

FTAMP 64.33.14 : 64.01.91

Ж.А. Майкыбекова¹ – негізгі автор, Р.Ш. Мирзамуратова², Д.Б. Худайбердиева³, Б.И. Умралиева⁴ | ©



¹Докторант, ²PhD, доцент, ³Техн. ғылым. д-ры, профессор,
⁴Техн. ғылым. канд., доцент

ORCID

¹<https://orcid.org/0009-0008-1673-9885> ²<https://orcid.org/0009-0005-2645-1357>
³<https://orcid.org/0000-0001-6412-8079> ⁴<https://orcid.org/0000-0002-3936-7497>



^{1,2}М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
Шымкент, Қазақстан

³Ташкент тоқыма және жеңіл өнеркәсіп институты, Ташкент, Өзбекстан

⁴Алматы гуманитарлық-экономикалық университеті, «Сымбат» дизайн
және технология институты, Алматы, Қазақстан



²era05.05@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/LBZD5224>

ТОҚЫМА РЕСУРСТАРЫН ЦИКЛІ ПАЙДАЛАНУДЫ БАҒАЛАУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ ИҚ-СПЕКТРОСКОПИЯ ӘДІСІМЕН РЕГЕНЕРАЦИЯЛАНҒАН МАҚТАНЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Жұмыс тоқыма қалдықтарын өндіріске тарту арқылы бастапқы шикізат тапшылығы мәселесін шешуге бағытталған. Зерттеудің мақсаты – механикалық регенерацияның кезеңдерінде мақта құрылымының трансформациялану заңдылықтарын анықтау. Зерттеудің өзектілігі Қазақстандағы импортты алмастыру мақсатында коммерцияландыру бағдарламалары аясында іске асырылып жатқан тоқыма бұйымдарын терең өңдеу бойынша алғашқы жобаларды (Астана қ., «Glovex» ЖШС мысалында) ғылыми сүйемелдеу қажеттілігімен негізделген. Алғаш рет табиғи талшықта кездеспейтін қайталама мақта деструкциясының спектрлік маркерлері ($1712\text{--}1716\text{ см}^{-1}$ пікі) сандық түрде тіркелді. Сызықтық – бағытталған таспаны қалыптастыру сынаманың максималды гомогенділігін және амидтік жолақтар (1558 см^{-1}) қарқындылығын төмендеуін қамтамасыз етіп, тазарту тиімділігін растайтыны анықталды. Латеральді ретгілік индексінің ($\text{LOI} \approx 1,39$) төмендеуі целлюлозаның аморфтылығын көрсетеді. Регенераттың спектрлік сипаттамалары мен оның технологиялық әлеуеті арасындағы байланыс ғылыми түрде негізделді. Молекулалық деңгейдегі талшықтың «шаршауы» болашақ трикотаж бен жеке жеке қорғаныс құралдарының жоғары гигроскопикалығын алдын ала анықтайтыны дәлелденді. Нәтижелер аралас иірілген жіпті иіру режимдерін оңтайландыруға мүмкіндік береді және Қазақстанның жеңіл өнеркәсібін тұрақты дамыту мен экологияландыру үшін негіз болады.

Тірек сөздер: регенерацияланған мақта талшығы, ИҚ-Фурье-спектроскопиясы, целлюлоза, тоқыма қалдықтары, латеральді ретгілік индексі, аморфтылық, механикалық регенерация, трикотаж өндірісі, жеке қорғаныс құралдары (ЖҚК).



Майкыбекова, Ж.А. Тоқыма ресурстарын циклі пайдалануды бағалау құралы ретінде иқ-спектроскопия әдісімен регенерацияланған мақтаның құрылымдық трансформациясын зерттеу [Мәтін] / Ж.А. Майкыбекова, Р.Ш. Мирзамуратова, Д.Б. Худайбердиева, Б.И. Умралиева // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2026. – №3(93). – Б.239-253. <https://doi.org/10.55956/LBZD5224>

Кіріспе. Заманауи жеңіл өнеркәсіп қос мәселеге: экологиялық дағдарыспен қайталама шикізатты қайта өңдеудің технологиялық проблемасына тап болып отыр. Қазақстан Республикасы үшін бұл мәселе таяу уақыттарда толық циклді регенерациялау кәсіпорындарының болмауына байланысты өте өзекті болды. Жағдай Астана қаласындағы «Glovex» ЖШС сияқты инновациялық өндірістердің пайда болуымен өзгере бастады.

«Glovex» ЖШС базасында қалдықсыз технология бойынша қайталама тоқыма ресурстарынан регенерацияланған талшықтар алу табиғи талшықтардың үлесі 80%-ға дейінгі аралас иірімжіп өндіруге мүмкіндік береді. Бұл тәсілді іске асыру экологиялық жүктемені барынша азайта отырып, өнімнің өзіндік құнын төмендетудің проблемаларын шешеді. Қайталама шикізатты пайдалану өндірістік қалдықтарды тиімді кәдеге жаратуға ықпал етеді, бұл Қазақстан Республикасы Экологиялық кодексінің «адамның өмірі мен денсаулығы үшін қолайлы қоршаған ортаны қамтамасыз ету» бөлігіндегі талаптарына тікелей жауап береді [1-3].

Табиғи ресурстардың үдемелі сарқылуы, биосфераға антропогендік әсердің күшеюі аясында қоғамдық санада тұрақты даму принциптеріне көшудің орнықты парадигмасы байқалады. Соңғы жылдары жеңіл өнеркәсіпте, атап айтқанда, тігін өндірісі мен үй тоқымасы сегменттерінде регенерацияланған шикізатты пайдалану тұжырымдамасының өзектілігі артып келеді. Бұл үрдіс өздерінің өндірістік циклдеріне тұйық циклді экономика принциптерін біріктіретін Adidas, Nike, Uniqlo және басқа да жетекші корпорациялардың стратегияларында практикалық көрініс табуда.

Тұйық циклді экономикаға көшу жағдайында тоқыма өнеркәсібі қайталама ресурстарды тиімді қайта өңдеу қажеттілігімен бетпе-бет келіп отыр. Сарапшылардың бағалауы бойынша, жыл сайын миллиондаған тонна тоқыма қалдықтары түзіледі, оның 1%-дан азы ғана жаңа бұйымдарға қайта өңделеді [4,5]. Мақта талшығын қалпына келтіру – экожүйеге түсетін жүктемені азайтуға және бастапқы шикізатты тұтынуды қысқартуға мүмкіндік беретін тұрақты сәннің ең перспективалы бағыттарының бірі [6,7].

Қазақстан Республикасы үшін бұл мәселені шешу тоқыма өнімдерін терең қайта өңдеу бойынша жобалардың, атап айтқанда, Астана қаласындағы «Glovex» ЖШС базасында іске қосылуымен практикалық сипатқа өтті. Мұндағы қалдықсыз технология табиғи талшықтардың үлесі 80%-ға дейінгі аралас иірімжіп өндіруге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, регенерацияланған шикізаттың мұндай жоғары мөлшеріне қол жеткізу алынатын субстраттың сапалық сипаттамаларын егжей-тегжейлі зерттеуді талап етеді.

Дегенмен, механикалық қайта өңдеу талшықтардың ұзындығын айтарлықтай қысқартып, олардың құрылымдық әркелкілігіне және беріктігінің төмендеуіне әкеледі. Бұл жағдай оларды иірілген жіп құрамына қосу үлесін шектеп келген болатын. Осы жұмыста авторлар аталған мәселені трикотаж маталарынан өмірлік циклі қысқа (ӨЦҚ) бұйымдарды жобалау арқылы шешуді ұсынады. Тоқыма түрі ретінде трикотажды таңдау себебі – оның ілмектік құрылымы өте икемді. Қатаң тоқылған маталарға қарағанда, мұндай құрылым құрамында қысқа талшықтар үлесі жоғары иірілген жіпті пайдаланған кезде де деформацияға ұшырап, бұзыла қоймайды.

Араластыру саласындағы белсенді зерттеулерге қарамастан, регенерацияланған шикізаттың аз мөлшерінде трикотаждың қасиеттерін болжауға мүмкіндік беретін ғылыми негізделген әдістемелердің тапшылығы байқалады. Механикалық қылшықтау сөзсіз целлюлозаның полимерлік

тізбектерінің деструкциясымен қатар жүретіндіктен, бұл трансформациялардың тереңдігін дәл бағалау қажеттілігі туындайды [8,9].

Бұл талдаудағы ең маңызды құрал ИҚ-Фурье спектроскопиясы болып табылады, ол молекулалық деңгейде өзгерістерді және материалдың кристаллдық дәрежесін бақылауға мүмкіндік береді [10,11]. Осылайша, материалтануды өндіріс технологиясымен және ресурсты аз қажет ететін соңғы ассортиментпен байланыстыратын кешенді тәсіл қажет.

Бұл зерттеуде аталған тәсілді іске асыру «Glovex» ЖШС-де алынған регенерацияланған мақтаның құрылымдық трансформацияларын бақылаудан басталды. Алынған ИҚ-спектрлерді талдау бастапқы целлюлозаның эталондық сипаттамаларымен салыстырыла отырып жүргізілді, бұл қайталама шикізаттың сапалық айырмашылықтарын бастапқы кезеңдердің өзінде-ақ анықтауға мүмкіндік берді.

Осылайша, $3387\text{--}3286\text{ см}^{-1}$ аймағында сутектік байланыстар жүйесіне тартылған гидроксил топтарының валенттік тербелістерінің кең жолағы тіркелді. Максимумның эталонға қатысты төмен жиілікті аймаққа қарай ығысуының эксперименталды түрде анықталуы сутектік байланыстар торының нығаюымен түсіндіріледі. Жоғары молекулалық жүйенің мұндай қайта құрылуы қайта өңдеудің қайталанатын циклдері мен қарқынды механикалық әсер ету кезіндегі целлюлозадағы құрылымдық өзгерістерге тән маркері болып табылады [12].

Заманауи зерттеулер көрсеткендей, талшықты механикалық өңдеу целлюлоза қаңқасының аморфизациясын тудырады, бұл латеральді реттілік индексіне (LOI) көрініс табады [13,14]. Сонымен қатар, қайталама шикізат бетіндегі қалдықтар мен бояғыштардың болуы оны қайта пайдалану кезінде қосымша технологиялық кедергілер туғызады [15,16]. Осыған байланысты, дайындаудың барлық кезеңдерінде: ластанған регенерацияланған шикізаттан бастап таспалы жартылай фабрикатқа дейін талшық құрылымының трансформациясын бақылау өзекті міндет болып табылады [17,18].

Эталонның басты айырмашылығы – 1716 см^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ валенттік тербелістері) кезінде айқын пиктің болуы [19]. Талдауларға сәйкес, бұл пик бастапқы бұйымды пайдалану процесінде талшықтың өзгеру маркері болып табылады немесе полиэфирлі аппреттердің бар екенін көрсетеді [20-22].

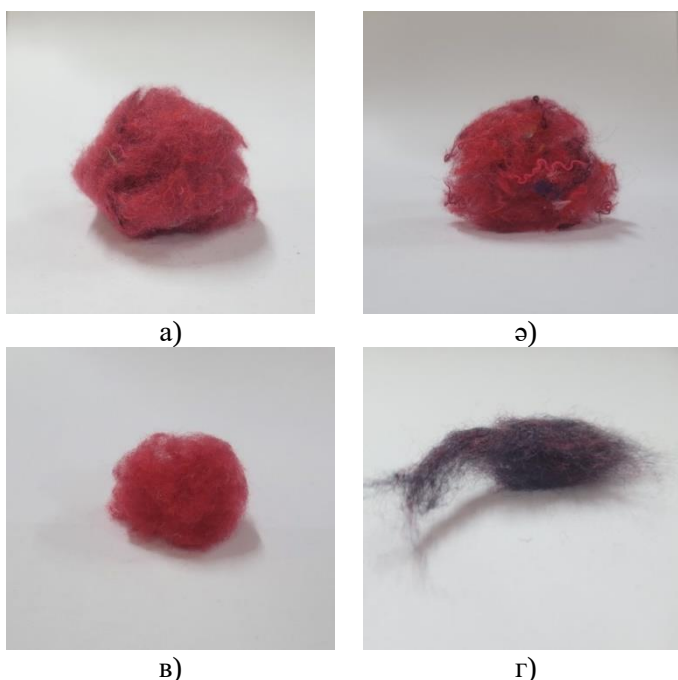
1516 см^{-1} кезінде анықталған пик N – H (Амид II) деформациялық тербелістерге сәйкес келеді. Бұл жолақтың болуы күкірт мөлшері (0,46%) туралы элементтік талдау мәліметтерімен жиынтықта механикалық тазарту процесінде жойылмаған технологиялық микроқоспалардың (майлағыштар немесе құрамында азоты бар бояғыштар) регенерацияланған шикізатта бар екенін растайды [23].

$894\text{--}897\text{ см}^{-1}$ аймағындағы жолақтың жоғары қарқындылығы қылшықтау кезінде механикалық күштердің әсерінен талшықтың кристаллдық торының ішінара бұзылуын көрсетеді, бұл қайталама шикізаттың кристаллдық индексінің төмендеуі туралы заманауи деректермен сипатталады [24,25].

Бұл жұмыс берілген тұтынушылық қасиеттері бар заманауи трикотаж бұйымдарын жобалауда регенерацияланған мақта талшықтарын пайдалануды ғылыми негіздеу мақсатында олардың физика-химиялық қасиеттерін кешенді зерттеуге арналған.

Зерттеу шарттары мен әдістері. Зерттеу нысандары ретінде «Glovex» ЖШС базасында тоқыма қалдықтарын механикалық регенерациялаудың технологиялық циклінің әртүрлі кезеңдерінде алынған мақта талшығының

үлгілері пайдаланылды. Талдау үшін зерттеуші ұсынған үлгілердің төрт түрі таңдап алынды (1-сурет).



а) №1 үлгі – ластану дәрежесі жоғары және жіптердің қылшықталмаған (талшықталмаған) фрагменттерінің мөлшері көп регенерацияланған талшық; ә) №2 үлгі – қалдық жіп тәрізді құрылымы бар және бөгде қоспалары бар ірі дисперсті мақта регенераты; б) №3 үлгі – құрылымдық элементтерінің ыдырау дәрежесі жоғары және қылшықталмаған фрагменттердің мөлшері барынша аз гомогенді талшықты масса; в) №4 үлгі – қосу және созу сатысынан өткен сызықтық-бағытталған талшықты өнім (таспа).

Сурет 1 – регенерацияланған талшықтар

Бақылау үлгісі (эталон) ретінде бұрын пайдалану және химиялық өңдеу циклдерінен өтпеген табиғи мақта талшығы (орташа талшықты шикі мақта) пайдаланылды.

Талшықты сынамаларды дайындау гидроксил топтарының валенттік тербелістері аймағындағы спектрлік көріністі бұрмалауы мүмкін адсорбцияланған ылғалды жою үшін 105°C температурада тұрақты массаға дейін кептіру әдісімен жүзеге асырылды. Үлгілер механикалық ұсақтаусыз табиғи күйінде зерттелді, бұл құрылымның морфологиялық ерекшеліктерін сақтауға мүмкіндік берді.

Химиялық құрам мен жоғары молекулалық құрылымды спектрлік зерттеу бұзылған толық ішкі шағылысу (БТПШ) әдісімен ИҚ-Фурье спектроскопиясы арқылы жүргізілді. Зерттеуде Pike Technologies фирмасының ATR Miracle қосымшасымен жабдықталған Shimadzu IRPrestige-21 ИҚ-Фурье спектрометрі пайдаланылды. Кристаллдық құрылымның трансформациясын сандық бағалау үшін Нельсон-О'Коннор әдістемесі бойынша латеральді реттілік индексі (LOI – Lateral Order Index) есептелді. Индекс 1429 см⁻¹ (кристаллдық фазаның CH₂ топтарының

симметриялы деформациялық тербелістері) және 897 см^{-1} (аморфты фазаның β -глюкозидтік байланыстарының валенттік тербелістері) толқындық сандарындағы жұтылу жолақтары қарқындылығының қатынасы ретінде анықталды. Нәтижелердің қайталанымдылығын қамтамасыз ету үшін қарқындылық пиктері базалық сызық әдісімен анықталды.

Алынған спектрлер LabSolutions IR бағдарламалық жасақтамасын (Shimadzu спектрометрінің кірістірілген БЖ) пайдалана отырып өңделді: базалық түзету, нормалау және сипаттамалық пиктерді сәйкестендіру жұмыстары орындалды. Целлюлозаның өзгеру дәрежесін бағалау үшін $1712\text{--}1716\text{ см}^{-1}$ аймағындағы жолақтарды талдауға және қалдық ластануларды (аппреттер мен бояғыштарды) анықтау үшін $1500\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ аймағындағы жолақтарға ерекше назар аударылды. Жоғары молекулалық құрылымды бағалау целлюлозаның аморфты және кристаллдық фазаларының жұтылу жолақтарының қарқындылығын салыстыру арқылы жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Ластану дәрежесі жоғары және жіптердің қайта өңделген фрагменттерінің мөлшері көп регенерацияланған талшық үшін Фурье түрлендіруі бар инфрақызыл спектроскопия әдісімен алынған ИҚ-спектрді (2-сурет) $4000\text{--}500\text{ см}^{-1}$ диапазонында талдау негізінде келесі қорытындыларды жасауға болады. $1161\text{--}1028\text{ см}^{-1}$ (C–O–C және C–O–H байланыстары) аймағында басым пиктері және 897 см^{-1} кезінде β -глюкозидтік байланыстың тән пигі бар спектрдің жалпы профилі материалдың негізін целлюлоза ретінде бірімді сәйкестендіреді. 3342 см^{-1} кезінде кең жолақтың болуы талшық морфологиясын анықтайтын молекулааралық сутектік байланыстардың дамыған жүйесінің бар екенін растайды. 1716 см^{-1} және 1558 см^{-1} маңында пиктердің болуы иірімжіптің не химиялық өңдеу сатысынан (мысалы, қыртыстанбайтын өңдеу) өткенін, не аралас (мысалы, синтетика немесе ақуыз талшықтары қосылған мақта) екенін болжауға мүмкіндік береді.

1716 см^{-1} (C=O карбонил тобы) кезінде аналитикалық маңызды пиктің анықталуы целлюлозаның өзгеруінің жүруін көрсетеді, бұл химиялық немесе термикалық жүктеме циклдерінен өткен регенерацияланған шикізатқа тән. 1558 см^{-1} пигінің (Амид II, N–H деформациялық тербелістері) болуы қалдық азотты қосылыстардың (азобояғыштар, бекіткіштер немесе аппреттер) бар екенін көрсетеді, бұл иірімжіптің екінші реттік шығу тегін растайды.

Жоғары молекулалық құрылымды талдау: $1456\text{--}1028\text{ см}^{-1}$ аймағындағы пиктердің қарқындылығы мен ауданы полимерлік тізбектің қаңқалық қаттылығының сақталуын көрсетеді. Дегенмен, кристаллдық тордың тербелістеріне жауап беретін төмен жиіліктер аймағындағы (507 см^{-1}) пиктердің болуы аморфты аймақтар туралы деректермен ұштаса отырып, бұл материалды кристаллдық және аморфты фазалардың арақатынасы өзгерген деструкцияланған целлюлоза ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Химиялық құрамның анықталған ерекшеліктері (карбонил және амид топтарының болуы) материалдың технологиялық процестердегі ерекше мінез-құлқын алдын ала анықтайды. Целлюлозаның өзгерген учаскелерінің жоғары реакциялық қабілеті және регенерацияланған талшықта қоспалардың болуы дайын трикотаж бұйымдарын өндіру кезінде міндетті гомогенизациялауды және бояу мен өңдеу режимдерін оңтайландыруды талап етеді.

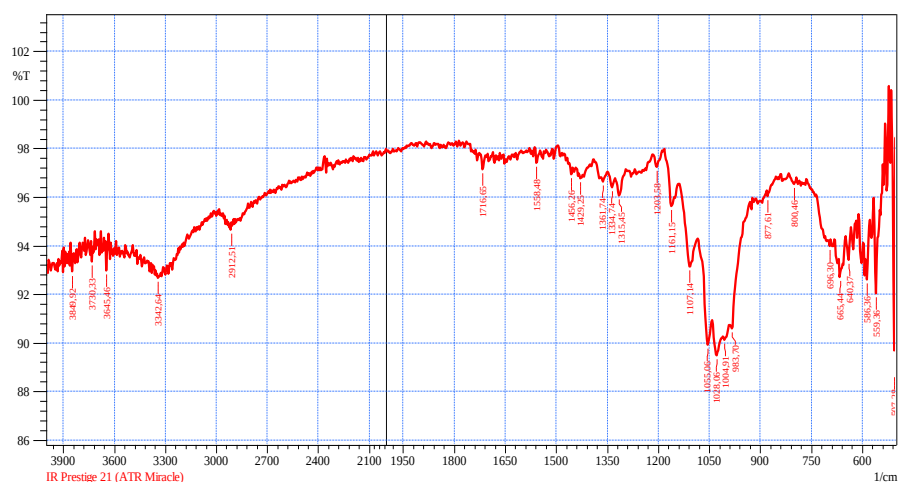
O–H және N–H валенттік тербелістерінің аймағы ($3600\text{--}3000\text{ см}^{-1}$): максимумы 3342 см^{-1} болатын кең жолақ байқалады. Мұндай ені мен қарқындылығы молекула аралық және молекула ішілік сутектік

байланыстардың тармақталған торының болуымен байланысты. 3645–3849 см^{-1} кезіндегі пиктер әлсіз байланысқан гидроксил топтарының немесе ылғал іздерінің бар екенін көрсетуі мүмкін.

C–H алифатты топтарының аймағы (2900–2800 см^{-1}): 2912 см^{-1} кезіндегі пик целлюлоза сақинасының құрылымындағы CH_2 және CH топтарының асимметриялы валенттік тербелістеріне сәйкес келеді.

Карбонил топтары мен қос байланыстар аймағы (1750–1500 см^{-1}): 1716 см^{-1} пикі C=O валенттік тербелістеріне (карбонил тобы) сәйкес келеді. Бұл целлюлозаның ішінара тотығуын (оксицеллюлоза) немесе аппреттің (мысалы, полиэфирлі типтегі тоқыма өңдеуінің) бар екенін көрсетуі мүмкін. 1558 см^{-1} пикін (Амид II) деп интерпретациялауға болады, бұл кейде ақуыз компоненті (жүн) бар аралас маталарда немесе құрамында азоты бар өңдеуші агенттерді пайдаланған кезде кездеседі.

Кестедегі мәліметтерге сәйкес, ең маңызды пиктер 1000–1100 см^{-1} диапазонында шоғырланған. №12 пиктің (1055,06 см^{-1}) ауданы жоғары (1,488) және айқын қарқындылыққа ие. Бұл полимерлік тізбектің C–O қаңқалық тербелістеріне жауап беретін спектр болып табылады. №1 пик (507,28 см^{-1}): Спектрдің төменгі аймағындағы жоғары қарқындылық көбінесе кристаллдық тордың тербелістерімен немесе молекула қаңқасының деформациялық тербелістерімен байланысты. №22 пик (1716,65 см^{-1}): ауданы кіші (0,206) болғанына қарамастан, оның болуы химиялық модификацияны немесе қоспаларды анықтау үшін өте маңызды, өйткені таза целлюлозада айқын карбонил жолағы болмайды. Жалпы алғанда, талдау көрсеткендей, ұсынылған деректер целлюлозалы тоқыма материалына тән болып табылады.



Сурет 2. Ластану дәрежесі жоғары және жіптердің қылшықталмаған (талшықталмаған) фрагменттерінің мөлшері көп регенерацияланған талшықтың ИҚ-Фурье спектрі (№1-үлгі)

Кесте 1

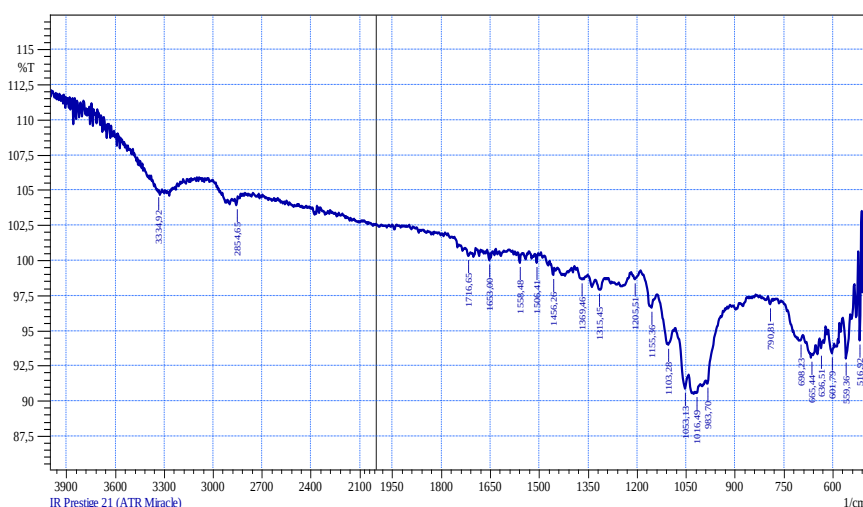
Целлюлоза құрылымының негізгі ИҚ-маркерлері

Толқындық сан (см^{-1})	Тербеліс түрі
1	2
1456-1429	CH_2 топтарының симметриялы деформациялық тербелістері («қайшы тәрізді»).

1-кестенің жалғасы

1	2
1361-1315	C – H және O – H жазықтық деформациялық тербелістері.
1161-1107	C – O – H асимметриялы валенттік тербелістері (гликозидтік байланыс).
1055-1028	C – C, C – OH, C – O – C сақиналарының валенттік тербелістері. Бұл целлюлозаның қаңқалық құрылымын растайтын ең қарқынды пиктер.
897-877	β-глюкозидтік байланыстың тербелістері (целлюлозаға тән).

Бұл аймақ ($1500\text{--}500\text{ см}^{-1}$) полимердің химиялық құрылымын сәйкестендіру (идентификациялау) үшін ең ақпаратты болып табылады.



Сурет 3. Қалдық жіп тәрізді құрылымы бар және бөгде қоспалары бар ірі дисперсті мақта регенератының ИҚ-Фурье спектрі (№2-үлгі)

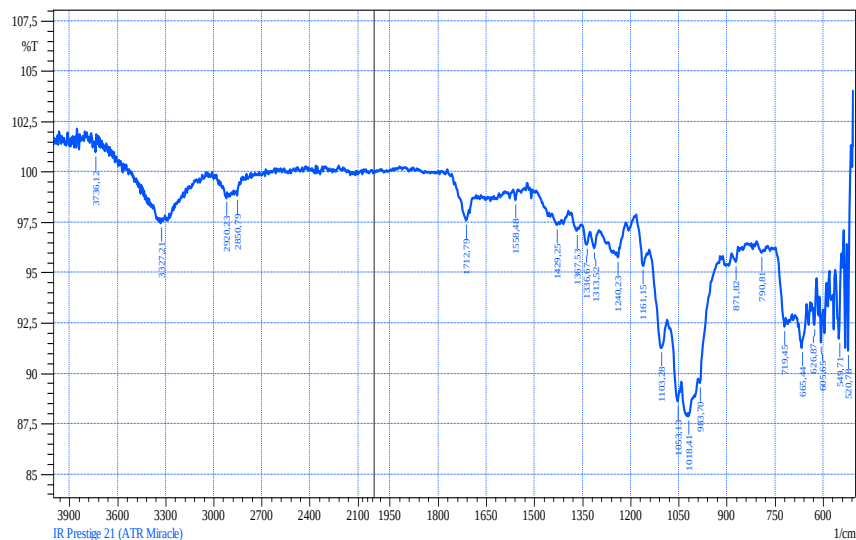
Үлгінің химиялық профилі синтетикалық модификаторлардың немесе аппреттердің ықтимал болуымен целлюлоза талшығына (мақта, вискоза) сәйкес келеді. $3334,92\text{ см}^{-1}$ (O – H) молекулааралық сутектік байланыстар жүйесіне тартылған валенттік тербелістер аймағы (1-кесте).

$2854,65\text{ см}^{-1}$ пикі глюкопираноза сақинасының құрылымындағы алифатты C – H (CH_2) топтарының симметриялы валенттік тербелістеріне жатады. $1716,65\text{ см}^{-1}$ — карбонил тобының (C = O) валенттік тербелістерінің жолағы. Бұл полиэфир талшықтарының бар екенін немесе құрамында карбоксилі бар өңдеуші агенттердің пайдаланылғанын көрсетуі мүмкін (3-сурет).

Пиктердің параметрлерін талдау ең маңызды спектрлік компоненттерді бөліп көрсетуге мүмкіндік береді: Max Corr. Intensity – $7,440 (516,92\text{ см}^{-1})$ кезінде) алыс ИҚ-аймақтағы күшті жұтылу, сірә, полимер қаңқасының деформациясы болуы мүмкін. Max Area – $1,334 (983,70\text{ см}^{-1})$ кезінде) полисахаридтік құрылымдарға тән кең жұтылу жолағы. №10 пик – $1053,13\text{ см}^{-1}$ ($1,717\text{ Corr, Int.}$) целлюлозаның негізгі құрылымдық маркері болып табылады.

Негізгі максимумдардың ($3334, 1053, 1016\text{ см}^{-1}$) орналасуына сүйене отырып, бұл иірімжіп табиғи немесе регенерацияланған целлюлоза талшығы

ретінде сәйкестендіріледі. $1716,65\text{ см}^{-1}$ кезінде пиктің болуы эфирлік топтардың бар екенін көрсетеді, бұл полиэфирмен (ПЭ) араластырудың немесе тоқыма-қосымша заттарды (ТҚЗ) жағудың нәтижесі болуы мүмкін.



Сурет 4. Құрылымдық элементтерінің ыдырау дәрежесі жоғары және қылшықталмаған (талшықталмаған) фрагменттердің мөлшері барынша аз гомогенді талшықты массаның ИҚ-Фурье спектрі (№3-үлгі)

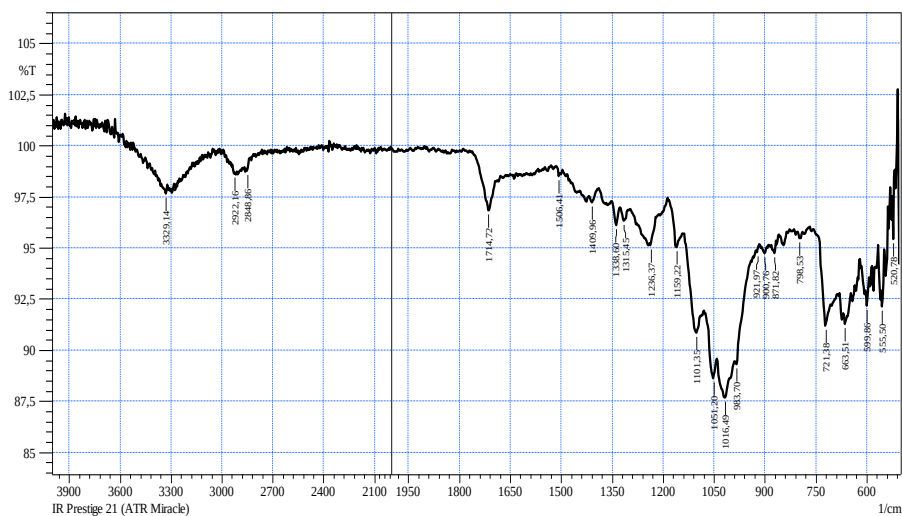
4-суретте ИҚ-Фурье спектроскопиясының бұзылған толық ішкі шағылысу (БТШ / ATR) әдісімен Shimadzu IRPrestige-21 аспабында алынған ұсынылған спектрограмма негізінде үлгінің химиялық құрылымына қисынды құрылымдалған ғылыми талдау келтірілген. №3 үлгінің ұсынылған талдауы тән функционалдық топтары бар целлюлоза талшықтарының (мақта немесе вискоза сияқты) классикалық профилін көрсетеді. Базалық сызықтың $4000\text{--}2500\text{ см}^{-1}$ аймағындағы еңістігі иірімжіп бетінің морфологиясына және БТШ (ATR) кристалымен жанасу сапасына байланысты болуы мүмкін.

Өткізу коэффициентінің (T, %) толқындық санға (см^{-1}) графикалық тәуелділігі зерттеліп отырған №3 үлгінің құрамында полимерлік целлюлоза бар екенін растайды. Спектр жоғары жиілікті валенттік тербелістер аймағына және 1500 см^{-1} -ден төмен ақпаратты аймағына анық бөлінеді. Молекула ішілік және молекула аралық сутектік байланыстар жүйесіне тартылған гидроксил топтарының (O – H) валенттік тербелістерінен туындаған, максимумы 3327 см^{-1} болатын қарқынды кең жолақ байқалады. 3736 см^{-1} кезіндегі шамалы пик регенерацияланған талшық бетінде бос (ассоциацияланбаған) –ОН топтарының немесе адсорбцияланған микро ылғалдың бар екенін көрсетеді. $2920, 2850\text{ см}^{-1}$ орташа қарқындылықтағы пиктер ангидроглюкоза сақинасының СН топтарындағы C – H байланыстарының асимметриялы және симметриялы валенттік тербелістеріне сәйкес келеді. Деструкцияның сипаттамалық белгілерінің аймағы ($1800\text{--}1500\text{ см}^{-1}$): бұл сегмент регенерацияланған талшықтың мәртебесін растауға мүмкіндік береді. 1712 см^{-1} кезіндегі анық көрінетін пик карбонил топтарының (C – O) валенттік тербелістеріне сәйкес келеді. Оның целлюлозалы материалда болуы деструктивті процестердің жүргенін немесе

синтетикалық аппреттердің бар екенін көрсетеді. Құрамында азоты бар қоспалар (1558 см^{-1}): N – H деформациялық тербелістері (Амид II) аймағындағы пик екінші реттік қайта өңделген шикізатқа тән бояғыштардың қалдық бекіткіштерінің немесе ақуыздық ластанулардың бар екенін көрсетеді.

$1500\text{--}500\text{ см}^{-1}$ негізгі полимерлік тізбектің сақталғанын растайды. CH_2 топтары (1429 см^{-1}): целлюлозаның кристалдық дәрежесіне симметриялы деформациялық тербелістер байқалады. Гликозидтік және қаңқалық байланыстар ($1161, 1103, 1053, 1018\text{ см}^{-1}$): ең қарқынды пиктер тобы C – O – C көпірлік байланыстарының асимметриялы тербелістеріне және сақиналық құрылымдардың валенттік тербелістеріне жауап береді. $1053\text{--}1018\text{ см}^{-1}$ диапазонындағы максималды қарқындылық мақта спектрінің негізі болып табылады. Тізбек конфигурациясы ($871, 897\text{ см}^{-1}$): бұл аймақта жолақтардың болуы глюкозидтік байланыстардың β -конфигурациясын растайды.

Ұсынылған спектрограмманы талдау үлгіні регенерацияланған мақта талшығы ретінде сәйкестендіруге мүмкіндік береді. Әдеттегі целлюлозалық профиль аясында 1712 см^{-1} және 1558 см^{-1} кезіндегі пиктердің жиынтығы талшықтың пайдалану және кейінгі регенерациялау процесінде химиялық модификацияға және деструкцияға ұшырағанының тікелей дәлелі болып табылады. Құрылымның анықталған аморфизациясы (1429 см^{-1} аймағындағы жолақтардың профиліне қарағанда) бұл шикізатты дайын бұйымдарды жобалау кезінде талшықтың жоғары жұмсақтығы мен сорбциялық қабілеті артықшылыққа айналатын трикотаж маталар өндірісінде қолдануды ғылыми түрде негіздейді.



Сурет 5. Қосу және созу сатысынан өткен сызықтық-бағытталған талшықты өнімнің (таспаның) ИҚ-Фурье спектрі (№4-үлгі)

5-суретте спектр құрылымдық қайта құрылудың айқын белгілері бар жоғары тазартылған регенерацияланған целлюлоза талшығын сипаттайды. Графикке полимерлік қаңқаны құрайтын негізгі функционалдық топтар анық тіркелген. 3329 см^{-1} (O – H валенттік тербелістері) кең қарқынды пикі сутектік байланыстардың тармақталған торының бар екенін көрсетеді. Максимумның табиғи мақтамен салыстырғанда сәл ығысуы регенерация

процесіндегі молекулааралық өзара әрекеттесу энергиясының өзгергенін білдіреді. $2922,16\text{ см}^{-1}$ және $2848,86\text{ см}^{-1}$ (C – H топтары) ангидроглюкоза сақинасының алифатты байланыстарының асимметриялы және симметриялы тербелістеріне сәйкес келеді. $1051,20\text{ см}^{-1}$ және $1016,49\text{ см}^{-1}$ (C – O, C – C қаңқалық тербелістері) механикалық әсер кезінде негізгі целлюлоза тізбегінің сақталғанын растайтын ең қарқынды пиктер («fingerprint») болып табылады.

$1800\text{--}1500\text{ см}^{-1}$ диапазонында ерекше пиктердің болуы талшықтың екінші реттік («вторичность») екендігінің ғылыми дәлелденген айғағы болып табылады. $1714,72\text{ см}^{-1}$ (C = O карбонил тобы) бұл пиктің болуы өте маңызды. Таза целлюлозада ол болмайды. Оның графиктегі қарқындылығы материалдың ескіруі немесе бұрынғы пайдалану циклдеріндегі химиялық әсер салдарынан туындаған талшықтың тотығу деструкциясын көрсетеді. $1506,41\text{ см}^{-1}$ (N – H / C – N байланыстары) бұл пиктің болуын регенерацияланған шикізатты тазарту процесінде толық жойылмаған қалдық азотты қосылыстардың (бояғыштар немесе аппреттер) бар екендігі деп интерпретациялауға болады.

Құрылымдық индекстер және гомогенділік: $1409,96\text{ см}^{-1}$ аймағы CH_2 топтарының деформациялық тербелістеріне сәйкес келеді. 897 см^{-1} аймағына (β -глюкозидтік байланыс) қатысты бұл аймақта қарқындылықтың төмендеуі кристаллдық индекстің төмендегенін көрсетеді. Бұл «қылшықтау» және талшықтау процесінде талшықтың аморфизациялануы туралы теорияны растайды. Таза базалық сызық және жоғары жиіліктер аймағында ($3600\text{--}4000\text{ см}^{-1}$) айтарлықтай шудың болмауы сынаманың жоғары дәрежеде гомогенділігін көрсетеді, бұл таспалы жартылай фабрикат сатысына тән қасиет.

Ұсынылған деректер үлгіні жоғары дәрежеде тазартылған регенерацияланған мақта талшығы ретінде жіктеуге мүмкіндік береді. Сақталған целлюлоза қаңқасының (1051 см^{-1} қарқынды пиктері) тотығудың айқын жолақтарымен (1714 см^{-1}) үйлесуі аралас иірімжіп жасау үшін бұл шикізатты таңдауды негіздейді.

Құрылымның жоғары аморфтылығы бұл талшықты трикотаж маталар өндірісі үшін тиімді етеді, бұл дайын бұйымдарға қажетті жұмсақтық пен жоғары гигроскопиялылықты қамтамасыз етеді. Зерттеліп отырған регенерацияланған талшықтың бастапқы мақтамен салыстырғандағы басты айрықша белгісі – 1716 см^{-1} аймағында қарқынды жұтылудың болуы. Әдеби мәліметтер мен табиғи мақта спектрлерін салыстырмалы талдауға сәйкес, бұл аймақ таза целлюлоза үшін спектрлік тұрғыдан мөлдір болып табылады. Зерттелетін №1–№4 үлгілерде карбонил жолағының пайда болуы шикізатты тотығу деструкциясына ұшыраған екінші реттік өнім ретінде бірімәнді сәйкестендіреді. Бұл ИҚ-спектроскопияны трикотаж өндірісіне жібермес бұрын талшықтың тозуын жедел-диагностикалау әдісі ретінде пайдаланудың орындылығын растайды.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу негізінде келесі тұжырымдар жасалды:

1. Қайталама шикізатты сәйкестендіру және сапасын бақылау. Спектрлік сипаттамаларды салыстыру регенерацияланған талшықта деструкцияның бірегей «химиялық таңбасының» бар екенін растады. Анықталған маркерлер ҚР қайта өңдеу кәсіпорындарында (атап айтқанда, «Glovex» және «Fabriqa» ЖШС) келіп түсетін шикізаттың сапасын бақылау және оның жарамдылық дәрежесін бағалаудың экспресс-әдісі ретінде ИҚ-мониторинг әдістерін енгізуге мүмкіндік береді.

2. Технологиялық циклді оңтайландыру. Тазарту динамикасын талдау таспаны қалыптастыру сатысы (№4 үлгі) сынаманың максималды гомогенділігін, қалдық химиялық аппреттерді тиімді жоюды және талшықтардың параллель бағытталуын қамтамасыз ететінін көрсетті. Бұл талшықты иіруге дайындаудың таңдалған режимдерінің технологиялық тұрғыдан сәйкестігін растайды.

3. Регенераттың жарамдылығын ғылыми негіздеу. Механикалық регенерация целлюлозаның ішінара аморфизациясына әкелетіндігі дәлелденді (LOI 1,39-ға дейін), бұл физика-механикалық қасиеттердің өзгеруінің негізгі факторы болып табылады. Бұл құрылымдық трансформация трикотаж маталар мен жеке қорғану құралдарын (ЖҚК) өндіруде артықшылық болып табылады, бұл дайын бұйымдарға жоғары гигроскопиялық пен жақсартылған жұмсақтық береді.

4. Экологиялық-экономикалық маңыздылығы. Зерттеу қайталама ресурстардан бәсекеге қабілетті тоқыма бұйымдарын жасау мүмкіндігін растайды. Бұл тәсілді іске асыру Қазақстандағы тоқыма бұйымдарын қайта өңдеу саласының тұрақты дамуы үшін ғылыми база жасайды. Астана қаласында осындай технологияларды коммерцияландырудың сәтті тәжірибесі регенерацияланған талшықтың ҚР Экологиялық кодексі шеңберінде Қазақстан Республикасының жеңіл өнеркәсібінде ресурстарды үнемдеу және импортты алмастыру міндеттерін тиімді шешуге қабілетті толыққанды өндірістік ресурс екенін растайды.

Әдебиеттер тізімі

1. Умралиева, Б.И. Современное состояние проблемы переработки отходов текстильного производства [Текст] / Б.И. Умралиева, Ж.Б. Байжанова, Б.Т. Нурмухамбетова, К.Д. Кожабергенова, Б.С. Туракулов // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2023. – Вып. 1 (93), ч. 1. – С. 125–130.
2. Умралиева, Б.И. Коммерциализация эффективной технологии разволокнения отходов текстильного производства [Текст] / Б.И. Умралиева, Ж.Б. Байжанова, Б.Т. Нурмухамбетова, К.Д. Кожабергенова, Б.С. Туракулов // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2023. – Вып. 1 (93), ч. 1. – С. 131–135.
3. Умралиева, Б.И. Анализ современного состояния переработки и использования отходов текстильного производства [Текст] / Б.И. Умралиева, Ж.Б. Байжанова, Б.Т. Нурмухамбетова, К.Д. Кожабергенова, Р.А. Жетербасева // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2023. – Вып. 2 (94), ч. 1. – С. 131–135.
4. Ellen MacArthur Foundation. A new textiles economy: Redesigning fashion's future. – 2020. – P. 18–25.
5. Sandin G., Peters G.M. Environmental impact of textile reuse and recycling – A review // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 184. – P. 353–365.
6. Mottet H., Ostlund A. Sustainable fashion and textile recycling // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – P. 14903–14912.
7. Утебай, Г. Исследование свойств пряжи из вторичного хлопкового волокна [Текст] / Г. Утебай, Д. Казиева // Легкая промышленность и сервис. – 2023. – № 2 (51). – С. 12–18.
8. He M. et al. Characterization of fiber mechanical recycled cotton denim fibres and the effects of their properties on yarns and knits // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 10, No. 5. – P. 177.
9. Regenfabric. Mechanical vs. Chemical recycled cotton: 2025 Guide. Sustainable materials review [Electronic resource]. – Access mode:

- <https://regenfabric.com/mechanical-vs-chemical-recycled-cotton-2025-guide-process-benefits-and-choosing-circular-fashion/>.
10. Ciolacu D. et al. Fourier transform infrared spectroscopic analysis in applied cotton fiber // Carbohydrate Polymers. – 2021. – Vol. 368. – P. 124–130.
 11. Chambre D., Dochia M. FT-IR Characterization of cellulose crystallinity from raw bast fibers // Journal of Textile Science. – 2022. – Vol. 12. – P. 45–52.
 12. Жбанков, Р.Г. Инфокрасные спектры целлюлозы и ее производных [Текст] / Р.Г. Жбанков. – Минск: Наука и техника, 1964. – 45 с.
 13. Nelson M.L., O'Connor R.T. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type // Journal of Applied Polymer Science. – 2021. – Vol. 8. – P. 1325–1341.
 14. Subramanya S. et al. Determining the crystallinity index of cellulose in mechanically extracted fiber // ResearchGate. – 2021. – P. 10–15.
 15. Ūtebay B. et al. Effects of cotton textile waste properties on recycled fiber quality // Journal of the Textile Institute. – 2024. – Vol. 115. – P. 201–210.
 16. Mustata A. et al. Comparative analysis of crystallinity changes in cellulose I polymers using ATR-FTIR // Biomacromolecules. – 2023. – Vol. 24. – P. 215–223.
 17. Chalmers University. Recycling of cotton textiles: Characterization, pretreatment, and purification // Thesis Repository. – 2024. – P. 88–95.
 18. MDPI. A brief review of mechanical recycling of textile waste // Chemical Engineering Journal. – 2025. – Vol. 5. – P. 44.
 19. Тарасов, В.П. Инфракрасная спектроскопия в анализе текстильных материалов: учебное пособие [Текст] / В.П. Тарасов. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2018. – 34 с.
 20. Жбанков, Р.Г. Инфокрасные спектры целлюлозы и ее производных [Текст] / Р.Г. Жбанков. – Минск: Наука и техника, 1964. – 158–161 с.
 21. Ciolacu D., Ciolacu F., Popa V.I. Amorphous cellulose: Structure and characterization // Cellulose Chemistry and Technology. – 2011. – Vol. 45. – P. 13–21.
 22. Nelson M.L., O'Connor R.T. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type // Journal of Applied Polymer Science. – 1964. – Vol. 8. – P. 1325–1341.
 23. Петканова, Н.Н. Переработка текстильных отходов и вторичного сырья [Текст] / Н.Н. Петканова. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – 50 с.
 24. Structure and properties of regenerated cellulose fibers // Polymers. – 2023. – Vol. 15, No. 4. – P. 5.
 25. Kam S. Parametric design methodology for sustainable fashion with 3D-printed textures // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – P. 11–18.

Материал редакцияға 30.03.26 түсті, 17.09.26 қабылданды.

Ж.А. Майкыбекова¹, Р.Ш. Мирзамуратова¹, Д.Б. Худайбердиева²,
Б.И. Умралиева³

¹Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан

²Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности,
Ташкент, Республика Узбекистан

³Алматинский гуманитарно-экономический университет, Институт дизайна и
технологии «Сымбат», Алматы, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО ХЛОПКА МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ ЦИКЛИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Аннотация. Работа направлена на решение проблемы дефицита первичного сырья путем вовлечения в производство текстильных отходов. Целью исследования является установление закономерностей трансформации структуры хлопка на различных этапах механической регенерации. Актуальность работы обусловлена необходимостью научного сопровождения первых в Казахстане проектов по глубокой переработке текстиля (на примере ТОО «Glovex», г. Астана), реализуемых в рамках программ коммерциализации для импортозамещения в РК. Впервые количественно зафиксированы спектральные маркеры деструкции вторичного хлопка (пик 1712-1716 см⁻¹), отсутствующие в натуральном волокне. Установлено, что формирование линейно-ориентированной ленты обеспечивает максимальную гомогенность пробы и снижение интенсивности амидных полос (1558 см⁻¹), подтверждая эффективность очистки. Выявлено снижение индекса латерального порядка (LOI≈1,39), свидетельствует о аморфизации целлюлозы. Научно обоснована связь между спектральными характеристиками регенерата и его технологическим потенциалом. Доказано, что «усталость» волокна на молекулярном уровне предопределяет повышенную гигроскопичность будущего трикотажа и средств индивидуальной защиты. Результаты позволяют оптимизировать режимы прядения смесовой пряжи и служат базой для устойчивого развития и экологизации легкой промышленности Казахстана.

Ключевые слова: регенерированное хлопковое волокно, ИК-Фурье-спектроскопия, целлюлоза, текстильные отходы, латерального порядка (LOI), аморфизация, механическая регенерация, трикотажное производство, средства индивидуальной защиты (СИЗ).

Zh.A. Maikybekova¹, R.Sh. Mirzamuratova¹, D.B. Xudayberdiyeva²,
B.I. Umrallieva³

¹M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

²Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Tashkent, Uzbekistan

³Almaty Humanitarian and Economic University, "Symbat" Academy of Design and
Technology, Kazakhstan

INVESTIGATION OF STRUCTURAL TRANSFORMATION OF REGENERATED COTTON VIA IR SPECTROSCOPY AS A TOOL FOR ASSESSING CIRCULAR TEXTILE RESOURCE UTILIZATION

Abstract. The study addresses the raw material by incorporating textile waste into production. The research objective is to establish the patterns of cotton structure transformation at stages of mechanical regeneration. The relevance of the work is driven by the need for scientific support of the first textile deep processing projects in

Kazakhstan (e.g., “Glovex” LLP, Astana), implemented under commercialization programs for import substitution in the Republic of Kazakhstan. For the first time, spectral markers of recycled cotton degradation (1712-1716 cm^{-1} peak), absent in native fibers, were quantitatively recorded. It was established that the formation of a linear-oriented sliver ensures maximum sample homogeneity and a decrease in the intensity of amide bands (1558 cm^{-1}), confirming the efficiency of purification. A decrease in the Lateral Order Index ($\text{LOI} \approx 1.39$) indicates significant cellulose amorphization. The correlation between the spectral characteristics of the regenerate and its technological potential has been scientifically substantiated. It is proven that fiber «fatigue» at the molecular level predetermines the increased hygroscopicity of future knitwear and personal protective equipment. The results allow for the optimization of blended yarn spinning modes and serve as a basis for the sustainable development and greening the light industry in Kazakhstan.

Keywords: regenerated cotton fiber, FTIR spectroscopy, cellulose, textile waste, Lateral Order Index (LOI), amorphization, mechanical regeneration, knitwear production, personal protective equipment (PPE).

References

1. Umralieva B.I., Bayzhanova Zh.B., Nurmukhambetova B.T., Kozhabergenova K.D., Turakulov B.S. Sovremennoe sostoyanie problemy pererabotki otkhodov tekstil'nogo proizvodstva [Current state of the problem of textile production waste processing] // Current Scientific Research in the Modern World. – 2023. – No. 1 (93), Part 1. – P. 125–130. [in Russian].
2. Umralieva B.I., Bayzhanova Zh.B., Nurmukhambetova B.T., Kozhabergenova K.D., Turakulov B.S. Komertsializatsiya effektivnoy tekhnologii razvolokneniya otkhodov tekstil'nogo proizvodstva [Commercialization of an efficient technology for fiber opening of textile production waste] // Current Scientific Research in the Modern World. – 2023. – No. 1 (93), Part 1. – P. 131–135. [in Russian].
3. Umralieva B.I., Bayzhanova Zh.B., Nurmukhambetova B.T., Kozhabergenova K.D., Zheterbaeva R.A. Analiz sovremennogo sostoyaniya pererabotki i ispol'zovaniya otkhodov tekstil'nogo proizvodstva [Analysis of the current state of processing and utilization of textile production waste] // Current Scientific Research in the Modern World]. – 2023. – No. 2 (94), Part 1. – P. 131–135. [in Russian].
4. Ellen MacArthur Foundation. A new textiles economy: Redesigning fashion's future. – 2020. – P. 18–25.
5. Sandin G., Peters G.M. Environmental impact of textile reuse and recycling – A review // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 184. – P. 353–365.
6. Mottet H., Ostlund A. Sustainable fashion and textile recycling // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – P. 14903–14912.
7. Utebay G., Kazieva D. Issledovanie svoystv pryazhi iz vtorichnogo khlopkovogo volokna [Study of the properties of yarn made from recycled cotton fiber] // Light Industry and Service. – 2023. – No. 2 (51). – P. 12–18 [in Russian].
8. He M. et al. Characterization of fiber mechanical recycled cotton denim fibres and the effects of their properties on yarns and knits // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 10, No. 5. – P. 177.
9. Regenfabric. Mechanical vs. Chemical recycled cotton: 2025 Guide. Sustainable materials review [Electronic resource]. – 2025. – Access mode: <https://regenfabric.com/mechanical-vs-chemical-recycled-cotton-2025-guide-process-benefits-and-choosing-circular-fashion/>.
10. Ciolacu D. et al. Fourier transform infrared spectroscopic analysis in applied cotton fiber // Carbohydrate Polymers. – 2021. – Vol. 368. – P. 124–130.
11. Chambre D., Dochia M. FT-IR characterization of cellulose crystallinity from raw bast fibers // Journal of Textile Science. – 2022. – Vol. 12. – P. 45–52.

12. Zhbakov R.G. Infokrasnye spektry tsellulozy i ee proizvodnykh [Infrared spectra of cellulose and its derivatives]. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1964. – P. 45 [in Russian].
13. Nelson M.L., O'Connor R.T. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type // Journal of Applied Polymer Science. – 2021. – Vol. 8. – P. 1325–1341.
14. Subramanya S. et al. Determining the crystallinity index of cellulose in mechanically extracted fiber // ResearchGate. – 2021. – P. 10–15.
15. Ütebay B. et al. Effects of cotton textile waste properties on recycled fiber quality // Journal of the Textile Institute. – 2024. – Vol. 115. – P. 201–210.
16. Mustata A. et al. Comparative analysis of crystallinity changes in cellulose I polymers using ATR-FTIR // Biomacromolecules. – 2023. – Vol. 24. – P. 215–223.
17. Chalmers University. Recycling of cotton textiles: Characterization, pretreatment, and purification // Thesis Repository. – 2024. – P. 88–95.
18. MDPI. A brief review of mechanical recycling of textile waste // Chemical Engineering Journal. – 2025. – Vol. 5. – P. 44.
19. Tarasov V.P. Infokrasnaya spektroskopiya v analize tekstil'nykh materialov: uchebnoe posobie [Infrared spectroscopy in the analysis of textile materials: study guide]. – Moscow: FGBOU VO «RGU im. A.N. Kosygina», 2018. – 34 p. [in Russian].
20. Zhbakov R.G. Infokrasnye spektry tsellulozy i ee proizvodnykh [Infrared spectra of cellulose and its derivatives]. – Minsk: Nauka i tekhnika, 1964. – P. 158–161 [in Russian].
21. Ciolacu D., Ciolacu F., Popa V.I. Amorphous cellulose: Structure and characterization // Cellulose Chemistry and Technology. – 2011. – Vol. 45. – P. 13–21.
22. Nelson M.L., O'Connor R.T. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type // Journal of Applied Polymer Science. – 1964. – Vol. 8. – P. 1325–1341.
23. Petkanova N.N. Pererabotka tekstil'nykh otkhodov i vtorichnogo syr'ya [Processing of textile waste and secondary raw materials]. – Moscow: Legprombytizdat, 1991. – 50 p. [in Russian].
24. Structure and properties of regenerated cellulose fibers // Polymers. – 2023. – Vol. 15, No. 4. – P. 5.
25. Kam S. Parametric design methodology for sustainable fashion with 3D-printed textures // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – P. 11–18.