

FTAMP 34.39.15; 60.13.23

<https://doi.org/10.26577/bb20251057>

И.С. Савицкая¹, Д.Х. Шокатаева¹, И.И. Абашидзе^{2*},
А.Б. Талипова¹, С.Д. Жантлесова¹, Ж. Хамитқызы¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²«AMD клиникасы» ЖШС, Алматы, Қазақстан

*e-mail: inara_abashidze@mail.ru

БАКТЕРИЯЛЫҚ ЦЕЛЛЮЛОЗА НЕГІЗІНДЕГІ НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ БИОМАТЕРИАЛДЫ СТЕРИЛДЕУ ӘДІСІН ТАҢДАУ

Бактериялық целлюлоза (БЦ), гидроксипатит (ГАП) және МХене негізіндегі нанокөпозиттер биосәйкестік, механикалық тұрақтылық, электрөткізгіштік және ИҚ-сәулені қарқынды сіңіру қабілетінің үйлесіміне байланысты регенеративті медицина мен фототермикалық технологиялар үшін перспективалы биоматериалдар класына жатады. Алайда МХене компонентінің және целлюлозалық матрицаның физика-химиялық әсерлерге жоғары сезімталдығы олардың негізгі функционалдық қасиеттерін жоғалтпай стерильдеуге мүмкіндік беретін әдісті мұқият таңдауды талап етеді.

Осы жұмыста БЦ/ГАП/МХене нанокөпозитіне қатысты тоғыз стерильдеу әдісінің – автоклавтау, құрғақ ауада қыздыру, этиленоксидпен өңдеу, үсәулендіру, электрондық шоқпен (E-beam) сәулендіру, Ультракүлгін сәуле, озондау, аса критикалық CO₂ және суық плазма – салыстырмалы зерттеуі жүргізілді. Үлгілердің стерильдігін қоректік орталарға тікелей егу әдісімен анықтап, микроб өсуінің болуына қарай стерилизация тиімділігі есептелді. Толық стерильдік ультракүлгін сәулені қоспағанда (50 %) және аса критикалық CO₂ өңдеуді қоспағанда (90 %), барлық әдістер үшін қамтамасыз етілді.

Стерилизация әдістерінің материалдың құрылымы мен қасиеттеріне әсері SEM-микроскопия, кеуектілікті анықтау, механикалық сынақтар, сондай-ақ электрөткізгіштік пен фототермикалық белсенділікті өлшеу арқылы бағаланды. Ең күшті құрылымдық бұзылулар мен беріктік сипаттамаларының төмендеуі термиялық өңдеу және озондау кезінде байқалды. Радиациялық әдістер орташа деңгейдегі өзгерістерге әкелді, ал этиленоксид, аса критикалық CO₂ және суық плазма өңдеуі морфологияның минималды деградациясын көрсетті. Суық плазма және EtO бастапқы өткізгіштік пен фототермикалық жауаптың 94–98 % дейін сақталуын қамтамасыз етті, ал термиялық өңдеу МХене-нің термо-тотықтырғыш деградациясына байланысты функционалдылықтың айқын төмендеуіне алып келді.

Жалпы бағалау суық плазма мен этиленоксидтің БЦ/ ГАП /МХене көпозитінің стерильдігін қамтамасыз ету және оның құрылымдық-функционалдық қасиеттерін сақтау арасындағы оңтайлы теңгерімді ұсынатынын көрсетті. Бұл әдістер материалды биомедициналық қолдануға дайындау үшін ең перспективалы болып табылады.

Түйін сөздер: БЦ/ГАП/МХене, нанокөпозит, стерилизация әдістері, суық плазма, этиленоксид, аса критикалық CO₂.

I.S. Savitskaya¹, D.Kh. Shokatayeva¹, I.I. Abashidze^{2*},
A.B. Talipova¹, S.D. Zhantlesova¹, Zh. Khamitkyzy¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²LLP «AMD Clinic», Almaty, Kazakhstan

*e-mail: inara_abashidze@mail.ru

Selection of a method for sterilization of nanostructured biomaterial based on bacterial cellulose

Nanocomposites based on bacterial cellulose (BC), hydroxyapatite (HAp), and MXene represent a promising class of biomaterials for regenerative medicine and photothermal technologies due to their combination of biocompatibility, mechanical stability, electrical conductivity, and strong infrared absorption capability. However, the high sensitivity of MXene phases and the cellulose matrix to physicochemical impacts requires careful selection of sterilization approaches that provide sterility without substantial loss of key functional properties.

This study presents a comparative evaluation of nine sterilization methods – autoclaving, dry heat, ethylene oxide treatment, γ -irradiation, electron beam (E-beam) irradiation, ultraviolet irradiation, ozonation, supercritical CO₂ treatment, and cold plasma – applied to BC/HAp/MXene nanocomposites. Sterility was assessed by direct plating on nutrient media; sterilization efficiency was calculated based on microbial growth. Complete sterility was achieved for all methods except UV (50%) and CO₂ treatment (90%).

The effects of sterilization on material structure and properties were analyzed using SEM imaging, porosity measurement, mechanical testing, electrical conductivity assessment, and photothermal activity evaluation. Thermal treatment and ozonation caused the most pronounced structural damage and reduction in mechanical strength. Radiation-based methods induced moderate changes, whereas ethylene oxide, supercritical CO₂, and cold plasma treatment resulted in minimal morphological degradation. Cold plasma and EtO preserved up to 94–98% of the initial conductivity and photothermal response, while thermal treatment led to significant loss of functional performance due to thermo-oxidative degradation of MXene.

Comprehensive analysis demonstrated that cold plasma and ethylene oxide provide the best balance between sterility and preservation of structural–functional properties of BC/HAp/MXene nanocomposites. These methods are the most promising for preparing such materials for biomedical applications.

Keywords: BC/HAp/MXene, nanocomposite, sterilization methods, cold plasma, ethylene oxide, supercritical CO₂.

И.С. Савицкая¹, Д.Х. Шокатаева¹, И.И. Абашидзе^{2*},
А.Б. Талипова¹, С.Д. Жантлесова¹, Ж. Хамиткызы¹

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²ТОО «Клиника AMD», Алматы, Казахстан

*e-mail: inara_abashidze@mail.ru

Подбор способа стерилизации наноструктурированного биоматериала на основе бактериальной целлюлозы

Наноккомпозиты на основе бактериальной целлюлозы (БЦ), гидроксиапатита (ГАП) и MXene представляют перспективный класс биоматериалов для регенеративной медицины и фототермических технологий благодаря сочетанию биосовместимости, механической стабильности, электропроводности и выраженной способности к поглощению ИК-излучения. Однако высокая чувствительность компонента MXene и целлюлозной матрицы к физико-химическим воздействиям требует тщательного выбора стерилизационных подходов, позволяющих достичь стерильности без существенной потери ключевых функциональных свойств.

В настоящей работе проведено сравнительное исследование девяти методов стерилизации – автоклавирования, сухого жара, этиленоксидной обработки, γ -облучения, электронно-пучкового (E-beam) облучения, УФ-излучения, озонирования, обработки сверхкритическим CO₂ и холодной плазмой – применительно к наноккомпозиту БЦ/ГАП/MXene. Стерильность образцов определяли методом прямого посева на питательные среды; по результатам регистрации роста рассчитывали эффективность стерилизации. Полная стерильность была достигнута для всех методов, кроме УФ-облучения (50 %) и CO₂-обработки (90 %).

Влияние методов на структуру и свойства материала оценивали с помощью SEM-микроскопии, определения пористости, механических испытаний, а также измерений электропроводности и фототермической активности. Максимальные структурные нарушения и снижение прочностных характеристик наблюдались после термической обработки и озонирования. Радиационные методы вызывали умеренные изменения, тогда как обработка этиленоксидом, сверхкритическим CO₂ и холодной плазмой обеспечивала минимальную деградацию морфологии. Холодная плазма и EtO позволили сохранить до 94–98 % исходной проводимости и фототермического отклика, в то время как термическая обработка приводила к выраженной потере функциональности вследствие термо-окислительной деградации MXene.

Комплексная оценка показала, что холодная плазма и этиленоксид представляют наилучший баланс между стерильностью и сохранением структурно-функциональных характеристик БЦ/ГАП/MXene. Эти методы являются наиболее перспективными для подготовки материала к биомедицинскому применению.

Ключевые слова: БЦ/ГАП/ MXene, наноккомпозит, методы стерилизации, холодная плазма, этиленоксид, сверхкритический CO₂.

Қысқартулар: БЦ – бактериалды целлюлоза, ГАП – гидроксипатит, МХеке – өтпелі металдардың екіөлшемді карбидтері/нитридтері, EtO – этилен оксиді, γ – гамма-сәулелендіру, E-beam – электрондық сәулелендіру, UV – ультракүлгін сәулелендіру, ScCO₂ – аса критикалық көмірқышқыл газы

Кіріспе

Медициналық құрылғылар мен биоматериалдардың стерилизациясы – олардың қауіпсіздігін және нормативтік құжаттар талаптарына сәйкестігін қамтамасыз етудегі негізгі кезең. Тіндермен немесе жара бетімен тікелей жанауға арналған бұйымдар үшін стерильділік жай ғана ұсыныс емес – ол міндетті талап болып табылады (мысалы, медициналық бұйымдарды радиациямен стерилдеу жөніндегі ISO 11137 стандартына сәйкес) [1]. Бұл ретте стерилдеу әдісін таңдау материалдың ерекшеліктерін ескеруі тиіс: температура, ылғалдылық, радиациялық әсер немесе химиялық агенттер полисахаридті матрицалар үшін аса өзекті болып табылатын олардың құрылымында, механикалық және функционалдық қасиеттерінде өзгерістер тудыруы мүмкін [2].

Полисахарид материалдар – бактериялық целлюлоза, хитозан, альгинат және басқа да биополимерлер – жоғары биосәйкестікке, биоыдырағыштыққа және тіндердің регенерациясын стимулдауға қабілеттілігіне байланысты медицинада белсенді түрде қолданылып келеді. Алайда олардың жылу, ылғал, реактивтер және иондаушы сәулелену әсеріне сезімталдығы стерилизация әдісін таңдауда ерекше ұқыптылықты талап етеді [2]. Мысалы, Мооре және басқалар көрсеткендей, иондаушы сәулелену, автоклавтау және басқа да әдістер полисахаридті материалдардың полимерлік тізбектерінің үзілуіне, молекулалық массасының төмендеуіне, оптикалық қасиеттерінің өзгеруіне және механикалық беріктігінің төмендеуіне әкелуі мүмкін [3].

Бактериялық целлюлоза, гидроксипатит және МХеке негізіндегі биокөмпозит – бұл полимерлі-наноқұрылымды күрделі матрица. Мұндай көпкомпонентті жүйе толық стерильділікті қамтамасыз етіп қана қоймай, материалдың құрылымы, морфологиясы, фототермикалық және антибактериалдық қасиеттерін бұзбайтын стерилизация әдісін таңдауды қажет етеді. Әсіресе МХеке наноматериалы мен органикалық компоненттердің болуы стерилизация

процесін таңдауды одан әрі күрделендіреді: жоғары температуралы және агрессивті химиялық әдістер полисахарид матрицасының деградациясына және нанобөлшектердің тотығуына әкелуі мүмкін.

Осыған байланысты, зерттеудің мақсаты – берілген биокөмпозиттің құрылымдық, механикалық және функционалдық сипаттамаларын сақтай отырып, оның стерилизациясына арналған оңтайлы әдісті ғылыми тұрғыдан негіздеп, таңдау болып табылады.

Зерттеу материалдары мен әдістері

1. Стерилизация әдістері

Стерилизацияға дейін биокөмпозит үлгілері (қалыңдығы 1 мм пленкалар) бастапқы ылғалдылықты теңестіру және материал құрылымын тұрақтандыру мақсатында 20 °C температурада және 50 % салыстырмалы ылғалдылықта 48 сағат бойы кондиционерленді [4]. Одан кейін төменде сипатталған 9 стерилизация әдісі қолданылды:

1.1 Автоклавтау. Үлгілер пергамент қағазынан жасалған герметикалық қаптарға салынып, ISO 17665-1 стандартына сәйкес 121 °C температурада және 1 атм қысымда 20 минут бойы автоклавта өңделді [5]. Цикл аяқталғаннан кейін конденсат толық жойылғанша үлгілер бөлме температурасында кептірілді.

1.2 Құрғақ қыздырумен стерилизация. Үлгілер 160 °C температурада 1 сағат бойы кептіргіш шкафқа орналастырылды. Бұл режим Munarin және басқалар (2013) ұсынған, спораларды минималды экспозицияда тиімді инактивациялайтыны көрсетілген деректерге сүйене отырып таңдалды [2]. Өндеуден кейін үлгілер эксикаторда салқындалды.

1.3 Этиленоксидпен (EtO) стерилизация. Үлгілер Steri-VAC 3М стерилизаторының герметикалық камерасына орналастырылды. Газ 450 мг/л концентрацияда, 37 °C температурада және 60 % ылғалдылықта 4 сағат бойы берілді. Одан кейін ISO 11135-1 стандарты бойынша қалған EtO-ны шығару үшін 40 °C температурада 12 сағаттық аэрация жүргізілді [6].

1.4 Гамма-сәулелендіру. Стерилизация ⁶⁰Co көзі бар қондырғыда ISO 11137-2 стандартына сәйкес 10 кГр дозада (сәулелендіру жылдамдығы ≈ 1 кГр/сағ) жүргізілді. Дозиметриялық бақылау термоллюминесцентті детекторлар (TLD-100) арқылы қамтамасыз етілді. Сәулеленгеннен кейін үлгілер талдау жүргізілгенге дейін 20°C температурасында сақталды.

1.5 Электрондық-сәулелі сәулелендіру (E-beam). Үлгілер электрондық үдеткіште (энергиясы 10 МэВ, ток 0,5 мА) азот атмосферасында, тотығуды болдырмау үшін, өңделді. Доза 5 кГр құрады, ал өңдеу кезіндегі температура 35 °С-тан аспады [8].

1.6 Ультракүлгін сәулелендіру. Үлгілер бактерицидтік лампы бар камераға (254 нм, TUV G15T8, Philips) 20 см қашықтықта орналастырылып, 25 °С температурада әр жағынан 30 минуттан сәулелендірілді [9].

1.7 Озонмен стерилизация. Өңдеу озонаторда (O_3 генерациясы = 10 г/сағ) 20 °С температурада және 60 % салыстырмалы ылғалдылықта 30 минут бойы жүргізілді. Экспозициядан кейін үлгілер қалған озонды жою үшін бөлме температурасында 1 сағат бойы желдетілді [10].

1.8 Аса критикалық CO_2 ($ScCO_2$) арқылы стерилизация. Үдеріс 30 °С температурада және 38 МПа қысымда 60 минут бойы этанолдың керіткіші (5 көлем %) қатысында реакторда жүргізілді. Өңдеуден кейін камера баяу түрде атмосфералық қысымға дейін декомпрессияланды [11].

1.9 Суық плазмамен стерилизация. Стерилизация PICO Plasma System (Германия) қондырғысында O_2/Ar (1:1) қоспасында, 0,2 мбар қысымда, 50 Вт қуатта және бөлме температурасында 15 минут экспозициямен жүргізілді [12].

2. Стерилизация тиімділігін бағалау

Өңделген үлгілердің стерильділігін бағалау үшін коректік орталарға тікелей дақылдау әдісі қолданылды [13]. Стерилизациядан кейін әрбір үлгі (1×1 см) асептикалық жағдайда коректік агармен толтырылған Петри табақшасына орналастырылды. Инкубация 37 °С температурада 48 сағат жүргізілді.

Колониялардың өсуі визуалды түрде тіркелді. Агар бетінде колониялардың көрінбеуі үлгінің толық стерильді екенін көрсетті. Бақылау үшін өңделмеген үлгілер және бос табақшалар (теріс бақылау) қолданылды.

Тиімділік келесі формуламен есептелді: Стерилизация тиімділігі (%) = $(1 - N_{\text{тәжірибе}} / N_{\text{контроль}}) \times 100$, мұндағы $N_{\text{тәжірибе}}$ – өңделгеннен кейінгі колониялар саны, $N_{\text{контроль}}$ – бақылау үлгілеріндегі колониялар саны.

3. Морфология және сыртқы түрі

Морфологияны сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM) әдісімен JEOL JSM-7610F микроскопында 5 кВ үдеткіш кернеуінде зерттелді. Талдау алдында үлгілер алтынмен шашу әдісі арқылы қапталды. Бағалау жүргізілді: MXene-п-

ластиналардың таралуы, НАр-бөлшектерінің адгезиясы, микротрещиналар және бетінің кеуектілігі.

4. Механикалық қасиеттерді анықтау

БЦ/ГАП/MXene биокөмпозитінің механикалық сипаттамалары бір осьті созылу әдісімен анықталды. Сынақтар Instron 3345 сынақ машинасында (Instron, АҚШ) ISO 527-1:2019 стандартына сәйкес 5 мм/мин деформация жылдамдығында жүргізілді. Сынақ алдында үлгілер (10 × 50 мм, қалыңдығы ≈ 1 мм) 23 ± 2 °С температурада және 50 ± 5 % ылғалдылықта 48 сағат бойы кондицияланды. Алынған «кернеу–деформация» диаграммалары бойынша есептелді: Юнг модулі (Е, МПа) – қисықтың сызықтық бөлігінің көлбеуі ретінде; созу беріктігі (σ_u , МПа) – үзілу алдындағы максималды кернеу ретінде.

Әрбір өлшеу үш қайталауда жүргізілді. Орташа мәндер мен стандартты ауытқулар OriginPro 2023b бағдарламалық қамтамасыз етуін пайдалана отырып есептелді.

5. Кеуектілікті анықтау

Кеуектілік (%) этанолды сымдамайтын агент ретінде қолдану арқылы гравиметриялық әдіспен анықталды.

Үлгілерді бастапқыда кеуектілік құрылымын сақтау үшін лиофильді кептіру арқылы өңдеп, содан кейін тұрақты массасына дейін кептірді (m_1). Одан кейін үлгілерді 24 сағат бойы этанолға батырып, қайтадан салмақтарын өлшеді (m_2). Кеуектілік (Р, %) келесі формула арқылы есептелді: $P = (m_2 - m_1) / \rho_{\text{этанол}} \cdot V \times 100$, мұндағы V – үлгінің көлемі, ρ – этанолдың тығыздығы.

6. Электрөткізгіштік

Электрөткізгіштік (σ , S/cm) төрт-зондты контакт әдісімен Keithley 2400 SourceMeter қондырғысында өлшенді. Үлгілер 10 × 10 мм квадраттар түрінде кесіліп, 25 °С температурада және 50 % ылғалдылықта өлшенді. Сенімді контактты қамтамасыз ету үшін стандартты күміс пасталары қолданылды. Электрөткізгіштік формуласы: $\sigma = I/V \cdot l/A$, мұндағы I – ток, V – кернеу түсуі, l – зондтар арасындағы қашықтық, A – үлгінің қимасының ауданы.

7. Фототермиялық белсенділік

Фототермиялық тиімділік 808 нм ИҚ-лазер (интенсивтілігі 1 Вт/см²) көмегімен зерттелді. Беткі температураның жоғарылауы 10 минут бойы үздіксіз сәулелендіру кезінде жанаспайтын термометрмен өлшенді.

Температуралық жауап (ΔT) – бастапқы және максималды температуралар айырмашылығы ретінде анықталды.

Статистикалық деректерді өңдеу

Барлық эксперименттер кемінде үш қайталаымда ($n = 3$) жүргізілді. Нәтижелер орташа мән $\pm$ стандартты ауытқу ($M \pm SD$) түрінде берілді. Топтар арасындағы айырмашылықтардың маңыздылығы бір факторлы дисперсиялық талдау (ANOVA) және кейінгі Тьюки пост-хок тестімен бағаланды. Статистикалық маңыздылық деңгейі $p < 0,05$ деп қабылданды.

Зерттеу нәтижелері және оларды талдау

Тоғыз стерилизация әдісінің тиімділігін анықтау үшін БЦ/ГАП/МХене композитінің стерильдігі тікелей егу әдісі арқылы тексерілді. Әрбір үлгі (1×1 см) асептикалық жағдайда ет-пептонды агардың және тиісті қоректік ортаның бетіне орналастырылып, 37°C температурада 48 сағат инкубацияланды. Микробтық өсу визуал-

ды түрде бағаланды. Колониялардың болмауы толық стерильділікті көрсетті. Бақылау ретінде өңделмеген үлгілер және материал салынбаған стерильді Петри табақшалары пайдаланылды. Нәтижелер 1-кестеде келтірілген.

Композиттің стерилдеу тиімділігі мен морфологиясының сақталу дәрежесіндегі айырмашылықтар әрбір әдіске тән физика-химиялық әсер сипатына байланысты. Мысалы, гамма-сәулелену және электронды-шоғырлы сәуле ағымымен өңдеу полисахаридтердің радиолизін белсендіреді, нәтижесінде бос радикалдар түзіледі, бұл макромолекулалық тізбектердің ішінара бұзылуына және кросс-сілтемелердің түзілуіне әкеледі [14; 15]. Мұндай өзгерістер материалдың механикалық қасиеттеріне әсер етуі мүмкін, алайда микроорганизмдерді іс жүзінде толық инактивациялауды қамтамасыз етеді.

1-кесте – БЦ/ГАП/МХене композитін әртүрлі стерилизация әдістерімен өңдеу тиімділігі

№	Стерилизация әдісі	Агарға дақылдау нәтижелеріндегі бақылаулар	Стерилизация тиімділігі
1	Автоклавтау (121°C , 20 мин)	Өсу байқалмады	100 %
2	Құрғақ қыздыру (160°C , 1 сағ)	Өсу байқалмады	100 %
3	Этиленоксид (37°C , 4 сағ + 12 сағ аэрация)	Өсу байқалмады	100 %
4	Гамма-сәулелену (10 кГр)	Өсу байқалмады	100 %
5	Электронды-шоғырлы сәулелену (5 кГр)	Өсу байқалмады	100 %
6	Ультракүлгін сәуле (254 нм, 30 мин $\times$ 2 жақ)	Микробтық жүктеме бақылаумен салыстырғанда екі есе төмендеді	50 %
7	Озон (10 г/сағ, 30 мин)	Өсу байқалмады	100 %
8	Аса критикалық CO_2 (38 МПа, 30°C , 60 мин)	Аздаған өсу (2–3 колония)	90 %
9	Суық плазма (O_2/Ar , 15 мин)	Өсу байқалмады	100 %

Ионизирлейтін әдістерден айырмашылығы, суық плазма негізінен композит бетіне әсер етеді: оттегі мен азоттың активті түрлері жасушалық құрылымдарды тиімді түрде бұзады, матрицаның айтарлықтай термиялық деструкциясына жол бермей [16].

Ультракүлгін сәулелену айтарлықтай төмен тиімділікті көрсетеді (50 %), бұл сәулеленің ену тереңдігінің шектеулігі және полимерлік матрицаның ішінара экрандауымен байланысты. Мұндай эффект табиғи түрде ультракүлгін сәулеге төзімді биополимерлердің фотолизін эксперименттік зерттеулермен расталады [17].

Химиялық агенттер (этиленоксид және озон) әртүрлі механизмдер арқылы жоғары стерили-

зация деңгейін қамтамасыз етеді: сәйкесінше алкилрлеу және тотығу жолымен. Осылайша, озон қанттардың жеңіл беттік тотығуын тудыруы мүмкін, ал EtO өңдеуі қалдық улы газды жою үшін міндетті аэрацияны талап етеді [18].

Термиялық әдістер (автоклавтау және құрғақ қыздыру) сенімді стерилизацияны қамтамасыз еткенімен, жоғары температура әсерінен гликозидтік байланыстардың гидролизімен, кристалдылықтың төмендеуімен және полисахарид матрицасының жалпы деградациясымен қатар жүреді. Бұған қосымша, құрғақ қыздыру үлгінің қарқынды сусыздануына әкеледі, бұл кеуектердің коллапсын және бастапқы гидрогельдік үшөлшемді кеуекті құрылымның жоғалуын тудырады.

Бұл термотұрақсыз композиттер үшін олардың қолданылуын айтарлықтай шектейді [19].

Құрылымды сақтауды есепке алғанда ең жұмсақ әдіс – аса критикалық CO_2 : стерильділік шамамен 90 % деңгейінде қол жеткізіледі, бұл акуыздардың денатурациясы және бактериялардың липидтерін экстракциялау есебінен [20].

Осылайша, стерилизациялау қабілеті мен материалдың құрылымын сақтау дәрежесінің үйлесімі бойынша ең тиімді әдістер – суық плазма, этиленоксид, озон және гамма-сәулелендіру, ал УФ-сәулелендіру және термиялық әдістерді қосалқы ретінде қарастыруға болады.

БЦ/ГАП/МХене композитінің әртүрлі физика-химиялық әсерлерге төзімділігін кешенді бағалау үшін стерилдеуден кейінгі оның құрылымдық-функционалдық қасиеттерінің салыстырмалы сипаттамасы жүргізілді. Қолданылған әдістер әсер ету механизмі бойынша айтарлықтай ерекшеленетіндіктен (термиялық, радиациялық, химиялық, плазмалық және аса критикалық фаза әсері), олардың материалдың морфологиясына, механикалық параметрлеріне және функционалдық қасиеттеріне ықпалы да бірдей болмайды деп күтілді.

Зерттеу аясында композиттің бактериалды целлюлозаның бастапқы үшөлшемді құрылы-

мын және толтырғыштардың (ГАП және МХене) таралуын сақтайтыны, сондай-ақ өңдеуден кейін оның пайдалану сипаттамаларының өзгеретіндігі бағаланды. Талдау өзгерістерді микроқұрылымдық ұйымдасу деңгейінде (кеуектілік, морфология) және макроскопиялық сипаттамалар деңгейінде (механика, электрөткізгіштік) модельдеуді қамтыды, бұл бақылаған құбылыстарды сәйкес стерилизация әсерінің табиғатымен байланыстыруға мүмкіндік берді.

Атап айтқанда, әртүрлі стерилизация әдістерін қолданғаннан кейін келесі параметрлер бағаланды: сыртқы көрінісі және морфологиясы; механикалық қасиеттер: Юнг модулі (E), созылуға беріктік (σ_u); құрылымдық өзгерістер: кеуектілік; функционалдық қасиеттер: электрөткізгіштік және фототермикалық белсенділік.

Ең айқын морфологиялық зақымданулар БЦ/ГАП/МХене-де термиялық стерилизация және озон өңдеуден кейін байқалды (қысқару, жарықтар түзілуі, түс өзгеруі), ал γ - және электрондық сәулелену, EtO, ScCO_2 және әсіресе суық плазма бастапқы құрылымды минималды визуалды өзгерістермен сақтады.

Стерилизациядан кейін материалдардың механикалық қасиеттерінің нәтижелері 2-кестеде келтірілген.

2-кесте – Әртүрлі зарарсыздандыру әдістерінің БЦ/ГАП/МХене биоккомпозитінің механикалық қасиеттеріне әсері

№	Стерилизация әдісі	Температура / доза / экспозиция	Е-модульдің өзгеруі, %	σ_u өзгеруі, %
I. Термиялық әдістер				
1	Автоклав	121 °C, 1 атм, 20 мин	–28 %	–33 %
2	Құрғақ қыздыру	160 °C, 60 мин	–35 %	–40 %
II. Радиациялық әдістер				
3	Г- сәулелену	10 кГр (^{60}Co)	–12 %	–15 %
4	E-beam сәулелену	5 кГр (10 МэВ)	–10 %	–12 %
III. Химиялық әдістер				
5	Этиленоксид (EtO)	37 °C, 4 сағ + аэрация 12 сағ	–5 %	–8 %
6	Озон	10 г/ сағ, 30 мин	–22 %	–26 %
IV. Фото-химиялық/плазмалық әдістер				
7	Ультракүлгін сәулелену	254 нм, 30 мин × 2	–15 %	–18 %
8	Суық плазма (O_2/Ar)	50 Вт, 0.2 мбар, 15 мин	–3 %	–4 %
9	Аса критикалық CO_2 (ScCO_2)	30 °C, 38 МПа, 60 мин	–7 %	–9 %

Салыстырмалы талдау БЦ/ГАП/MXene биокөпестінің механикалық қасиеттерінің өзгеруі стерильдеу әдісінің табиғатына айтарлықтай тәуелді екенін көрсетті. БЦ/ГАП/MXene материалдарына механикалық тұрғыдан теріс әсер ету дәрежесі бойынша әдістер келесі ретпен орналасады: термиялық (құрғақ қыздыру > автоклав) $\approx$ озон > орташа әсер ететін (Ультракүлгін сәулелену, γ -, E-beam) > жұмсақ (ScCO_2 , EtO, суық плазма). Механикалық қасиеттер мен морфологияның сақталуы тұрғысынан БЦ/ГАП/MXene үшін ең оңтайлы әдістер – суық плазма,

EtO және ScCO_2 ; γ - және E-beam әдістері төмен дозаларда қолдануға жарамды; ал термиялық әдістер мен озон ең жоғары деградацияны көрсетіп, сақтықпен қолдануды немесе қосалқы әдіс ретінде қарастыруды талап етеді.

Материалдың стерилизациядан кейінгі тұрақтылығын неғұрлым толық бағалау үшін оның құрылымдық сипаттамаларының (кеуектілік) сақталуы (3-кесте), сондай-ақ композиттің қолданбалы әлеуетін айқындайтын негізгі функционалдық қасиеттері – электрөткізгіштігі мен фототермиялық белсенділігі қосымша бағаланды.

3-кесте – Әртүрлі стерилизация әдістерін қолданғаннан кейінгі БЦ/ГАП/MXene-нің кеуектілігі

№	Стерилизация әдісі	Температура / доза / экспозиция	Кеуектіліктің өзгерісі, %
I. Термиялық әдістер			
1	Автоклав	121°C, 1 атм, 20 мин	+8 %
2	Құрғақ қыздыру	160°C, 60 мин	+12 %
II. Радиациялық әдістер			
3	Γ -сәулелену	10 кГр (^{60}Co)	+4 %
4	E-beam сәулелену	5 кГр (10 МэВ)	+5 %
III. Химиялық әдістер			
5	Этиленоксид (EtO)	37 °C, 4 сағ + аэрация 12 сағ	+3 %
6	Озон	10 г/сағ, 30 мин	+6 %
IV. Фото-химиялық/плазмалық әдістер			
7	Ультракүлгін сәулелену	254 нм, 30 мин $\times$ 2	+2 %
8	Суық плазма (O_2/Ar)	50 Вт, 0.2 мбар, 15 мин	+2 %
9	Аса критикалық CO_2 (ScCO_2)	30 °C, 38 МПа, 60 мин	+3 %

Деректерді талдау көрсеткендей, стерилизация әдістері БЦ/ГАП/MXene биокөпестінің кеуектілігіне әсер ету дәрежесі бойынша ерекшеленеді: ең үлкен кеуектілік өсуі термиялық әдістерде тіркелді (автоклав +8 %, құрғақ қыздыру +12 %), ал радиациялық әдістер (γ +4 %, E-beam +5 %) және жұмсақ процестер (EtO +3 %, ScCO_2 +3 %) тек орташа деңгейде өсуге әкелді, ең төменгі көрсеткіш – Ультракүлгін және суық плазма (+2 %). Бұл агрессивті стерилизация режимдері құрылымның айтарлықтай бұзылуына және екінші реттік қуыс немесе микрожарылулардың түзілуіне әкелетінін көрсетеді, ал жұмсақ әдістер бастапқы кеукті архитектураны жақсы сақтайды.

Стерилизациядан кейінгі кеуектіліктің өзгерісі әр әдістің композит құрылымына әсерін жақсы көрсетеді. Кеуектіліктің ең үлкен өсуі

термиялық өңдеу кезінде байқалды, бұл, әдетте, материалдың дегидратациясы және жиырылуына байланысты, нәтижесінде ірі кеуектер коллапс болып, микрожарылулар қалыптасады. Ұқсас механизм биополимерлер үшін де сипатталған, олардың құрылымы қыздырылғанда тұрақсызданып, жергілікті бұзылуға бейім болады. Нәтижесінде кеуектілік формальды түрде артады, алайда іс жүзінде бұл толық ішкі желі түзілуімен емес, ақаулардың пайда болуымен байланысты [21].

Сәулелендіру кезінде (γ -сәулелер, электрондық сәулелік шоғыр) кеуектілікке әсер әлдеқайда әлсіз. Ионизацияланған сәуле радиоллизді және тізбектердің жартылай ыдырауын тудырады, бұл құрылымның аздап «қалқуымен» қатар жүре алады, бірақ күшті термиялық әсердің болмауы кеңістіктік тордың айтарлықтай бұзылуын

болдырмайды. Сондықтан кеуектіліктің өсуі орташа деңгейде қалыптасады, ал бастапқы архитектура термиялық стерилизацияға қарағанда жақсы сақталады.

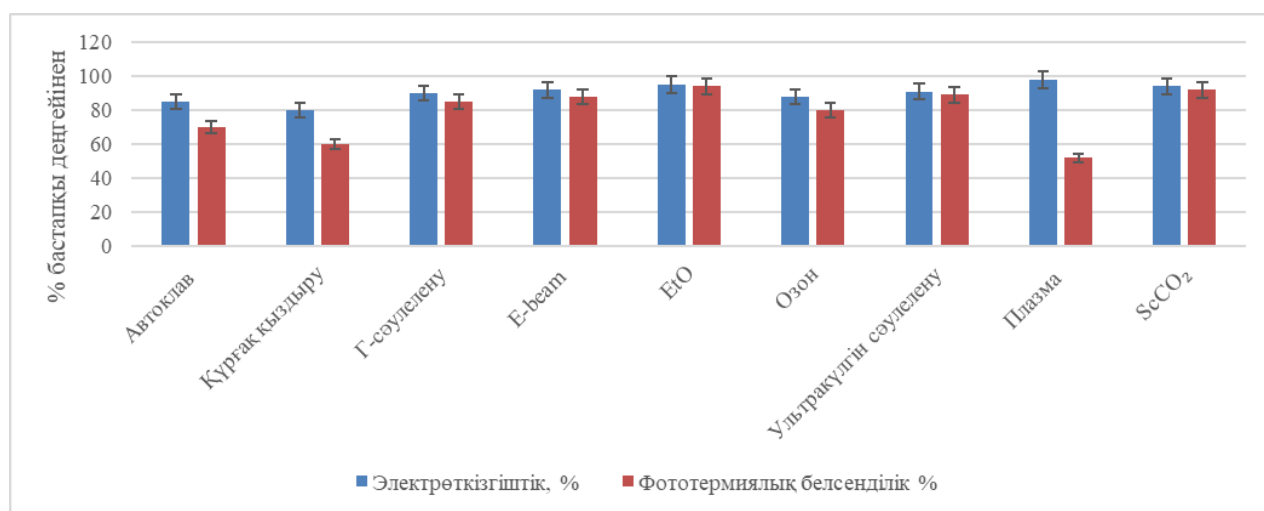
Этиленоксидпен өңдеу, аса критикалық CO_2 және суық плазма сияқты төмен температурадағы химиялық және физика-химиялық әсер ету әдістері кеуектілікке минималды әсер көрсетеді. Олар композиттің терең құрылымын бұзбай, негізінен бетіне әсер етеді, сондықтан кеңістік ұйымдасуы дерлік өзгеріссіз сақталады.

Сондықтан кеуектіліктің өсуін әрдайым он нәтиже деп қарастыруға болмайды: термиялық әдістерде оның айтарлықтай өсуі көбіне матрицаның бұзылуы мен ақаулардың пайда болуына байланысты, ал жеңіл әдістерден кейін байқалатын аз өзгерістер бастапқы кеуекті құрылымның жақсы сақталғанын көрсетеді. Әдебиеттерде тек

кеуектіліктің мөлшерін ғана емес, оның табиғатын да ескеру маңызды деп атап көрсетіледі, себебі ақаулы қуыстар мен жарықтар бастапқы ұйымдасқан кеуекті желіге функционалды түрде тең емес.

БЦ/ГАП/МХене көпкомпонентті материал ретінде жасалғандықтан, МХене-фазалардың болуы арқылы электрөткізгіштік және айқын фототермикалық қасиеттерге ие, осы параметрлер оның биомедицинада әрі қарай қолданылуы үшін (мысалы, локалды фототермотерапияда және электро-активті имплантаттар мен биоэлектродтарды жасау үшін) шешуші мәнге ие.

Әрбір стерилизация әдісі үшін электрөткізгіштік пен фототермикалық белсенділіктің сақталу мөндері (бастапқы деңгейдің %) алынған және олар 1-суретте көрсетілген.



1-сурет – БЦ/ГАП/МХене композитінің функционалдық қасиеттеріне әртүрлі стерилизация әдістерінің әсері

БЦ/ГАП/МХене композитінің функционалдық қасиеттеріне әртүрлі стерилизация әдістерінің әсерін салыстырғанда, олардың сипаты оның электрөткізгіштігі және фототермикалық жауаптылық деңгейінің сақталуына тікелей әсер ететіні анықталды.

Функционалдық қасиеттердің ең көп төмендеуі термиялық әдістер кезінде байқалады: автоклавтау және әсіресе күрғақ қыздыру электрөткізгіштікті айтарлықтай төмендетеді (80–85 %-ға дейін) және фототермикалық жауапты 60–70%-ға дейін азайтады. Бұл МХене материалдарының термооксидативтік деструкциясына бай-

ланысты, нәтижесінде $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ бетінде оксидтер (TiO_2) түзіледі, ол оның фотосіңіру және электрөткізгіштік қасиеттерін төмендетеді [22].

Радиациялық әдістер (γ -сәулелер, электрондық сәуле шоғыры) айтарлықтай аз өзгерістер туғызады. Электрөткізгіштік шамамен 90–92 % деңгейінде сақталады, фототермикалық жауап – 85–88 %. Бұл төмен дозалар МХене бөлшектерінің бетінде тек жартылай тотығу процесін тудыратынын, бірақ өткізгіш желінің құрылымын бұзбайтынын көрсетеді.

Озондық өңдеу орташа теріс әсер көрсетеді (электрөткізгіштік 88 %, фототермика 80 %),

бұл $Ti_3C_2T_x$ бетінің жылдам беткі тотығуымен түсіндіріледі, алайда құрылымдық деградация шектеулі болып қалады.

Ең жұмсақ әдістер төмен температурада қолданылатын – этиленоксид (EtO), аса критикалық CO_2 ($ScCO_2$) және суық плазма болып шықты. Олар функционалдық қасиеттерді дерлік толық сақтауға мүмкіндік береді: электрөткізгіштік 94–98 %, фототермикалық белсенділік 92–95 %. Әсіресе суық плазма ерекшеленеді: ол материалдың функционалдылығын минималды төмендетеді, бұл беткі гидрофилділіктің артуы мен MXene бөлшектерінің целлюлозалық матрицадағы біркелкі таралуымен түсіндіріледі [23–25].

Жалпы алғанда, композиттің функционалдық қасиеттерінің тұрақтылығы тікелей термиялық және агрессивті химиялық әсердің жоқты-

ғына байланысты. 60 °C жоғары температураны қоспайтын стерилизация әдістері MXene бөлшектерінің электрондық өткізгіштік пен фототермикалық белсенділігін барынша сақтауға мүмкіндік береді, ал жоғары температуралық процестер MXene-нің тотығуы және оның қабаттық құрылымының мүмкін болатын деструкциясына байланысты функционалдылықтың жартылай жоғалуына әкеледі.

Төменде БЦ/ГАП/MXene композитін стерилизациялау әдістерінің салыстырмалы рейтингі көрсетілген, ол мына көрсеткіштерге негізделген: (1) механикалық қасиеттердің сақталуы, (2) құрылымдық өзгерістердің минималды болуы (кеуектілік), (3) функционалдық қасиеттердің – электрөткізгіштіктің және фототермикалық белсенділіктің – сақталуы (Кесте 4).

4-кесте – БЦ/ГАП/MXene композитін стерилизациялау әдістерінің интегралдық бағасы

Ранг	Әдіс	Жалпы баға	Қысқаша негіздеме
1	Суық плазма	5	Механикалық қасиеттердің минималды деградациясы (–3/–4 %), кеуектіліктің аз өзгеруі (+2 %), электрөткізгіштіктің шамамен толық сақталуы (98 %) және фототермикалық белсенділіктің жоғары деңгейде сақталуы (95 %).
2	EtO (Этиленоксид)	5	Құрылым мен механиканың аз өзгеруі, өткізгіштік (95%) және фототермика (94%) жоғары деңгейде сақталған. Аэрация қажет.
3	$ScCO_2$ (аса критикалық CO_2)	4	Құрылым мен функционалдың жақсы сақталуы (94/92 %), кеуектіліктің аз өзгеруі (+3 %).
4	E-beam	4	Механиканың орташа төмендеуі, кеуектілік +5 %, фототермика 88 %, өткізгіштік 92 %
5	γ - сәулелену	3	E-beam-ге қарағанда сәл нашар: механика –12/–15 %, фототермика 85 %, кеуектілік +4 %.
6	Ультракүлгін сәулелену	3	Параметрлердің орташа төмендеуі, беткі әсері айқын, фототермика 89 %, өткізгіштік 91 %.
7	Озон	2	Матрицаның айқын деградациясы (–22/–26 %); функционалдық көрсеткіштер орташа төмендеген (88/80 %)
8	Автоклав	1	Механиканың күшті деградациясы (–28/–33 %), кеуектілік +8 %, фототермика 70 %, өткізгіштік 85 %.
9	Құрғақ қыздыру	1	Ең нашар әдіс: құрылым мен функционалдың елеулі деградациясы (–35/–40 %), кеуектілік +12 %, фототермика 60 %, өткізгіштік 80 %.
Ескерту: көрсеткіштер өңделмеген үлгілермен салыстырғанда пайыздық өзгерістер (%) ретінде берілген.			

БЦ/ГАП/MXene композитін стерилдеудің ең жұмсақ әдістері – суық плазма, EtO және аса критикалық CO_2 , олар құрылымдық, механикалық және функционалдық сипаттамаларды бастапқы деңгейге жақын сақтауға мүмкіндік береді.

Радиациялық әдістер (γ және E-beam) аралық позицияны алады – олар қолдануға жарамды, бірақ төмен температуралы химико-физикалық әдістерге қарағанда қасиеттердің деградациясына әкеледі.

Ультракүлгін өңдеу параметрлердің орташа нашарлауын береді, бірақ ол озон және термиялық әдістерге қарағанда агрессивті емес.

Ең нашар нәтижелерді құрғақ қыздыру және автоклавтау көрсетті, бұл БЦ матрицасының айтарлықтай деградациясына, дефекттердің түзілуіне және өткізгіштік пен фототермикалық қасиеттердің айқын жоғалуына әкелді – ең алдымен МХене-нің термо-тотығу трансформациясы мен БЦ құрылымының бұзылуы салдарынан.

Қорытынды

Осы зерттеуде БЦ/ГАП/МХене нанокомпозиіне арналған тоғыз стерилизация әдісінің жан-жақты салыстырмалы бағасы жүргізілді. Бағалау стерильділік, құрылым мен морфологияның сақталуы, механикалық сипаттамалар, сондай-ақ функционалдық қасиеттерді (электроөткізгіштік пен фототермикалық белсенділік) ескере отырып жасалды. Алынған нәтижелер көрсеткендей, стерилизация әдісін таңдау материалдың жұмыс қабілетіне және биомедицинада қолданылу мүмкіндігіне тікелей әсер етеді.

Негізгі қорытындылар:

Барлық әдістерде толық стерильділік қамтамасыз етілген, тек ультракүлгін сәулелену (50 %) және ScCO_2 өңдеуі (90 %) ерекшеленеді. Сондықтан бастапқы конфигурациядағы Ультракүлгін стерилизация тек қосымша процедура ретінде қарастырылуы тиіс, ал ScCO_2 параметрлерін оңтайландыру қажет.

Ең айқын деградацияны (кеуектіліктің өсуі, микрожарылыстар, Е-модуль мен σ_u төмендеуі) термиялық әдістер (құрғақ қыздыру, автоклав) және озон өңдеуі тудырады. Радиациялық әдістер (γ және E-beam) орташа өзгерістерге әкеледі.

EtO , ScCO_2 және суық плазма минималды құрылымдық бұзылуларды қамтамасыз етеді.

Термикалық өңдеу электроөткізгіштік пен фототермикалық жауапты МХене-нің термо-окислитті деградациясы салдарынан айтарлықтай төмендетеді. Суық плазма мен EtO бастапқы өткізгіштіктің және фототермикалық белсенділіктің 94–98 % дейін сақталуын қамтамасыз етеді. Радиациялық әдістер төмен дозада стерильділік пен функционалдық қасиеттерді сақтаудың қабилданатын компромисін береді.

Жалпы, БЦ/ГАП/МХене үшін стерилизация әдісін таңдау стерильділік тиімділігі мен функционалдық сипаттамалардың сақталуы арасындағы балансты ескере отырып жүргізілуі тиіс: ең оңтайлы әдістер – суық плазма және EtO , ал термиялық әдістер материалдың 100 % стерильділігін қамтамасыз етсе де, олардың қасиеттерді айтарлықтай нашарлатуы салдарынан сезімтал көпкомпонентті композиттерге қолдануға ұсынылмайды.

Қаржыландыру көзі

Жұмыс 2024–2026 жылдарға арналған Қазақстан Республикасының Ұлттық гранттар бағдарламасының қолдауымен жүзеге асырылды. Қаржыландыру Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің 217 «Ғылымды дамыту» бюджеттік бағдарламасы және 102 «Ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру» қосымша бағдарламасы аясында берілді, келісім-шарт №190, 2024 жылғы 9 қыркүйек, ИРН АР23488697 «Инфекцияланған жараларды емдеуге арналған антибактериялық және регенерациялық қасиеттері күшейтілген, гидрогельді фототермиялық платформаны құрудың стратегиясы».

Әдебиеттер

1. ISO 11137-1:2025. Sterilization of health care products – Radiation – Part 1: Requirements for development, validation and routine control of a sterilization process for medical devices. Geneva: International Organization for Standardization, 2006. – 37 p.
2. Munarin F., Tanzi M. C., Petrini P. Sterilization treatments on polysaccharides: effects and implications. // Carbohydrate Polymers. – 2013. – Vol. 98, № 1. – P. 2-12.
3. Moore E., Cortese Y. J., Colbert D. M. A review of sterilization methods and their commercial impacts on polysaccharide-based biomaterials // Macromol. – 2025. – Vol. 5, № 4. – Article 45.
4. ISO 291:2008. Plastics – Standard atmospheres for conditioning and testing. Geneva: International Organization for Standardization; 2008.
5. ISO 17665:2024. Sterilization of health care products – Moist heat – Requirements for the development, validation and routine control of a sterilization process for medical devices. Geneva: ISO; 2006.
6. ISO 11135:2014. Sterilization of health care products – Ethylene oxide – Requirements for the development, validation and routine control of a sterilization process for medical devices. Geneva: ISO; 2014.
7. ISO 11137-2:2013. Sterilization of health care products – Radiation – Part 2: Establishing the sterilization dose. Geneva: ISO; 2013.

8. Iuliano A., Fabiszewska A., Kozik K., Rzepna M., Ostrowska J., Plichta A. Effect of electron-beam radiation and other sterilization techniques on structural, mechanical and microbiological properties of thermoplastic starch blend // *Journal of Polymers and the Environment*. – 2021. – Vol. 29. – P. 1489–1504.
9. Souza P.R., Nascimento G.F., Almeida A. et al. Polysaccharide-Based Materials Created by Physical Processes // *Polymers (Basel)*. 2021. 13(9):1427.
10. Tyubaeva P., Zykova A., Podmasteriev V., Olkhov A., Popov A., Iordanskii A. The investigation of the structure and properties of ozone-sterilized nonwoven biopolymer materials for medical applications // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, № 8. – 1268.
11. Pavelić S.K., Žuntar I., Tomašković M. et al. A new era for sterilization based on supercritical CO₂ // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022. 10:961423.
12. Karthik C., Gnanaraj M., Kumar R. et al. Cold Plasma Technology-Based Eco-Friendly Food Packaging Biomaterials: A Review // *Polymers (Basel)*. 2024. 16(1):89.
13. ISO 11737-2:2019. Sterilization of health care products – Microbiological methods – Part 2: Tests of sterility performed in the definition, validation and maintenance of a sterilization process. Geneva: ISO; 2019.
14. International Atomic Energy Agency (IAEA). Radiation Chemistry of Polysaccharides. Vienna: IAEA, 2015. 164 p.
15. Ahmed M. S., Alshareef A. H., Al-Hadeethi Y. A Comprehensive Review of Radiation-Induced Hydrogels // *Gels*. 2024. Vol. 10, № 1: 2.
16. Mahmoud Y. A. G., El-Sylmawy N. M., El-Gendy A. O. Cold Plasma as a Revolutionary Antimicrobial Modality // *Pharmaceutics*. 2025. 17(6):688.
17. Herczeg C. K., Dzeichciarz P., Raut V. P., Dunn A. S. Sterilization of Polymeric Implants: Challenges and Opportunities // *Polymers (Basel)*. 2022. 14(21):4531.
18. Vink P., Pleijsier K. Aeration of ethylene oxide-sterilized polymers // *Polymer Degradation and Stability*. 1986. Vol. 14, № 3. P. 313–321.
19. Xue H., et al. Preparation, properties, and applications of polysaccharide-based materials. // *Advanced Food and Nutrition Research*. 2025. Vol. 100. P. 75–112.
20. Bernhardt A., Wehrl M., Paul B., Hochmuth T., Schumacher M., Schütz K., Gelinsky M. Improved sterilization of sensitive biomaterials with supercritical carbon dioxide at low temperature // *PLoS ONE*. – 2015. – Vol. 10, No 6: e0129205.
21. Bento C.S.A., Gaspar M.C., Coimbra P., de Sousa H.C., Braga M.E.M. A review of conventional and emerging technologies for hydrogels sterilization // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2023. – PII: S0378-5173(23)00091-1. – DOI:10.1016/j.ijpharm.2023.122671.
22. Habib T., Yang S., Wang Q., et al. Oxidation stability of Ti₃C₂T_x MXene nanosheets in air, liquid and solid media // *npj 2D Materials and Applications*. – 2019. – Vol. 3, № 1, Article 8. DOI:10.1038/s41699-019-0089-3.
23. Kawano T., Matsuda Y., Uesugi Y., et al. Surface Modification of a Regenerated Cellulose Film Using Atmospheric-Pressure Low-Temperature Plasma // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7, № 50. – P. 46063–46071.
24. Chiper A. S., Ursu C.-E., Vasilache V., et al. Stable Surface Modification by Cold Atmospheric-Pressure Plasma for Enhanced Adhesion and Hydrophilicity of Polymer Substrates // *Polymers (Basel)*. – 2023. – Vol. 15, № 20. – Article 4172.
25. Naysmith A., Mativenga P., et al. The effect of plasma pre-treatment on the electrical resistance of MXene-based coatings // *Materials Advances*. – 2025.

References

1. Ahmed M. S., Alshareef A. H., Al-Hadeethi Y. (2024) A comprehensive review of radiation-induced hydrogels. *Gels*, 10(1): 2.
2. Bento C. S. A., Gaspar M. C., Coimbra P., de Sousa H. C., Braga M. E. M. (2023) A review of conventional and emerging technologies for hydrogels sterilization. *Int. J. Pharmaceutics*, DOI:10.1016/j.ijpharm.2023.122671.
3. Bernhardt A., Wehrl M., Paul B., Hochmuth T., Schumacher M., Schütz K., Gelinsky M. (2015) Improved sterilization of sensitive biomaterials with supercritical carbon dioxide at low temperature. *PLoS ONE*, 10(6): e0129205.
4. Chiper A. S., Ursu C.-E., Vasilache V. et al. (2023) Stable surface modification by cold atmospheric-pressure plasma for enhanced adhesion and hydrophilicity of polymer substrates. *Polymers*, 15(20): 4172.
5. Habib T., Yang S., Wang Q. et al. (2019) Oxidation stability of Ti₃C₂T_x MXene nanosheets in air, liquid and solid media. *npj 2D Mater. Appl.*, 3: 8.
6. Herczeg C. K., Dzeichciarz P., Raut V. P., Dunn A. S. (2022) Sterilization of polymeric implants: challenges and opportunities. *Polymers*, 14(21): 4531.
7. IAEA (2015) Radiation Chemistry of Polysaccharides. Vienna, 164 p.
8. Iuliano A., Fabiszewska A., Kozik K., Rzepna M., Ostrowska J., Plichta A. (2021) Effect of electron-beam radiation and other sterilization techniques on structural, mechanical and microbiological properties of thermoplastic starch blend. *J. Polym. Environ.*, 29: 1489–1504.
9. ISO (2008) ISO 291: Plastics – Standard atmospheres for conditioning and testing. Geneva.
10. ISO (2025) ISO 11137-1: Sterilization of health care products – Radiation – Part 1: Requirements for development, validation, and routine control. Geneva.
11. ISO (2013) ISO 11137-2: Sterilization of health care products – Radiation – Part 2: Establishing the sterilization dose. Geneva.

12. ISO (2014) ISO 11135: Sterilization of health care products – Ethylene oxide – Requirements for development, validation and routine control. Geneva.
13. ISO (2024) ISO 17665-1: Sterilization of health care products – Moist heat – Requirements for development, validation and routine control. Geneva.
14. ISO (2019) ISO 11737-2: Sterilization of health care products – Microbiological methods – Part 2: Tests of sterility performed in the definition, validation and maintenance of a sterilization process. Geneva.
15. Karthik C., Gnanaraj M., Kumar R. et al. (2024) Cold plasma technology-based eco-friendly food packaging biomaterials: a review. *Polymers*, 16(1): 89.
16. Kawano T., Matsuda Y., Uesugi Y. et al. (2022) Surface modification of regenerated cellulose film using atmospheric-pressure low-temperature plasma. *ACS Omega*, 7(50): 46063–46071.
17. Mahmoud Y. A. G., El-Sylmawy N. M., El-Gendy A. O. (2025) Cold plasma as a revolutionary antimicrobial modality. *Pharmaceutics*, 17(6): 688.
18. Moore E., Cortese Y. J., Colbert D. M. (2025) A review of sterilization methods and their commercial impacts on polysaccharide-based biomaterials. *Macromol.*, 5(4): 45.
19. Munarin F., Tanzi M. C., Petrini P. (2013) Sterilization treatments on polysaccharides: effects and implications. *Carbohydr. Polym.*, 98(1): 2–12.
20. Naysmith A., Mativenga P. et al. (2025) The effect of plasma pre-treatment on the electrical resistance of MXene-based coatings. *Materials Advances*.
21. Pavelić S. K., Žuntar I., Tomašković M. et al. (2022) A new era for sterilization based on supercritical CO₂. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 10: 961423.
22. Souza P. R., Nascimento G. F., Almeida A. et al. (2021) Polysaccharide-based materials created by physical processes. *Polymers*, 13(9): 1427.
23. Tyubaeva P., Zykova A., Podmasteriev V., Olkhov A., Popov A., Iordanskii A. (2021) The investigation of the structure and properties of ozone-sterilized nonwoven biopolymer materials for medical applications. *Polymers*, 13(8): 1268.
24. Vink P., Pleijsier K. (1986) Aeration of ethylene oxide-sterilized polymers. *Polym. Degrad. Stabil.*, 14(3): 313–321.
25. Xue H. et al. (2025) Preparation, properties, and applications of polysaccharide-based materials. *Adv. Food Nutr. Res.*, 100: 75–112.

Авторлар туралы мәлімет:

Ирина Станиславовна Савицкая – биология ғылымдарының докторы, профессор, биотехнология кафедрасы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (ҚР, Алматы, e-mail: irasava_2006@mail.ru).

Дина Хабдулманатовна Шокатаева – PhD докторы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биотехнология кафедрасының аға оқытушысы (ҚР, Алматы, e-mail: irasava_2006@mail.ru) Әл-Фараби атындағы Фараби (ҚР, Алматы, e-mail: shokatayeva.dina@kaznu.kz).

Абашидзе Инара Исрафиловна – медицина ғылымдарының магистрі, Денсаулық сақтау академиясы клиникасының (AMD Clinic LLP) жетекші пластикалық хирургы (Алматы, e-mail: inara_abashidze@mail.ru).

Талипова Айжан Бериковна – PhD докторанты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биотехнология кафедрасының аға оқытушысы (ҚР, Алматы, e-mail: talipova.aizhan@gmail.com).

Жанлессова Сирина Дүйсеновна – PhD докторы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биотехнология кафедрасының аға оқытушысы (ҚР, Алматы, e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru).

Хамитқызы Жазира Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің биотехнология кафедрасының PhD докторанты (ҚР, Алматы, e-mail: bailovazhazira@gmail.com).

Information about authors:

Savitskaya Irina Stanislavovna – Doctor of Biological Sciences, Professor, Department of Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan; e-mail: irasava_2006@mail.ru).

Shokatayeva Dina Khabdulmanatovna – PhD, Senior Lecturer, Department of Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan; e-mail: shokatayeva.dina@kaznu.kz).

Abashidze Inara Israfilovna – Master of Medical Sciences, leading plastic surgeon at the Academy of Health Clinic (AMD Clinic LLP) (Almaty, e-mail: inara_abashidze@mail.ru).

Talipova Aizhan Berikovna – PhD student, Senior Lecturer, Department of Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan; e-mail: talipova.aizhan@gmail.com).

Zhantlessova Sirina Duissenovna – PhD, Senior Lecturer, Department of Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan; e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru).

Khamitkyzy Zhazira – PhD student, Department of Biotechnology, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan; e-mail: bailovazhazira@gmail.com).

Сведения об авторах:

Савицкая Ирина Станиславовна – доктор биологических наук, профессор кафедры биотехнологии Казахского национального университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: irasava_2006@mail.ru).

Шокатаева Дина Хабдулманатовна – PhD, старший преподаватель кафедры биотехнологии Казахского национального университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: shokataeva.dina@kaznu.kz).

Абашидзе Инара Исрафиловна – магистр медицинских наук, ведущий пластический хирург клиники «Академия Здоровья» (ТОО «Клиника АМД») (Алматы, Казахстан, e-mail: inara_abashidze@mail.ru).

Талипова Айжан Бериковна – PhD-докторант, старший преподаватель кафедры биотехнологии Казахского национального университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: talipova.aizhan@gmail.com).

Жантлесова Сирина Дүйсеновна – PhD, старший преподаватель кафедры биотехнологии Казахского национального университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: sirina.zhantlessova@mail.ru).

Хамиткызы Жазира – PhD-докторант кафедры биотехнологии Казахского национального университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: bailovazhazira@gmail.com).

Келін түсті: 23 тамыз 2025 жыл

Қабылданды: 20 қараша 2025 жыл