



**Камола ФАЙЗУЛЛАЕВА,**

Базовый докторант Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

E-mail: fayzullayevakamola9449@gmail.com

ORCID 0009-0003-4076-1568

**Адхам РАФИКОВ,**

Профессор Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

**Дилноза УТКУРОВА,**

Базовый докторант Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности

На основе отзыва д.х.н., профессора Ташкентского государственного технического университета Р. Исмаилова

### BIOMADIFIKATSIYALANGAN PAXTA MATOSINIG MIKROSTRUKTURASI VA KAPILLYARLIGI

Annotatsiya

Paxta matosi sellulozasini  $\alpha$ -amilaza va lipaza fermentativ kompleksi bilan biologik modifikatsiya qilindi, so'ngra aktiv bo'yovchi modda bilan bo'yaldi. IQ-Fur'ye spektroskopik metod bilan dastlabki xom matoni, an'anaviy sovun-sodali va fermentativ usulda ishlov berilgan, hamda bo'yalgan matolarni mikrostrukturasi tadqiq etildi. Spektrlar tahlili, ajralib chiqqan qandlar miqdori va matolar kapillyarligining ko'rsatishicha, an'anaviy usuldan farqli ravishda, fermentativ ishlov berilganda selluloza strukturasidan faqatgina ohorni emas, balki karbonil, yog' va mumsimon qo'shimchalarining ham ajralib chiqishi sodir bo'ladi. Sellulozaning struktur o'zgarishlari paxta matosini aktiv bo'yovchilar bilan samarali pardozlash uchun qulay sharoitlarini vujudga keltiradi.

**Kalit so'zlar:** selluloza, ferment, modifikatsiya, struktura, IQ-Fur'ye spektr.

### МИКРОСТРУКТУРА И КАПИЛЛЯРНОСТЬ БИОМОДИФИЦИРОВАННОЙ ХЛОПКОВОЙ ТКАНИ

Произведена биологическая модификация целлюлозы хлопковой ткани ферментным комплексом  $\alpha$ -амилазы и липазы, затем окрашена активным красителем. Методом ИК-Фурье спектроскопии исследованы микроструктура исходной суворой ткани, тканей, обработанных традиционным мыльно-содовым и ферментативным способом, а также окрашенной ткани. Анализ спектров, количество выделившихся сахаров и капиллярность тканей показывает, что в отличие от традиционной, при ферментативной обработке происходит более полное удаление не только шлихты, а также сопутствующих карбонильных, жирных и восковых примесей со структуры целлюлозы. Структурные изменения целлюлозы создают благоприятные условия для эффективной отделки хлопковой ткани активным красителем.

**Ключевые слова:** целлюлоза, фермент, модификация, структура, ИК-Фурье спектр.

### MICROSTRUCTURE AND CAPILLARITY OF BIOMODIFIED COTTON FABRIC

Biological modification of cotton fabric cellulose was carried out with enzyme complexes of  $\alpha$ -amylase and lipase; after that was dyed with the active dye. The microstructure of the original raw fabric, fabrics treated with the traditional soap-soda and enzymatic methods, and the dyed fabric were studied using the IR Fourier spectroscopy method. Analysis of the spectra, the amount of released sugars and the capillarity of the fabrics show that, unlike traditional processing, enzymatic processing results in a more complete removal of not only the sizing, but also the accompanying carbonyl, fatty and wax impurities from the cellulose structure. Structural changes in cellulose create favorable conditions for effective finishing of cotton fabric with an active dye.

**Key words:** cellulose, enzyme, modification, structure, FTIR spectrum.

**Введение.** Хлопковое волокно широко используется во многих областях благодаря своей низкой стоимости и высокой биосовместимости, особенно в текстильной промышленности [1]. Текстильное производство включает в себя последовательность различных химических процессов, в основном направленных на удаление примесей и окраски, а также на обеспечение желаемой отделки [2]. Растущие экологические проблемы и риски для здоровья, связанные с синтетическими химикатами, обусловили спрос на устойчивые и экологически чистые решения [3]. Поиски экологически чистых процессов для химической обработки текстильной продукции в сочетании с достижениями в области биотехнологии привели к разработке различных ферментных процессов, которые оказались эффективными и безопасными для текстильных субстратов [4, 5]. Более того, ферменты разлагают токсичные соединения до их нетоксичной формы перед их выбросом в природу [6].

Для расщепления текстиля в результате разложения крахмала, который является одним из широко используемых в текстильной промышленности шлихтующих веществ [7, 8], используется амилазы [9]. Липазы всегда заслуживали промышленного внимания из-за широкого спектра гидролитических и синтетических реакций, которые они катализируют [10]. Различные виды влажной обработки текстиля, такие как, биорасщепление, биоочистка, биоотбеливание, биополировка, было исследовано с использованием таких ферментов, как альфа-амилаза, пектиназа, протеаза, липаза и целлюлаза, с выяснением воздействия ферментов на цвет [11, 12]. Оказалось, что в биомодифицированных образцах образуется более интенсивный, равномерный и устойчивый цвет.

В связи с вышеизложенными преимуществами, в текстильной промышленности наблюдается переход от химических методов к биологическим и биохимическим методам отделки. При этом недостаточно исследованы вопросы влияния ферментов на характеристики текстильных материалов. Термические и микроструктурные характеристики

текстильных материалов служат основой для выбора оптимальных режимов подготовки и окрашивания, а также позволяют прогнозировать физико-механические свойства и условия использования изделий. Целью данного исследования является определение термических и микроструктурных свойств тканей, обработанных биологическими и биохимическими методами, а также окрашенных активными красителями хлопчатобумажных тканей.

**Методы и материалы.** Объектами исследования являлись:

суровая хлопковая ткань с поверхностной плотностью  $120 \pm 5 \text{ г/м}^2$  без обработки;

хлопковая ткань, обработанная традиционным методом в мыльно-содовом растворе;

хлопковая ткань, обработанная ферментативным методом в растворе, содержащим 2 г/л  $\alpha$ -амилазы и 2 г/л липазы;

хлопковая ткань, обработанная ферментативным методом, затем окрашенная активным красителем "Chemactive orange 2 RL R.O Besiktas/Istanbul".

Микроструктура образцов определена с помощью инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием (ИК-Фурье) Nicolet iN10 компании Thermo Fisher Scientific (США) в диапазоне сканирования 500-4000  $\text{cm}^{-1}$ .

Степень расщепления и ферментативной обработки полотна оценивали по капиллярности и количеству редуцированных сахаров.

Для определения капиллярности ткани из образца ткани отрезали полоски шириной 5 см и длиной 30 см. Образцы опускали вертикально в раствор дихромата калия на глубину 1 см и выдерживали в течение 60 минут. Капиллярность оценивали по средней высоте (мм) поднятия красителя по длине образца ткани.

Для определения общего количества редуцированных сахаров в растворе после ферментативной обработки к навеске образца (20-30 мг) добавляли дистиллированную воду в отношении 1:10 и гомогенизировали. Затем забирали 0,4 мл раствора и добавляли 7,6 мл дистиллированной воды. Из полученного раствора брали 0,06 мл и добавляли 0,06 мл фенола (5%) и 0,32 мл концентрированной серной кислоты, содержащей гидразин сульфат. Затем измеряли оптическую плотность раствора на фотоэлектроколориметре при длине волн 490 нм. Величину оптической плотности подставляли на калибровочную кривую стандартного раствора и определяли концентрацию сахаров в образце. В качестве стандарта использовали раствор крахмала.

**Результаты и обсуждение.** Для определения микроструктуры образцов исследованных тканей проведены ИК-Фурье спектроскопические исследования. На рисунке 1 представлены ИК-Фурье спектры исходной, модифицированной биологическим и традиционным методом тканей.

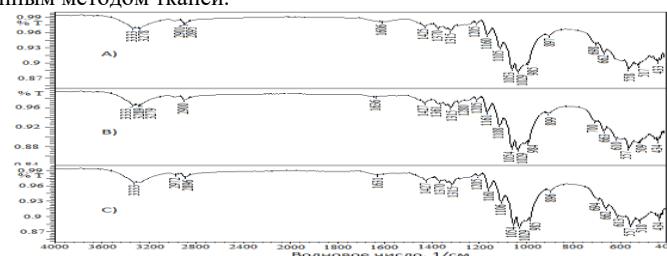


Рис. 1. ИК-Фурье хлопчатобумажной ткани: А) исходная ткань, В) после традиционной обработки, С) после ферментативной обработки

В ИК-Фурье исходного образца наблюдаются характеристические полосы поглощений целлюлозы. Широкая полоса поглощения при 3333 и 3278  $\text{cm}^{-1}$ , соответствующая валентным колебаниям ( $\nu$ ) связи гидроксильной группы  $\nu_{O-H}$ . Полосы в области 2901–2895  $\text{cm}^{-1}$ , соответствующие  $\nu_{C-H}$ ; полоса при 1606  $\text{cm}^{-1}$ , что может быть связано с наличием карбонильных примесей (остаточный лигнин, белки); полосы в области 1425–1315  $\text{cm}^{-1}$ , которые соответствуют деформационным колебаниям ( $\delta$ ) водорода с углеродом и кислородом  $\delta_{C-H}$ ,  $\delta_{O-H}$ ; выраженные полосы в области 1200–1000  $\text{cm}^{-1}$ , соответствующие колебаниям  $\nu_{C-O}$ ,  $\delta_{C-O}$  в полисахаридной матрице; характерный пик при  $\sim 897 \text{ cm}^{-1}$ , соответствующий  $\beta$ -гликозидным связям ( $\beta$ -1,4) целлюлозы.

ИК-Фурье образца после традиционной обработки характеризуется сохранением полосы  $\nu_{O-H}$  при 3333 и 3289  $\text{cm}^{-1}$  – водородные связи менее разрушены; наличием полосы при 1636  $\text{cm}^{-1}$ , что может свидетельствовать о присутствии остаточных примесей (лигнина); более выраженными и резкими пиками в области 1200–1000  $\text{cm}^{-1}$ , указывающими на частичную кристалличность структуры; сохранением  $\beta$ -гликозидного пика при 896  $\text{cm}^{-1}$ .

ИК-Фурье образца после ферментативной обработки обнаружены следующие изменения:

уменьшение интенсивности и сужение полосы  $\nu_{O-H}$  (3333  $\text{cm}^{-1}$ ), что указывает на частичное разрушение водородных связей и уменьшении их количества в результате удаления крахмала с поверхности волокон;

исчезновение полосы при 1631  $\text{cm}^{-1}$ , свидетельствующее об удалении карбонильных примесей;

снижение интенсивности и смещение пиков полос в области 1200–1000  $\text{cm}^{-1}$ , что указывает на некоторое уменьшение доли кристаллической фазы в матрице целлюлозы или модификацию гликозидных связей;

сохранение пика при 896  $\text{cm}^{-1}$ , что говорит о сохранении структуры  $\beta$ -1,4-целлюлозы.

Наблюдаемые изменения свидетельствуют о более полном удалении шлихты и других примесей из целлюлозы и о некотором изменении фазового состояния в процессе ферментативной обработки. Это в свою очередь создает благоприятные условия для колорирования материала.

Степень удаления шлихты оценена по капиллярности тканей и количеству сахаров, редуцированных в растворах в процессе обработки (табл.).

Таблица. Капиллярность ткани и количество сахаров в растворе

Способ обработки	Без обработки	Традиционный	Ферментативный
Капиллярность	$8 \pm 2$	$24 \pm 2$	$128 \pm 6$
Количество сахаров, мг/л	0	$113 \pm 5$	$131 \pm 5$

Как видно из данных таблицы, как капиллярность ткани, так и количество выделенных сахаров при ферментативной обработке, существенного больше, чем при традиционной обработке. Это конечно результат более полного выделения шлихты и других примесей из целлюлозы. Следует обратить внимание на то, что если количество сахаров при ферментативной обработке увеличивается на 16%, капиллярность ткани возрастает примерно в 5 раз. Это свидетельствует о том, что в процессе ферментативной обработки из целлюлозы полностью удаляются как сахаристые вещества, так и жиры, и другие восковые примеси.

Биомодифицированные хлопковые полотна были окрашены активным красителем. Для выяснения характера взаимодействия красителя с модифицированной целлюлозой были сняты ИК-Фурье спектры активного красителя и окрашенного этим красителем образца ткани, подготовленного биологическим методом (рисунок 2).

ИК-Фурье красителя наблюдаются следующие полосы поглощений: широкая, малоинтенсивная полоса при 3406  $\text{см}^{-1}$ , которая относится к  $\nu_{O-H}$  и  $\nu_{N-H}$  красителя, участвующих в межмолекулярной водородной связи; полосы при 1756  $\text{см}^{-1}$  и 1607  $\text{см}^{-1}$ , соответствующие валентным колебаниям  $\nu_{C=O}$  и  $\nu_{C=N}$ , которые являются хромофорными группами красителя; полосы в области 1540-1330, соответствующие деформационным колебаниям  $\delta_{C-H}$ ,  $\delta_{O-H}$ ,  $\delta_{N-H}$ ; полосы в области 1250-900  $\text{см}^{-1}$ , соответствующие валентным и деформационным колебаниям  $\nu_{C-O}$ ,  $\nu_{C-N}$ ,  $\delta_{C-O}$ ,  $\delta_{C-N}$ . Колебания в дальней ИК области соответствуют деформационным колебаниям  $\delta_{C-H}$ .

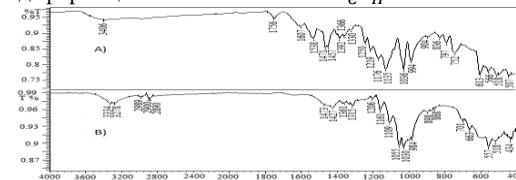


Рис. 2. ИК-Фурье красителя (А) и окрашенной после ферментативной обработки хлопчатобумажной ткани (В)

ИК-Фурье образца окрашенных после ферментативной обработки отличается увеличением интенсивности и ширины полос поглощения  $\nu_{O-H}$  и  $\nu_{N-H}$  при 3334 и 3287  $\text{см}^{-1}$ , свидетельствующей об образовании новых водородных связей между молекулами модифицированной целлюлозы и красителя. Исчезают полосы поглощения красителя при 1756  $\text{см}^{-1}$  и 1607  $\text{см}^{-1}$ , видимо, за счет участия кислорода и азота этих групп в межмолекулярных связях с водородом целлюлозы. Полосы поглощений целлюлозы  $\delta_{C-H}$ ,  $\delta_{O-H}$ ,  $\delta_{N-H}$ ,  $\nu_{C-O}$ ,  $\nu_{C-N}$ ,  $\delta_{C-O}$ ,  $\delta_{C-N}$  в средней и дальней ИК области становятся более отчетливыми и с более резкими пиками, что характеризует возрастание степени кристалличности окрашенных образцов. Более полное удаление шлихты и примесей с поверхности целлюлозы создает благоприятные условия для сорбции, диффузии и химического связывания молекул красителя.

**Заключение.** ИК-спектроскопия показала, что различные методы обработки (традиционная и ферментативная) значительно влияют на химическую структуру, как исходной ткани, так и окрашенных образцов. Ферментативная обработка приводила к более выраженному разрушению водородных связей и удалению карбонильных примесей, что свидетельствует о повышении чистоты и изменении структуры целлюлозы. Происходившие изменения создадут благоприятные условия для сорбции, диффузии и закрепления красителя на волокнах целлюлозы. В то же время традиционная обработка сохраняла водородные связи и оставляла больше остаточных примесей. Эти результаты подтверждают эффективность ИК-спектроскопии в оценке изменений, происходящих в материалах после различных типов обработки. Преимущества биомодификации делают метод перспективным в технологии отделки хлопковых материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. L. Xianxi, Z. Fengxuan, Y. Lu, Z. Qiangqiang, H. Jinxin, T. Hualiang, D. Xia. A low chemical consumption cationization and salt-free dyeing process for cotton fabrics by reusing polyallylamine modification bath. International Journal of Biological Macromolecules. 2025, V. 297: 139837. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139834>
2. A. Periyasamy, S. Rvwahire, Y. Zhao. Environmental Friendly Textile Processing. Handbook of Ecomaterials, Springer, 2019, P. 1521-1558. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6\\_176](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6_176)
3. V. Palanisamy, R. Zhang, M. Hui, S. Subhav, V. Deekshant, P. Shengyan. Biocatalytic enzymes in food packaging, biomedical, and biotechnological applications: A comprehensive review. International Journal of Biological Macromolecules V 300, April 2025, 140069. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140069>
4. B. Subhransu, N. Suchismita, N. Jagatjeet, S. Abinash, R. Lopamudra. Chapter 9 - Microbial production of cellulase and lipase: Mechanisms, optimizations, and industrial applications. Microbial Biotechnology: Integrated Microbial Engineering for B3 – Bioenergy, Bioremediation, and Bioproducts. 2025, P. 235-270 <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23796-6.00021-3>
5. Sh. Javed, B. Indrajit. 6 - Enzymes for green chemical processing of cotton. The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology. 2019, P. 135-160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102491-1.00006-X>
6. S. Li, X. Yang, S. Yang, M. Zhu, X. Wang. Technology prospecting on enzymes: application, marketing and engineering. Comput. Struct. Biotechnol. J., 2012, V.2, P. 1-11. <https://doi.org/10.5936/csbj.201209017>
7. V. Besegatto, N. Costa, S. Damas, L. Colombi, C. De Rossi, R. De Aguiar, P. Immich. Enzyme treatment at different stages of textile processing: a review. Ind. Biotechnol., 2018, V.14, P. 298-307. <https://doi.org/10.1089/ind.2018.0018>
8. R. Hardin. Enzymatic treatment versus conventional chemical processing of cotton. Advances in Textile Biotechnology, Woodhead Publishing., 2010, P. 132-149. <https://doi.org/10.1533/9780857090232.2.132>
9. R. Araujo, M. Casal, A. Cavaco-Paulo. Application of enzymes for textile fibres processing. Biocatal. Biotransfor, 2008, V.26 (5), P. 332-349. <http://doi.org/10.1080/10242420802390457>
10. K. Vivek, S. Sandhia, S. Subramaniyan. Extremophilic lipases for industrial applications: A general review. Biotechnology Advances. Volume 60, November 2022, 108002. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.108002>
11. N. Francois, S. Veen, N. Florien, S. Archana, N. Ajay, K. Anantharaju, S. More. Chapter 23 - Microbial enzymes used in textile industry. Biotechnology of Microbial Enzymes (Second Edition). 2023, Pages 649-684. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19059-9.00006-2>
12. C. Vigneswaran, M. Ananthasubramanian, P. Kandhavadiu. 2 - Industrial enzymes. Bioprocessing of Textiles. Fundamentals for Applications and Research Perspective. 2014, Pages 23-52. <https://doi.org/10.1016/B978-93-80308-42-5.50002-0>