (а) және химиялық өңдеу температурасына байланысты (NaOH:Urea = 1,5:1 қатынасында) (б)

1а-суреттен өңдеу ерітіндісі компоненттерінің арақатынасы кеуектердің қалыптасу жылдамдығына тікелей әсер ететіні байқалады. NaOH:Urea = 2:1 қатынасында өңдеу ең жоғары жылдамдықпен жүреді. Бес сағаттық өңдеуден кейін кеуектердің орташа диаметрі шамамен 600 нм-ге дейін ұлғайған. Сонымен бірге, бұл жағдайда ерітінді тек сәулелену нәтижесінде өзгерген аймақтарға ғана емес, үлдірдің жалпы бетіне де белсенді әсер етеді. Сондықтан өңдеудің таңдамалылығы төмендеп, хитозан матрицасының артық еру қаупі жоғарылайды. Компоненттердің арақатынасы 1:1 болған кезде, керісінше, кеуек түзілу процесі баяулайды. Өңдеу 5 сағатқа созылғанның өзінде олардың диаметрі 200 нм шамасынан аспайды. Мұндай жағдай латентті тректерді қажетті деңгейде ашу үшін өңдеу қарқындылығының жеткіліксіз екенін көрсетеді. Оңтайлы нәтиже NaOH:Urea=1,5:1 қатынасында байқалды, мұнда полимер матрицасының еру процесі күрт жеделдемей, кеуектер диаметрінің бақыланатын түрде ұлғаюы қамтамасыз етіледі. Мұндай нәтижесі сәулелену кезінде бұзылған аймақтардың сілтілік гидролизі мен мочевиінаның хитозан матрицасына тигізетін әсерінің өзара үйлесуімен түсіндіруге болады. Яғни, өңдеу жағдайлары латентті тректердің ашылуына жеткілікті болғанымен, қоршаған полимердің шамадан тыс еруіне жол бермейді. Осы нәтижелерді ескере отырып, келесі тәжірибелерде NaOH:Urea = 1,5:1 қатынасы қолданылды. Аталған құрам кеуек өлшемін қажетті шекте біртіндеп өзгертуге және өңдеу нәтижелерінің тұрақтылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік берді.

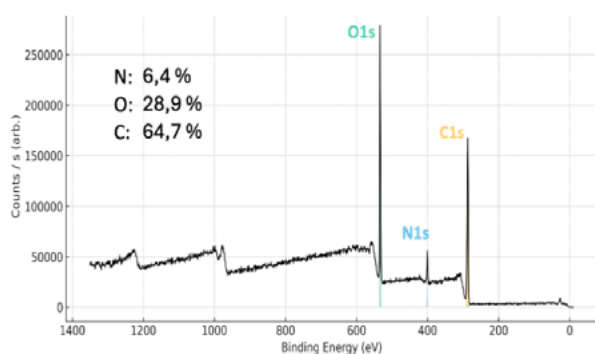
Өңдеу температурасының жоғарылауы гидроксид-иондарының диффузиясын және хитозан матрицасының сәулелену әсерінен деструкцияланған аймақтарындағы β -(1 $\rightarrow$ 4)-гликозидтік байланыстар-

дың сілтілік гидролизін жеделдетеді. Бұл латентті тректердің селективті еру жылдамдығының артуына, соның нәтижесінде кеуектердің орташа диаметрінің заңды түрде ұлғаюына әкеледі [10,11].

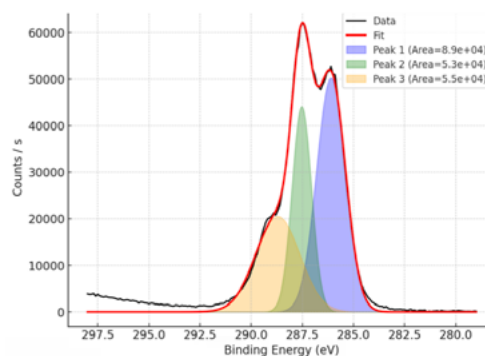
2. Ch_GO TM құрылымы мен химиялық құрамын талдау

Әзірленген Ch_GO TM тректік мембраналарының (TM) беттік қабатының элементтік құрамын және ондағы элементтердің химиялық күйін анықтау мақсатында рентгендік фотоэлектрондық спектроскопия (РФЭС) жүргізілді. Шолу спектрінен хитозанға тән көміртек (C), оттегі (O) және азот (N) элементтері анықталды. Спектрде қосымша тректерді қалыптастыру және кейінгі өңдеу кезеңдерінен соң мембрананың айтарлықтай өзгермегенін көрсетеді.

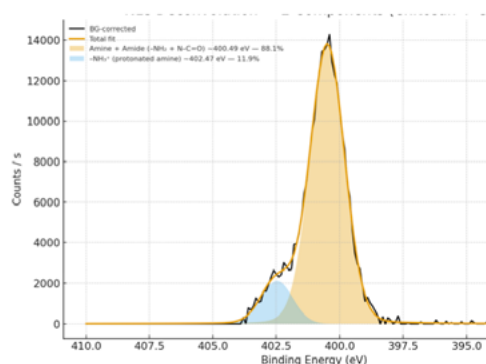
N1s спектрінде аминдік, амидтік және протондалған амин топтарына сәйкес келетін компоненттер анықталды. Бұл модификациядан кейін хитозанның функционалдық топтарының сақталғанын растайды. O1s спектрінде гидроксил, эфир, карбонил және карбоксил топтарына жататын оттегі түрлері анықталды. Аталған топтардың болуы хитозан құрамымен қатар, GO енгізілгенін де көрсетеді. C1s спектрінде C-C/C-H, C-N/C-O және O-C=O байланыстарына сәйкес келетін компоненттер анықталды. Бұл хитозан матрицасы мен графен оксиді арасында молекулааралық өзара әрекеттесулердің түзілгенін дәлелдейді. Алынған нәтижелер әзірленген тректік мембраналар бетінің графен оксидімен сәтті модификацияланғанын көрсетеді.



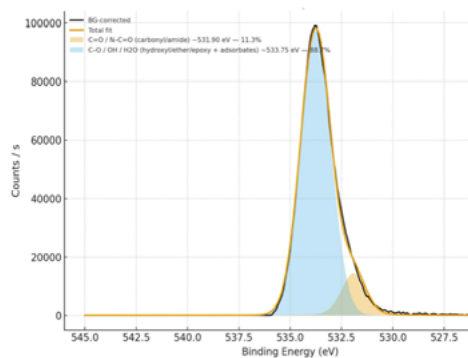
(a)



(б)



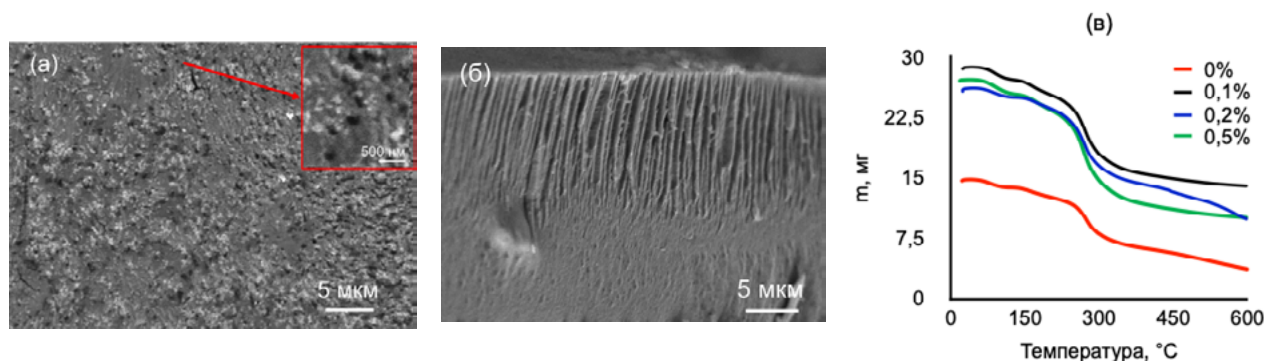
(в)



(г)

2-сурет. Ch_GO (0,2 масс.% GO) үлгісінің XPS шолу спектрі, онда C, N және O элементтеріне тән шыңдар көрсетілген. Кірістірме шолуда сканерлеу нәтижесінде есептелген беттік атомдардың концентрациялары (а), сондай-ақ Ch_GO TM үшін C 1s (б), O 1s (в) және N 1s (г) аймақтарындағы жоғары ажыратымдылықтағы спектрлер келтірілген.

Химиялық өңдеу нәтижесінде мембранада кеуекті құрылымның пайда болғанын анықтау үшін үлгілерге сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) арқылы талдау жүргізілді (3-сурет). Зерттеу барысында графен оксиді қосылған хитозан мембраналарының электрондық шоққа сезімтал екені анықталды.



3-сурет. Ch_GO (GO 0,2 масс.%) ТМ бетінің (а) және көлденең сынған қимасының (б) электрондық микрофотосуреттері, GO мөлшеріне байланысты Ch ТМ термогравиметриялық талдау (ТГА) қисықтары (в).

Электрондық шоқтың қарқындылығы барынша төмен болған жағдайда да үлгі бетінде сәулеленуге байланысты айқын өзгерістер орын алды. Атап айтқанда, жекелеген аймақтардың бұзылуы және бастапқы морфологиялық құрылымның өзгеруі байқалды. Осы ерекшелік жоғары үлкейтуде мембрана бетінің толық морфологиялық сипаттамасын алуға мүмкіндік бермеді. Сондықтан кеуектердің құрылымын жақсырақ көрсету үшін СЭМ кескіндеріне қосымша үлкейтілген аймақтар енгізілді (3а-сурет, inset). Бұл фрагменттер электрондық шоқтың әсерінен үлгі құрылымының айтарлықтай өзгеруінсіз кеуектердің орналасуын және олардың пішінін анық көруге мүмкіндік береді.

Ch_GO ТМ термиялық тұрақтылығын зерттеу

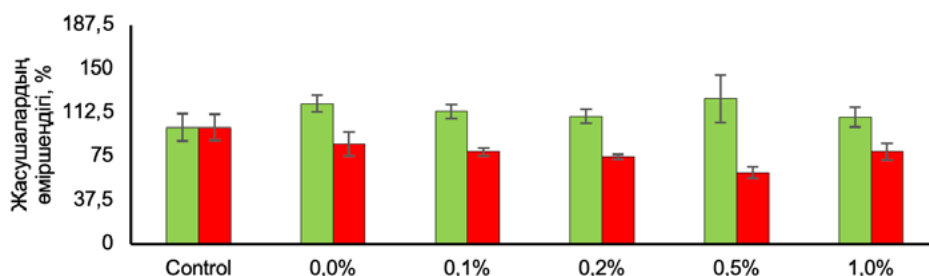
Зв-суретте бастапқы хитозан мембранасының (Ch) және құрамында 0,1 масс.%; 0,2 масс.% және 0,5 масс.% графен оксиді бар Ch_GO композиттік мембраналарының термогравиметриялық қисықтары көрсетілген. Зерттелген барлық үлгілер үшін масса жоғалуының екі сатылы сипаты байқалады. Алғашқы өзгеріс 50-120 °C аралығында жүреді және үлгі құрамындағы физикалық байланысқан әрі адсорбцияланған судың бөлуімен байланысты. Одан кейінгі 250-400 °C аралығында тіркелетін негізгі масса жоғалуы хитозанның полимерлік тізбектерінің термиялық ыдырауымен сипатталады.

Зерттелген концентрациялар диапазонында (0,1–0,5 масс.%) графен оксидін енгізу термиялық ыдырау сипатына және негізгі температуралық ауысулардың орналасуына елеулі әсер етпейді. Сонымен қатар, барлық Ch_GO композиттік мембраналары бастапқы хитозан мембранасымен салыстырғанда көміртекті қалдықтың жоғары шығымымен сипатталады. Бұл олардың термиялық тұрақтылығының артқанын көрсетеді. Құрамында 0,1 және 0,2 масс.% GO бар үлгілер үшін ең ұқсас термогравиметриялық қисықтар байқалды. Ал графен оксидінің мөлшерін 0,5 масс.% дейін және одан әрі арттыру композиттердің термогравиметриялық мінез-құлқында айқын өзгерістерге әкелмейді. Алынған нәтижелер әдебиет деректерімен сәйкес келеді. Оларға сай хитозан-графен оксиді композиттерінің термиялық тұрақтылығының жоғарылауы фазаралық сутектік байланыстардың түзілуімен, полимер тізбектерінің қозғалғыштығының шектелуімен және термиялық деструкция өнімдерінің ұшқыш компоненттерінің диффузиясына кедергі келтіретін графен оксидінің тосқауылдық әсерімен түсіндіріледі [12,13].

3. Ch ТМ биологиялық үйлесімділігін зерттеу

Дайындалған биополимерлі ТМ суда жақсы еритін болғандықтан және культуралық ортамен жанасқан кезде құрылымдық тұтастығын біртіндеп жоғалтатындықтан, цитоуыттылықты тікелей жанасу әдісімен бағалауды жүргізу қайталай алатын жағдайларды қамтамасыз етуге мүмкіндік бермейді. ISO 10993-5 және ISO 10993-12 талаптарына сәйкес, мұндай материалдар үшін осы зерттеуде материалдың экстракттарын алдын ала алу және кейіннен оны жасуша культурасына әсеріне негізделген экстракциялық әдіс қолданылды [14,15].

Үлгілердің биологиялық үйлесімділігін бағалау мақсатында NIN3T3 жасушаларының культу-
расында цитоуыттылық сынақтары жүргізілді. Зерттеу құрамында 0,1-1,0 масс.% GO бар Ch_OG TM үл-
гілерінің экстракттарын пайдалана отырып, 1,0 және 5,0 мг/мл концентрацияларында жүргізілді. NIN3T3
жасушаларының культу-расында жүргізілген зерттеу нәтижесінде 1,0 мг/мл концентрациясында барлық
үлгі топтарының цитоуытты әсер көрсетпейтіні анықталды (4-сурет). Модификацияланбаған Ch TM
(120%) және Ch_GO (GO 0,5 масс.%) тобында (124,6%) жасушалардың өміршеңдігінің жоғарылауына жал-
пы тенденция байқалды. Алайда, бақылау тобымен салыстырғандағы бұл айырмашылық статистикалық
тұрғыдан маңызды болмады (p -value >0.05).

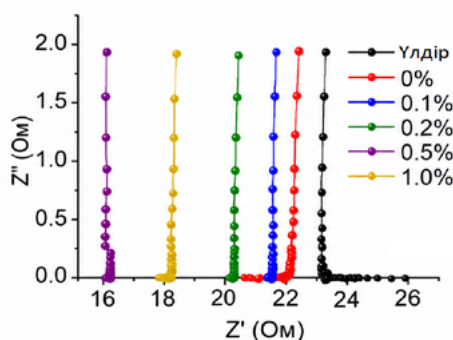


4-сурет. Ch_GO TM экстракттарының 24 сағаттық әсерінен кейінгі NIN3T3 фибробласттарының өміршеңдігі.

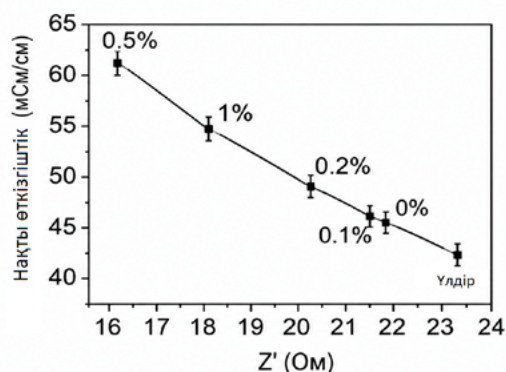
Осы нәтижелерге сүйене отырып, алынған композиттік тректік мембраналардың 1,0 мг/мл кон-
центрациядағы экстракты жасушалармен жақсы үйлесімділік көрсеткенін айтуға болады. Ал экстракт
концентрациясын 5,0 мг/мл-ге дейін арттырған кезде жасушалардың өміршеңдігі төмендеген. Бұл нәти-
же биодырайтын материалдардың медициналық қолданылу мүмкіндігін бағалау барысында олардың
экстракттарының концентрациясын ескерудің маңыздылығын көрсетеді.

4. Ch_GO TM электрохимиялық импеданстық спектроскопиясы

Найквист диаграммаларын талдау (5а-сурет) бастапқы тұтас хитозан үлдірінің (Ch film) ең жоға-
ры көлемдік кедергісімен сипатталатынын көрсетеді. Тректік құрылым қалыптасқаннан кейін кедергі
төмендейді. Бұл мембрана арқылы иондарының тиімдірек тасымалдануын қамтамасыз ететін өтпелі ке-
уктер жүйесінің түзілуімен байланысты болуы мүмкін [16].



(a)



(б)

5-сурет. Ch_GO TM негізіндегі ГПЭ үшін Найквист диаграммалары (a)
және GO мөлшерінің ГПЭ TM иондық өткізгіштігіне әсері (б).

Тректік мембраналарды графен оксидімен модификациялау көлемдік кедергінің одан әрі төмен-
деуімен қатар жүреді. R_b мәнінің ең төмен көрсеткіші құрамында 0,5 масс.% GO бар үлгіде байқалды, бұл

зерттелген мембраналар арасындағы иондық өткізгіштіктің ең жоғары мәніне сәйкес келеді. Алынған әсер, мүмкін, дамыған кеуекті құрылым мен графен оксидінің құрамында оттегі бар функционалдық топтарының бірлескен әсерімен байланысты. Бұл топтар полимер матрицасындағы иондарының тасымалдануын жеңілдетуі мүмкін [17]. GO мөлшерін 1,0 масс.% дейін одан әрі арттырған кезде көлемдік кедергінің біршама жоғарылауы байқалады. Болжам бойынша, бұл жоғары концентрацияларда толтырғыштың матрица ішінде таралуының өзгеруімен байланысты, соның нәтижесінде иондардың миграциясы үшін қолайлы жағдайлар нашарлайды.

Әзірленген толықтай қатты күйдегі электролит ашық дереккөздерде ұсынылған биополимерлік аналогтармен салыстырғанда бәсекеге қабілетті сипаттамаларды көрсетеді, әсіресе булануға және ағып кетуге бейім сұйық пластификаторлардың болмауын ескергенде (1-кесте).

1-кесте. Хитозан мен GO негізіндегі ГПЭ-нің иондық өткізгіштігін салыстырмалы бағалау

Электролит құрамы	Иондық өткізгіштік, См/см	Дереккөз
Ch_GO TeMs (GO 0.5%)	$6,15 \times 10^{-5}$	Осы зерттеу
Ch-CL	$\sim 3.50 \times 10^{-5}$	[18]
PEO/GO (1 wt %)	1.54×10^{-5} См/см	[19]
PEO/GO-IL (1%)	1.80×10^{-5} См/см	[20]
PEO-LiClO ₄ /0.3%GO	4.01×10^{-5} См/см	[21]
PEO/PVA/FGO(2)	5.20×10^{-5} См/см	[22]

Қорытынды

Зерттеу барысында хитозан мен графен оксиді негізінде кеуек өлшемін бақылауға болатын биоыдырайтын композиттік тректік мембраналар алынды. Ауыр иондармен сәулелендіргеннен кейін химиялық өңдеу әдісі арқылы оларды қалыптастырудың оңтайлы шарттары анықталды. РФЭС, СЭМ және термогравиметриялық талдау нәтижелері графен оксидінің хитозан матрицасына енгізілгенін, химиялық өңдеуден кейін кеуекті құрылымның түзілгенін және композиттердің термиялық сипаттамаларының жақсарғанын көрсетті. Биологиялық үйлесімділікті зерттеу нәтижелері 1,0 мг/мл концентрациясында экстракттардың цитоутты әсерінің жоқ екенін көрсетті. Электрохимиялық импеданстық спектроскопия нәтижелері бойынша графен оксидін енгізу көлемдік кедергінің төмендеуіне және иондық өткізгіштіктің жоғарылауына әкелді. Иондық өткізгіштіктің ең жоғары мәні GO мөлшері 0,5 масс.% болатын мембраналарды байқалды. Алынған нәтижелерге сүйене отырып, Ch_GO тректік мембраналарын толық қатты күйдегі электрохимиялық құрылғыларда қолдануға арналған гель-полимерлі электролиттер үшін негіз ретінде пайдаланудың мүмкіндігі бар деп қарастыруға болады.

Қосымша материал: қосымша берілген файлда ұсынылған.

Алғыс айту

Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылыми комитеті қаржыландыратын AP23487226 ГФ және BR28713053 ПЦФ жобалары шеңберінде орындалды.

Авторлардың үлесі

Концептуализация, **Жумабаев А.М.**; әдістеме, **Жумабаев А. М.**; бағдарламалық қамтамасыз ету, **Иванов И.А.**; Ракишева С. Р. валидация, **Жумабаев А.М.**, **Ракишева С.Р.**, формалды талдау, **Есенғалиева Н.Б.**, **Жумабаев А.М.**, **Бабенова А.М.**, **Қойшыбайқызы Т.**; зерттеу жүргізу, **Есенғалиева Н.Б.**, **Жумабаев А.М.**, **Ракишева С.Р.**, **Шокаев А.М.**, **Бабенова А.М.**, **Қойшыбайқызы Т.**; ресурстармен қамтамасыз ету, **Ракишева С.Р.**; деректерді басқару, **Жумабаев А.М.**; жазу - бастапқы қолжазба жобасын дайындау, **Жумабаев**

А.М., Есенгалиева Н.Б., Бабенова А.М., Қойшыбайқызы Т.; жазу — рецензиялау және өңдеу, **Есенгалиева Н.Б., Жумабаев А.М., Бабенова А.М.;** визуализация, **Жумабаев А.М.;** жетекшілік, **Жумабаев А.М** және **Ракишева С.Р.,** жобаны басқару, **Жумабаев А.М** және **Ракишева С.Р.;** қаржыландыруды алу, **Жумабаев А.М** және **Ракишева С.Р.** Барлық авторлар қолжазбаның жарияланған нұсқасын оқып, келісімін берді.

Мүдделер қақтығысы

Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Қолжазбаны дайындау процесінде генеративті ЖИ және ЖИ пайдаланатын технологияларды пайдалану туралы мәлімдеме

Осы қолжазбаны дайындау барысында авторлар қазақ және ағылшын тілдеріндегі мәтіннің грамматикасын тексеру, тілдік рәсімделуін жақсарту және деректерді талдау, нәтижелерді интерпретациялау және қорытындыларды тұжырымдау жұмыстары толығымен авторлар тарапынан орындалды. Аталған құралдарды пайдаланғаннан кейін авторлар алынған мәтінді мұқият тексеріп, оқылымдылығын арттыру мақсатында Grammarly және ChatGPT-4o құралдарын пайдаланды. Мақаланың ғылыми мазмұны, деректерді талдау нәтижелерді интерпретациялау және қорытындыларды тұжырымдау жұмыстары толығымен авторлар тарапынан орындалды. Аталған құралдарды пайдаланғаннан кейін авторлар алынған мәтінді мұқият тексеріп түзетті және осы жарияланымның мазмұнына толық жауапты болады.

Әдебиеттер тізімі

1. N. A. Aimanova, A. A. Almanov, S. Alipoori, M. Barsbay, A. M. Zhumabayev, D. T. Nurpeisova, & A. A. Mashentseva, *Development of the all-solid-state flexible supercapacitor membranes via RAFT-mediated grafting and electrospun nanofiber modification of track-etched membranes*, RSC Advances, 15 (8), 6260–6280 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4RA08055F>
2. G. Behzadi Pour, H. Nazarpour Fard, & L. Fekri Aval, *A Comparison of the Electrical Properties of Gel Polymer Electrolyte-Based Supercapacitors: A Review of Advances in Electrolyte Materials*, Gels, 10 (12), 803 (2024). <https://doi.org/10.3390/GELS10120803>
3. M. S. K. Chowdury, Y. J. Cho, S. B. Park, & Y. Park, *Review—Functionalized Graphene Oxide Membranes as Electrolytes*, Journal of The Electrochemical Society, 170 (3), 033503 (2023). <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ACC35E>
4. B. Eslami, I. Ghasemi, & M. Esfandeh, *Using Pegylated Graphene Oxide to Achieve High Performance Solid Polymer Electrolyte Based on Poly(ethylene oxide)/Polyvinyl Alcohol Blend (PEO/PVA)*, Polymers, 15 (14), 3063 (2023). <https://doi.org/10.3390/POLYM15143063>
5. S. Gruber, & A. Nickel, *Toxic or not toxic? The specifications of the standard ISO 10993-5 are not explicit enough to yield comparable results in the cytotoxicity assessment of an identical medical device*, Frontiers in Medical Technology, 5, 1-14 (2023). <https://doi.org/10.3389/FMEDT.2023.1195529>
6. D. Han, L. Yan, W. Chen, & W. Li, *Preparation of chitosan/graphene oxide composite film with enhanced mechanical strength in the wet state*, Carbohydrate Polymers, 83 (2), 653–658 (2011). <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2010.08.038>
7. Z. Hu, X. Zhang, J. Liu, & Y. Zhu, *Ion Liquid Modified GO Filler to Improve the Performance of Polymer Electrolytes for Li Metal Batteries*, Frontiers in Chemistry, 8, 232 6. (2020). <https://doi.org/10.3389/FCHEM.2020.00232>
8. K. H. Khan, Y. Golitsyn, D. Reichert, J. Kressler, & H. Hussain, *Graphene Oxide-Grafted Hybrid Diblock Copolymer Brush (GO-graft-PEG6k-block-P(MA-POSS)) as Nanofillers for Enhanced Lithium Ion Conductivity of PEO-Based Nanocomposite Solid Polymer Electrolytes*, The Journal of Physical Chemistry. B, 127 (9), 2066–2082 (2023). <https://doi.org/10.1021/ACS.JPCB.2C07699>
9. Z. Lu, L. Zou, X. Zhou, D. Huang, & Y. Zhang, *High strength chitosan hydrogels prepared from NaOH/urea aqueous solutions: the role of thermal gelling*, Carbohydrate Polymers, 297, 120054 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.120054>

10. S. M. Mousavi, S. A. Hashemi, M. Y. Kalashgrani, A. Gholami, M. Binazadeh, W. H. Chiang, & M. M. Rahman, *Recent advances in energy storage with graphene oxide for supercapacitor technology*, Sustainable Energy & Fuels, 7 (21), 5176–5197 (2023). <https://doi.org/10.1039/D3SE00867C>
11. N. F. Nur, K. S. Loh, A. B. Mohamad, A. A. H. Kadhum, & K. L. Lim, *Sintesis dan pencirian membran biokomposit kitosan-selulosa untuk aplikasi sel bahan Api*, Malaysian Journal of Analytical Sciences, 20 (4), 885–891 (2016). <https://doi.org/10.17576/MJAS-2016-2004-24>
12. M. M. Rahman Khan, & N. Chakraborty, *Conducting Polymer-Based Gel Materials: Synthesis, Morphology, Thermal Properties, and Applications in Supercapacitors*, Gels, 10 (9), 553 (2024). <https://doi.org/10.3390/GELS10090553/S1>
13. R. Ramakrishnan, & A. C. Daly, *Revisiting ISO 10993-5 In Vitro Cytotoxicity Standard Tests for Evaluation of Extracellular Matrix-Based Biomaterials*, International Journal of Biomaterials, 1, 1-27 (2026). <https://doi.org/10.1155/IJBM>
14. P. R. Rege, & L. H. Block, *Chitosan processing: influence of process parameters during acidic and alkaline hydrolysis and effect of the processing sequence on the resultant chitosan's properties*, Carbohydrate Research, 321 (3–4), 235–245 (1999). [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(99\)00172-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(99)00172-X)
15. M. S. Rostami, & M. M. Khodaei, *Recent advances of chitosan-based nanocomposites for supercapacitor applications: Key challenges and future research directions*, Journal of Energy Storage, 72, 108344 (2023). <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.108344>
16. P. K. Sahoo, N. Kumar, A. Jena, S. Mishra, C. P. Lee, S. Y. Lee, & S. Park, *Recent progress in graphene and its derived hybrid materials for high-performance supercapacitor electrode applications*, RSC Advances, 14 (2), 1284–1303 (2024). <https://doi.org/10.1039/D3RA06904D>
17. C. Thambiliyagodage, M. Jayanetti, A. Mendis, G. Ekanayake, H. Liyanaarachchi, & S. Vigneswaran, *Recent Advances in Chitosan-Based Applications—A Review*, Materials, 16 (5), 2073 (2023). <https://doi.org/10.3390/MA16052073>
18. J. Wen, Q. Zhao, X. Jiang, G. Ji, R. Wang, G. Lu, J. Long, N. Hu, & C. Xu, *GrapheneOxide Enabled Flexible PEO-Based Solid PolymerElectrolyte for All-Solid-State Lithium Metal Battery*, ACS Applied Energy Materials, 4 (4), 3660–3669 (2021). <https://doi.org/10.1021/ACSAEM.1C00090>
19. X. Xue, L. Wan, W. Li, X. Tan, X. Du, & Y. Tong, *A Self-Healing Gel Polymer Electrolyte, Based on a Macromolecule Cross-Linked Chitosan for Flexible Supercapacitors*, Gels, 9 (1), 8 (2022). <https://doi.org/10.3390/GELS9010008>
20. C. Yu, H. Sun, L. Yao, & Y. Weng, *NaOH/Urea-Compatible Chitosan/Carboxymethylcellulose Films: Orthogonal Optimization of Packaging Properties*, Molecules, 30 (11), 2279 (2025). <https://doi.org/10.3390/MOLECULES30112279>
21. Zhang, W., & Xia, W. *Dissolution and stability of chitosan in a sodium hydroxide/urea aqueous solution*, Journal of Applied Polymer Science, 131 (3). (2014). <https://doi.org/10.1002/APP.39819>
22. P. P. Zuo, H. F. Feng, Z. Z. Xu, L. F. Zhang, Y. L. Zhang, W. Xia, & W. Q. Zhang, *Fabrication of biocompatible and mechanically reinforced graphene oxide-chitosan nanocomposite films*, Chemistry Central Journal, 7 (1), 39 (2013). <https://doi.org/10.1186/1752-153X-7-39>

**Жумабаев А.М.*, Ракишева С.Р., Есенғалиева Н.Б., Бабенова А.М.,
Қойшыбайқызы Т., Иванов И.А., Шокаев А.М.**

*Институт ядерной физики Агентства Республики Казахстан по атомной энергии,
Алматы, Казахстан*

*(E-mail: *a.zhumabayev@inp.kz, s.rakisheva@inp.kz, n.esengalieva@inp.kz, aigerimbabenova@gmail.com,
tkoishybaikyzy04@gmail.com, i.ivanov@inp.kz., aibek.shokayev@gmail.com)*

**Разработка биосовместимых композитных трековых мембран на основе хитозана,
модифицированного оксидом графена, и комплексное исследование их структуры,
биосовместимости и транспортных свойств**

Аннотация. Разработаны биоразлагаемые композитные трековые мембраны на основе хитозана, модифицированного оксидом графена. Методом SRIM определены параметры облучения тяжелыми ионами, а оптимизация условий химического травления обеспечила формирование сквозной пористой структуры. Для исследования структуры и состава сформированных мембран использованы методы РФЭС и СЭМ, а термические свойства исследованы методом термогравиметрического анализа. Полученные результаты подтвердили успешную модификацию мембран оксидом графена, формирование трековых пор и повышение термической стабильности композитов. Исследование биосовместимости показало отсутствие цитотоксического действия экстрактов мембран при концентрации 1,0 мг/мл. По данным электрохимической импедансной спектроскопии введение оксида графена способствовало снижению объемного сопротивления и увеличению ионной проводимости, максимальной при содержании GO 0,5 мас.%. Разработанные мембраны перспективны в качестве матриц гель-полимерных электролитов для полностью твердотельных суперконденсаторов. В ходе исследования последовательно проведены этапы получения мембран, исследования их структуры, оценки биосовместимости и определения электрохимических свойств. Это позволило систематически охарактеризовать различные свойства разработанных композитных мембран и подтвердить результаты проведенных исследований.

Ключевые слова: трековые мембраны; хитозан; оксид графена; биосовместимость; гель-полимерный электролит; полностью твердотельные суперконденсаторы.

**Zhumabayev A.M.*, Rakisheva S.R., Yessengaliyeva N.B., Babenova A.M.,
Koishybaikyzy T., Ivanov I.A., Shokayev A.M.**

*The Institute of Nuclear Physics of the Agency of the Republic of Kazakhstan
for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan*

*(E-mail: *a.zhumabayev@inp.kz, s.rakisheva@inp.kz, n.esengaliyeva@inp.kz, aigerimbabenova@gmail.com,
tkoishybaikyzy04@gmail.com, i.ivanov@inp.kz, aibek.shokayev@gmail.com)*

**Development of Biocompatible Composite Track-Etched Membranes Based
on Graphene Oxide-Modified Chitosan and Comprehensive Investigation of Their Structure,
Biocompatibility, and Transport Properties**

Abstract. Biodegradable composite track membranes based on chitosan modified with graphene oxide (GO) were developed. The parameters of heavy-ion irradiation were determined using the SRIM method, and optimization of the chemical etching conditions ensured the formation of a through porous structure. The structure and composition of the developed membranes were studied using XPS and SEM, while their thermal properties were investigated by thermogravimetric analysis. XPS, SEM, and thermogravimetric analysis confirmed the successful modification of the membranes with graphene oxide, the formation of track pores, and an increase in the thermal stability of the composites. Biocompatibility studies showed no cytotoxic effect of membrane extracts at a concentration of 1.0 mg/mL. According to electrochemical impedance spectroscopy, the introduction of graphene oxide contributed to a decrease in volume resistance and an increase in ionic conductivity, which was maximal at a GO content of 0.5 wt.%. The developed membranes are promising as matrices for gel-polymer electrolytes for fully solid-state supercapacitors.

Keywords: track-etched membranes; chitosan; graphene oxide; biocompatibility; gel polymer electrolyte; all-solid-state supercapacitors.

Авторлар туралы мәлімет:

Жумабаев А. М. – хат-хабар авторы, Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институты, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан.

Ракишева С.Р. – PhD, Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институты, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан.

Есенгалиева Н.Б. – Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институты, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан.

Бабенова А.М. - Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институты, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан.

Қойшыбайқызы Т. - Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институты, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан.

Иванов И.А. - Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институты, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан.

Шокаев А.М. - Қазақстан Республикасы Атом энергиясы жөніндегі агенттігінің Ядролық физика институты, Ибрагимов көшесі, 1, 050032, Алматы, Қазақстан.

Жумабаев А. М. – автор для корреспонденции, Институт ядерной физики АРКАЭ, ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан.

Ракишева С.Р. – PhD, Институт ядерной физики АРКАЭ, ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан.

Есенгалиева Н.Б. – Институт ядерной физики АРКАЭ, ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан.

Бабенова А.М. – Институт ядерной физики АРКАЭ, ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан.

Қойшыбайқызы Т. – Институт ядерной физики АРКАЭ, ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан.

Иванов И.А. – Институт ядерной физики АРКАЭ, ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан.

Шокаев А.М. – Институт ядерной физики АРКАЭ, ул. Ибрагимова, 1, 050032, Алматы, Казахстан.

Zhumabaev A. M. – the corresponding author, The Institute of Nuclear Physics of the ARKAE, 1 Ibragimov str., 050032, Almaty, Kazakhstan.

Rakisheva S. R. - PhD, The Institute of Nuclear Physics of the ARKAE, 1 Ibragimov str., 050032, Almaty, Kazakhstan.

Esengalieva N. B. - The Institute of Nuclear Physics of the ARKAE, 1 Ibragimov str., 050032, Almaty, Kazakhstan.

Babenova A. M. - The Institute of Nuclear Physics of the ARKAE, 1 Ibragimov str., 050032, Almaty, Kazakhstan.

Koishybaikyzy T. – The Institute of Nuclear Physics of the ARKAE, 1 Ibragimov str., 050032, Almaty, Kazakhstan.

Ivanov I.A. - The Institute of Nuclear Physics of the ARKAE, 1 Ibragimov str., 050032, Almaty, Kazakhstan.

Shokayev A.M. – The Institute of Nuclear Physics of the ARKAE, 1 Ibragimov str., 050032, Almaty, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).