

Ж.А. Майкыбекова* 

Докторант
ЮКУ им. М. Ауезова
г. Шымкент, Казахстан
mega.zharyk@mail.ru

Р.Ш.Мирзамуратова 

PhD, доцент
ЮКУ им. М. Ауезова
г. Шымкент, Казахстан

Д.Б. Худайбердиева 

Д.т.н., профессор
ТИТЛП
Ташкент, Узбекистан

Б.И. Умралиева 

К.т.н, доцент
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 cm^{-1}), отсутствующие в натуральном волокне. Установлено, что формирование линейно-ориентированной ленты обеспечивает максимальную гомогенность пробы и снижение интенсивности амидных полос (1558 cm^{-1}), подтверждая эффективность очистки. Выявлено снижение индекса кристалличности ($LOI \approx 1,39$), 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, индекс кристалличности (LOI), аморфизация, механическая регенерация, импортозамещение, трикотажное производство, средства индивидуальной защиты (СИЗ).

Введение. Современная легкая промышленность сталкивается с двойным вызовом: экологическим кризисом и технологической проблемой переработки вторичного сырья. Для Республики Казахстан

этот вопрос стоит особенно остро из-за отсутствия до недавнего времени предприятий полного цикла регенерации. Ситуация начала меняться с появлением инновационных производств, таких как ТОО «Glovex» в г. Астана.

Получение регенерированных волокон из вторичных текстильных ресурсов на базе ТОО «Glovex» по безотходной технологии разволокнения позволяет производить смесовую пряжу с содержанием натуральных волокон до 80%. Реализация данного подхода решает актуальную задачу снижения себестоимости продукции при одновременной минимизации экологической нагрузки. Использование вторичного сырья способствует эффективной утилизации промышленных отходов, что напрямую отвечает требованиям Экологического кодекса Республики Казахстан в части «обеспечения благоприятной для жизни и здоровья человека окружающей среды» [1-3].

На фоне прогрессирующего истощения природных ресурсов, усиления антропогенного воздействия на биосферу в общественном сознании наблюдается устойчивая парадигма перехода к принципам устойчивого развития. В последние годы в легкой промышленности, в частности в сегментах швейного производства и домашнего текстиля, отмечается актуализация концепции использования регенерированного сырья. Данная тенденция находит практическое воплощение в стратегиях ведущих транснациональных корпораций, таких как Adidas, Nike, Uniqlo и других, которые интегрируют принципы экономики замкнутого цикла в свои производственные циклы.

В условиях перехода к экономике замкнутого цикла текстильная промышленность сталкивается с

необходимостью эффективной переработки вторичных ресурсов. По оценкам экспертов, ежегодно образуются миллионы тонн текстильных отходов, из которых менее 1% перерабатывается в новые изделия [4, 5]. Регенерация хлопкового волокна является одним из наиболее перспективных направлений устойчивой моды, позволяющим снизить нагрузку на экосистему и сократить потребление первичного сырья [6, 7].

Для Республики Казахстан решение данной проблемы перешло в практическую плоскость с запуском проектов по глубокой переработке текстиля, в частности на базе ТОО «Glovex» (г. Астана). Безотходная технология разволокнения позволяет производить здесь смесовую пряжу с содержанием натуральных волокон до 80%. Вместе с тем, достижение столь высокого содержания регенерата требует детального изучения качественных характеристик получаемого субстрата [1-3].

Однако механическая переработка неизбежно приводит к значительному укорочению длины волокон (проблема «коротких волокон»), их структурной неравномерности и снижению прочности. Это традиционно ограничивает процент их ввода в пряжу. В данной работе авторами предлагается решение данной проблемы через проектирование изделий с коротким жизненным циклом (КЖЦ) из трикотажных полотен. Выбор трикотажного способа формирования полотна обусловлен гибкостью его петельной структуры, которая, в отличие от жесткой структуры тканей, менее подвержена деформационному разрушению при использовании пряжи с высоким содержанием коротких волокон.

Несмотря на активные исследования в области смешивания, существует дефицит научно обоснованных методик, позволяющих прогнозировать свойства трикотажа при критическом содержании регенерата. Поскольку механическое разволокнение неизбежно сопровождается деструкцией полимерных цепей целлюлозы, возникает необходимость в прецизионной оценке глубины этих трансформаций [8, 9].

Важнейшим инструментом в этом анализе выступает ИК-Фурье-спектроскопия, позволяющая фиксировать процессы окислительной деструкции и изменения степени кристалличности материала на молекулярном уровне [10, 11]. Таким образом, требуется комплексный подход, который свяжет материаловедение (химическую чистоту и надмолекулярную структуру) с технологией производства и конечным ассортиментом с низкой ресурсоемкостью.

Реализация данного подхода в настоящем исследовании началась с верификации структурных трансформаций регенерированного хлопка, полученного на ТОО «Glovex». Анализ полученных ИК-спектров проводился в сравнении с эталонными характеристиками первичной целлюлозы, что позволило выявить качественные отличия вторичного сырья уже на начальных этапах.

Так, в области $3387\text{-}3286\text{ см}^{-1}$ зафиксирована широкая полоса валентных колебаний гидроксильных групп, вовлеченных в систему водородных связей. Экспериментально установленное смещение максимума в низкочастотную область относительно эталона объясняется упрочнением сетки водородных связей. Подобная перестройка надмолекулярной системы является

характерным маркером структурных изменений в целлюлозе, при повторных циклах переработки и интенсивном механическом воздействии [12].

Современные исследования показывают, что механическая обработка «утопленного» волокна вызывает аморфизацию целлюлозного скелета, что отражается на латеральном индексе порядка (LOI) [13, 14]. Кроме того, наличие остаточных аппретов и красителей на поверхности вторичного сырья создает дополнительные технологические барьеры при его повторном использовании [15, 16]. В связи с этим актуальной задачей является мониторинг трансформации структуры волокна на всех этапах подготовки: от засоренного регенерата до ориентированного ленточного полуфабриката [17, 18].

Ключевым отличием от эталона является наличие выраженного пика при 1716 см^{-1} (валентные колебания $C=O$). Согласно классификации [19], данный пик служит маркером окислительной деструкции волокна (образование оксиглюкозы) в процессе эксплуатации исходного изделия или указывает на наличие полиэфирных аппретов [20-22].

Обнаруженный пик при 1516 см^{-1} соответствует деформационным колебаниям N-H (Амид II). Наличие этой полосы, в совокупности с данными элементного анализа о содержании серы (0,46%), подтверждает присутствие в регенерате технологических микропримесей (замасливателей или азотсодержащих красителей), не удаленных в процессе механической очистки [23].

Повышенная интенсивность полосы в области $894\text{-}897\text{ см}^{-1}$ (колебание аморфной фазы) свидетельствует о частичном разрушении кристаллической решетки волокна под воздействием

механических усилий при разволокнении, что коррелирует с современными данными о снижении индекса кристалличности вторичного сырья [24].

Настоящая работа посвящена комплексному исследованию физико-химических свойств регенерированных хлопковых волокон с целью научного обоснования их использования в проектировании современных

трикотажных изделий с заданными потребительскими свойствами [25].

Материалы и методы. В качестве объектов исследования использовали образцы хлопкового волокна, полученные на различных этапах технологического цикла механической регенерации текстильных отходов на базе ТОО «Glovex». Для анализа было отобрано четыре типа образцов, предоставленных исследователем:

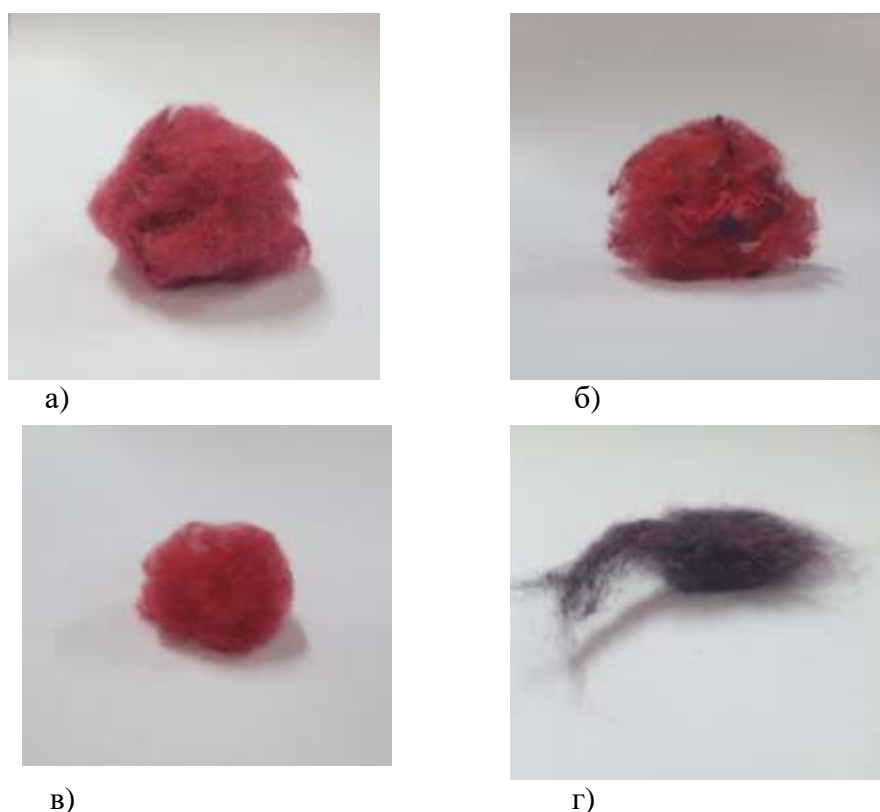


Рисунок 1 –регенерированные волокна

а) образец №1 - регенерированное волокно, характеризующееся высокой степенью засоренности и повышенным содержанием неразволокненных фрагментов нитей;

б) образец №2 - грубодисперсный хлопковый регенерат с остаточной нитевидной структурой и наличием посторонних включений;

в) образец №3 - гомогенизированная волокнистая масса с высокой степенью расщепления структурных

элементов и минимальным содержанием неразволокненных фрагментов;

г) образец №4 - линейно-ориентированный волокнистый продукт (лента) прошедший стадию сложения и вытягивания.

В качестве контрольного образца (эталоны) использовалось натуральное хлопковое волокно (средневолокнистый хлопксырец), не подвергавшееся ранее циклам эксплуатации и химической отделки.

Подготовка волокнистых проб осуществлялась методом высушивания до постоянной массы при температуре 105°C для удаления адсорбированной влаги, способной исказить спектральную картину в области валентных колебаний гидроксильных групп. Образцы исследовались в натуральном виде без механического измельчения, что позволило сохранить морфологические особенности структуры.

Спектральные исследования химического состава и надмолекулярной структуры проводилось методом ИК-Фурье-спектроскопии с нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Использовали ИК-Фурье спектрометр Shimadzu IRPrestige-21, оснащенный приставкой ATR Miracle фирмы Pike Technologies. Для количественной оценки трансформации кристаллической структуры рассчитывался латеральный индекс порядка LOI – Lateral Order Index по методике Нельсона-О'Коннора. Индекс определялся как отношение интенсивностей полос поглощения при волновых числах 1429 cm^{-1} (симметричные деформационные колебания групп CH_2 кристаллической фазы) и 897 cm^{-1} (валентные колебания β -глюкозидных связей аморфной фазы). Пики интенсивностей определялись по методу базовой линии для обеспечения воспроизводимости результатов.

Полученные спектры обрабатывали с использованием программного обеспечения LabSolutions IR (встроенное ПО спектрометра Shimadzu): выполняли базовую коррекцию, нормализацию и идентификацию характеристических пиков. Особое внимание уделялось анализу полос в области 1712-1716 cm^{-1} для оценки степени окислительной деструкции целлюлозы и полос в области 1500-1600 cm^{-1}

для идентификации остаточных загрязнений (аппретов и красителей). Оценка надмолекулярной структуры проводилась путем сравнения интенсивностей полос поглощения аморфной и кристаллической фаз целлюлозы.

Результаты и обсуждения. На основании анализа ИК-спектра полученного методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье для регенерированного волокна, характеризующееся высокой степенью засоренности и повышенным содержанием неразволокненных фрагментов нитей (Рисунок 2), в диапазоне 4000-500 cm^{-1} позволяет сделать следующие выводы. Общий профиль спектра с доминирующими пиками в области 1161-1028 cm^{-1} (C-O-C и C-O-H связей) и характерным пиком β -глюкозидной связи при 897 cm^{-1} однозначно идентифицирует основу материала как целлюлозу (хлопок). Наличие широкой полосы при 3342 cm^{-1} подтверждает существование развитой системы мужмолекулярных водородных связей, определяющих морфологию волокна. Наличие пиков в районе 1716 cm^{-1} и 1558 cm^{-1} позволяет предположить, что пряжа либо прошла стадию химической отделки (например, несминаемая отделка), либо является смесовой (например, хлопок с добавлением синтетики или белковых волокон).

Обнаружение аналитически значимого пика при 1716 cm^{-1} (карбонильная группа C=O) свидетельствует о протекании процессов окислительной деструкции целлюлозы, что характерно регенерированного сырья, прошедшего циклы химической или термической нагрузки. Присутствие пика 1558 cm^{-1} (Амид II, деформационные колебания N-H) указывает на наличие остаточных азотсодержащих соединений (азокрасители, закрепители или

аппреты), что подтверждает вторичный характер происхождения пряжи.

Анализ надмолекулярной структуры: интенсивность и площадь пиков в области «отпечатко-образной» (fingerprint region) ($1456-1028\text{ см}^{-1}$) указывают на сохранение скелетной жесткости полимерной цепи. Однако наличие пиков в области низких частот (507 см^{-1}), отвечающих за колебания кристаллической решетки, в сочетании с данными об аморфных зонах, позволяет рассматривать данный материал как деструктурированную целлюлозу с измененным соотношением кристаллической и аморфной фаз.

Выявленные особенности химического состава (наличие карбонильных и амидных групп) предопределяют специфическое поведение материала в технологических процессах. Повышенная реакционная способность окисленных участков целлюлозы и наличие примесей в регенерированном волокне требуют обязательной гомогенизации и оптимизации режимов крашения и отделки при производстве готовых трикотажных изделий.

Область валентных колебаний $O-H$ и $N-H$ ($3600-3000\text{ см}^{-1}$): Наблюдается широкая полоса с максимумом 3342 см^{-1} . Такая ширина и интенсивность обусловлены наличием разветвленной сети межмолекулярных и внутримолекулярных водородных связей. Пики при $3645-3849\text{ см}^{-1}$ могут указывать на присутствие слабосвязанных гидроксильных групп или следов влаги.

Область алифатических групп $C-H$ ($2900-2800\text{ см}^{-1}$): Пик при 2912 см^{-1} соответствует ассимметричным валентным колебаниям групп CH_2 и CH в структуре целлюлозного кольца.

Область карбонильных групп и двойных связей ($1750-1500\text{ см}^{-1}$): Пик 1716 см^{-1} соответствует валентным колебаниям $C=O$ (карбонильная группа). Это может указывать либо на частичное окисление целлюлозы (оксицеллюлоза), либо на наличие аппрета (текстильной отделки, например, полиэфирного типа). Пик 1558 см^{-1} может быть интерпретирован как (Амид II), что иногда встречается в смесовых тканях с белковой компонентой (шерсть) или при использовании азотсодержащих отделочных агентов.

Согласно данным в таблице, наиболее значимые пики по показателю Corr. Intensity и Area сосредоточены в диапазоне $1000-1100\text{ см}^{-1}$. Пик №12 ($1055,06\text{ см}^{-1}$) имеет высокую площадь (1,488) и выраженную интенсивность. Это «сердце» спектра, отвечающее за скелетные колебания $C-O$ полимерной цепи. Пик №1 ($507,280\text{ см}^{-1}$): Высокая интенсивность в нижней области спектра часто связана с колебаниями кристаллической решетки или деформационными колебаниями скелета молекулы. Пик №22 ($1716,65\text{ см}^{-1}$): не смотря на малую площадь (0,206), его наличие критически важно для определения химической модификации или примесей, так как чистая целлюлоза не имеет выраженной карбонильной полосы. В целом анализ показывает, что представленные данные характерны для целлюлозного текстильного материала. Химический профиль образца соответствует целлюлозному волокну (хлопок, вискоза) с потенциальным наличием синтетических модификаторов или аппретов. Область валентных колебаний $3334,92\text{ см}^{-1}$ ($O-H$), вовлеченных в систему межмолекулярных водородных связей.

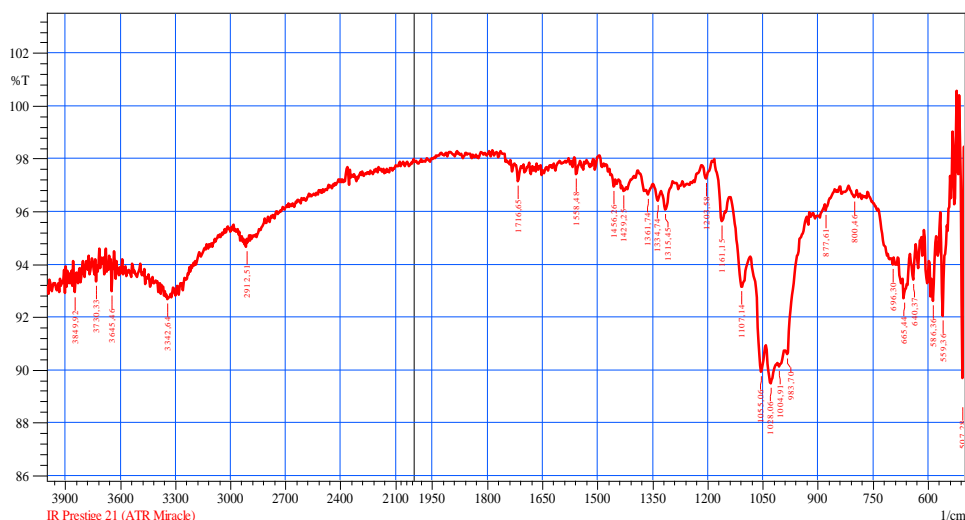


Рисунок 2 – ИК-Фурье спектр регенерированного волокна, характеризующееся высокой степенью засоренности и повышенным содержанием неразволокнуемых фрагментов нитей (Образец 1)

Таблица 1

Основные ИК-маркеры структуры целлюлозы

Волновое число (см-1)	Тип колебаний
1456-1429	Симметричные деформационные колебания CH_2 («ножничные»).
1361-1315	Плоскостные деформационные колебания $\text{C}-\text{H}$ и $\text{O}-\text{H}$.
1161-1107	Асимметричные валентные колебания $\text{C}-\text{O}-\text{H}$ (гликозидная связь).
1055-1028	Валентные колебания кольца $\text{C}-\text{C}$, $\text{C}-\text{OH}$, $\text{C}-\text{O}-\text{C}$. Это самые интенсивные пики, подтверждающие скелетную структуру целлюлозы.
897-877	Колебания β -гликозидной связи (характерно для целлюлозы).

Эта область ($1500-500 \text{ см}^{-1}$) наиболее информативна для идентификации химической структуры полимера.

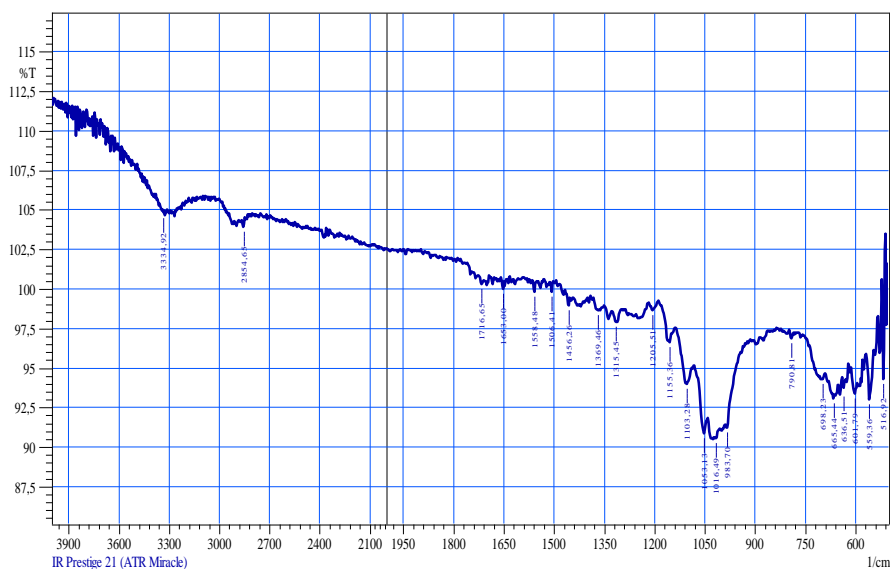


Рисунок 3 – ИК-Фурье спектр грубодисперсного хлопкового регенерата с остаточной нитевидной структурой и наличием посторонних включений (Образец 2)

Пик $2854,65 \text{ cm}^{-1}$ относится к симметричным валентным колебаниям алифатических групп C-H (CH_2) в структуре глюкопиранозного кольца. $1716,65 \text{ cm}^{-1}$, полоса валентных колебаний карбонильной группы (C=O). Что может указывать на присутствие полиэфирных волокон или использование карбоксилсодержащих отделочных агентов.

Анализ параметров пиков позволяет выделить наиболее весомые спектральные компоненты: Max Corr. Intensity – 7,440 (при $516,92 \text{ cm}^{-1}$) сильное поглощение в дальней ИК-области, вероятно, деформации скелета полимера. Max Area – 1,334

(при $983,70 \text{ cm}^{-1}$) широкая полоса поглощения, характерная для полисахаридных структур. Peak №10 – $1053,13 \text{ cm}^{-1}$ (1,717 Corr, Int.) основной структурный маркер целлюлозы.

Исходя из положения ключевых максимумов ($3334, 1053, 1016 \text{ cm}^{-1}$), данная пряжа идентифицируется как натуральное или регенерированное целлюлозное волокно. Присутствие пика при $1716,65 \text{ cm}^{-1}$ свидетельствует о наличии эфирных групп, что может быть результатом смешивания с полиэфиром (ПЭ) или нанесения текстильно-вспомогательных веществ (ТВВ).

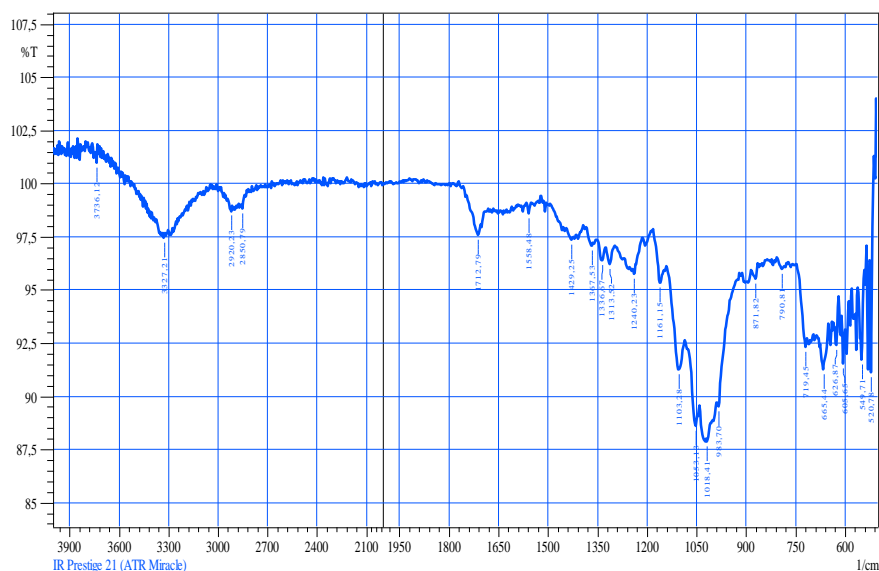


Рисунок 4 – ИК-Фурье спектр гомогенизированной волокнистой массы с высокой степенью расщепления структурных элементов и минимальным содержанием неразволокненных фрагментов (Образец 3)

На основе представленной спектрограммы, полученной методом ИК-фурье-спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения НПВО (ATR) на приборе Shimadzu IRPrestige-21, приводится логически структурированный научный анализ химической структуры образца. Представленный анализ образца 3 демонстрирует классический профиль целлюлозных волокон (таких как хлопок или

вискоза) с характерными функциональными группами. Наклон базовой линии в области $4000\text{-}2500 \text{ cm}^{-1}$ может быть обусловлен морфологией поверхности пряж и качеством контакта с кристаллом НПВО (ATR).

Графическая зависимость коэффициента пропускания ($T, \%$) от волнового числа (cm^{-1}) подтверждает, что исследуемый образец 3 имеет полимерную целлюлозную природу. Спектр четко разделяется на область

высокочастотных валентных колебаний и информативную «отпечаткообразную» зону (fingerprint region) ниже 1500 cm^{-1} . Наблюдается интенсивная широкая полоса с максимумом при 3327 cm^{-1} обусловленная валентными колебаниями гидроксильных групп (О-Н), вовлеченных в систему внутри- и межмолекулярных водородных связей. Незначительный пик при 3736 cm^{-1} указывает на наличие свободных (неассоциированных) групп – ОН или адсорбированной микро-влаги на поверхности регенерированного волокна. $2920, 2850\text{ cm}^{-1}$ пики средней интенсивности соответствуют ассиметричным и симметричным валентным колебаниям связей С-Н в группах СН ангидроглюкозного кольца. Область характеристических признаков деструкции ($1800\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$). Данный сегмент позволяет подтвердить статус регенерированного волокна. Окисление (1712 cm^{-1}) четко выраженный пик при 1712 cm^{-1} соответствует валентным колебаниям карбонильных групп (С-О). Его наличие в целлюлозном материале свидетельствует о протекании деструктивных процессов (окислительная деструкция) или присутствии синтетических аппретов. Азотосодержащие примеси (1558 cm^{-1}) пик в области деформационных колебаний N-H (Амид II) указывает на наличие остаточных закрепителей красителей или белковых загрязнений, характерных для вторичного переработанного сырья.

Область «отпечатков пальцев» и скелетных колебаний ($1500\text{-}500\text{ cm}^{-1}$), что подтверждает сохранность основной полимерной цепи. Группы CH_2 (1429 cm^{-1}) симметричные деформационные колебания, чувствительные к степени кристалличности целлюлозы. Гликозидные и скелетные связи ($1161, 1103, 1053, 1018\text{ cm}^{-1}$) группа наиболее интенсивных пиков

отвечает за ассиметричные колебания мостиковых связей С-О-С и валентные колебания кольцевых структур. Максимальная интенсивность в диапазоне $1053\text{-}1018\text{ cm}^{-1}$ является «фундаментом» спектра хлопка. Конфигурация цепи ($871, 897\text{ cm}^{-1}$) наличие полос в области подтверждает β -конфигурацию гликозидных связей.

Анализ представленной спектрограммы позволяет идентифицировать образец как регенерированное хлопковое волокно. Совокупность пиков при 1712 cm^{-1} и 1558 cm^{-1} на фоне типичного целлюлозного профиля служит прямым доказательством химической модификации и деструкции волокна в процессе его эксплуатации и последующей регенерации. Выявленная аморфизация структуры (судя по профилю полос в области 1429 cm^{-1}) научно обосновывает применение данного сырья в производстве трикотажных полотен, где повышенная мягкость и сорбционная способность волокна станут преимуществом при проектировании готовых изделий.

Данный спектр характеризует высокоочищенное регенерированное целлюлозное волокно с выраженными признаками структурной перестройки. На графике четко фиксируются ключевые функциональные группы, формирующие полимерный скелет. 3329 cm^{-1} (валентные колебания О-Н) широкий интенсивный пик свидетельствует о наличии разветвленной сети водородных связей. Незначительный сдвиг максимума по сравнению с натуральным хлопком указывает на изменение энергии межмолекулярных взаимодействий в процессе регенерации. $2922, 16\text{ cm}^{-1}$ и $2848,86\text{ cm}^{-1}$ (Группы С-Н) соответствуют ассиметричным и симметричным колебаниям алифатических связей

ангидроглюкозного кольца. 1051,20 cm^{-1} и 1016,49 cm^{-1} (Скелетные колебания C-O, C-C) наиболее интенсивные пики («fingerprint»),

подтверждающие сохранение основной целлюлозной цепи механического воздействия.

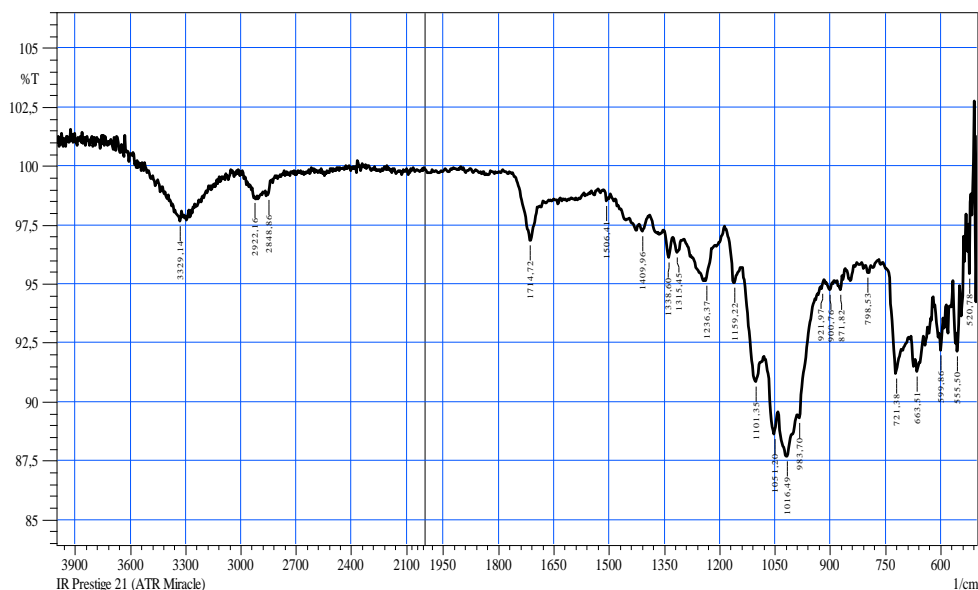


Рисунок 5 – ИК-Фурье спектр линейно-ориентированной волокнистого продукта (лента) прошедший стадию сложения и вытягивания (Образец 4)

Наличие специфических пиков в диапазоне 1800-1500 cm^{-1} является научно подтвержденным доказательством «вторичности» волокна. 1714,72 cm^{-1} (карбонильная группа C=O) наличие данного пика критически важно. В чистой целлюлозе он отсутствует. Его интенсивность на графике указывает на окислительную деструкцию волокна, возникшую вследствие старения материала или химического воздействия при предыдущих циклах эксплуатации. 1506,41 cm^{-1} (Связи N-N/C-N) наличие этого пика может интерпретироваться как присутствие остаточных азотсодержащих соединений (красителей или аппретов), которые не были полностью удалены в процессе очистки регенерата.

Структурные индексы и гомогенность: область 1409,96 cm^{-1} соответствует деформационным колебаниям CH_2 -групп. Снижение интенсивности в этой зоне

относительно области 897 cm^{-1} (β -глюкозидная связь) свидетельствует о снижении индекса кристалличности. Это подтверждает теорию об аморфизации волокна в процессе «распушения» и разволокнения. Чистая базовая линия и отсутствие значительного шума в области высоких частот (3600-4000 cm^{-1}) указывают на высокую степень гомогенизации пробы, что характерно для стадии ленточного полуфабриката.

Представленные данные позволяют классифицировать образец как регенерированное хлопковое волокно высокой степени очистки. Сочетание сохраненного целлюлозного скелета (интенсивные пики 1051 cm^{-1}) с четко выраженными полосами окисления (1714 cm^{-1}) обосновывает выбор данного сырья для создания смесовой пряжи. Повышенная аморфность структуры (по данным анализа fingerprint-области) делает это

волокно оптимальным для производства трикотажных полотен, обеспечивая им необходимую мягкость и повышенную гигроскопичность.

Главным отличительным признаком исследуемого регенерированного волокна по сравнению с первичным хлопком является наличие интенсивного поглощения в области 1716 см^{-1} . Согласно литературным данным и сравнительному анализу спектров натурального хлопка, данная область является спектрально прозрачной для чистой целлюлозы. Появление карбонильной полосы в исследуемых образцах №1-№4 однозначно идентифицирует сырье как вторичное, подвергшееся окислительной деструкции. Это подтверждает правомерность использования ИК-спектроскопии как метода экспрессдиагностики «усталости» волокна перед его запуском в трикотажное производство.

Заключение. На основании проведенного исследования сформулированы следующие выводы:

1. Идентификация и контроль качества вторичного сырья. Сравнение спектральных характеристик подтвердило наличие уникального «химического отпечатка» деструкции в регенерированном волокне. Обнаруженные маркеры позволяют внедрить методы ИК-мониторинга на перерабатывающих предприятиях РК (в частности, ТОО «Glovex» и Fabriqa) в качестве экспресс-метода оперативного контроля качества поступающего сырья и оценки степени его «усталости».

2. Оптимизация технологического цикла. Анализ динамики очистки показал, что стадия формирования ленты (Образец 4) обеспечивает максимальную гомогенность пробы, эффективное удаление остаточных химических ашретов и параллельную ориентацию волокон. Это подтверждает технологическую адекватность выбранных режимов подготовки волокна к прядению.

3. Научное обоснование пригодности регенерата. Доказано, что механическая регенерация приводит к частичной аморфизации целлюлозы (LOI до 1,39), что является ключевым фактором изменения физико-механических свойств. Данная структурная трансформация выступает преимуществом при производстве трикотажных полотен и средств индивидуальной защиты (СИЗ), обеспечивая готовым изделиям повышенную гигроскопичность и улучшенные тактильные характеристики (мягкость).

4. Эколого-экономическая значимость. Исследование подтверждает возможность создания конкурентоспособного текстиля из вторичных ресурсов. Реализация данного подхода создает научную базу для устойчивого развития отрасли переработки текстиля в Казахстане. Успешный опыт коммерциализации подобных технологий в г. Астана подтверждает, что регенерированное волокно является полноценным промышленным ресурсом, способным эффективно решать задачи ресурсосбережения и импортозамещения в легкой промышленности Республики Казахстан в рамках Экологического кодекса РК.

Список литературы

1. Умралиева, Б.И. Современное состояние проблемы переработки отходов текстильного производства-печ. [Текст] / Б.И. Умралиева, Ж.Б. Байжанова, Б.Т. Нурмухамбетова, К.Д. Кожабергенова, Б.С.Туракулов // сертификат-Журнал РИНЦ ISCIENCE.IN.UA «Актуальные научные исследования в современном мире», Украина, Переслав. – 2023. – выпуск №1(93) – часть 1. – С.125-130, ISSN 2524-0986

2. Умралиева, Б.И. Комерциализация эффективной технологии разволокнения отходов текстильного производства-печ [Текст] / Б.И. Умралиева, Ж.Б. Байжанова, Б.Т. Нурмухамбетова, К.Д. Кожабегенова, Б.С. Туракулов // сертификат-Журнал РИНЦ ICIENCE.IN.UA «Актуальные научные исследования в современном мире», Украина, Переслав. – 2023. – выпуск №1(93). – часть 1. – С.131-135, ISSN 2524-0986
3. Умралиева, Б.И. Анализ современного состояния переработки использования отходов текстильного производства-печ [Текст] / Б.И. Умралиева, Ж.Б. Байжанова, Б.Т. Нурмухамбетова, К.Д. Кожабегенова, Р.А. Жетербаяева // сертификат-Журнал РИНЦ ICIENCE.IN.UA «Актуальные научные исследования в современном мире», Украина, Переслав – 2023 – выпуск №2(94) – часть 1 – С.131-135, ISSN 2524-0986
4. Ellen MacArthur Foundation. A new textiles economy: Redesigning fashion`s future, 2020. – P. 18-25.
5. Sandin, G. Environmental impact of textile reuse and recycling Sandin [Текст] / G. Sandin, G. M. Peters // A review. Journal of cleaner production. – 2021. – Vol. 184 – P.353-365.
6. Motte, H. Sustainable fashion and textile recycling [Текст] / H. Motte, A. Ostlund // 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. MDPI Applied Sciences. 2025. – Vol. 10(5), – P. 177.
9. Regenfabric. Mechanical vs. Chemical recycled cotton: 2025 Guide. Sustainable materials review. Режим доступа: <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]. – Минск: Наука и техника, 1964. – С. 45.
13. Nelson, M.L. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type [Текст] / M.L. Nelson, R.T. O`Connor // Journal of applied polymer science. Reprint. – 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. Ûtebay B. et al. effects of cotton textile waste properties on recycled fiber quality. Journal of 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. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2018. – С. 34.
20. Жбанков, Р.Г. Инфокрасные спектры целлюлозы и ее производных. – Минск: Наука и техника, 1964. – С. 158-161.
21. Ciolacu D. Amorphous Cellulose: Structure and Characterization / D. Ciolacu, F. Ciolacu, V.I. Popa // Cellulose Chemistry and Technology. 2011. – Vol. 45, P. 13-21.
22. Nelson M.L. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type / M.L. Nelson, R.T. O`Connor // Journal of Applied Polymer Science, 1964. – Vol. 8, P. 1325-1341
23. Петканова, Н.Н. Переработка текстильных отходов и вторичного сырья. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – С. 50.
24. Structure and properties of regenerated cellulose fibers // MDPI Polymers, 2023, 15 (4). – P.5.
25. Kam S. Parametric design methodology for sustainable fashion with 3D-printed textures. Sustainability. 2022. – Vol. 14, – P. 11-18.

Ж.А. Майкыбекова¹, Р.Ш.Мирзамуратова² Д.Б. Худайбердиева³,
Б.И. Умралиева⁴

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

³Ташкент тоқыма және жеңіл өнеркәсіп институты, Ташкент қ., Өзбекстан

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

ТОҚЫМА РЕСУРСТАРЫН ЦИКЛІ ПАЙДАЛАНУ ДЫ БАҒАЛАУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ ИҚ-СПЕКТРОСКОПИЯ ӨДІСІМЕН 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 тотығу деструкциясының спектрлік маркерлері (1712-1716 см⁻¹ пикі) сандық түрде тіркелді. Сызықтық – бағытталған таспаны қалыптастыру сынамаының максималды гомогенділігін және амидтік жолақтар (1558 см⁻¹) қарқындылығын төмендеуін қамтамасыз етіп, тазарту тиімділігін растайтыны анықталды. Кристаллдылық индексінің төмендеуі (LOI≈1,39) 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, кристаллдылық индексі (LOI), аморфтылық, механикалық, механикалық регенерация, импортты алмастыру, трикотаж өндірісі, жеке қорғаныс құралдары (ЖҚК).

Zh.A. Maikybekova¹, R.Sh. Mirzamuratova², D.B. Xudayberdiyeva³,
B.I. Umralieva⁴

^{1,2} M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

³Taskent Institute of Textile and Light Industry, Tashkent, Uzbekistan.

⁴Almaty Humanitarian and Economic University, "Symbat" Academy of Design and Technology, Almaty, 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.

-transform infrared spectroscopy with attenuated total reflectance (FTIR-ATR) using the Shimadzu IRPrestige-21 instrument was employed as the primary research method. The analysis was conducted in the wavenumber range of 4000-500 cm^{-1} , with the calculation of the Lateral Order Index (LOI) using the Nelson-O'Connor method.

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 crystallinity 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, crystallinity index (LOI), amorphization, mechanical regeneration, import substitution, knitwear production, personal protective equipment (PPE).

References

1. Umraliyeva, B.I., Baizhanova, Zh.B., Nurmukhambetova, B.T., Kozhabergenova, K.D., & Turakulov, B.S. (2023). Current state of the problem of textile production waste recycling. Actual scientific research in the modern world [Aktual'nyye nauchnyye issledovaniya v sovremennom mire], (1-93), part 1, P. 125–130. (In Russian.), ISSN 2524-0986
2. Umraliyeva, B.I., Baizhanova, Zh.B., Nurmukhambetova, B.T., Kozhabergenova, K.D., & Turakulov, B.S. (2023). Commercialization of efficient technology for shredding of textile production waste. Actual scientific research in the modern world [Aktual'nyye nauchnyye issledovaniya v sovremennom mire], (1-93), part 1, P. 131–135. (In Russian), ISSN 2524-0986
3. Umraliyeva, B.I., Baizhanova, Zh.B., Nurmukhambetova, B.T., Kozhabergenova, K.D., & Zheterbayeva, R.A. (2023). Analysis of the current state of recycling and use of textile production waste. Actual scientific research in the modern world [Aktual'nyye nauchnyye issledovaniya v sovremennom mire], (2-94), part 1, P. 131–135. (In Russian), ISSN 2524-0986
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. Motte H., Ostlund A. Sustainable fashion and textile recycling. Sustainability. 2022. – Vol. 14, – P. 14903-14912.
7. Utebay, G., & Kaziyeva, D. (2023). Investigation of the properties of yarn from recycled cotton fiber. Legkaya promyshlennost' i servis [Light Industry and Service], (2), 12–18. (In Russ.)
8. He M. et al. Characterization of fiber mechanical recycled cotton denim fibres and the effects of their properties on yarns and knits. MDPI Applied Sciences. 2025. – Vol. 10(5), – P. 177.
9. Regenfabric. Mechanical vs. Chemical recycled cotton: 2025 Guide. Sustainable materials review. Режим доступа: <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., Infrared Spectra of Cellulose and Its Derivatives [Text]. – Minsk: Nauka i Tekhnika, 1964. – P. 45.
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. Reprint 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. Utebay B. et al. effects of cotton textile waste properties on recycled fiber quality. Journal of 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. (2018). Infrared spectroscopy in the analysis of textile materials: a textbook. Moscow: Kosygin Russian State University. p. 34. (In Russ.)
20. Zhbakov, R.G. Infrakrasnye spektry tsellyulozy i ee proizvodnykh [Infrared spectra of cellulose and its derivatives]. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1964, pp. 158-161.
21. Ciolacu D. Amorphous Cellulose: Structure and Characterization / D. Ciolacu, F. Ciolacu, V.I. Popa // Cellulose Chemistry and Technology. 2011. – Vol. 45, P. 13-21.
22. Nelson M.L. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type / M.L. Nelson, R.T. O`Connor // Journal of Applied Polymer Science, 1964. – Vol. 8, P. 1325-1341
23. Petkanova, N.N. (1991). Recycling of textile waste and secondary raw materials. Moscow: Legprombytizdat. p. 50. (In Russian)
24. Structure and properties of regenerated cellulose fibers // MDPI Polymers, 2023, 15 (4). – P.5.
25. Kam S. Parametric design methodology for sustainable fashion with 3D-printed textures. Sustainability. 2022. – Vol. 14, – P. 11-18.

Поступило в редакцию 20.02.2026

Принято в печать 30.03.2026

Ссылка на статью: *



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).