

М.А. Абдулжанова^{2*}, Д.Х. Шокатаева², С.П. Жантлесова²,
А. Балтабай¹, Ж. Батыкова²

¹«Жану проблемалары институты» РМК, Алматы, Қазақстан

²Биология және биотехнология мәселелері ФЗИ, Алматы, Қазақстан

*e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com

БАКТЕРИАЛДЫ ЦЕЛЛЮЛОЗА – ТҰРАҚТЫ ТАҒАМДЫҚ ҚАПТАМАҒА АРНАЛҒАН БИОЫДЫРАЙТЫН МАТЕРИАЛ

Бактериалды целлюлоза (БЦ) жоғары тазалығы, нанофибриллярлық құрылымы, биосәйкестігі және функционалдық модификация мүмкіндігі арқасында биоыдырайтын қаптама материалдарын әзірлеу үшін перспективалы биополимер ретінде қарастырылады. Осы шолудың мақсаты – БЦ алу әдістеріне, оның физика-механикалық және тосқауылдық (барьерлік) қасиеттеріне, функционализация тәсілдеріне, сондай-ақ белсенді және интеллектуалды тағамдық қаптамада қолданылуына қатысты заманауи зерттеулерді талдау.

Әдебиеттерді іздеу 2009–2024 жылдар аралығында *Scopus*, *Web of Science* және *Google Scholar* дерекқорларында *bacterial cellulose*, *food packaging*, *active packaging*, *smart packaging*, *biocomposites* кілт сөздері бойынша жүргізілді. Барлығы 120-дан астам жарияланым талданып, олардың ішінен ең өзекті 95 дереккөз іріктеліп алынды.

Зерттеулер нативті БЦ-ның негізгі шектеулері ретінде жоғары гидрофильділігін, ылғалды ортада тұрақтылығының төмендігін және өзіндік антимикробтық белсенділігінің жоқтығын көрсетеді. Бұл кемшіліктерді биополимерлерді, нанобөлшектерді және биоактивті қосылыстарды қолдана отырып, *in situ* және *ex situ* модификациялау арқылы тиімді жоюға болады. БЦ негізіндегі белсенді және интеллектуалды жүйелерге ерекше назар аударылып, олардың антимикробтық қорғауды қамтамасыз ету, антиоксиданттарды біртіндеп босату және өнімдердің балғындығын бақылау қабілеті қарастырылған.

Сонымен қатар масштабтау мәселелері, функционалдық қоспалардың миграциясы және экономикалық тиімділікке қатысты шешілмеген проблемалар атап өтіледі. Қорытындылай келе, БЦ негізіндегі қаптамаларды әрі қарай коммерцияландыру биосинтез үдерісін, композиттердің қасиеттерін кешенді оңтайландыруды және олардың өмірлік циклін жан-жақты бағалауды талап етеді.

Түйін сөздер: бактериалды целлюлоза, биоқаптама, азық-түлік қаптама, биополимер, биокөмбіозит.

M.A. Abdulzhanova^{2*}, D.H. Shokatayeva², S.D. Zhantlesova²,
A. Baltabai¹, Zh. Batykova²

¹RSE "Institute of Combustion Problems", Almaty, Kazakhstan

²Research Institute of Biology and Biotechnology Problems, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com

Bacterial cellulose – a biodegradable material for sustainable food packaging

Bacterial cellulose (BC) is considered a promising biopolymer for the development of biodegradable packaging materials due to its high purity, nanofibrillar structure, biocompatibility, and potential for functional modification. The aim of this review is to analyze current studies focused on BC production, its physicochemical and barrier properties, functionalization methods, as well as its application in active and intelligent food packaging. A literature search was conducted in the *Scopus*, *Web of Science*, and *Google Scholar* databases for the period 2009–2024 using the keywords "bacterial cellulose," "food packaging," "active packaging," "smart packaging," and "biocomposites." More than 120 publications were analyzed, of which 95 of the most relevant sources were selected.

It has been shown that the main limitations of native BC remain its high hydrophilicity, insufficient stability in humid environments, and lack of intrinsic antimicrobial activity. These drawbacks can be effectively overcome through *in situ* and *ex situ* modifications using biopolymers, nanoparticles, and

bioactive compounds. Particular attention is given to BC-based active and intelligent systems that provide antimicrobial protection, antioxidant release, and monitoring of food freshness. At the same time, unresolved issues related to scale-up, migration of functional additives, and economic feasibility are highlighted. It is concluded that further commercialization of BC-based packaging requires comprehensive optimization of biosynthesis processes, composite properties, and life cycle assessment.

Keywords: bacterial cellulose, biopackaging, food packaging, biopolymer, biocomposite.

М.А. Абдулжанова^{2*}, Д.Х. Шокатаева², С.Д. Жантлесова²,
А. Балтабай¹, Ж. Батыкова²

¹РГП «Институт проблем горения», Алматы, Казахстан

²НИИ Проблем биологии и биотехнологии, Алматы, Казахстан

*e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com

Бактериальная целлюлоза – биоразлагаемый материал для устойчивой пищевой упаковки

Бактериальная целлюлоза (БЦ) рассматривается как перспективный биополимер для разработки биоразлагаемых упаковочных материалов благодаря высокой чистоте, нанофибриллярной структуре, биосовместимости и возможности функциональной модификации. Цель настоящего обзора – проанализировать современные исследования, посвящённые получению БЦ, её физико-механическим и барьерным характеристикам, методам функционализации, а также применению в активной и интеллектуальной пищевой упаковке. Литературный поиск проводился в базах Scopus, Web of Science и Google Scholar за период 2009–2024 гг. с использованием ключевых слов *bacterial cellulose, food packaging, active packaging, smart packaging, biocomposites*. Проанализированы более 120 публикаций, из которых отобраны 95 наиболее релевантных источников.

Показано, что ключевыми ограничениями нативной БЦ остаются высокая гидрофильность, недостаточная устойчивость во влажной среде и отсутствие собственной антимикробной активности. Эти недостатки эффективно преодолеваются путём *in situ* и *ex situ* модификаций с использованием биополимеров, наночастиц и биоактивных соединений. Особое внимание уделено активным и интеллектуальным системам на основе БЦ, обеспечивающим антимикробную защиту, антиоксидантное высвобождение и мониторинг свежести продуктов. Вместе с тем подчеркнуты нерешённые проблемы масштабирования, миграции функциональных добавок и экономической эффективности. Сделан вывод, что дальнейшая коммерциализация БЦ-упаковки требует комплексной оптимизации биосинтеза, свойств композитов и оценки жизненного цикла.

Ключевые слова: бактериальная целлюлоза, биоупаковка, пищевая упаковка, биополимер, биокompозит.

Кіріспе

Қазіргі орау индустриясы – ғаламдық экономикада маңызды орын алатын және үдемелі даму үстіндегі сала. Оның өркендеуіне жаһандану, заманауи технологияларды кеңінен енгізу және тұтынушылардың өсіп келе жатқан талаптары сияқты бірнеше фактор әсер етеді. Нарық құрылымында азық-түлік пен сусындар сегменті басымдыққа ие болып, жалпы көлемнің шамамен 85%-ын құрайды (Bharimalla et al., 2017).

Бүгінде азық-түлік өнімдерін орауда негізінен мұнай шикізатынан алынатын полиэтилен мен полипропилен сияқты материалдар кеңінен қолданылуда. Алайда олардың кеңінен қолданылуы қоршаған ортаны ластау және экологиялық тепе-теңдікті бұзу сияқты айтарлықтай экологиялық әсерлерге әкеледі. Осыған байланысты биологиялық негіздегі балама материалдарға қызығушылық артып келеді. Биополимерлер биологиялық ыдырағыштығы және адам денсау-

лығына да, қоршаған ортаға да қауіпсіздігі арқасында дәстүрлі пластикалық ораудың перспективалы алмастырғышы ретінде қарастырылады. Олар токсинді қосылыстардың түзілуіне жол бермейді және жою кезінде айқаспалы ластану қаупін төмендетеді (Nagalakshmaiah et al., 2019).

Қоршаған ортаны ластаумен байланысты проблемалардың ушығуы тұрақты және экологиялық қауіпсіз орау шешімдерін әзірлеуге деген қоғам мен ғылымның қызығушылығын арттырды. Соның нәтижесінде салыстырмалы түрде жоғары өзіндік құнына қарамастан, табиғи және жаңартылатын материалдарды өнеркәсіптік өндіріске енгізу белсенді жүріп жатыр (Díez-Pascual, 2019).

Қазіргі зерттеулер жаңа функционалды сипаттамалары бар белсенді және интеллектуалды орау жүйелерін әзірлеуге бағытталған. Бұл табиғи биополимерлерді қажетті қасиеттерге ие ету мақсатында модификациялау қажеттілігін туындатты. Осындай материалдардың ішінде

БЦ – оның табиғи түрінде де, композиттер құрамында да – ерекше көңіл бөлінуде. БЦ өзінің жоғары тазалығы, беріктігі, биосәйкестілігі және функционалды модификация мүмкіндігі арқасында бұрын медицина мен косметикада қолданылған, ал соңғы жылдары орау және электронды өнеркәсіпте перспективалы материал ретінде белсенді зерттеліп, енгізілуде.

БЦ – бастапқыда жоғары тазалыққа ие ерекше биоматериал, ал көптеген басқа биополимерлер күрделі экстракция және тазалау кезеңдерін қажет етеді. Оның талшықтары өсімдік текті целлюлозадан әлдеқайда жіңішке және үшөлшемді, жоғары кеуекті құрылым қалыптастырады. Сонымен қатар, БЦ биологиялық ыдырағыш, улы реакциялар туғызбайды және аллергияға себеп болмайды (Tanprichai et al., 2020).

Бұл жұмыстың мақсаты – БЦ-ның экологиялық қауіпсіз және функционалды биополимер ретінде орау өнеркәсібінде қолданылу әлеуетін зерттеу. Зерттеу барысында БЦ-ның қасиеттері, оны алу және модификациялау әдістері талданады, сондай-ақ белсенді және интеллектуалды жүйелерді қоса алғанда, инновациялық орау материалдарының құрамында оны қолдану мүмкіндіктері қарастырылады. Ерекше назар БЦ-ны дәстүрлі полимерлі ораулармен және басқа да биоматериалдармен салыстыруға аударылады.

Бұл жұмыста азық-түлік өнімдерін орауда БЦ қолдану бойынша соңғы нәтижелерге шолу жасалады. Сондай-ақ бұл мәселе бойынша шектеулер мен болашақ перспективалар қысқаша сипатталады, бұл микробтық полисахаридтің басқа биополимерлер алдындағы артықшылықтарын айқындайды.

Шолудың әдіснамасы

Әдебиеттерді іздеу 2009–2024 жылдар аралығында Scopus, Web of Science және Google Scholar дерекқорларында жүргізілді. Келесі кілт сөздер пайдаланылды: *bacterial cellulose*, *biodegradable packaging*, *active food packaging*, *smart packaging*, *BC composites*.

Шолуға тек ағылшын және орыс тілдеріндегі рецензияланған мақалалар мен монографиялар енгізілді, оларда БЦ алу, оның физика-механикалық және тосқауылдық (барьерлік) қасиеттері немесе тағамдық қаптамада практикалық қолданылуы бойынша сандық деректер келтірілген.

Эксперименттік деректері жоқ жұмыстар және қаптама технологияларына қатысы жоқ жарияланымдар шолудан шығарылды. Қорытынды іріктеу 95 дереккөзді құрады.

Әдебиетке шолу

Технологиялардың қарқынды дамуы және жаңа материалдарды кеңінен енгізу жағдайында экологиялық қауіпсіздік пен тұрақты даму мәселелеріне ерекше көңіл бөлінуде. Осы тұрғыда қалдықсыз өндірістер инновациялық технологиялық шешімдердің маңызды элементтері ретінде қарастырылады. Өсімдік текті целлюлоза – жердегі ең көп таралған биополимер, оның жыл сайынғы жалпы өсімдік биомассасынан алынатын көлемі 100–125 Гт шамасында деп бағаланады (Алешина et al., 2001). Жоғары қолжетімділігі мен жаңартылуына байланысты целлюлоза қағаз өндірісінде, биобдырайтын орау материалдарында кеңінен қолданылады және биомедициналық салада да қолданылу аясын кеңейтіп келеді (Mautner, 2020).

Өсімдік көздерінен бөлек, сірке қышқылын түзуші бактерия штаммдарын пайдалана отырып, целлюлозаны микробиологиялық әдіспен де алуға болады. Мұндай микроорганизмдерге *Cetobacter*, *Gluconobacter*, *Gluconacetobacter* және *Komagateibacter* туыстарының өкілдері жатады. Олар аэробты жағдайларда спирттерді, альдегидтерді, моносахаридтерді және қант спирттерін сірке қышқылына дейін тотықтыра алады (Gregory et al., 2021). Бұл бактериялар табиғатта ферменттелген өнімдерде кең таралған, соның ішінде сірке суында, ната-де-кокода, шай саңырауқұлағында және шіріген жемістерде кездеседі.

Әсіресе *Gluconacetobacter* және *Komagateibacter* туыстарының түрлері ерекше қызығушылық тудырады, олар жасушадан тыс матрикс түзе алады, ол жоғары ұйымдасқан кристалды целлюлозадан тұрады. Бұл материал, әдетте, культуралық ортаның бетінде түзіледі және кеуіп кетуден және ультракүлгін сәулеленуден қорғау қызметін атқарады. Ол БЦ деген атпен танымал (Florea et al., 2016). Бұл сірке қышқылын түзуші бактериялар әртүрлі көміртегі көздерін – глюкоза, фруктоза, маннит, ксилоза, глицерин, дигидроксиацетон немесе дикарбон қышқылдарын метаболиздеп, β -(1→4)-глюканның сызықты тізбектерін түзеді және оларды цитоплазмалық мембранадағы көптеген тесіктер арқылы сыртқа шығарады (Gorgieva & Trček, 2019; Wang et al., 2018).

БЦ биосинтезі барысында көміртегі көзі осы биотехнологиялық процестің жалпы құнының 65%-ына дейін үлес қосады (Jedrzejczak-Krzepkowska et al., 2016). Сондықтан БЦ-ны коммерциялық қолдануды шектейтін ең маңыз-

ды және күрделі мәселелердің бірі – экономикалық тұрғыдан тиімді өсу ортасын табу болып табылады.

БЦ өндіруде дәстүрлі түрде Хестрин-Шрамм (ХШ) ортасы қоректік орта ретінде пайдаланылады. Бұл орта құрамында көміртегі мен азоттың негізгі көздері ретінде қызмет ететін глюкоза, пептон және ашытқы экстракты бар (Schramm & Hestrin, 1954). Зерттеулер көрсеткендей, ХШ ортасына метанол қосылған жағдайда БЦ шығымы барынша жоғарылайды (Lu et al., 2011), сондай-ақ инокулятқа аз мөлшерде эндолюкканаз енгізу де оң әсер етеді.

Қазақстандық авторлар да ХШ ортасын модификациялау бойынша зерттеулер жүргізді. Ең жоғары өнімділік 0,5% спирт концентрациясы бар нұсқаларда байқалды. Осылайша, глюкоза мөлшері 1%-ға дейін азайтылып, этанол 0,5% концентрацияда қосылған ХШ ортасының шағын модификациясы ұсынылды. Бұл орта модификацияланған ХШ (МХШ) деп аталды (Савицкая et al., 2017).

Шығындарды азайту және БЦ шығымын арттыру мақсатында ауылшаруашылық қалдық-

тары мен өнеркәсіптік жанама өнімдерді оның өндірісі үшін арзан қоректік орта ретінде қолдану зерттелді (Carreira et al., 2011; Vazquez et al., 2013). Осы саладағы ірі зерттеулердің бірі Скиба Е.А. және әріптестерінің жұмыстары болды. Олар *Medusomyces gisevii* симбиоттық дақылы арқылы ауылшаруашылық қалдығы болып табылатын сұлы қауызынан БЦ алды. Зерттеуде сұлы қауызын алдымен 2–6% концентрациялы азот қышқылы ерітінділерімен өндеп, кейін ферментативтік гидролизге ұшыратты. Нәтижесінде қантқа бай ерітінді алынып, ол БЦ синтезі үшін субстрат ретінде қолданылды. Сұлы қауызын пайдалану арқылы жүргізілген тәжірибелік-өндірістік процесс 100 тонна шикізаттан 98% ылғалдылығы бар 80,5 тонна гидрогель алуға мүмкіндік берді (Skiba et al., 2020).

Соңғы уақытта ХШ ортасының модификациялары әртараптанып келеді. Бұл модификациялардың басты мақсаты – минималды шығындармен максималды өнімділікке қол жеткізу. Төмендегі кестеде БЦ өндіру үшін қолданылатын әртүрлі шикізат көздері және олардың максималды шығымы көрсетілген.

1-кесте

БЦ өндіруге арналған әртүрлі шикізат көздері (Богатырёва, 2021)

Тазартылмаған және ауылшаруашылық қалдықтары	БЦ шығымы (құрғақ зат, орта көлеміне), г/л
Хестрин және Шрамм ортасы (ХШ)	2,73
Меласса	1,6
Қызылша мелассасы	3,58
Қамыс мелассасы	7,92-8,87
Апельсин және ананас шырыны	3,58
Ананас шырыны мен қабығы	2,73
Құрма шәрбаты	8,19
Үн гидролизаттары (кондитерлік өнеркәсіп қалдықтарынан)	13
Шикі глицерин және күнбағыс күнжарасының гидролизаты	13,3
Жүгері собығының қышқылдық гидролизаты	4
<i>Amorphophallus konjac</i> түйнектерінен алынған үн	8,19
Ағын суларды биоөндеуден алынған лигноцеллюлоза	20
Үйеңкі шәрбаты	2,73
Бидай сабанының гидролизаты	8,31

Сонымен қатар көптеген зерттеушілер экономикалық және экологиялық тұрғыдан тиімді болуына байланысты көміртегінің баламалы табиғи көздерін, мысалы, жеміс шырындары,

бидай сабаны, патока, үйеңкі шәрбаты, мақта негізіндегі текстиль қалдықтары және басқа да өнеркәсіптік немесе ауылшаруашылық қалдықтарын пайдалануды ұсынады (Kurosuni et al.,

2009; Chen et al., 2013; Çakar et al., 2014; Zeng et al., 2011; Hong et al., 2012; Tsouko et al., 2015; Hussain et al., 2019; Molina-Ramírez et al., 2018). Мысалы, Чжао және әріптестері БЦ өндіру үшін шарап өңдеу қалдықтары сияқты арзан қосалқы өнімдерді қолданған. Зерттеу нәтижелері бұл қалдық түрі ферментация ортасында жақсы субстрат бола алатынын және *Ga. xylinus BC-11* өсуі үшін жеткілікті мөлшерде қоректік заттар қамтамасыз ететінін көрсетті (Zhao et al., 2018). Рани және Аппайя кофейлі жидектердің қауызынан алынған экстрактты көміртегі көзі ретінде пайдаланып, *Ga. hansenii UAC09* микроорганизмімен БЦ өндірді. Бұл агроқалдықтарды қолдану глюкозаға бай қоректік ортамен салыстырғанда БЦ биосинтезінің үш есе артуына әкелді (Rani & Appaia, 2013).

Қазақстанда да осыған ұқсас зерттеулер әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың қолданбалы микробиология зертханасының ғалымдары жүргізді (Shokatayeva et al., 2019; Kistaubayeva et al., 2021). Қазақстан Республикасында сүт және қант өндірісі жақсы дамыған, олардың қалдықтары – сүт сарысуы мен меласса. Бұл қалдықтарды пайдаланудың тиімді тәсілдерінің бірі – олардың негізінде БЦ өндіруге арналған қарапайым әрі арзан қоректік орталарды әзірлеу. Сонымен қатар, соңғы жылдары биоэтанол өндіретін зауыттардың саны тұрақты өсуде. Мұндай биологиялық отынды өндіру процесінде органикалық қалдықтардың маңызды компоненттерінің бірі – глицерин болып табылады. Қалдықтарды тиімді кәдеге жарату экологиялық қауіпсіз және экономикалық тұрғыдан тиімді өндірістерді құрудағы басты басымдықтардың бірі саналады. Осыған байланысты авторлар МХШ ортамен салыстырғанда глюкозаның орнына сүт сарысуын, мелассаны және глицеринді қолданды (Шокатаева et al., 2018). Алынған деректерге сәйкес, БЦ шығымы ең төмен орта сүт сарысуы негізіндегі ортада болды (2,3 г/л). Сүт сарысуында болатын лактоза – глюкоза мен галактозадан тұратын дисахарид. Галактоза целлюлоза түзуші бактериялар үшін ең қолайсыз көміртегі көзі болып саналады (Гладышева & Скиба, 2014). Сонымен қатар, галактоза немесе лактоза бар ортада культивирлеу кезінде целлюлоза синтездеуге қабілетсіз мутанттардың үлесі артады. Cel- жасушаларының көбеюі субстрат үшін целлюлоза түзуші жасушалармен бәсекелестікке әкеледі. Глицерин негізіндегі ортада да штаммның өнімділігі төмен болды. Бұл ортада синтезделген пленканың массасы 4,75 г/л құрады, бұл МХШ ортасына қарағанда 33,19%-ға

аз. БЦ синтезі үшін ең қолайлы орта меласса негізіндегі орта болып шықты (Шокатаева et al., 2018). Ол микробиологиялық өндірісте көміртегінің ең үнемді көздерінің бірі болып табылады. Меласса – қант өндірудің соңғы кристалдану кезеңінің жанама өнімі. Мелассадағы сахарозаның жоғары мөлшеріне байланысты оны қоректік орталар дайындауға арналған шикізат ретінде белсенді қолданады. Мелассаның құрамында шамамен 80% құрғақ заттар бар, оның 57%-ын көмірсулар құрайды. Алайда бұл концентрация микроорганизмдердің өсуіне қолайсыз болғандықтан, мелассаны дистилденген сумен 10 есеге дейін сұйылту қажет болды. Мелассадағы қанттың төмен концентрациясы целлюлозаның тиімді өндірілуінің қажетті шарты болып табылады. Меласса негізіндегі ортада алынған полимер массасы 12,8 г/л құрады, бұл МХШ ортасындағыдан (7,11 г/л) 1,8 есе көп.

Өнеркәсіптік немесе ауылшаруашылық өндірісінің тиісті және арзан қосалқы өнімдерін пайдалану БЦ биосинтезінің тиімділігін арттырып қана қоймай, дәстүрлі глюкоза негізіндегі ортамен салыстырғанда өндіріс құнын да төмендететініне сенімділік бар (Hong & Qiu, 2008; Goelzer et al., 2009).

Өсімдік текті целлюлозамен салыстырғанда, БЦ айтарлықтай жоғары кристалдылықпен (84–89%), керемет химиялық тазалығымен (гемицеллюлоза, лигнин немесе пектин сияқты қоспалардың болмауы), басқа биоматериалдармен салыстырғанда жоғары созылу беріктігімен және жақсы қалыптау қабілетімен ерекшеленеді (Gorgieva & Trček, 2019). Сонымен қатар, БЦ талшықтарының көлденең қимасы әлдеқайда кіші, бұл материалдың жоғары кеуектілігін қамтамасыз етеді (Chawla et al., 2009; Moniri et al., 2017). Бұдан бөлек, БЦ өндіру процесінде целлюлозаны бөліп алу және тазарту үшін қатаң химиялық өңдеуді қажет етпейді (Shi et al., 2014).

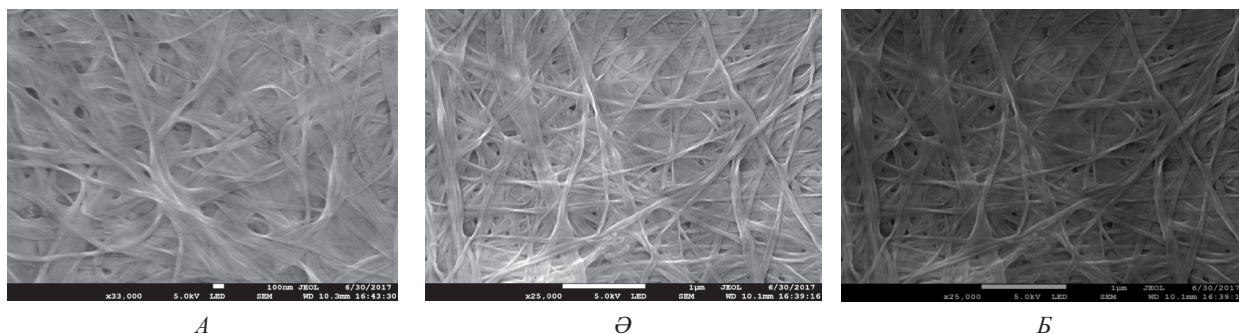
БЦ гидрогелі суды сіңіру және газдарды өткізу қабілетінің жоғары болуымен сипатталады, бұл бактериялардың тіршілік әрекеті үшін қоректік заттар мен қажетті элементтердің тиімді алмасуын қамтамасыз етеді. Tanpichai et al. Авторларының зерттеуі бойынша БЦ құрғақ заттың 1 грамына 309 граммға дейін ылғал ұстай алады және 150 °C дейінгі температураға, ал химиялық өңдеуден кейін 275 °C дейінгі температураға төтеп бере алады (Tanpichai et al., 2020). Бұл материалды құрылымын бұзбай кептіруге мүмкіндік береді. Жоғары беріктілігіне қарамастан, БЦ жақсы серпімділік, иілгіштік және пластикалық қасиеттерін сақтайды.

Сонымен қатар, БЦ наноталшықты биоматериал болып табылады. Оның микроталшықтары β -1,4-гликозидті байланыстармен жалғанған мономерлік бірліктерден тұратын анық құрылымдалған үш өлшемді торға ұйымдасқан. Мұндай

құрылым өсімдік текті целлюлозамен салыстырғанда жоғары механикалық беріктікке, полимерлену деңгейінің жоғарылығына, кристалдылық индексінің жоғары болуына және созылуға төзімділікке мүмкіндік береді (1-сурет).

1-сурет

Komagataeibacter xylinus C-3 штаммымен синтезделген БЦ пленкаларының СЭМ кескіндері: А – ХШ қоректік ортасы; Ә – МХШ қоректік ортасы; Б – Меласса қосылған қоректік орта (үлкейту $\times 25\,000$) (Shokatayeva et al., 2019)



БЦ – бұл өзінің жоғары биологиялық үйлесімділік және цитоуыттылықтың болмауы арқасында коммерциялық қызығушылық тудырып отырған әмбебап биоматериал.

БЦ-ның химиялық қасиеттері, ең алдымен, қайталанатын құрылымдық бірлік – целлобиозаға байланысты, оның құрамында үш бос гидроксил топтары бар: С2 және С3 позицияларында (екіншілік спирттер) және С6 позициясында (біріншілік спирт). Осы гидроксил топтарының болуына байланысты БЦ химиялық белсенді бетке ие және салыстырмалы түрде оңай этерификация және ацилирлеу реакцияларына түседі. Сонымен қатар, БЦ уытсыз және табиғи кеуекті биоматериал болып табылады және ерекше қасиеттерімен ерекшеленеді, олардың ішінде биоыдырағыштық, жоғары гидратация және тамаша ылғал ұстау қабілеті бар (өз салмағынан 100 есе артық су ұстай алады) (Gorgieva & Trček, 2019; Moniri et al., 2017).

БЦ-ның барлық қасиеттері көптеген факторларға – ортаның рН деңгейі, қоректік ортаның құрамы, өсіру уақыты мен жағдайлары, сондай-ақ продуцент микроорганизмнің түріне тікелей тәуелді. Соған қарамастан, БЦ мембранасы кенінен қолданылады: ол медицинада және косметологияда белсенді қолданылып қана қоймай, тағам өнеркәсібінде де Филиппиндік десерт – Nata de coco ретінде көп жылдан бері белгілі (Azeredo et al., 2019). Соңғы жылдары БЦ-ны тағамдық өнімдерге арналған табиғи, бактериялармен өндіретін

орау материалы ретінде арнайы модификациялап қолдану белсенді зерттелуде (Gama et al., 2016).

Тауарлар мен қызметтер нарығының көлемі адамның белсенділігінің артуымен және халық санының тез өсуімен қатар ұлғайып келеді. Бұл мұнай-химиялық және синтетикалық пластмассалардың кеңінен қолданылуы салдарынан экологиялық проблемаларға әкелді. Осыған жауап ретінде көптеген елдер пластикалық қаптаманы қолданудың теріс салдарын азайтуға бағытталған заңнамалық шаралар қабылдады. Ыдырамайтын қатты қалдықтардың қоршаған ортаға әсері – әсіресе мұхиттар мен қоқыс полигондарын ластау – орау саласында тұрақты және экологиялық қауіпсіз баламаларды іздеуге түрткі болды. Мұнай негізіндегі пластмассалар коммуналдық қалдықтардың шамамен үштен бірін құрайды, олардың тек 2,2%-ы ғана қауіпсіз өңдеуден өтеді (V poiskakh plastika, 2020). Мұндай қалдықтардың жиналуы мен жағылуынан пайда болатын уыттылық, сондай-ақ тағамдық қаптаманың қауіпсіздігіне қойылатын қатаң талаптар биоыдырайтын материалдар мен биопластиктерге назар аударды. Экономикалық тұрғыдан тиімді және экологиялық таза орау материалдары тағам қалдықтарының көлемін азайтуға (Schmidt-Traub et al., 2019) және көмірқышқыл газының шығарындыларын төмендетуге (Zheng & Suh, 2019) мүмкіндік береді.

Қаптама – тағам өнеркәсібінің ажырамас бөлігі және өнімдерді қоршаған ортадан оқшаулап,

оларды химиялық, биологиялық және физикалық әсерлерден қорғауда шешуші рөл атқарады. Оның функциялары алуан түрлі: өнімнің бұзылуына жол бермеу, ылғал, оттегі, көмірқышқыл газы, радиация/жарық, иістер мен дәмдердің өтуін шектеу сияқты тосқауылдық қасиеттерді қамтамасыз ету. Бұдан бөлек, қаптама тағам өнімдерінің микробиологиялық қауіпсіздігін сақтауға және олардың сақтау мерзімін ұзартуға бағытталған.

Қазіргі таңда қаптама өнеркәсібінде негізгі шикізат ретінде мұнайдан алынатын пластиктің түрлі түрлері, шыны, металл, қағаз, алюминий және барған сайын жиі қолданылып жүрген биополимерлер пайдаланылады (Bandyopadhyay et al., 2018). Синтетикалық полимерлер бұл секторда өздерінің керемет механикалық қасиеттері, мөлдірлігі, икемділігі, термопластикалығы, жеңілдігі және өндірісінің төмен құны арқасында үлкен үлеске ие болды. Алайда осы артықшылықтарға қарамастан, мұнайдан алынған материалдардың кеңінен қолданылуы күрделі экологиялық мәселелер тудыруда. Дәстүрлі тағамдық ораулардың ыдырауға төзімділігі пластикалық қалдықтардың жиналуына және экожүйенің ластануына әкеледі. Синтетикалық полимерлердің басқа да кемшіліктеріне өндіріс кезінде CO₂ деңгейінің жоғары шығарындылары, қатерлі ісік ауруларының қаупі (пластмассалардағы кейбір қоспалар уытты болуы мүм-

кін) және қайта өңдеудің жоғары құны жатады (Nagalakshmaiah et al., 2019).

Еуропалық комиссияның бағалауы бойынша, Еуропада жыл сайын шамамен 25,8 млн тонна пластикалық қалдықтар түзіледі, олардың тек 30%-дан азы қайта өңделеді (European Commission, 2018). Осыған байланысты Еуропалық жасыл келісім 2050 жылға қарай климаттық бейтараптыққа қол жеткізуге бағытталған келісілген стратегияны іске қосты. ЕС-тің экономиканың түйік цикліне арналған пластик стратегиясы, атап айтқанда, қайта қолдануға және қайта өңдеуге болатын қаптама тұжырымдамасын әзірлеуді, экологиялық таза баламаларды немесе көп реттік жүйелерді енгізуді қарастырады. Еуропалық комиссияның экологиялық қалдықтарға қатысты қабылдаған шешімдері биоыдырайтын орау материалдарына, соның ішінде бактериалды наноцеллюлозаға деген қызығушылықты арттырды (European Commission, 2020).

Биологиялық орау материалдары жаңартылатын көздерден алынған және толықтай ыдырайтын қасиетке ие. Олар тікелей биологиялық жүйелер (мысалы, өсімдіктер, жануарлар, балдырлар, микроорганизмдер) арқылы синтезделуі немесе биологиялық негіздегі мономерлерді полимерлеу нәтижесінде алынуы мүмкін (мысалы, полимолекулалық қышқыл). Осыған сәйкес, бұл полимерлерді олардың шығу тегі мен өндіріс тәсіліне қарай үш негізгі топқа бөлуге болады (2-сурет).

2-сурет

Биоқаптама өндірісінде қолданылатын биополимерлер (DeGruson, 2016; Ramos et al., 2018; Kumar et al., 2017)



Биологиялық пленкалар мен жабындар негізінен макромолекулалық матрица мен пластификаторлардан немесе қосымша компоненттерден тұратын мембраналар болып табылады. Мұндай қоспалар әдетте биопластиктерге тән сынғыштықты азайтуға, сондай-ақ олардың механикалық және тосқауылдық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді (Okuyama et al., 1992; Глазков et al., 2018).

Джунг және соавторларының жұмысында бірнеше микрометр қалыңдықтағы жеуге жарамды және жуылатын жабын жасалды (Jung et al., 2020). Ол 54% тауық альбуминінен және өсімдік текті целлюлозаның нанокристалдарынан тұрды және жемістердің сақтау мерзімін арттыра алды. Папайя, авокадо, банан және құлпынайды осы жабынмен өңдеу олардың дәмдік қасиеттерін сақтай отырып, балғындығын ұзартуға мүмкіндік берді. Ақуызды жабын оттегіге тосқауыл болды, бұл жемістерді сақтауға септігін тигізді. Механикалық беріктікті арттыру үшін құрамға целлюлоза нанокристалдары қосылды, бұл материалдың су мен газдарға өткізгіштігін қосымша төмендетті. Пленка икемді болып қала берді және бірнеше рет бүктелгенде де зақымдалмады. Шағын мөлшерде жұмыртқа сарысын қосу жабынның ылғалға сезімталдығын азайтты. Сонымен қатар, куркуминді қосу жабынға антибактериалды, саңырауқұлақтарға қарсы және бактерияға қарсы қасиеттер берді (Okuyama et al., 1992; Jung et al., 2020). Зерттеуде қолданылған целлюлозаның нанокристалдары БЦ-дан алынған.

Тағамдық қаптама бөгде ластаушылардың, микроорганизмдердің және бөгде иістердің енуіне жол бермей, өнімнің сақтау мерзімін арттыруға ықпал ететін қорғаныс контейнері ретінде қызмет етеді.

Жанартылатын көздерден алынған мұндай материалдар әдетте тағам өнімдерін орауда қолданылады және құрамына полисахаридтер (целлюлоза, крахмал, хитозан), ақуыздар (коллаген, казеин, глютен), биомассадан алынған мономерлерді полимерлеу арқылы алынған полимерлер (полилактик қышқыл – PLA), сондай-ақ микроорганизмдер тікелей синтездейтін полимерлер (полигидроксиалканоаттар – PHA, БЦ, пуллулан, курдлан, ксантан) жатады (Grujić et al., 2017).

Табиғи полисахаридтер, ақуыздар және олардың туындылары орау өнеркәсібінде қолданылатын биополимерлердің бірі болып табылады (Pellicer et al., 2017). Бұл биоматериалдар

салыстырмалы түрде жақсы тосқауылдық қасиеттерге ие және қалыпты төмен шығындармен үлкен өнеркәсіптік масштабта өндірілуі мүмкін, бұл оларды мұнайдан алынатын пластмассаларға тартымды балама етеді. Дегенмен, биомассадан алынған полимерлердің коммерциялануы әлі де шектеулі, себебі олар пластиктермен салыстырғанда нашар созылу беріктігі, морттылығы, жылу тұрақсыздығы және судың әсеріне сезімталдығы сияқты кемшіліктерге ие (Zhong et al., 2020; Jabeen et al., 2015; Milani & Tirgarian, 2020; Chen et al., 2019).

Сондықтан сапасы жақсартылған жеуге жарамды пленкалар мен жабындарды алу үшін оларды әртүрлі арматуралық материалдармен және қоспалармен, мысалы, пластификаторлармен (глицерин, гликоль, сорбит) араластырады (Borges et al., 2015; Jeyasubramanian & Balachander, 2016; Zakaria et al., 2018; Rahman, 2019; Shendurse, 2018; Wagh, 2014).

Қаптама өнеркәсібінде қолданылатын ең қызықты материалдар санатына микроорганизмдер тікелей өндіретін биополимерлер жатады. Бұған, мысалы, алифатты полиэфирлер – полигидроксиалканоаттар (PHA), сондай-ақ пуллулан, курдлан, ксантан және БЦ сияқты микробтық полисахаридтер кіреді. Бұл материалдардың негізгі артықшылықтарына уыттылықтың болмауы, биоыдырағыштық, пластикалық және газдарға таңдамалы өткізгіштік жатады (Bugnicourt et al., 2014; Ferreira et al., 2016).

Сонымен қатар, микробтық полимерлердің негізгі кемшіліктері – жоғары өндірістік шығындар және салыстырмалы түрде төмен механикалық қасиеттер, бұл олардың тағамдық өнімдерге арналған коммерциялық орау саласында бәсекеге қабілеттілігін шектейді (Ferreira et al., 2016; Mitra et al., 2020). Қазіргі уақытта полигидроксиалканоаттар негізінен майлылығы жоғары тағамдарды (мысалы, зәйтүндер, ірімшік, жанғақтар), мұздатылған, оттекке сезімтал және органикалық өнімдерді орау үшін қолданылады (Grujić et al., 2017; Arrieta et al., 2014; Lin et al., 2018; Shen et al., 2009). Пуллулан, курдлан және ксантан сияқты микробтық полисахаридтердің жеуге жарамды пленкалар мен жабындар ретінде қолдану әлеуеті жоғары. Алайда олардың физика-химиялық және механикалық қасиеттерін жақсарту үшін көбінесе басқа полимерлермен және арматуралық қоспалармен біріктіріледі (Wu J et al., 2013; Zhang et al., 2013; Kraśniewska et al., 2019; Mohsin et al., 2020; Nur Hazirah et al.,

2016). Солардың ішінде БЦ, қажетті пішіндерде, қалыңдықта және өлшемде үздіксіз мембрана ретінде синтезделетін, орау өнеркәсібінде кеңінен қолданылатын жоғары бәсекеге қабілетті материалға айналып отыр.

БЦ қолданылу аясы өте ауқымды – ол тағам өнімдеріне арналған жеуге жарамды орау материалдарынан бастап, белсенді және интеллектуалды қаптама жүйелеріне дейін кеңінен пайдаланылады. Әдетте, биоматериалдар негізіндегі орау өнімге химиялық, биологиялық және механикалық қорғаныс қамтамасыз етуі тиіс. Осы тұрғыда БЦ-ны тағам өнеркәсібінде қолданудың негізгі артықшылықтары – оның жеуге жарамдылығы, биоыдырайтындығы, уыттылықтың болмауы, жақсы тосқауылдық селективтілігі және жоғары механикалық беріктігі. АҚШ-тың Азық-түлік және дәрі-дәрмекті бақылау басқармасы (FDA) БЦ-ны қауіпсіз деп таныған (GRAS – жалпы танылған қауіпсіздік мәртебесі), сондықтан ол қауіпсіз тағамдық ингредиент ретінде кеңінен қолданылуы мүмкін (Azeredo et al., 2019).

Бұл материалдың басқа биополимерлермен салыстырғандағы басты артықшылығы – стационарлық бактериалды культура толық өлшемді, салыстырмалы түрде қалың мембрана түзеді. Бұл мембрана өте жақсы механикалық қасиеттерге және қалыптау қабілетіне ие, және оны тазалау мен кептіруден кейін тікелей бастапқы орау материалы ретінде қолдануға болады. Дегенмен, табиғи микробтық целлюлозаны қолданудың кейбір кемшіліктері бар, мысалы, оның мембраналарының гидрофильді сипаты немесе антимикробтық және антиоксиданттық белсенділіктің болмауы. Осы шектеулерді жеңу үшін БЦ үнемі модификациялануда. Ең көп қолданылатын әдістердің бірі – БЦ матрицасының табиғи қасиеттерін әртүрлі арматуралық қосылыстардың физика-химиялық және биологиялық ерекшеліктерімен үйлестіру. Бұл тәсіл БЦ-ның бастапқы сипаттамаларын жақсартып қана қоймай, сонымен бірге нақты қолдану салаларына қажетті жаңа, арнайы қасиеттерге ие микробтық целлюлоза пленкаларын алуға мүмкіндік береді.

Композитті материалдар БЦ матрицасынан (қаңқалық құрылым қызметін атқарады) және оған ерекше физика-химиялық әрі биологиялық қасиеттер беретін арматуралық қосылыстардан тұрады. Әдетте, БЦ композиттерін синтездеу оның функционалдық мүмкіндіктерін кеңейтуге және қаптама материалдарын жасауға бағытталған. Бұл тәсіл БЦ-ның табиғи қасиеттерін жетілдіруге немесе оған қосымша пайдалы си-

паттамалар беруге мүмкіндік береді. БЦ модификациясы, негізінен, оның физика-химиялық көрсеткіштерін (ыдырау қабілеті, механикалық, термиялық, химиялық және беткі қасиеттері, реологиялық сипаттамалары) жақсартуға, сондай-ақ тағам өнімдерінің сапасын сақтау, сақтау мерзімін ұзарту және сапасын бақылау үшін биоактивті қосылыстар енгізуге бағытталған (Azeredo et al., 2019; Ramos et al., 2018).

Белсенді және/немесе интеллектуалды қаптама материалдарын жасау мақсатында БЦ-ны модификациялау үшін антимикробтық және антиоксиданттық агенттер, қоректік заттар, пластификаторлар, тұрақтандырғыштар, оттегі сіңіргіштер және антистатиктер сияқты әртүрлі функционалдық қоспаларды қолдануға болады (Ramos et al., 2018).

БЦ негізіндегі композиттер салыстырмалы түрде жаңа материалдар қатарына жатады. Олар бастапқыда медициналық мақсаттарда қолдануға ұсынылғанымен, қазіргі уақытта тағамдық орау өнеркәсібінде де сәтті қолданылуда. Қажетті функционалдық топтарды енгізу және БЦ матрицасына белгілі бір қасиеттер беру осы полисахаридті химиялық және физикалық модификациялау арқылы жүзеге асырылады.

Әдебиеттерде БЦ функционалдандырудың екі негізгі тәсілі атап көрсетіледі: *in situ* және *ex situ* әдістері (Cacicedo et al., 2016).

Биополимерлі композиттерді синтездеу үшін ең жиі қолданылатын стратегия – *in situ* әдісі, ол БЦ өндірісінің басында культуралық ортаға арматуралық материалдарды (мысалы, натрий альгинаты, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), поливинилспирт (ПВС), желатин, агар, пектин, крахмал) қосуды қамтиды (Cheng et al., 2011; Lin et al., 2016; Osorio et al., 2014; Andriani et al., 2020).

Модификацияның артықшылықтары – қарапайымдылығы және қосылған қосылыстардың БЦ-ның өсіп келе жатқан фибриллалық желісінің бөлігіне айналуы, бұл қажетті қасиеттері бар тұрақты композиттер алуға мүмкіндік береді. Алайда *in situ* әдісінің басты шектеулері – кейбір қоспалардың культуралық ортада ерімейуі және жекелеген арматуралық қосылыстардың бактериялардың өсуін тежейтін қасиеті (Cheng et al., 2011).

Ал *ex situ* модификациясы, керісінше, БЦ өндірісі аяқталғаннан кейін жүзеге асырылады. Бұл постсинтетикалық әдіс негізінен БЦ-ның кеуекті нанофибрилалық матрицасын биоактивті материалдармен қанықтыруға бағытталған. *Ex situ* әдісінің негізгі артықшылықтары – антимикроб-

тық агенттерді қолдану мүмкіндігі және БЦ-ның бастапқы құрылымдық ерекшеліктерін сақтау. Бұл модификация түрінің басты кемшілігі – гидрофобты арматуралық қосылыстарды қолдану мүмкін еместігі. Сонымен қатар, БЦ порларына тек субмикрондық немесе наноөлшемді бөлшектер ене алады (Andriani et al., 2020). Дегенмен, осы функционалдандыру әдістері БЦ-ның табиғи пленкаларының физика-химиялық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік беріп, оларды тағам өнімдерін орау нарығында қолданудың жаңа мүмкіндіктерін ашты.

Табиғи күйінде БЦ тағамдық өнім ретінде (Филиппиндік Nata de coco десерті ретінде белгілі) биоыдырайтын жеуге жарамды орау материалы ретінде қолданылуы мүмкін және тағаммен бірге тұтынуға жарамды (Vilela et al., 2018; Chunyan et al., 2012). Нативті БЦ өздігінен айқын антимикробтық және антиоксиданттық белсенділік көрсетпейді, алайда оның құрылымында химиялық модификацияға қолайлы жоғары реакцияға қабілетті гидроксил топтары (–ОН) бар. Бұл қоспаларға биоактивті агенттер (антимикробтық препараттар, антиоксиданттар, өсімдік экстракттары, эфир майлары, органикалық қышқылдар, ферменттер және т.б.), табиғи пигменттер, металл иондары, бейорганикалық және органикалық нанобөлшектер, пластификаторлар, УФ-стабилизаторлар, биополимерлер (мысалы, хитозан, крахмал, пектин) немесе арматуралық қоспалар (мысалы, КМЦ, ПВС, поливинилпирролидон (ПВП), монтмориллонит (ММТ)) жатады (Cacicedo et al., 2016).

Бұл әрекеттердің нәтижесінде тағам өнімдерін ластанудан және сыртқы ортаның әсерінен (тосқауылдық және антимикробтық қасиеттер), сондай-ақ сақтау және тасымалдау кезінде механикалық зақымданудан қорғауға қабілетті биоматериалдар алынады. Мысалы, БЦ-ны ПВП және КМЦ-пен біріктіру арқылы нативті БЦ мембраналарымен салыстырғанда жақсартылған механикалық, оптикалық және биоыдырайтын қасиеттерге ие композициялар алынған (Bandyopadhyay et al., 2018). Бұл пленкалар экологиялық таза балама ретінде қолданылуы мүмкін. **БЦ/ПВП/КМЦ биокөпозиттері** жоғары созылу беріктігінің арқасында механикалық зақымдануға жақсы төзімділік көрсетеді және осылайша көкөністер мен ет өнімдерінің сақтау мерзімін ұзартады (Bandyopadhyay et al., 2018). БЦ-ның гидроксил топтары қамтамасыз ететін химиялық реактивтілігі оны орау өнеркәсібінің нақты талаптарын орындау үшін (*in situ* және *ex situ*) түрлі модификацияларды

жүргізуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, жоғары кеуектілік пен үлкен беттік аудан БЦ-ны белсенді қосылыстармен физикалық өзара әрекеттесу үшін қолайлы материал етеді (Azeredo et al., 2019).

БЦ негізіндегі белсенді/интеллектуалды орауды өндіруге арналған негізгі тәсілдерге сіңдіру, иммобилизация әдістері немесе БЦ матрицасын жабындармен қаптау жатады (Andriani et al., 2020). Мысалы, тағамдық патогендерден туындаған бұзылудың алдын алатын антимикробтық мембраналар БЦ пленкаларын низин, лактоферрин немесе ϵ -полилизин сияқты бактериястатикалық ерітінділерге батыру арқылы алынды (Nguyen et al., 2008; Padrao et al., 2016; Wahid et al., 2019). Иммобилизацияны қолданатын әдістерге, мысалы, белсенді заттарды (грибтік лакказан немесе лизоцим сияқты) БЦ бетіне физикалық адсорбциялау немесе глутар альдегидін қолдану арқылы химиялық байланыстыру кіреді (Chen et al., 2015; Bayazidi et al., 2018; Buguaga-Ramiro et al., 2020). *Ex situ* модификациясының тағы бір мысалы – БЦ мембраналарына күміс нанобөлшектері мен молибден триоксидінің альгинатын жоғары қарқынды ультрадыбыстық ванна арқылы енгізу. Бұл кейіннен сутегі сульфидімен (H_2S) қолданылатын гибриді пленкалар ретінде пайдаланылды (Sukhavattanakul & Manuspiya, 2020). Жалпы, осы технология арқылы өндірілген орау материалдары тағам өнімдерінің сапасын сақтау үшін арналған.

Соңғы уақытта БЦ және оның модификацияларын тағам өнімдерін бүлінуден қорғау үшін антимикробтық қасиеттері бар қосымша функциялары бар орау материалдары ретінде қолдану мүмкіндіктерін зерттеуге көбірек назар аударылуда. Көптеген зерттеулер табиғи антимикробтық агенттерді тағамдық орау жүйелеріне енгізу өнімдердің сақтау мерзімін ұзартуға және олардың сапасын сақтауға ықпал ететінін растады (Jafarzadeh et al., 2021). Мысалы, авторлар (Stroescu et al., 2019) БЦ және оның модификациялары негізінде суперабсорбент материалдардан жасалған антимикробтық тағамдық төсемдерді әзірледі. Олар жемістердің, көкөністердің және ет өнімдерінің дәмдік қасиеттерін тиімді сақтауға мүмкіндік берді (Okuyama et al., 1992).

БЦ-ның жеуге жарамдылығы оның негізінде бірегей тағамдық және физика-механикалық сипаттамалары бар жеуге жарамды орау материалдарын жасауға жол ашады (Zahan et al., 2020). Дегенмен, биополимерлі ораулардың кең ауқымды коммерциялық қолданылуына кедергі

келтіретін шектеулердің бірі – олардың синтетикалық полимерлерге қарағанда әмбебаптығының төмендігі (Ludwicka et al., 2020). Осыған байланысты қазіргі зерттеулер әртүрлі композициялар мен полимерлі композиттерді әзірлеуге бағытталған, олар синтетикалық пластмассалардың әмбебап қасиеттерін белгілі бір талаптарға сай имитациялай алады.

Айта кету керек, кейбір биопленкалар мен жабындар гигиеналық нормаларға сай болу үшін қосымша сыртқы орауды қажет етеді. Осыған байланысты авторлар (Azeredo et al., 2019) термопластикалық жүгері крахмалы және БЦ талшықтары негізінде жаңа композиттік материал әзірледі. Бұл материалдағы БЦ талшықтарының ең жоғары мөлшері 15%-дан аспайды. Зерттеулер көрсеткендей, талшықтардың қосылуы композиттің тосқауылдық қасиеттерін жақсартып, қаттылығын арттырады, бұл оның серпімділік модулінің ұлғаюына әкеледі.

Зерттеуде БЦ талшықтарын пайдаланып композиттер алу қарастырылады, ерекше қызығушылық тудырған жұмыстың бірі – Салариа М. және әріптестері (Salaria et al., 2019) әзірлеген нанокомпозит. Ол хитозаннан, қышқылдық гидролиз арқылы алынған БЦ нанокристалдарынан және күміс нанобөлшектерінен тұрады. Бұл модификациялаушы компоненттерді енгізу хитозан пленкаларының түсі мен мөлдірлігіне айтарлықтай әсер етіп, олардың механикалық қасиеттерін, бу өткізгіштігін және суға сезімталдығын жақсартады. Сонымен қатар, бұл нанокомпозит тағамдық патогендерге қарсы айқын антимикробтық белсенділік көрсетеді, бұл оны өнімнің сақтау мерзімін ұзартуға бағытталған белсенді тағамдық орау материалы ретінде перспективалы етеді.

БЦ құрамына әртүрлі модификаторларды енгізу ерекше қасиеттері бар жаңа материалдарды жасауға мүмкіндік береді. Мысалы, БЦ пленкаларына лаурин қышқылын қосу тағам, медицина және фармацевтика салаларында қолдануға болатын биоыдырайтын және антимикробтық материал алуға мүмкіндік берді. Зерттеулер лаурин қышқылы *Bacillus subtilis* өсуін тиімді түрде тежейтінін көрсетті, бұл мұндай пленканы орауда синтетикалық пластмассаларға лайықты балама етеді (Skiba et al., 2021).

Осылайша, БЦ-ны антимикробтық және басқа да функционалдық заттармен модификациялау әртүрлі қасиеттері бар орау материалдарын жасау үшін кең мүмкіндіктер ашады. Бүгінгі таңда бұл БЦ қолданудың ең перспективалы бағыттарының бірі болып саналады.

Қорытынды

Әдеби дереккөздерді талдау бактериалды целлюлозаның (БЦ) құрылымы, қасиеттері, қолдану салалары және оны өндіру процесінде пайдаланылатын субстраттардың түрлері сияқты негізгі аспектілерін жүйелеуге мүмкіндік берді. БЦ алғаш рет шамамен жүз жыл бұрын сипатталғанымен, оның практикалық қолданылуы соңғы онжылдықтарда ғана айтарлықтай кеңейе бастады. Ерекше физика-химиялық және құрылымдық қасиеттерінің арқасында БЦ әртүрлі салаларда зерттеліп келеді, соның ішінде сорбенттік материалдарда, қағаз және тоқыма өндірісінде, тағам өнеркәсібінде қоспа ретінде, сондай-ақ сүзгілеуші және орау материалдары ретінде қолдану мүмкіндігі қарастырылуда.

Тағам өнімдерін орау сақтау және тасымалдау процесінің маңызды элементі болып табылады және өнімдердің сапасына, қауіпсіздігіне, сақтау мерзіміне және экономикалық тиімділігіне әсер етуі мүмкін. Қазіргі уақытта мұнай негізіндегі полимерлерден жасалған дәстүрлі орау материалдары кеңінен қолданылады, себебі олар өндірісінің салыстырмалы түрде қарапайымдылығымен, төмен бағасымен және жақсы механикалық қасиеттерімен ерекшеленеді. Алайда олардың көпшілігі биологиялық жолмен ыдырамайды және қоршаған ортада жиналуы белгілі бір экологиялық мәселелер туындатуы мүмкін. Осыған байланысты соңғы жылдары жаңартылатын шикізат көздерінен алынатын биоыдырайтын материалдарды зерттеуге қызығушылық артып келеді.

Бактериалды целлюлоза мұндай материалдардың бірі ретінде қарастырылады. Ол жоғары кристалдылық, химиялық тазалық, үш өлшемді наноталшықты құрылым және салыстырмалы түрде жақсы механикалық қасиеттерімен сипатталады. Сонымен қатар, БЦ-ның биоыдырағыштығы мен биосәйкестігі оны тағамдық орау материалдарына арналған әлеуетті биополимерлер қатарына жатқызуға мүмкіндік береді. БЦ-ны әртүрлі арматуралық қосылыстармен немесе биоактивті компоненттермен біріктіру оның физика-химиялық және функционалдық қасиеттерін өзгертуге және белсенді немесе интеллектуалды орау жүйелерін әзірлеуге мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, БЦ негізіндегі материалдарды кең ауқымды өндірісте қолдану бірқатар шектеулермен байланысты болуы мүмкін. Олардың қатарына продуцент микроорганизмдердің салыстырмалы түрде төмен өнімділігі, сондай-

ақ өндірістік процестің экономикалық тиімділігіне әсер ететін қоректік орталардың және кейбір функционалдық қоспалардың жоғары құны жатады. Осыған байланысты қазіргі зерттеулердің едәуір бөлігі өндірістік шығындарды төмендету тәсілдерін қарастыруға бағытталған. Атап айтқанда, қоректік орталардың құрамын оңтайландыру, сондай-ақ дәстүрлі Хестрин–Шрамм (ХШ) ортасын ауыл шаруашылығы немесе өнеркәсіптік биомассалық қалдықтарға негізделген баламалармен алмастыру мүмкіндіктері зерттелуде.

Жалпы алғанда, БЦ синтезі мен модификациялау әдістерін жетілдіру бұл материалды тағамдық орау саласында қолдану мүмкіндіктерін кеңейтуі мүмкін. Алдағы зерттеулер БЦ өндірісінің экономикалық тиімділігін арттыруға және оның функционалдық қасиеттерін мақсатты түрде реттеуге бағытталуы тиіс. Бұл бағыттағы ғылыми жұмыстардың нәтижелері БЦ-ны экологиялық тұрғыдан қолайлы орау материалдарының бірі ретінде қарастыруға негіз болуы мүмкін.

Қаржыландыру көзі

Жұмыс 2025–2027 жылдарға арналған Қазақстан Республикасының Ұлттық гранттар бағдарламасының қолдауымен жүзеге асырылды. Қар-

жыландыру Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің 217 «Ғылымды дамыту» бюджеттік бағдарламасы және 102 «Ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру» қосымша бағдарламасы аясында берілді, келісім-шарт №371, 2025 жылғы 06 қазан, ИРН АР26103429 «Инновациялық тағамдық қаптама жасауға арналған биоыдырайтын функционалды целлюлоза пленкасын алудың биотехнологиялық тәсілі» орындалды.

Мүдделер қақтығысы туралы мәлімдеме

Авторлар осы жұмыста ұсынылған нәтижелерге ықпал етуі мүмкін қандай да бір белгілі бәсекелес қаржылық мүдделердің немесе жеке қатынастардың жоқ екенін мәлімдейді.

Авторлардың үлесі

М.А. Абдулжанова: концептуализация, әдіснама, жазу – бастапқы нұсқа, формалдық талдау. Д.Х. Шокатаева: деректерді жинау және басқару, ғылыми жетекшілік, жобаны жалпы басқару. С.Д. Жантлесова: әдіснама, деректерді талдау, жазу – рецензиялау және редакциялау. А. Балтабай: ресурстар, зерттеуге техникалық қолдау. Ж. Батыкова: зерттеуді жүргізу, визуализация.

Әдебиеттер

- Aleshina, L. A., Glazkova, S. V., Lugovskaya, L. A., Podoinikova, M. V., Fofanov, A. D., & Silina, E. V. (2001). Sovremennye predstavleniya o stroenii tsellyuloz (obzor). *Khimiya rastitel'noy syr'ya*, (1), 5–36. (In Russian)
- Andriani, D., Apriyana, A. Y., & Karina, M. (2020). The optimization of bacterial cellulose production and its applications: A review. *Cellulose*, 27, 1–20 <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03273-9>
- Arrieta, M. P., Castro-López, M. D. M., Rayón, E., Barral-Losada, L. F., López-Vilariño, J. M., López, J., & González-Rodríguez, M. V. (2014). Plasticized poly(lactic acid)-poly(hydroxybutyrate) (PLA-PHB) blends incorporated with catechin intended for active food-packaging applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62, 10170–10180 <https://doi.org/10.1021/jf5029812>
- Azeredo, H. M. C., Barud, H., Farinas, C. S., Vasconcellos, V. M., & Claro, A. M. (2019). Bacterial cellulose as a raw material for food and food packaging applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00007>
- Bandyopadhyay, S., Saha, N., Brodnjak, U. V., & Saha, P. (2018). Bacterial cellulose based greener packaging material: A bioadhesive polymeric film. *Materials Research Express*, 5, 115405. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aadb01>
- Bayazidi, P., Almasi, H., & Asl, A. K. (2018). Immobilization of lysozyme on bacterial cellulose nanofibers: Characteristics, antimicrobial activity and morphological properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 2544–2551. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.137>
- Bharimalla, A. K., Deshmukh, S. P., Vigneshwaran, N., Patil, P. G., & Prasad, V. (2017). Nanocellulose-polymer composites for applications in food packaging: Current status, future prospects and challenges. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56, 805–823. <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1233281>
- Bogatyeva, A. O. (2021). *Optimizatsiya uslovii biosinteza bakterial'noy tsellyulozyi poluchenie na ee osnove biokompozitsionnykh materialov s antibakterial'nymi svoystvami* (PhD thesis). Saransk. (In Russian)
- Borges, J. A., Romani, V. P., Cortez-Vega, W. R., & Martins, V. G. (2015). Influence of different starch sources and plasticizers on properties of biodegradable films. *International Food Research Journal*, 22, 2346–2351.
- Bugnicourt, E., Cinelli, P., Lazzeri, A., & Alvarez, V. (2014). Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. *Express Polymer Letters*, 8, 791–808. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2014.82>

- Buruaga-Ramiro, C., Valenzuela, S. V., Valls, C., Roncero, M. B., Pastor, F. I. J., Díaz, P., & Martínez, J. (2020). Development of an antimicrobial bioactive paper made from bacterial cellulose. *International Journal of Biological Macromolecules*, *158*, 587–594. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.234>
- Cacicedo, M. L., Castro, M. C., Servetas, I., Bosnea, L., Boura, K., Tsafrakidou, P., Dima, A., Terpou, A., Koutinas, A., & Castro, G. R. (2016). Progress in bacterial cellulose matrices for biotechnological applications. *Bioresource Technology*, *213*, 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.071>
- Carreira, P., Mendes, J. A. S., Trovatti, E., Serafim, L. S., Freire, C. S. R., Silvestre, A. J. D., & Neto, C. P. (2011). Utilization of residues from agro-forest industries in the production of high value bacterial cellulose. *Bioresource Technology*, *102*, 7354–7360. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.081>
- Chawla, P. R., Bajaj, I. B., Survase, S. A., & Singhal, R. S. (2009). Microbial cellulose: Fermentative production and applications. *Food Technology and Biotechnology*, *47*, 107–124.
- Chen, H., Wang, J., Cheng, Y., Wang, C., Liu, H., Bian, H., Pan, Y., Sun, J., & Han, W. (2019). Application of protein-based films and coatings for food packaging: A review. *Polymers*, *11*, 2039. <https://doi.org/10.3390/polym11122039>
- Chen, L., Hong, F., Yang, X.-X., & Han, S.-F. (2013). Biotransformation of wheat straw to bacterial cellulose and its mechanism. *Bioresource Technology*, *135*, 464–468. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.029>
- Chen, L., Zou, M., & Hong, F. F. (2015). Evaluation of fungal laccase immobilized on natural nanostructured bacterial cellulose. *Frontiers in Microbiology*, *6*, 1245. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01245>
- Cheng, K. C., Catchmark, J. M., & Demirci, A. (2011). Effects of CMC addition on bacterial cellulose production in a biofilm reactor. *Biomacromolecules*, *12*, 730–736. <https://doi.org/10.1021/bm101363t>
- Chunyan, Z., & Yuguang, Z. (2012). Edible food packaging film. CN Patent CN102145779B.
- Çakar, F., Özer, I., Aytekin, A. Ö., & Şahin, F. (2014). Improved production of bacterial cellulose by semi-continuous process in molasses medium. *Carbohydrate Polymers*, *106*, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.01.103>
- DeGruson, M. L. (2016). Biobased polymer packaging. In G. Smithers (Ed.), *Reference module in food science* (pp. 1–10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03373-4>
- Diez-Pascual, A. M. (2019). Synthesis and applications of biopolymer composites. *International Journal of Molecular Sciences*, *20*, 2321. <https://doi.org/10.3390/ijms20092321>
- European Commission. (2018). *A European strategy for plastics in a circular economy* (Document 52018DC0028). Publications Office of the European Union.
- European Commission. (2020). *A new circular economy action plan for a cleaner and more competitive Europe* (Document 52020DC0098). Publications Office of the European Union.
- Ferreira, A. R. V., Alves, V. D., & Coelho, I. M. (2016). Polysaccharide-based membranes in food packaging applications. *Membranes*, *6*, 22. <https://doi.org/10.3390/membranes6010022>
- Florea, M., Hagemann, H., Santosa, G., et al. (2016). Engineering control of bacterial cellulose production using a genetic toolkit and a new cellulose-producing strain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(24), E3431–E3440. <https://doi.org/10.1073/pnas.1522985113>
- Gama, M., Dourado, F., & Bielecki, S. (2016). *Bacterial nanocellulose: From biotechnology to bio-economy*. Elsevier. ISBN: 9780444634580
- Gladysheva, E. K., & Skiba, E. A. (2014). Vliyanie uglerodnogo sostava pitatel'nykh sred na produktivnost' tsellyulozozinteziruyushchikh bakterii (obzor). *Polzunovskii vestnik*, (3), 168–173. (In Russian) https://journal.altstu.ru/media/old2/pv2014_03/pdf/168gladysheva.pdf
- Glazkov, S. V., Koptsev, S. V., Lesnikova, N. A., Bogdanova, V. V., & Volodarskaya, T. K. (2018). Sovremennye innovatsionnye tekhnologii khraneniya svezhikh fruktov i ovoshchei i produktov ikh pererabotki (obzor). *Ovoshchi Rossii*, (5), 84–89. (In Russian) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-5-84-89>
- Goelzer, F. D. E., Faria-Tischer, P. C. S., Vitorino, J. C., Sierakowski, M. R., & Tischer, C. A. (2009). Production and characterization of nanospheres of bacterial cellulose from *Acetobacter xylinum* from processed rice bark. *Materials Science and Engineering C*, *29*, 546–551. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2008.10.013>
- Gorgieva, S., & Trček, J. (2019). Bacterial cellulose: Production, modification and perspectives in biomedical applications. *Nanomaterials*, *9*, 1352. <https://doi.org/10.3390/nano9101352>
- Gregory, D. A., Tripathi, L., Fricker, A. T. R., Asare, E., Orlando, I., Raghavendran, V., & Roy, I. (2021). Bacterial cellulose: A smart biomaterial with diverse applications. *Materials Science and Engineering R*, *145*, 100623. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100623>
- Grujić, R., Vujadinović, D., & Savanović, D. (2017). Biopolymers as food packaging materials. In E. Pellicer et al. (Eds.), *Advances in applications of industrial biomaterials* (pp. 139–160). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62767-0_6
- Hong, F., Guo, X., Zhang, S., Han, S.-F., Yang, G., & Jönsson, L. J. (2012). Bacterial cellulose production from cotton-based waste textiles. *Bioresource Technology*, *104*, 503–508. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.028>
- Hong, F., & Qiu, K. (2008). An alternative carbon source from konjac powder for enhancing bacterial cellulose production. *Carbohydrate Polymers*, *72*, 545–549. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.09.015>
- Hussain, Z., Sajjad, W., Khan, T., & Wahid, F. (2019). Production of bacterial cellulose from industrial wastes: A review. *Cellulose*, *26*, 2895–2911. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02307-1>
- Jabeen, N., Majid, I., & Nayik, G. A. (2015). Bioplastics and food packaging: A review. *Cogent Food & Agriculture*, *1*, 1117749. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1117749>
- Jafarzadeh, S., Nafchi, A. M., Salehabadi, A., & Oladzad-Abbasabadi, N. (2021). Application of bio-nanocomposite films and edible coatings for extending shelf life. *Advances in Colloid and Interface Science*, *291*, 102405. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102405>

- Jedrzejczak-Krzepkowska, M., Kubiak, K., Ludwicka, K., & Bielecki, S. (2016). Bacterial nanocellulose synthesis: Recent findings. In M. Gama et al. (Eds.), *Bacterial nanocellulose* (pp. 19–46). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63458-0.00002-0>
- Jeyasubramanian, K., & Balachander, R. (2016). Starch bioplastic film as an alternative food-packaging material. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 75, 78–84. <https://doi.org/10.5604/17348412.1228383>
- Jung, S., Cui, Y., Barnes, M., Satam, C., et al. (2020). Multifunctional bio-nanocomposite coatings for perishable fruits. *Advanced Materials*, 32, 1908291. <https://doi.org/10.1002/adma.201908291>
- Kistaubayeva, A., Savitskaya, I., & Shokatayeva, D. H. (2021). Isolation and identification of a new bacterial cellulose producing strain. In *Proceedings of the 5th Symposium on EuroAsian Biodiversity* (p. 230).
- Kraśniewska, K., Pobięga, K., & Gniewosz, M. (2019). Pullulan biopolymer with potential for food packaging. *International Journal of Food Engineering*, 15, 20190030. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0030>
- Kumar, N., Kaur, P., & Bhatia, S. (2017). Advances in bio-nanocomposite materials for food packaging. *Nutrition & Food Science*, 47, 591–606. <https://doi.org/10.1108/NFS-11-2016-0176>
- Kurosumi, A., Sasaki, C., Yamashita, Y., & Nakamura, Y. (2009). Utilization of fruit juices as carbon source for bacterial cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 76, 333–335. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.11.009>
- Lin, S.-P., Liu, C.-T., Hsu, K.-D., Hung, Y.-T., Shih, T.-Y., & Cheng, K.-C. (2016). Production of bacterial cellulose with additives. *Cellulose*, 23, 367–377. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0855-0>
- Lin, X., Fan, X., Li, R., Li, Z., Ren, T., Ren, X., & Huang, T. S. (2018). Preparation of biodegradable antibacterial nanofibrous membranes. *Polymer Advanced Technologies*, 29, 481–489. <http://dx.doi.org/10.1002/pat.4137>
- Lu, Z., Zhang, Y., Chi, Y., Xu, N., Yao, W., & Sun, B. (2011). Effects of alcohols on bacterial cellulose production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27, 2281–2285. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0692-8>
- Ludwicka, K., Kaczmarek, M., & Białkowska, A. (2020). Bacterial nanocellulose—a biobased polymer for active packaging. *Polymers*, 12, 2209. <https://doi.org/10.3390/polym12102209>
- Mautner, A. (2020). Nanocellulose water treatment membranes and filters: A review. *Polymer International*, 69, 741–751. <https://doi.org/10.1002/pi.5993>
- Milani, J. M., & Tirgarian, B. (2020). Edible protein-based packaging overview. *Journal of Packaging Technology and Research*, 4, 103–115. <https://doi.org/10.1007/s41783-020-00086-w>
- Mitra, R., Xu, T., Xiang, H., & Han, J. (2020). Polyhydroxyalkanoates synthesis by halophiles. *Microbial Cell Factories*, 19, 1–30.
- Mohsin, A., Zaman, W. Q., Guo, M., Ahmed, W., Khan, I. M., Niazi, S., Rehman, A., Hang, H., & Zhuang, Y. (2020). Xanthan-curdlan nexus for synthesizing edible food packaging films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.008>
- Molina-Ramírez, C., Castro, C., Zuluaga, R., & Gañán, P. (2018). Physical characterization of bacterial cellulose produced by *Komagataeibacter medellinensis* using food supply chain waste and agricultural by-products as alternative low-cost feedstocks. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, 830–837. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-0993-6>
- Moniri, M., Boroumand Moghaddam, A., Azizi, S., Abdul Rahim, R., Bin Ari, A., Zuhainis Saad, W., Navaderi, M., & Mohamad, R. (2017). Production and status of bacterial cellulose in biomedical engineering. *Nanomaterials*, 7, 257. <https://doi.org/10.3390/nano7090257>
- Nagalakshmaiah, M., Afrin, S., Malladi, R. P., Elkoun, S., Robert, M., Ansari, M. A., Svedberg, A., & Karim, Z. (2019). Biocomposites: Present trends and challenges for the future. In G. Koronis & A. Silva (Eds.), *Green composites for automotive applications* (pp. 197–215). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102177-4.00009-4>
- Nguyen, V. T., Gidley, M. J., & Dykes, G. A. (2008). Potential of a nisin-containing bacterial cellulose film to inhibit *Listeria monocytogenes* on processed meats. *Food Microbiology*, 25, 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2008.01.004>
- Nur Hazirah, M. A. S. P., Isa, M. I. N., & Sarbon, N. M. (2016). Effect of xanthan gum on the physical and mechanical properties of gelatin-carboxymethyl cellulose film blends. *Food Packaging and Shelf Life*, 9, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.foodpack.2016.05.008>
- Okiyama, A., Motoki, M., & Yamanaka, S. (1992). Bacterial cellulose II. Processing of the gelatinous cellulose for food materials. *Food Hydrocolloids*, 6, 479–487. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(09\)80033-7](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(09)80033-7)
- Osorio, M. A., Restrepo, D., Velásquez-Cock, J. A., Zuluaga, R. O., Montoya, U., Rojas, O., Gañán, P. F., Marin, D., & Castro, C. I. (2014). Synthesis of thermoplastic starch-bacterial cellulose nanocomposites via *in situ* fermentation. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 25, 1607–1613. <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20140146>
- Padrão, J., Gonçalves, S., Silva, J. P., Sencadas, V., Lanceros-Méndez, S., Pinheiro, A. C., Vicente, A. A., Rodrigues, L. R., & Dourado, F. (2016). Bacterial cellulose-lactoferrin as an antimicrobial edible packaging. *Food Hydrocolloids*, 58, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.019>
- Pellicer, E., Nikolic, D., Sort, J., Baró, M. D., Zivic, F., Grujovic, N., Grujic, R., & Pelemis, S. (2017). *Advances in applications of industrial biomaterials*. Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-62766-3 <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62767-0>
- Rahman, R. (2019). Bioplastics for food packaging: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8, 2311–2321. <https://doi.org/10.20546/ijcm.2019.803.274>
- Ramos, Ó. L., Pereira, R. N., Cerqueira, M. A., Martins, J. R., Teixeira, J. A., Malcata, F. X., & Vicente, A. A. (2018). Bio-based nanocomposites for food packaging and their effect in food quality and safety. In A. M. Grumezescu & A. M. Holban (Eds.), *Food packaging and preservation* (pp. 271–306). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811516-9.00008-7>
- Rani, M. U., & Appaiah, K. A. A. (2013). Production of bacterial cellulose by *Gluconacetobacter hansenii* UAC09 using coffee cherry husk. *Journal of Food Science and Technology*, 50, 755–762. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0401-5>

Salaria, M., Khiabani, M. S., Mokarram, R. R., Ghanbarzadeh, B., & Kafil, H. S. (2018). Development and evaluation of chitosan based active nanocomposite films containing bacterial cellulose nanocrystals and silver nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 84, 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.05.037>

Savitskaya, I. S., Kistaubaeva, A. S., Zhantlesova, S. D., & Kurmangali, A. K. (2017). Podbor optimal'nykh uslovii dlya rosta produktenta i biosinteza gel'-plenki bakterial'noi tsellyulozy. In *Materialy IV Mezhdunarodnykh Farabievskikh chtenii* (p. 82). Almaty. (In Russian)

Schmidt-Traub, G., Obersteiner, M., & Mosnier, A. (2019). The urgency of agriculture green development. *Nature*, 181–183. <https://doi.org/10.15302/j-fase-2019313>

Schramm, M., & Hestrin, S. (1954). Factors affecting production of cellulose at the air/liquid interface of a culture of *Acetobacter xylinum*. *Microbiology*, 11, 123–129. <https://doi.org/10.1099/00221287-11-1-123>.

Shen, L., Haufe, J., & Patel, M. K. (2009). *Product overview and market projection of emerging bio-based plastics*. Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, Utrecht University. <https://doi.org/> https://www.uu.nl/sites/default/files/copernicus_probip2009_final_june_2009_revised_in_november_09.pdf

Shendurse, A. (2018). Milk protein based edible films and coatings—Preparation, properties and food applications. *Journal of Nutrition and Health Food Engineering*, 8, 219–226. <https://doi.org/10.15406/jnhfe.2018.08.00273>

Shi, Z., Zhang, Y., Phillips, G. O., & Yang, G. (2014). Utilization of bacterial cellulose in food. *Food Hydrocolloids*, 35, 539–545. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.07.012>

Shokatayeva, D. Kh., Savitskaya, I. S., Kistaubaeva, A. S., Abdulzhanova, M. A., & Talipova, A. B. (2018). Strukturnye i mekhanicheskie svoistva bakterial'noi tsellyulozy. *Vestnik KazNU. Ekologicheskaya seriya*, 55(2), 80–91. (In Russian) <https://bulletin-ecology.kaznu.kz/index.php/1-eco/article/view/818>

Shokatayeva, D. Kh., Savitskaya, I. S., Kistaubaeva, A. S., & Talipova, A. B. (2018). Izolirovanie bakterii vida *Komagataeibacter*. In *Materialy XV Mezhdunarodnoi konferentsii* (pp. 23–26). Belgorod. (In Russian) <https://pps.kaznu.kz/kz/Main/FileShow2/129946/76/359/924/%D0%A1%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D1%86%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%98%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B0%20%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B0/2020/2>

Shokatayeva, D., Ignatova, L., Savitskaya, I., Kistaubaeva, A., Talipova, A., Asylbekova, A., Abdulzhanova, M., & Mashzhan, A. (2019). Bacterial cellulose and pullulan from simple and low cost production media. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 21, 247–258. <https://doi.org/10.18321/ectj866>

Skiba, E. A., Budaeva, V. V., Ovchinnikova, E. V., Gladysheva, E. K., Kashcheyeva, E. I., Pavlov, I. N., & Sakovich, G. V. (2020). A technology for pilot production of bacterial cellulose from oat hulls. *Chemical Engineering Journal*, 383, 123128. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123128>

Skiba, E. A., Gladysheva, E. K., Golubev, D. S., & Budaeva, V. V. (2021). Self-standardization of quality of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii* in nutrient media derived from *Miscanthus* biomass. *Carbohydrate Polymers*, 252, 117178. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117178>

Stroescu, M., Isopencu, G., Busuioc, C., & Stoica-Guzun, A. (2019). Antimicrobial food pads containing bacterial cellulose and polysaccharides. In *Cellulose-based superabsorbent hydrogels* (pp. 1303–1338). https://doi.org/10.1007/978-3-319-77830-3_3

Sukhavattanakul, P., & Manuspiya, H. (2020). Fabrication of hybrid thin film based on bacterial cellulose nanocrystals and metal nanoparticles with hydrogen sulfide gas sensor ability. *Carbohydrate Polymers*, 230, 115566. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115566>.

Tanpichai, S., Witayakran, S., Wootthikanokkhan, J., Srimarut, Y., Woraprayote, W., & Malila, Y. (2020). Mechanical and antibacterial properties of the chitosan coated cellulose paper for packaging applications: Effects of molecular weight types and concentrations of chitosan. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155, 1510–1519. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.128>

Tsouko, E., Kourmentza, C., Ladakis, D., Kopsahelis, N., Mandala, I., Papanikolaou, S., Paloukis, F., Alves, V., & Koutinas, A. (2015). Bacterial cellulose production from industrial waste and by-product streams. *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 14832–14849. <https://doi.org/10.3390/ijms1607148322>

V poiskakh plastika: kak Greenpeace v Rossii i lyudi po vsei strane izuchali plastikovyi musor na beregakh morei, rek i ozer. (2020). Moscow. (In Russian)

Vazquez, A., Foresti, M. L., Cerrutti, P., & Galvagno, M. (2013). Bacterial cellulose from simple and low cost production media by *Gluconacetobacter xylinus*. *Journal of Polymers and the Environment*, 21, 545–554. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0541-3>

Vilela, C., Kurek, M., Hayouka, Z., Röcker, B., Yildirim, S., Antunes, M. D. C., Nilsen-Nygaard, J., Pettersen, M. K., & Freire, C. S. R. (2018). A concise guide to active agents for active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.006>

Wagh, Y. R., Pushpadass, H. A., Emerald, F. M. E., & Nath, B. S. (2014). Preparation and characterization of milk protein films and their application for packaging of Cheddar cheese. *Journal of Food Science and Technology*, 51, 3767–3775. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0916-4>

Wahid, F., Wang, F. P., Xie, Y. Y., Chu, L. Q., Jia, S. R., Duan, Y. X., Zhang, L., & Zhong, C. (2019). Reusable ternary PVA films containing bacterial cellulose fibers and polylysine with improved mechanical and antibacterial properties. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 183, 110486. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110486>

Wang, S. S., Han, Y. H., Chen, J. L., Zhang, D. C., Shi, X. X., Ye, Y. X., Chen, D. L., & Li, M. (2018). Insights into bacterial cellulose biosynthesis from different carbon sources and the associated biochemical transformation pathways in *Komagataeibacter* sp. W1. *Polymers*, 10, 963. <https://doi.org/10.3390/polym10090963>

Wu, J., Zhong, F., Li, Y., Shoemaker, C. F., & Xia, W. (2013). Preparation and characterization of pullulan-chitosan and pullulan-carboxymethyl chitosan blended films. *Food Hydrocolloids*, 30, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.04.002>.

Zahan, K. A., Azizul, N. M., Mustapha, M., Tong, W. Y., Abdul Rahman, M. S., & Sahuri, I. S. (2020). Application of bacterial cellulose film as a biodegradable and antimicrobial packaging material. *Materials Today: Proceedings*, 31, 83–88. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.201>

Zakaria, N. H., Muhammad, N., Sandu, A. V., & Abdullah, M. M. A. B. (2018). Effect of mixing temperature on characteristics of thermoplastic potato starch film. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 374, 012083. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012083>

Zeng, X., Small, D. P., & Wan, W. (2011). Statistical optimization of culture conditions for bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* BPR 2001 from maple syrup. *Carbohydrate Polymers*, 85, 506–513. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.02.034>

Zhang, C., Gao, D., Ma, Y., & Zhao, X. (2013). Effect of gelatin addition on properties of pullulan films. *Journal of Food Science*, 78, C805–C810. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02925.x>

Zhao, H., Li, J., & Zhu, K. (2018). Bacterial cellulose production from waste products and fermentation conditions optimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 394, 022041. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/2/022041>

Zheng, J., & Suh, S. (2019). Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. *Nature Climate Change*, 9, 374–378. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0459-z>

Zhong, Y., Godwin, P., Jin, Y., & Xiao, H. (2020). Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2019.11.002>

Авторлар туралы мәлімет:

Абдулжанова Малика Анварбеговна (хат-хабарға жауапты автор) – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com).

Шокатаева Дина Хабдулманатовна – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: dina_ibrayeva_91@mail.ru).

Жантлесова Сирина Дүйсеновна – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің аға оқытушысы (Алматы, Қазақстан, e-mail: sirina.zhantlesova@mail.ru).

Балтабай Ақниет – магистр, ғылыми қызметкер, «Жану проблемалары институты» РМК (Алматы, Қазақстан, e-mail: bakniyet@gmail.com).

Батықова Жұлдыз – магистр, ғылыми қызметкер, Биология және биотехнология проблемалары ФЗИ (Алматы, Қазақстан, e-mail: batyqova@gmail.com).

Information about authors:

Abdulzhanova Malika Anvarbegovna (corresponding author) – PhD, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com).

Shokatayeva Dina Khabdulmanatovna – PhD, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: dina_ibrayeva_91@mail.ru).

Zhantlesova Sirina Duisenovna – PhD, Senior Lecturer, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: sirina.zhantlesova@mail.ru).

Baltabay Akniyet – MSc, Researcher, RSE “Institute of Combustion Problems” (Almaty, Kazakhstan, e-mail: bakniyet@gmail.com).

Batykova Zhuldyz – MSc, Researcher, Research Institute of Biology and Biotechnology Problems (Almaty, Kazakhstan, e-mail: batyqova@gmail.com).

Сведения об авторах:

Абдулжанова Малика Анварбеговна (корреспондентный автор) – PhD, старший преподаватель КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: malika.abdulzhanova1@gmail.com).

Шокатаева Дина Хабдулманатовна – PhD, старший преподаватель КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: dina_ibrayeva_91@mail.ru).

Жантлесова Сирина Дүйсеновна – PhD, старший преподаватель КазНУ им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: sirina.zhantlesova@mail.ru).

Балтабай Ақниет – магистр, ИС, РГП «Институт проблем горения» (Алматы, Казахстан, e-mail: bakniyet@gmail.com).

Батықова Жұлдыз – магистр, ИС, НИИ Проблем биологии и биотехнологии (Алматы, Казахстан, e-mail: batyqova@gmail.com).

Поступила 9 июля 2025 года
Принята 25 марта 2026 года