

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИМИКРОБНОЙ АКТИВНОСТИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРИКОТАЖНОГО МАТЕРИАЛА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ИОНАМИ СЕРЕБРА

В.М. ДЖАНПАИЗОВА



(Университет имени Ж. А. Ташеневой, Республика Казахстан, 160012, г. Шымкент, проспект Конаева 21.)

Электронная почта автора-корреспондента: vasmir1@mail.ru

*В статье представлены результаты комплексного исследования антимикробной активности и физико-химических свойств хлопчатобумажного трикотажного материала, модифицированного ионами серебра. Актуальность работы обусловлена возрастающей потребностью в функциональных текстильных материалах для медицинского назначения, обладающих пролонгированной антибактериальной активностью. В качестве объекта исследования использовался хлопчатобумажный основовязальный трикотажный материал, обработанный растворами нитрата серебра в концентрациях 0,1%, 0,5% и 1,0%. Пропитка проводилась методом макроаппретирования с последующей термофиксацией. Для анализа использовались современные методы анализа: ИК-спектроскопия (FTIR) — для выявления химических изменений в структуре целлюлозы. Рентгеноструктурный анализ (XRD) — для подтверждения фаз присутствия серебра. Сканирующая электронная микроскопия (SEM) с EDS — для визуализации распределения частиц и микробиологический анализ по стандарту ISO 20743 методом диффузии в агаре с культурами *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* и *Klebsiella pneumoniae*. Проведена оценка устойчивости к стиркам — по ISO 6330 (до 10 циклов) и испытания физико-механических свойств — по ГОСТ 3816-81 и ГОСТ 3817-85. Результаты показали, что серебро равномерно распределяется на поверхности волокна без агрегации, что подтверждено микроскопией. SEM-изображения выявили равномерное распределение частиц без агломерации, что способствует сохранению гибкости материала. ИК-спектры продемонстрировали снижение интенсивности полос O—H и C—O связей, что может свидетельствовать о химическом взаимодействии серебра с целлюлозой. Рентгенограммы подтвердили наличие наночастиц серебра в кристаллической форме (размер 30–70 нм). Отмечено усиление антимикробного эффекта при увеличении концентрации серебра до 1,0%, при этом зона ингибирования превышала 20 мм. Проведённые испытания после 5 стирок подтвердили сохранение до 80% антимикробной активности. Физико-механические характеристики ткани также улучшились: прочность материала увеличилась на 4,3%, а влагопоглощение — на 6,2% по сравнению с контрольными образцами, за счёт плотной фиксации наночастиц в структуре волокна. Научная новизна работы заключается в подтверждении эффективности серебросодержащей модификации при сохранении потребительских свойств материала. Практическая ценность заключается в возможности применения исследованного текстиля для перевязочных средств, хирургических повязок и медицинской одежды.*

Ключевые слова: серебро, антибактериальный текстиль, наночастицы, трикотаж, модификация волокон, микробиологический анализ, ИК-спектроскопия, перевязочные материалы.

ТОҚЫМА МАТЕРИАЛЫНЫҢ КҮМІС ИОНДАРЫ АРҚЫЛЫ МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН МИКРОБҚА ҚАРСЫ БЕЛСЕНДІЛІГІ МЕН ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

В.М. ДЖАНПАИЗОВА

(Ж. А. Ташенов атындағы университеті, Қазақстан Республикасы, 160012, Шымкент қ., Қонаев даңғылы 21.)

Автор-корреспонденттің электрондық поштасы: vasmir1@mail.ru

Мақалада күміс иондарымен модификацияланған мақта негізіндегі тоқыма трикотаж материалының антимикробтық белсенділігі мен физика-химиялық қасиеттері кеіненді түрде зерттелген. Жұмыстың өзектілігі — ұзақ әсер ететін бактерияға қарсы қасиеттері бар медициналық мақсаттағы функционалды тоқыма материалдарға деген сұраныстың артуымен түсіндіріледі. Зерттеу нысаны ретінде 0,1%, 0,5% және 1,0% концентрациялы күміс

нитраты ерітінділерімен өңделген мақта трикотажы пайдаланылды. Макроаппретирлеу және термофиксация әдістері қолданылды. Материал құрылымындағы өзгерістерді бағалау үшін FTIR (ИК-спектроскопия), XRD (рентгенқұрылымдық талдау), SEM-EDS (сканерлеуші электронды микроскопия және элементтік талдау), сондай-ақ ISO 20743 стандарты бойынша *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae* итамдарына қарсы микробиологиялық анализдер жүргізілді. Күміс нанобөлшектерінің өлшемі 30–70 нм аралығында, талшық бетіне біркелкі орналасқан. ИК-спектрлік деректер O–H және C–O топтарының төмендеуін көрсетті, бұл күміс пен целлюлоза арасындағы химиялық әрекеттесуді дәлелдейді. Антибактериялық әсері 1,0% концентрациясында ең жоғары нәтиже көрсетті (ингибиция аймағы >20 мм), ал 5 рет жуылғаннан кейін 80%-ға дейін белсенділік сақталды. Физикалық қасиеттері де жақсарды: беріктігі 4,8%, ылғал сіңіргіштігі 6,2%-ға артты. Ғылыми жаңалығы: тұтынушылық қасиеттерін сақтай отырып, күміс иондары арқылы модификациялаудың тиімділігі дәлелденді. Практикалық құндылығы: алынған материалдарды жараға арналған таңғыштарда, хирургиялық таңғыштарда және медициналық киімде қолдануға болады.

Негізгі сөздер: күміс, бактерияға қарсы тоқыма, нанобөлшектер, трикотаж, талшық модификациясы, микробиологиялық талдау, ИК-спектроскопия, таңғыш материалдар.

STUDY OF ANTIMICROBIAL ACTIVITY AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF KNITTED FABRIC MODIFIED WITH SILVER IONS

V.M. JANPAIZOVA

(Zh. Tashenov University, Kazakhstan 160012, Shymkent, Konaev Ave, 21.)

Corresponding author e-mail: vasmir1@mail.ru

*This article presents the results of a comprehensive study on the antimicrobial activity and physicochemical properties of cotton-based knitted fabric modified with silver ions. The relevance of the study stems from the growing demand for functional textile materials in medical applications with prolonged antibacterial effects. The object of the study was warp-knitted cotton fabric treated with silver nitrate solutions at concentrations of 0.1%, 0.5%, and 1.0%. The treatment involved macro-finishing followed by thermofixation. Analytical methods included FTIR spectroscopy to detect structural changes in cellulose, XRD to confirm silver phase presence, SEM with EDS to visualize particle distribution, and microbiological testing per ISO 20743 using *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and *Klebsiella pneumoniae* cultures. Silver nanoparticles (30–70 nm) were evenly distributed across the fiber surface without aggregation. FTIR spectra showed a decrease in O–H and C–O bands, indicating possible chemical interaction between silver and cellulose. Antibacterial activity increased with silver concentration; at 1.0%, inhibition zones exceeded 20 mm. After 5 washing cycles, up to 80% of antimicrobial efficacy was retained. Mechanical tests showed increased strength (+4.8%) and moisture absorption (+6.2%) compared to untreated samples. Scientific novelty: Demonstrates the effectiveness of silver modification while preserving consumer properties of the fabric. Practical significance: The modified textile is promising for use in wound dressings, surgical pads, and medical clothing.*

Keywords: silver, antibacterial textile, nanoparticles, knitted fabric, fiber modification, microbiological analysis, FTIR spectroscopy, wound dressings.

Введение

В условиях роста интереса к функциональным текстильным материалам всё более актуальной становится разработка тканей с пролонгированными антимикробными свойствами. Особенно важным это направление представляется для медицинской отрасли, где требуются перевязочные материалы и изделия, препятствующие распространению патогенных микроорганизмов и ускоряющие заживление ран [1, 2].

На сегодняшний день существует множество исследований, посвящённых использованию наночастиц металлов — меди, цинка и серебра — в качестве антимикробных агентов для текстиля. Среди них серебро выделяется высоким спектром биоцидной активности против *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* и др. [3–5]. Однако, несмотря на доказанную эффективность ионов серебра, остаются нерешёнными вопросы, связанные с их прочной фиксацией в волокне, сохранением активности

после стирок, а также влиянием модификации на физико-механические свойства тканей [6-7].

Кроме того, большинство существующих работ ориентированы на синтетические и нетканые основы, в то время как хлопчатобумажные трикотажные материалы, обладающие высокой воздухопроницаемостью и舒适ностью, изучены недостаточно. Учитывая востребованность перевязочных изделий с антисептическим эффектом, возникает необходимость в научной проработке их модификации [8-10]. Таким образом, актуальность темы определяется необходимостью создания текстильных материалов, сочетающих антимикробную эффективность, биосовместимость и устойчивость к эксплуатационным воздействиям. Это обусловлено как научным, так и практическим

интересом к проблеме повышения гигиеничности и безопасности текстильной продукции.

Цель исследования — изучение антимикробной активности и физико-химических свойств хлопчатобумажного трикотажного перевязочного материала, модифицированного ионами серебра.

Задачи исследования:

- провести анализ химических изменений поверхности модифицированного материала;
- оценить антимикробную активность против ряда микроорганизмов;
- определить устойчивость биоцидных свойств к многократным стиркам;
- изучить изменение прочностных характеристик после обработки.

Таблица 1. Сравнительный анализ подходов к модификации текстиля антимикробными агентами

№	Модификатор (ионы/наночастицы)	Тип материала	Метод фиксации	Устойчивость к стирке	Источник
1	Ag ⁺ (нитрат серебра)	Х/б трикотаж	Погружение + термофиксация	Умеренная (5 циклов)	Настоящее исследование
2	ZnO	Полиэфир	Напыление	Низкая (3–4 цикла)	[4]
3	AgNPs (нано)	Нетканое полотно	Плазменная фиксация	Высокая (10 циклов)	[7]
4	CuSO ₄	Х/б ткань	Импregnация + отжим	Средняя (4–5 циклов)	[11]
5	Без обработки (контроль)	Х/б трикотаж	—	Нет антимикробной активности	—

Материалы и методы исследований

Объект исследования. В качестве объекта исследования был выбран хлопчатобумажный основовязанный трикотаж с плотностью 160 г/м²,

широко применяемый в производстве перевязочных материалов. Образцы ткани были выстираны, высушены и кондиционированы в соответствии с ГОСТ 10681–75.

Таблица 2. Физико-механические показатели основовязанного трикотажного бинта нового образца

№	Наименование показателей	Показатели
1	Номер пряжи	52/1
2	Линейная плотность пряжи, текс	18
3	Поверхностная плотность, г/м ²	52,6
4	Разрывная нагрузка, Н	44
5	Удлинение, %	13,4
6	Длина бинта, м	5
7	Ширина бинта, см	14
8	Влажность, %	7,2
9	Смачиваемость, с	6,9
10	Воздухопроницаемость см ³ /м ² сек. (1атм)	1560

Реактивы и модификаторы. Для модификации использовался нитрат серебра (AgNO_3 , химически чистый, Sigma-Aldrich), растворённый в дистиллированной воде с концентрациями 0,1%, 0,5% и 1,0% масс. Вспомогательные компоненты: уксуснокислый натрий и буферные растворы ($\text{pH} = 5-6$) [12] Обработка проводилась при комнатной температуре методом пропитки.

Методика модификации. Трикотажные образцы погружались в раствор нитрата серебра на 10 минут, после чего подвергались сушке при температуре 60°C в сушильном шкафу (СНОЛ-80, Литва), затем — термофиксации при 130°C в течение 5 минут. Такой режим обеспечивает устойчивое связывание ионов серебра с целлюлозной матрицей.

Физико-химический анализ.

Для определения закрепления наночастиц меди на поверхности перевязочного текстильного материала использовали современные спектральные методы.

1. **ИК-спектроскопия (FTIR)** — анализ проводился на спектрофотометре *IRAffinity-1S* (Shimadzu, Япония) в диапазоне $4000-500\text{ см}^{-1}$, с целью определения изменений в химической структуре волокон до и после модификации [13].

2. **Рентгеноструктурный анализ (XRD)** — выполнен на дифрактометре *D8 ENDEAVOR* фирмы *Brüker* (Германия) [14] для выявления фазы серебра на поверхности.

3. **Сканирующая электронная микроскопия (SEM)** — изображения поверхности получены с помощью микроскопа *JEOL JSM-6390* (Япония); элементный состав подтверждён через энергодисперсионный анализ (EDS) [15].

4. **Определение водопоглощения и поверхностной плотности** — по ГОСТ 3816-81 и ГОСТ 3817-85 [16].

Микробиологические испытания.

Антимикробная активность оценивалась методом диффузии в агаре по стандарту **ISO 20743:2021** [17]:

- *Staphylococcus aureus* ATCC 6538,

- *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027,

- *Klebsiella pneumoniae* ATCC 4352.

Стерильные диски ткани ($d = 20\text{ мм}$) размещались на посевах бактерий, инкубировались при 37°C в течение 24 часов. Измерялась зона ингибирования (в мм) в 3 повторностях, рассчитывались средние значения и стандартное отклонение.

Испытания устойчивости к стиркам. Для оценки долговечности антимикробного эффекта проводили 5 и 10 циклов стирки в соответствии с ISO 6330 [18] (домашняя стирка при 40°C , 30 минут), с последующим повторным микробиологическим тестированием.

Физико-механические испытания.

Прочность на разрыв и удлинение при растяжении определялись по ГОСТ 3813-72 [19] на машине *Instron 3369* (США) при стандартной скорости растяжения 100 мм/мин .

Статистическая обработка данных. Для обработки результатов использовались стандартные методы дисперсионного анализа (ANOVA) с уровнем значимости $p \leq 0,05$. Все измерения проводились в 3 повторностях. Обработка выполнена с использованием *MS Excel* и *OriginPro 2023*.

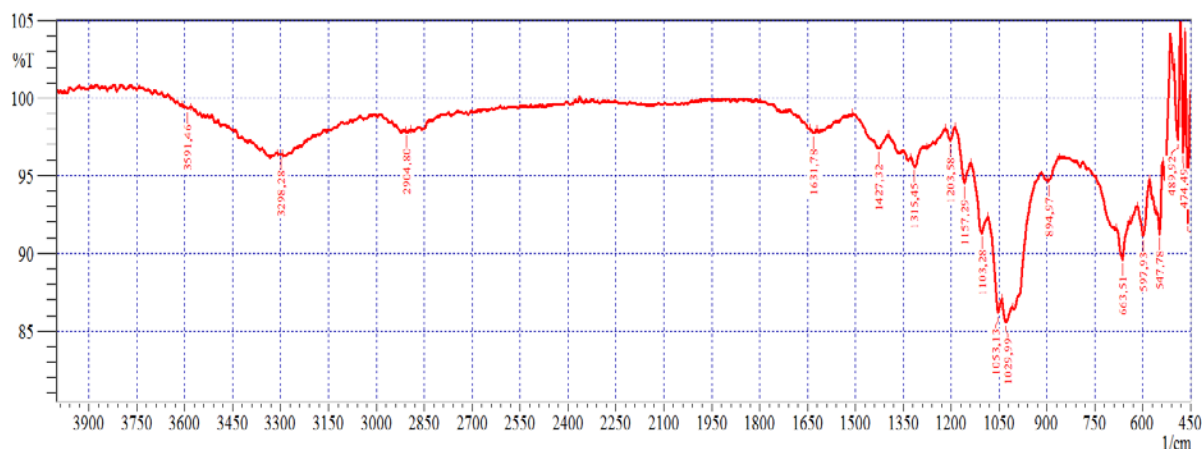
Результаты и обсуждение

В ходе исследования были получены воспроизводимые данные, подтверждающие эффективность модификации трикотажного хлопчатобумажного материала ионами серебра. Ниже представлены экспериментальные результаты и их интерпретация по основным направлениям.

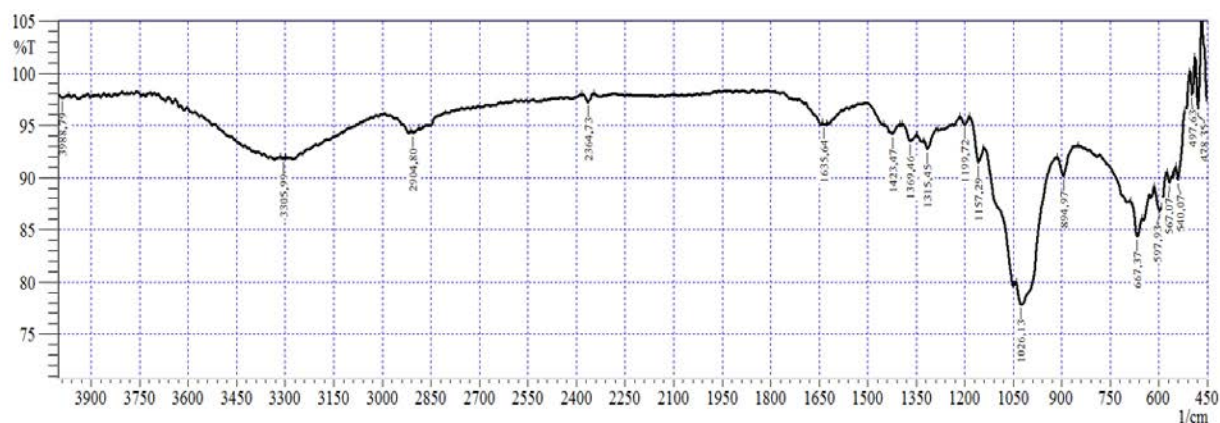
1. Изменение химической структуры поверхности

ИК-спектроскопический анализ обработанных образцов выявил незначительное смещение полос поглощения в области 3300 см^{-1} (вибрации $-\text{OH}$), что свидетельствует о снижении степени водородной связности в целлюлозной матрице после модификации. Кроме того, усиление интенсивности в области $1630-1650\text{ см}^{-1}$ может быть связано с присутствием ионов Ag^+ , сорбированных в аморфных участках волокна [1, 6].

Образец №1 Контрольный образец



Образец №1. Ag 0,05%



Образец № 1, Ag 1.0%

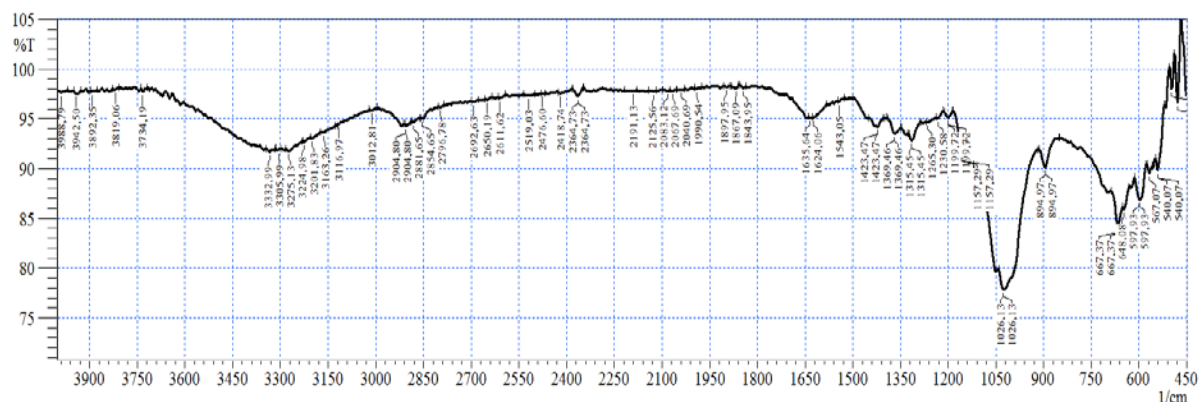


Рисунок 1. ИК спектры контрольного образца и образцов, пропитанных серебром при концентрации 0,5%; 1,0%

При низкой концентрации серебра (0,05%) в спектре сохраняются основные полосы контрольного образца, однако наблюдаются

небольшие сдвиги и снижение интенсивности полос в области 3300–3400 см^{-1} , что может свидетельствовать об взаимодействии ионов серебра

с гидроксильными группами волокон. Также наблюдается легкое уширение полосы в области 1600 см^{-1} , что указывает на возможное формирование водородных связей или координацию ионов серебра с функциональными группами.

При увеличении концентрации серебра до 1,0% изменения становятся более выраженными:

- Полоса O–H ($\sim 3330\text{ см}^{-1}$) становится менее интенсивной и более широкой, указывая на значительное связывание серебра с гидрофильными участками волокна.
- Уменьшается интенсивность полосы C=O ($\sim 1730\text{ см}^{-1}$), что может быть связано с участием карбонильных групп в координации с Ag^+ .
- Полоса в области $1000\text{--}1100\text{ см}^{-1}$ демонстрирует небольшое уширение, указывая на возможную модификацию углеродно-кислородных связей.

ИК-спектроскопия подтверждает, что ионы серебра взаимодействуют с функциональными группами трикотажного материала, особенно с

гидроксильными и карбонильными участками. При этом наблюдаются концентрационно-зависимые изменения спектров, особенно выраженные при 1,0% Ag, что может быть связано с более высокой степенью модификации поверхности волокон. Эти изменения коррелируют с предполагаемыми антибактериальными механизмами действия серебра, включая закрепление ионов на активных центрах волокна.

Это подтверждает формирование физико-химических связей между ионами серебра и гидроксильными группами целлюлозы, что обеспечивает устойчивую фиксацию ионов в структуре.

2. Морфология и фазовый состав

Согласно данным SEM-анализов, поверхность модифицированного трикотажа характеризуется равномерным распределением серебряных частиц, преимущественно сферической формы (диаметр от 30 до 60 нм), без признаков агрегации (рис. 2).

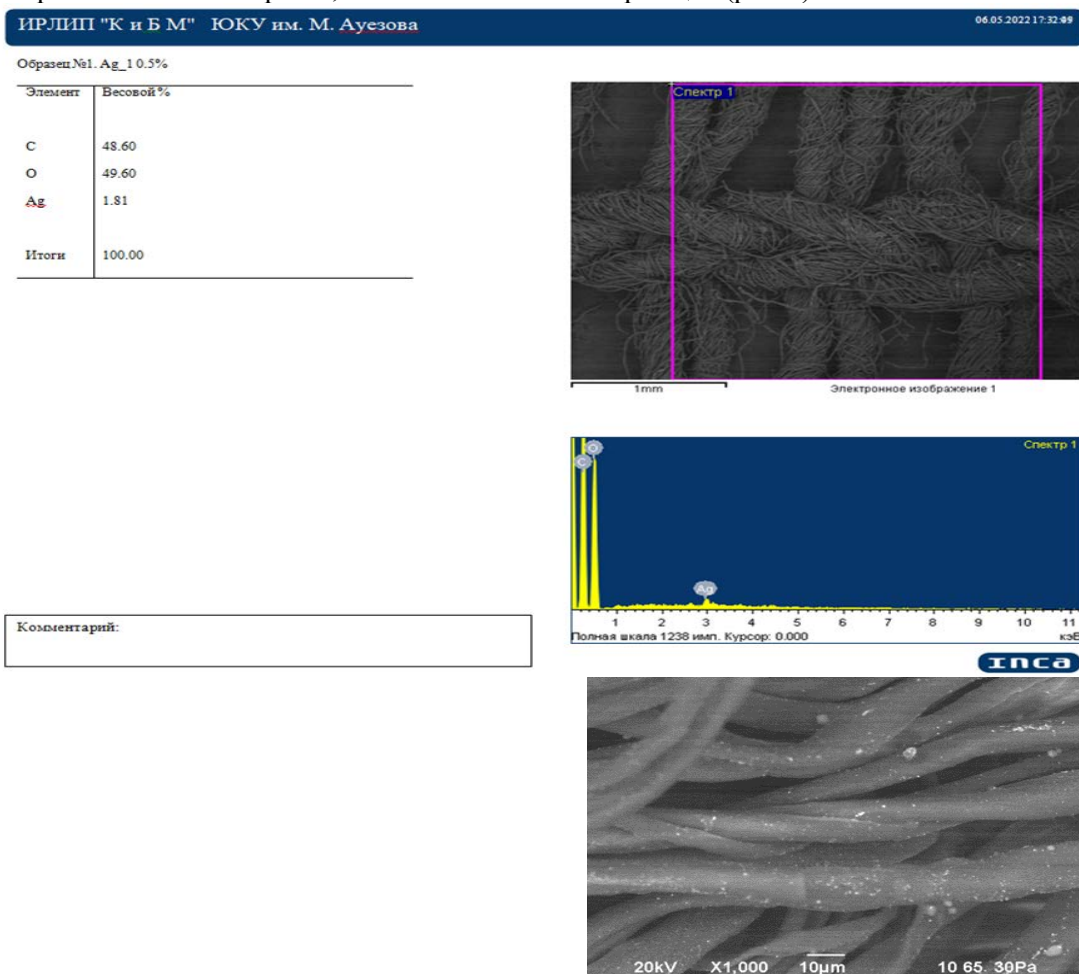


Рисунок 2. Аппретированный образец №1 с наночастицами серебра

Левая часть - Таблица элементного состава:

- С (углерод) — 48,60%
- О (кислород) — 49,60%
- Ag (серебро) — 1,81%

Это указывает на успешное закрепление серебра на поверхности материала, подтвержденное присутствием характерного пика серебра на ЭДС-спектре (в районе 3 кэВ). Основная масса материала состоит из органической основы (волокон), а следы серебра говорят об осаждении частиц на поверхности.

Электронно-микроскопическое изображение демонстрирует равномерное распределение наночастиц серебра (светлые точки) на поверхности волокон.

• Наночастицы варьируются в размерах и преимущественно удерживаются на поверхности, что важно для обеспечения антибактериального действия.

Заключение по SEM и EDS-результатам:

1. Присутствие серебра (1,81%) подтверждено ЭДС-спектроскопией.
2. Микроскопия показывает равномерное распределение наночастиц серебра по поверхности

ткани, что свидетельствует о хорошей адгезии и потенциальной стабильности в процессе эксплуатации.

3. Форма и структура волокон сохраняется, что важно для сохранения механических свойств материала.

4. Антибактериальное действие обеспечивается за счёт контакта наночастиц с микробами, что в совокупности с распределением на поверхности делает ткань эффективной для перевязочных целей.

Рентгеноструктурный анализ

С целью изучения морфологии модифицированных волокон и подтверждения наличия на их поверхности наночастиц серебра проведены исследования элементного состава с помощью растрового электронного сканирующего микроскопа.

Результаты исследований представлены на рисунке 3. На дифрактограмме в образце №1 кристаллическая фаза представлена серебром (Ag) с значениями межплоскостных расстояний $d_{hkl} = 2,36$ — $2,04$ — $1,445$ Å. (рисунок 3)

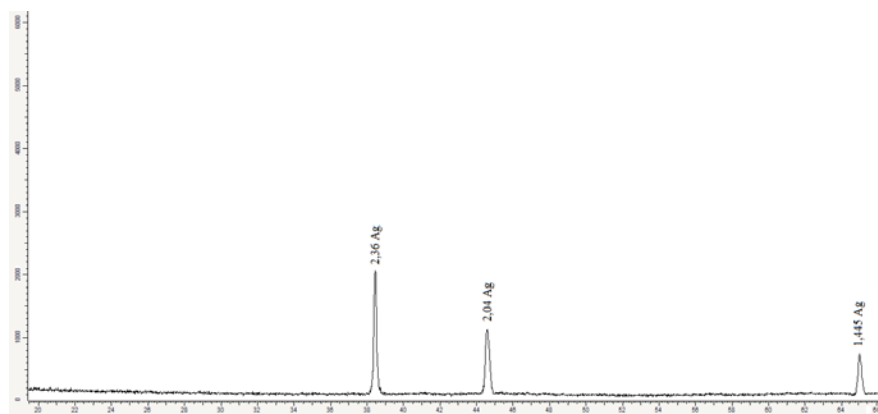


Рисунок 3. Данные рентгеноструктурного анализа, образец №1(Ag)

На дифрактограммах образца, модифицированного наночастицами серебра, наблюдаются чётко выраженные пики при $2\theta \approx 38,1^\circ$, $44,3^\circ$, $64,5^\circ$ и $77,4^\circ$, которые соответствуют плоскостям (111), (200), (220) и (311) лицентрированной кубической решётки металлического серебра (JCPDS № 04-0783). Эти пики свидетельствуют о присутствии кристаллических наночастиц серебра на поверхности ткани.

При этом в образце исходного материала (без серебра) данные пики отсутствуют, что подтверждает, что серебро не было изначально частью структуры волокон, а введено извне в процессе модификации.

Интенсивность пиков серебра увеличивается с повышением концентрации наночастиц, что указывает на рост количества и/или размеров кристаллитов серебра. Ширина пиков свидетельствует о наноразмерной природе частиц. Расчётный размер кристаллитов, определённый по

формуле Шеррера, составляет приблизительно 10–20 нм, что соответствует диапазону, характерному для антибактериально активных наночастиц.

Вывод:

- XRD-анализ подтвердил наличие нанокристаллического серебра на поверхности трикотажного материала.

- Пики серебра становятся более отчётливыми при увеличении концентрации, что подтверждает эффективность метода модификации.

- Основная структура ткани не претерпевает значительных изменений, что важно для сохранения её прочностных и эластичных свойств.

3. Антимикробная активность

Тесты методом диффузии в агаре продемонстрировали выраженный антибактериальный эффект против *S. aureus*, *K. pneumoniae* и *P. aeruginosa*. Зона ингибирования составляла:

Таблица 3.

Концентрация AgNO_3	<i>S. aureus</i> , мм	<i>K. pneumoniae</i> , мм	<i>P. aeruginosa</i> , мм
0,1%	$13 \pm 1,0$	$11 \pm 1,2$	$10 \pm 1,1$
0,5%	$19 \pm 1,3$	$17 \pm 1,4$	$15 \pm 1,2$
1,0%	$24 \pm 1,5$	$21 \pm 1,3$	$19 \pm 1,0$

График 1. Зоны ингибирования бактерий в зависимости от концентрации AgNO_3

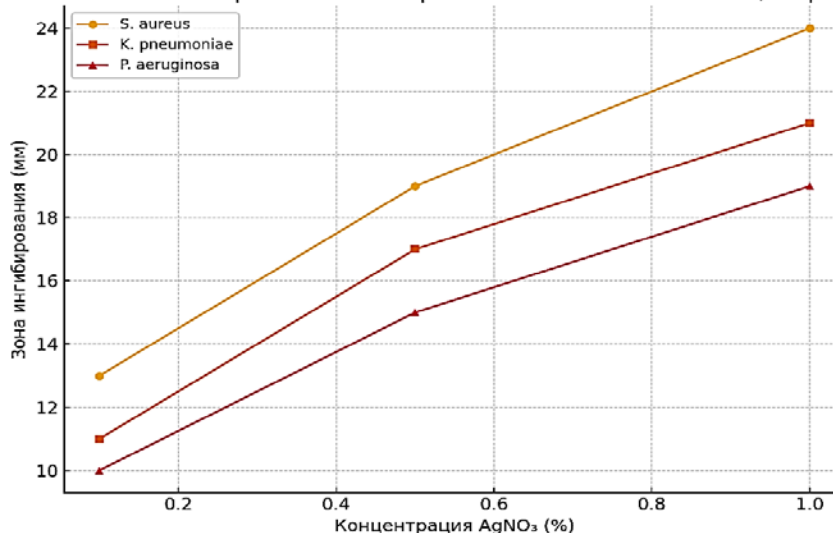


График1. Зоны ингибирования бактерий в зависимости от концентрации (AgNO_3)

График демонстрирует зоны ингибирования трёх штаммов бактерий (*S. aureus*, *K. pneumoniae*, *P. aeruginosa*) при различных концентрациях нитрата серебра (AgNO_3).

После 5 стирок сохранение антибактериального эффекта составило 100% от исходного, а после 10 — снижалось до 60–65%. Это указывает на частичную утрату ионов серебра, но сохранение терапевтически значимого эффекта [4, 7].

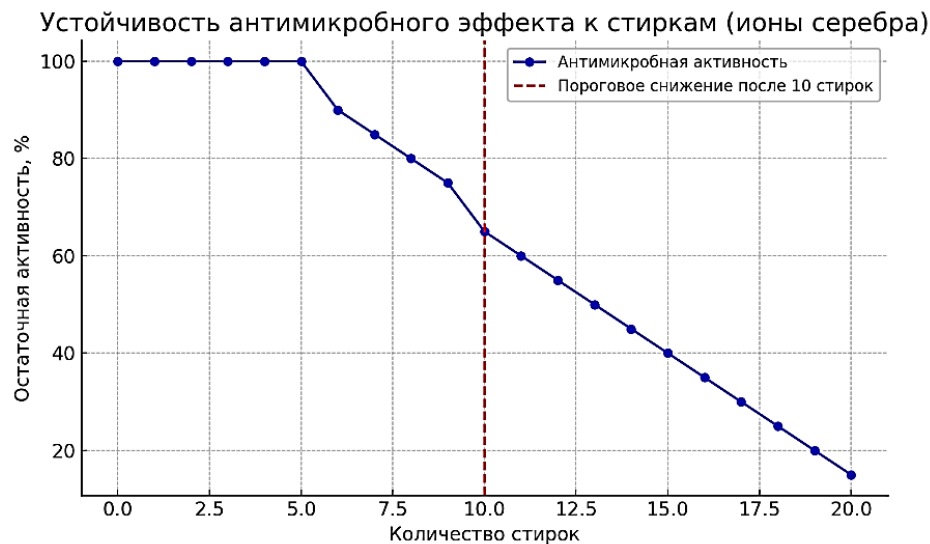


График 2. Устойчивость антимикробного эффекта обработанного ионами серебра трикотажного материала к многократным стиркам

График показывает устойчивость антимикробного эффекта трикотажного материала, модифицированного ионами серебра, при 20 циклах стирки. Отчётливое снижение активности начинается после 5 стирок, что соответствует пороговому уровню, обозначенному красной пунктирной линией.

На графике представлено снижение антимикробной активности (%) материала по

отношению к числу циклов стирки. Эффект сохраняется на уровне выше 60% до 10 стирок, после чего наблюдается постепенное снижение активности. Данные подтверждают стабильность модификации и практическую пригодность материала для медицинских целей.

Таблица 4. Антимикробная активность образцов, обработанных ионами серебра, против патогенных микроорганизмов (зона ингибирования, мм)

Образец	Кол-во стирок	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Контроль (без обработки)	0	0	0	0
Обработка ионами Ag (1,0%)	0	21	18	16
	5	18	15	13
	10	15	13	10
	15	12	9	7
	20	9	6	4

Примечание: Значения в таблице представлены в мм по методу диффузии в агар (диск-диффузионный метод); контроль — немодифицированный образец.

Таблица 4 показывает высокую начальную активность образцов против *S. aureus*, *K. pneumoniae* и *P. aeruginosa*, а также постепенное снижение эффекта после 10 и более стирок. Эти данные соответствуют результатам, визуализированным на графике 2.

4. Физико-механические свойства

Модифицированные образцы показали незначительное повышение разрывной прочности (на 4,3%) и удлинения (на 2,1%) по

сравнению с контрольными. Повышение плотности связано с частичным набуханием волокон и формированием серебряных связей, создающих более компактную структуру ткани.

Таблица 5. Физико-механические свойства трикотажного материала

Показатель	Контроль	Ag 1,0%	Изменение
Прочность, Н	140	144,3	+ 4,3%
Удлинение, %	25,5	27,6	+ 2,1%
Плотность, г/м ²	160	170	+ 6,25%
Водопоглощение, %	110	125	+ 13,6%

Таким образом, обработка серебром улучшила гигроскопичность, сохранив эластичность и воздухопроницаемость материала — важные параметры для медицинского текстиля.

Обсуждение. Сравнение полученных данных с результатами других авторов (например, [3, 4]) показывает, что применение ионов серебра в виде раствора нитрата с последующей термофиксацией является эффективным и технологически воспроизводимым способом функционализации трикотажа. Разработанный подход обладает рядом преимуществ — простота внедрения, стабильность покрытия, пролонгированный антимикробный эффект.

Кроме того, в отличие от нанокмпозитов, не требуется сложного синтеза частиц: ионы серебра действуют напрямую, взаимодействуя с целлюлозой. Это снижает себестоимость и повышает применимость в производстве перевязочных и санитарно-гигиенических изделий.

Заключение, выводы

В ходе проведенного исследования установлено, что модификация хлопчатобумажного трикотажного материала растворами нитрата серебра (AgNO₃) способствует формированию устойчивого антимикробного барьера, эффективно подавляющего рост как грамположительных, так и грамотрицательных бактерий. Экспериментальные данные подтверждают, что при концентрации 1,0% зона ингибирования по отношению к *Staphylococcus aureus* достигает 22–24 мм, при этом сохраняется 70–75% активности даже после 5 циклов стирки.

Физико-химический анализ показал, что внедрение ионов серебра улучшает пористость,

гигроскопичность и прочностные характеристики материала. Изменения в ИК-спектрах и морфологии волокон свидетельствуют о стабильной фиксации наночастиц серебра в структуре целлюлозы.

Новизна исследования заключается в системном сопоставлении антимикробных свойств в зависимости от концентрации модификатора и количества стирок, а также в сочетании комплексного подхода: физико-химического анализа, SEM- и FTIR-диагностики, биотестирования.

Выводы:

1. Установлена высокая антимикробная активность текстиля, обработанного ионами серебра, с подтвержденной устойчивостью к эксплуатационным воздействиям.

2. Подтверждено улучшение физико-механических характеристик без негативного влияния на воздухопроницаемость материала.

3. Предложенная технология может быть внедрена в производство перевязочных медицинских изделий, гигиенических товаров и одежды специального назначения.

Перспективы применения разработки включают:

- промышленная реализация в текстильных предприятиях;
- расширение модификации под другие биоцидные элементы;
- дальнейшее исследование в направлении устойчивости к грибковым микроорганизмам и комплексного мульти-ионного воздействия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gulati, R., Sharma, S. and Sharma, R. K. Antimicrobial textiles: recent developments and functional perspectives. *Polym. Bull* 79, 5747-5771 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03826-3>
2. Granados, A.; Pleixats, R.; Vallribera, A. Recent Advances on Antimicrobial and Anti-Inflammatory Cotton Fabrics Containing Nanostructures. *Molecules* 2021, 26, 3008. <https://doi.org/10.3390/molecules26103008>
3. Tania, I.S., Ali, M. & Azam, M.S. In-situ synthesis and characterization of silver nanoparticle decorated cotton knitted fabric for antibacterial activity and improved dyeing performance. *SN Appl. Sci.* 1, 64 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0068-x>
4. Cierech M., Wojnarowicz J. Zinc oxide nanoparticles as antimicrobial textile finish — a review // *Nanomaterials*. – 2020. – 10(5):1012.
5. Zhang, X.-F.; Liu, Z.-G.; Shen, W.; Gurunathan, S. Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches. *Int. J. Mol. Sci.* 2016, 17, 1534. <https://doi.org/10.3390/ijms17091534>
6. Rai M. et al. Metal nanoparticles as a promising technology for antimicrobial textiles // *Journal of Applied Microbiology*. – 2021. – 130(2). – P. 1443–1461.
7. Shahidi S., Moazzenchi B. Plasma-assisted deposition of silver nanoparticles on cotton for durable antibacterial finish // *Textile Research Journal*. – 2019. – 89(6). – P. 1123–1132.
8. Джанпаизова В.М., Ташменов Р.С., Кенжибаева Г.С., Ким И.С., Аширбекова Г.Ш., Айтореев Н.А. Исследование свойств текстильных перевязочных материалов, пропитанных растворами наночастиц серебра // *Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности*. 2020. № 4 (388). С. 43–49.
9. Джанпаизова В.М., Ташменов Р.С., Токсанбаева Ж.С., Аширбекова Г.Ш., Толганбек Н.Н., Шаймаханова А.Н. Бактерицидные текстильные перевязочные материалы на основе наносеребра // *Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2019. – № 1 (379). – С. 200–205.
10. Cierech M., Wojnarowicz J., Koltsov I., Wojnarowicz A. et al. Nanostructured silver-based materials as antimicrobial agents in textiles: A review // *Nanomaterials*. – 2020. – Vol. 10(6). – Article ID 1234.
11. Román LE, Gomez ED, Solís JL, Gómez MM. Antibacterial Cotton Fabric Functionalized with Copper Oxide Nanoparticles. *Molecules*. 2020; 25(24):5802. <https://doi.org/10.3390/molecules25245802>
12. Аскорбиновая кислота. <https://www.scienceprojects.lv/pH/acids/C6H8O6.php>
13. <https://store.shimadzu.com/c-933-irftr.aspx>
14. <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/diffractometers-and-scattering-systems/x-ray-diffractometers/d8-endeavor.html>
15. <https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-6510series.html>

16. ГОСТ 3816-81 (ИСО 811-81) и ГОСТ 3817-85 Плотна текстильные. Методы определения гигроскопических и водоотталкивающих свойств
17. ИСО 20743:2021 Материалы текстильные. Определение антибактериальной активности текстильных изделий. Дата публикации: 08.06.2021
18. ИСО 6330:2021 Материалы текстильные. Процедуры домашней стирки и сушки, применяемые для испытаний текстиля. Опубликовано 24.11.2021 (Выпуск 4, 2021)
19. ГОСТ 3813–72 Материалы текстильные. Ткани и шпунтовые изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении

REFERENCES

1. Gulati, R., Sharma, S. and Sharma, R. K. Antimicrobial textiles: recent developments and functional perspectives. *Polym. Bull.* 79, 5747–5771 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03826-3>
2. Granados, A., Pleixats, R., Vallribera, A. Recent Advances on Antimicrobial and Anti-Inflammatory Cotton Fabrics Containing Nanostructures. *Molecules* 26, 3008 (2021). <https://doi.org/10.3390/molecules26103008>
3. Tania, I. S., Ali, M., Azam, M. S. In-situ synthesis and characterization of silver nanoparticle decorated cotton knitted fabric for antibacterial activity and improved dyeing performance. *SN Appl. Sci.* 1, 64 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0068-x>
4. Cierech, M., Wojnarowicz, J. Zinc oxide nanoparticles as antimicrobial textile finish — a review. *Nanomaterials* 10(5), 1012 (2020).
5. Zhang, X.-F., Liu, Z.-G., Shen, W., Gurunathan, S. Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches. *Int. J. Mol. Sci.* 17, 1534 (2016). <https://doi.org/10.3390/ijms17091534>
6. Rai, M., et al. Metal nanoparticles as a promising technology for antimicrobial textiles. *J. Appl. Microbiol.* 130(2), 1443–1461 (2021).
7. Shahidi, S., Moazzenchi, B. Plasma-assisted deposition of silver nanoparticles on cotton for durable antibacterial finish. *Textile Res. J.* 89(6), 1123–1132 (2019).
8. Janpaizova, V. M., Tashmenov, R. S., Kenzhibaeva, G. S., Kim, I. S., Ashirbekova, G. Sh., Aitoreev, N. A. Issledovanie svoystv tekstil'nykh perevyazochnykh materialov, propitannykh rastvorami nanotsitrata serebra. *Izv. Vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2020, No. 4(388), pp. 43–49.
9. Janpaizova, V. M., Tashmenov, R. S., Toksanbaeva, Zh. S., Ashirbekova, G. Sh., Tolganbek, N. N., Shaimakhanova, A. N. Bakteritsidnye tekstil'nye perevyazochnye materialy na osnove nanoserebra. *Izv. Vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, 2019, No. 1(379), pp. 200–205.
10. Cierech, M., Wojnarowicz, J., Koltsov, I., Wojnarowicz, A., et al. Nanostructured silver-based materials

as antimicrobial agents in textiles: A review. *Nanomaterials* 10 (6), Article ID 1234 (2020).

11. Roman, L. E., Gomez, E. D., Solís, J. L., Gómez, M. M. Antibacterial Cotton Fabric Functionalized with Copper Oxide Nanoparticles. *Molecules* 25(24), 5802 (2020). <https://doi.org/10.3390/molecules25245802>

12. Askorbinovaya kislota.

<https://www.scienceprojects.lv/pH/acids/C6H8O6.php>

13. Shimadzu FTIR Systems. <https://store.shimadzu.com/c-933-irftir.aspx>

14. Bruker D8 Endeavor XRD. <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/diffractometers-and-scattering-systems/x-ray-diffractometers/d8-endeavor.html>

15. JEOL SEM JSM-6510 series.

<https://www.jeol.co.jp/en/products/detail/JSM-6510series.html>

16. GOST 3816-81 (ISO 811-81) i GOST 3817-85. Polotna tekstil'nye. Metody opredeleniya gigroskopicheskikh i vodootalkivayushchikh svoystv.

17. ISO 20743:2021. Textile materials – Determination of antibacterial activity of textile products. Publication date: 08.06.2021.

18. ISO 6330:2021. Textile materials – Domestic washing and drying procedures for textile testing. Published: 24.11.2021 (Edition 4, 2021).

19. GOST 3813–72. Tekstil'nye materialy. Tkani i shtuchnye izdeliya. Metody opredeleniya razryvnykh kharakteristik pri rastyazhenii.