

МОДИФИКАЦИЯ ШЕРСТЯНОГО ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

А.А. Соловьёва, Е.Л. Владимирцева, А.С. Одинцов, А.К. Шибанова

Анна Алексеевна Соловьёва (ORCID 0009-0006-4463-3717)*, Елена Львовна Владимирцева (ORCID 0000-0003-2389-0192), Андрей Сергеевич Одинцов, Анастасия Константиновна Шибанова

Кафедра химической технологии волокнистых материалов, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: solovyova.anna05@bk.ru*, elvladimirtseva@mail.ru, ivcopy@yandex.ru, sibanovanasta7@gmail.com

В работе исследованы возможности применения технического углерода в комбинации с полимерными композициями, созданными на основе акриловых кислот, для оптимизации качественных параметров низкосортного шерстяного волокна и повышения его эксплуатационных характеристик. Специфические свойства технического углерода, разветвленная структура, развитая удельная поверхность, наличие свободных валентностей, способствующих образованию прочных связей с другими материалами, создают предпосылки для эффективного применения его в качестве модифицирующего агента при обработке шерстяных волокон. В качестве полимеров для закрепления частиц технического углерода на волокнистом материале использовались препараты российского производства Рузин-33 (водная сополимерная дисперсия на основе акриловой и метакриловой кислот, модифицированная акрилонитрилом) и Ларус-33П (водная сополимерная дисперсия на основе винилацетата и эфиров акриловой кислоты). В ходе экспериментов было доказано, что процесс закрепления технического углерода происходит не только на поверхности волокнистого материала, также зафиксировано проникновение частиц технического углерода в глубь микроструктуры волокна. Это открывает дополнительные возможности для модификации свойств волокнистого материала: заметно повышается теплоёмкость, что расширяет возможности его применения в изделиях с повышенными требованиями к терморегуляции; возрастает устойчивость материала к воздействию гнилостных бактерий, что увеличивает срок службы изделий и снижает потребность в химической обработке; значительно, за счет сглаживания поверхностного чешуйчатого слоя, снижается уровень усадки и свойлачивания при проведении влажно - тепловых обработок, что упрощает технологический процесс производства и повышает стабильность геометрических параметров готовых изделий. Таким образом, результаты исследования демонстрируют высокий потенциал комбинированного применения технического углерода и полимерных композиций на основе акриловых кислот для кардинального улучшения качественных показателей низкосортной шерсти и расширения сферы её практического использования.

Ключевые слова: шерстяное волокно, технический углерод, модификация, полимерные композиции, теплоёмкость, устойчивость к гниению, свойлачивание, ИК-спектроскопия

MODIFICATION OF WOOL FIBER BASED ON THE JOINT USE OF CARBON BLACK AND POLYMER COMPOSITIONS

A.A. Solovyova, E.L. Vladimirtseva, A.S. Odintsov, A.K. Shibanova

Anna A. Solovyova (ORCID 0009-0006-4463-3717)*, Elena L. Vladimirtseva (ORCID 0000-0003-2389-0192), Andrey S. Odintsov, Anastasia K. Shibanova

Department of Chemical Technology of Fibrous Materials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology and Design, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: solovyova.anna05@bk.ru*, elvladimirtseva@mail.ru, ivcopy@yandex.ru, sibanovanasta7@gmail.com

This study explored the potential of using carbon black in combination with acrylic acid-based copolymer composites to optimize the quality parameters of low-grade wool fiber and improve its performance. Carbon black's unique properties, including its branched structure, high specific surface area, and the presence of free valences that facilitate the formation of strong bonds with other materials, make it ideal for use as a modifying agent in the processing of wool fibers. Russian-made Ruzin-33 (an aqueous copolymer dispersion based on acrylic and methacrylic acids modified with acrylonitrile) and Larus-33P (an aqueous copolymer dispersion based on vinyl acetate and acrylic acid esters) were used as polymers for fixing carbon black particles to the fibrous material. The experiments demonstrated that the carbon black fixation process occurs not only on the surface of the fibrous material. Carbon black particles also penetrate deep into the fiber microstructure. This opens up additional possibilities for modifying the properties of the fiber material: the heat capacity of wool increases significantly, expanding its application in products with increased thermal regulation requirements; the material's resistance to putrefactive bacteria increases, extending the product's service life and reducing the need for chemical treatment; and, by smoothing the surface scaly layer, shrinkage and felting during wet-heat treatment are significantly reduced, simplifying the manufacturing process and improving the geometric stability of finished products. Thus, the study results demonstrate the high potential of the combined use of carbon black and acrylic acid-based polymer composites for dramatically improving the quality of low-grade wool and expanding its practical applications.

Keywords: wool fiber, technical carbon, modification, polymer compositions, heat capacity, rot resistance, felting, IR spectroscopy

Для цитирования:

Соловьёва А.А., Владимирцева Е.Л., Одинцов А.С., Шибанова А.К. Модификация шерстяного волокна на основе совместного применения технического углерода и полимерных композиций. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2026. Т. 69. Вып. 9. С. 135–144. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.7136.

For citation:

Solovyova A.A., Vladimirtseva E.L., Odintsov A.S., Shibanova A.K. Modification of wool fiber based on the joint use of carbon black and polymer compositions. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2026. V. 69. N 9. P. 135–144. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.7136.

ВВЕДЕНИЕ

Современная шерстяная промышленность России находится в сложном, но динамично развивающемся состоянии. С одной стороны, отрасль сталкивается с рядом проблем, таких как дефицит качественного сырья, нехватка квалифицированных кадров и инфраструктурные ограничения. С другой стороны, в настоящее время, в связи с интересом государства, проявляемым к этой тематике, реализуются масштабные меры материальной поддержки, направленные на модернизацию производства, повышение качества продукции и расширение рынков сбыта [1, 2].

Основной проблемой на сегодняшний день является нехватка качественного сырья. Ключевыми производителями шерсти являются фермерские и личные подсобные хозяйства, на которые приходится около 86% общего объема производства. По данным на 2025 г., в России производится около 43 тыс. т шерсти в 1 г. [3, 4]. При этом боль-

шая часть – грубая и полугрубая шерсть, так как доминирует разведение овец на мясо.

Тонкорунная шерсть, которая востребована при производстве суконных или камвольных тканей, в дефиците. Ее доля в общем объеме спроса переработчиков составляет около 55%, но в основном это зарубежные закупки. Отечественное сырье, к сожалению, не имеет требуемого качества [5]. Тем не менее, даже низкосортная шерсть благодаря специфике многоуровневого строения имеет значительные преимущества перед химическими волокнами.

Шерстяное волокно (ШВ) обладает достаточно сложным многоуровневым химическим и морфологическим строением. На макромолекулярном уровне шерсть является белковым волокном, в котором микрофибриллы и матричный полимер состоят из химически и физически взаимосвязанных полипептидов, содержащих гидрофильные amino- и карбоксильные группы, придающие волокну амфотерные свойства и высокую гигроскопичность. На

надмолекулярном уровне структуру формируют α -кератиновые спирали, объединённые дисульфидными, водородными и изопептидными связями, а поверхностный слой представлен кутикулярными чешуйками, покрытыми гидрофобным слоем 18-метилэйкозановой кислоты [6-12].

Сложное строение шерстяного волокна обеспечивает его неоспоримые достоинства и, в тоже время, обуславливает ряд недостатков, затрудняющих технологии отделки и последующую эксплуатацию: межмакромолекулярные цистиновые связи делают шерсть неустойчивой к ряду химических агентов, а также к инсоляции и УФ-излучению, строение поверхностного слоя, извитость волокон, придают волокну склонность к усадке, свойлачиванию, пиллингуемости [13].

Улучшить эксплуатационные свойства шерсти, расширить сферу применения и повысить конкурентоспособность продукции позволяет направленная модификация шерстяного волокнистого материала. Современные технологии модификации включают химические, физические и биотехнологические методы, которые направлены на устранение недостатков текстильных материалов и придание новых функциональных свойств [14-16].

Решить проблему повышения качественных характеристик низкосортного шерстяного волокна, улучшения его эксплуатационной способности можно при использовании технического углерода (ТУ). Благодаря высокой удельной поверхности, развитой пористой структуре и наличию свободных валентностей ТУ способен эффективно выступать в роли функционального наполнителя. В промышленности он широко применяется для армирования синтетических полимеров, улучшения электропроводности композитов, придания материалам термостабилизирующих и бактерицидных свойств [14, 17-20]. В литературе достаточно много сведений о применении его для модификации свойств синтетических полимеров, но нет опыта применения с натуральными волокнистыми материалами. Предполагается, что нанесение микрочастиц ТУ на поверхность шерстяного волокна может повысить его теплоемкость, усилить устойчивость к микробиологической деградации и создать активные центры для последующего закрепления функциональных покрытий. Вместе с тем, прямое нанесение технического углерода на шерсть сопряжено с риском его неравномерного распределения, агрегации частиц и слабой адгезии к белковой поверхности.

Для решения этой задачи целесообразно использовать полимерные композиции в качестве связующей матрицы. В последние годы синтетические

полимеры все чаще используются для обработки натуральных волокон с целью придания им дополнительных свойств. Указанная обработка, не ухудшая имеющихся характеристик волокна, расширяет сферу применения натуральных волокон [21].

В рамках теоретической модели данный метод способен обеспечить сохранение присущих натуральной шерсти свойств (в т.ч. гидрофильности и воздухопроницаемости) при одновременном приобретении новых характеристик: устойчивости к усадке, пожелтению, водоотталкивающим и маслоотталкивающим свойствам, а также адгезии к синтетическим компонентам [22-24].

Однако ряд исследователей отмечает потенциальные риски: интеграция полимеров во внутреннюю структуру шерсти может негативно отразиться на её физико-механических показателях, включая прочность на разрыв, гигроскопичность и термическую стабильность [14, 25, 26]. Основной задачей при проведении такой модификации становится достижение оптимального баланса между внедрением новых свойств и сохранением ценных природных качеств шерсти. Кроме того, избыточная обработка повышает вероятность повреждения волокон, что способно снизить качество конечного продукта [27, 28].

В задачи настоящего исследования входило изучение возможности применения технического углерода для повышения теплоемкости шерстяного волокна, придания ему устойчивости к гнилостным бактериям, а также разработка перспективных методов поверхностной обработки шерсти на основе совместного применения микрочастиц и полимерных композиций.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использовались следующие вещества. Технический углерод (ТУ) – элементарный углерод (95-99%), остальное – примеси до 1% Н, до 1% S, до 8% O, до 1% N, до 0,5% минеральные примеси, средний размер частиц - 30 ± 5 нм. Рузин-33 – водная сополимерная дисперсия на основе акриловой и метакриловой кислот, модифицированная акрилонитрилом. Ларус-33П – водная сополимерная дисперсия на основе винилацетата и эфиров акриловой кислоты.

Приготовление водных составов осуществляли серийным методом. Базовый объем воды составлял 100 мл. Содержание технического углерода во всех композициях было фиксированным и составляло 1,0 г на 100 мл воды. Концентрация полимера варьировалась в ряду: 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 и 6,0 г на 100 мл состава [29].

Навески шерсти массой 1,0 г погружали в подготовленные составы на 30 с. Эксперимент проводили при трех температурных режимах: 20, 30 и 40 °С. Для каждого сочетания концентрации полимера и температуры пропитки готовили отдельные серии образцов. После пропитки образцы подвергали механическому отжиму на лабораторной плюсовке в два прохода для удаления избытка раствора и регулирования степени привеса 100%. Далее образцы сушили на воздухе при комнатной температуре до визуального сухого состояния. Завершающим этапом являлась термостабилизация (термофиксация) модифицированного волокна в сушильном шкафу при температуре 150 °С в течение 3 мин.

ИК-спектроскопические исследования пленочных образцов шерсть, шерсть + Рузин-33 + ТУ, и шерсть + Ларус-33П + ТУ проводили на инфракрасном Фурье-спектрометре Avatar 360 FT-IR ESP. Волокна с нанесенными частицами ТУ погружали в полимерную композицию. Пленки получали методом отливки на тефлоновых шаблонах с сушкой на воздухе или с термофиксацией в сушильном шкафу при температуре 150 °С в течение 3 мин. Спектры записаны в режиме на пропускание в диапазоне 400–4000 см⁻¹ с разрешением 2 см⁻¹. Количественную оценку спектров осуществляли, характеризуя интенсивность анализируемых полос по величине показателя относительной оптической плотности.

Для оценки интенсивности (K/S) серого оттенка волокна применяли спектрофотометр «YS 3010», фиксируя коэффициент отражения (R, %) с последующим расчетом интенсивности по формуле Гуревича-Кубелки-Мунка:

$$\frac{K}{S} = \frac{(1 - R_\lambda)^2}{2R_\lambda} - \frac{(1 - R_s)^2}{2R_s} \quad (1)$$

где K – коэффициент поглощения света, обработанным волокном; S – коэффициент рассеяния этим же волокном; R_λ – спектральный коэффициент отражения обработанного волокна; R_s – спектральный коэффициент отражения исходного волокна [30].

Прочностные характеристики шерстяного волокна оценивали по разрывной нагрузке пучка волокон, измеряемой на динамометре типа ДШ-3М [31]. Для этого подготавливаются 25 пучков волокон, масса каждого пучка должна быть в пределах 3–4 мг. Предварительно волокна в пробах должны быть параллелизованы и выдержаны в течение 3–4 ч при температуре 20±2 °С и влажности 65±2%. После разрыва все волокна необходимо собрать в бюкс и взвесить на аналитических весах с погреш-

ностью не более ±0,1 мг. Разрывная нагрузка (P₀) рассчитывалась по формуле (2) (сН/текс):

$$P_0 = l \cdot 10^{-3} \cdot 0,98 \cdot \frac{\sum P}{m} \quad (2)$$

где l – длина пучка волокон, мм; m – вес пучков волокон, мг; P, P₀ – значения разрывной нагрузки образцов, сН/текс.

Теплоемкость и теплозащитные свойства оценивали методом нагрева с последующим остыванием. Образец массой 0,5 г помещали в цилиндрическую термоизолированную трубку (Ø = 2,2 см) с подключенным двухканальным терморегулятором STC-3008 с двумя датчиками для контроля температуры в начале и конце трубки [32].

Через слой волокна подавали поток тёплого воздуха (40–45 °С) в течение 20 с, после чего в течение 180 с регистрировали кинетику остывания. Температуру контролировали датчиками, установленными до и после волоконного слоя, с погрешностью ±0,1 °С.

Теплозащитный эффект оценивали по величине температурного градиента ΔT = T_{вх}–T_{вых} и скорости остывания (°С/мин). Замедление остывания и увеличение ΔT свидетельствовали об увеличении теплоёмкости и улучшении теплоизоляционных свойств.

Противогнильные свойства шерстяного волокна определяли по стандартизованному почвенному тесту, имитирующему естественные условия биоповреждения. Для проведения испытания в стандартных условиях готовили почву из смеси песка, коровьего навоза, садовой земли в соотношении 1:1:1 с pH 6,0...7,5 [33]. Образцы шерстяного волокна в виде плоских коврикков массой 1 г закапывали в почву на глубину 10 см. Площадку для закапывания делали с небольшим наклоном, чтобы при поливе вода не удерживалась на образцах. Температуру поддерживали 20–25 °С. Образцы вынимали через 30 сут. После выемки их тщательно промывали водой и 0,5 %-м раствором формалина (для подавления жизнедеятельности оставшихся микроорганизмов), затем высушивали на воздухе и определяли степень разрушения кератина шерсти по степени растворимости в 0,1 Н растворе щелочи.

Отсутствие потери механической целостности при наличии поверхностной плесени интерпретировалось как бактериостатический эффект (подавление проникновения и метаболической активности, но не уничтожение микроорганизмов).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Доказательством сорбции ТУ из водной дисперсии шерстяным волокном являются как по-

лученные микрофотографии (рис. 1), так и изменение цвета волокнистого материала, отмечаемое как визуально, так и спектрофотометрическим методом. Результаты приведены в виде диаграммы на рис. 2.

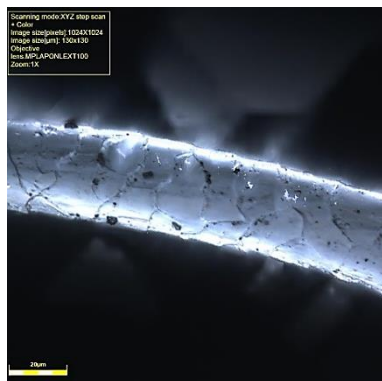


Рис. 1. Шерстяное волокно с закрепленными частицами углерода

Fig. 1. Wool fiber with fixed carbon particles

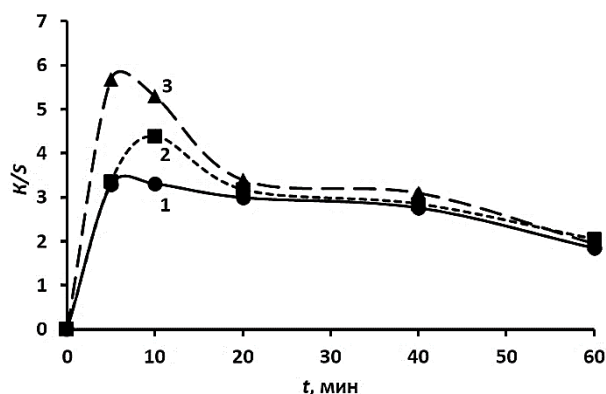


Рис. 2. Изменение окраски шерстяного волокна в зависимости от времени и температуры обработки в дисперсии технического углерода: 1 - 20 °C; 2 - 40 °C; 3 - 60 °C

Fig. 2. Changes in the color of woolen fibers depending on the time and temperature of treatment in a dispersion of technical carbon: 1 - 20 °C; 2 - 40 °C; 3 - 60 °C

Анализ экспериментальных данных позволил выявить следующую динамику нанесения ТУ на шерстяное волокно: в первые 5-10 мин после погружения ШВ в дисперсию, на него наносится максимальное количество порошка, далее происходит его медленное вымывание, которое ускоряется после 40 мин обработки. Температурные параметры оказывают меньшее влияние на количество закрепленного на волокне углерода, чем временные. Как и следовало ожидать, чем выше температура, тем больше порошка ТУ наносится на волокно в первые минуты обработки. При этом независимо от температуры через 60 мин обработки на волокне закрепляется практически одинаковое количество порошка ТУ. Известно, что размер дефектностей

поверхности ШВ может составлять до 12 мкм [13]. Поэтому технический углерод с диаметром частиц от 10 до 30 нм фиксируется как в микротрещинах и на сколах чешуек, что подтверждено полученными микрофотографиями (см. рис. 1), так и вероятно его проникновение в структуру волокна, что косвенно подтверждают ИК спектры поглощения, полученные с исходных и обработанных волокон.

При анализе ИК спектров исходного ШВ были выявлены характерные для чистой шерсти полосы поглощения, включая: О–Н и адсорбированную воду (3630 см^{-1}); колебания С–Н ($2955\text{--}2853\text{ см}^{-1}$) и COO^- групп аспарагиновой и глутаминовой кислот (1707 и 1688 см^{-1}), а также амидных групп: амид I (1661 см^{-1}), амид II (1576 и 1541 см^{-1}) и амид III (1229 см^{-1}) и цистиновых групп (1064 , 1065 , 1063 см^{-1}). После обработки ТУ полоса поглощения 1065 см^{-1} несколько уменьшается, что свидетельствует о нарушении -S-S- связей. Однако, обработка волокна не привела к существенным изменениям его прочностных показателей.

Вместе с тем количественное содержание ТУ на волокне невелико и по результатам проведенных гравиметрических измерений составляет 0,5-1,5% от веса волокна. Чтобы увеличить его содержание, прочнее закрепить на волокне, а также сделать модификацию более эффективной, одновременно с ТУ на волокно наносились акриловые полимеры Рузин 33П и Ларусс 33, выпускаемые российским производителем «Группа компаний «СВАН» (г. Дзержинск) специально для применения в текстильном отделочном производстве. При использовании данные препараты формируют сетчатые структуры, характеризующиеся высокими упруго-эластическими показателями, без ухудшения грифа текстильных материалов, что имеет существенное значение для обработки шерстяного волокна.

При нанесении полимеров на шерстяное волокно изменение его характеристик было более существенным, чем при использовании технического углерода, что подтверждено ИК-анализом и испытаниями на прочность. При этом основные изменения в структуре шерстяного волокна происходили после термофиксации обработанных образцов.

Характеристические изменения в ИК спектре обработанного полимерами шерстяного волокна отражены в табл. 1. Отмечено, что добавление в композицию ТУ практически не меняет величину и положение полос поглощения.

Анализируя данные ИК-спектроскопии модельных систем – полимерных плёнок, включающих шерстяное волокно, технический углерод, и

отделочную композицию, – можно предположить, что обработка вызывает перестройку внутренней структуры шерсти: водородные и ионные связи, стабилизирующие исходную структуру кератина, заменяются внутримономерными. Это приводит к формированию единой композитной сети, где полимерная матрица связана с кератиновыми волокнами.

Таблица 1

Полосы поглощения ИК спектра шерстяного волокна, обработанного полимерной композицией
Table 1. The IR spectrum absorption bands of wool fiber treated with a polymer composition

Компонент	Характеристические полосы	
	Рузин-33	Ларус-33П
Акриловые звенья	1824, 1222, 1134 см ⁻¹	1024, 1781, 1124 см ⁻¹
Амидные группы	1799 см ⁻¹	1765 см ⁻¹
Вода	3383 см ⁻¹ (низкая)	3384 см ⁻¹ (низкая)
Сшивки	I(C-O)/ I(C=O) = 1,67	I(C-O)/ I(C=O) = 2,02

Полученные данные коррелируют с изменением прочности шерстяного волокна, которая заметно снижается после обработки композицией с Ларус-33П – потери в этом случае составляют от 30 до 45%. С Рузин-33 также наблюдается некоторое снижение прочностных характеристик, но при оптимальной концентрации полимера оно не превышает 3% [34].

Из научно-технической литературы известно, что потери прочности при обработке волокнистых материалов полимерными композициями связаны с параметрами формирующихся в волокне новых связей, а именно с их количеством, длиной, жесткостью [35, 36]. При низком содержании полимера в волокне образующиеся связи выполняют роль «цемента»: они упрочняют структуру волокна, повышая его механическую прочность. При высоком содержании полимерной составляющей наблюдается резкое увеличение жесткости, сопровождающееся снижением прочности материала. В нашем случае для шерстяного волокна, ввиду сложности его макроструктуры, снижение прочности фиксируется практически при любом уровне полимерной обработки. Тем не менее, при правильном подборе препарата и выборе его концентрации, потери могут быть минимальны.

Присутствие ТУ на шерстяном волокне меняет его технологические характеристики. Обработка ТУ на 18-20% в присутствии полимера на 35-40% снижает способность шерстяного волокна к

свойлачиванию. Это связано со сглаживанием чешуек в результате закрепления на поверхности волокна по их краям и сколам микрочастиц углерода. Эффект усугубляется в случае добавки полимера – происходит увеличение трения скольжения между волокнами, они не сцепляются друг с другом при проведении мокрых обработок, следовательно, усадки не происходит или она значительно снижается.

Еще одним значимым с практической точки зрения эффектом является повышение стойкости шерсти к гнилостным бактериям. В табл. 2 приводятся данные по потере массы у образцов после выдерживания в течение 30 сут. во влажной почве вследствие гниения. Одновременно оценивается и степень повреждения кератина по растворению в 0,1 н NaOH.

Таблица 2

Результаты проверки устойчивости шерстяного волокна к почвенным бактериям

Table 2. The test of wool fiber resistance to soil bacteria

Образец	Потери массы, %	Степень повреждения кератина, %
Исходное волокно	90±5	86±2
Обработанное ТУ	75±5	67±2
Обработанное Рузин-33+ТУ	62	-
Обработанное Ларус-33П+ТУ	58	-

Таблица 3

Изменение теплопроводности шерстяного волокна после модификации

Table 3. Change in thermal conductivity of wool fiber after modification

Образец	Δm , % от исх.	ΔT , °C	
		Нагрев, 20 с	Остывание 3 мин
Исходное волокно	-	12	11
Обработанное ТУ	0,5	12	17
	1,0	15	19
	1,5	17	20
Обработанное Рузин-33+ТУ	1,0	15	18
	2,0	15	16
	3,0	15	14
Обработанное Ларус-33П+ТУ	1,0	13	17
	2,0	13	15
	3,0	13	13

Основным эффектом присутствия частиц ТУ в структуре шерстяного волокна является повышение его теплоемкости. Известно, что шерстя-

ное волокно отличается высокой теплоемкостью и низкой теплопроводностью. Причины такого эффекта заключаются в сложной структуре волокнистого материала, его извитости и наличии воздушных прослоек между волокнами.

В табл. 3 представлен градиент температур (ΔT) при нагревании/остывании образцов шерсти, отличающихся количественным содержанием технического углерода.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что закрепленные в шерстяном волокне частицы углерода замедляют нагревание и увеличивают время остывания образца. Присутствие полимерной составляющей мало влияет разницу температур при нагревании, но несколько ускоряет остывание образцов. Остывание происходит тем быстрее, чем больше полимерной композиции находится на волокне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование позволило всесторонне оценить эффективность использования технического углерода – как в монокомпонентном виде, так и в составе полимерных композиций – для модификации шерстяного волокна. Анализ экспериментальных данных показал, что частицы ТУ благодаря закреплению в структуре шерсти повышают теплоемкость материала, на 18-20% снижают способность волокна к свойлачиванию и при этом не ухудшают его прочностные характеристики. Сочетание ТУ с полимерными композициями, вследствие увеличения его количества на волокне, позволяет достичь более выраженного эффекта – до 35-40% снижается усадка, улучшаются

упруго-эластические свойства волокна, усиливается устойчивость шерсти к гнилостным бактериям. Вместе с тем, нанесение полимерных композиций на волокно при неверном выборе параметров обработки может ухудшать его прочностные характеристики.

Таким образом, применение технического углерода в сочетании с полимерными композициями представляет собой перспективное направление для улучшения качественных характеристик низкосортной шерсти. Продолжение исследований в этом направлении даст возможность подобрать оптимальные составы и режимы обработки для достижения оптимального баланса эксплуатационных характеристик и расширения сферы применения шерстяных материалов.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного задания на выполнение НИР, тема № FZZW-2026-0004 с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out within the framework of the State Assignment for Research, topic № FZZW-2026-0004. The study was carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment of the ISUCT.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Samohin V.A. State support for the development of sheep breeding: advanced world experience. *Russ. J. Manag.* 2025. V. 13. N 3. P. 153-160. DOI: 10.29039/2500-1469-2025-13-3-153-160.
2. Имгеев Я.И., Мамаев С.Ш., Разумеев К.Э. Проблема улучшения и сохранения качества шерсти в современном мире. *Сб. науч. тр. Ставропол. НИИ животновод. и кормопроизв.* 2007. Т. 3. № 3-3. С. 108-111.
3. Тептерева Г.А., Пахомов С.И., Четвертнева И.А., Каримов Э.Х., Егоров М.П., Мовсумзаде Э.М., Евстигнеев Э.И., Васильев А.В., Севастьянова М.В., Волошин А.И., Нифантьев Н.Э., Носов В.В., Докичев В.А., Бабаев Э.Р., Роговина С.З., Берлин А.А., Факхреева А.В., Баулин О.А., Колчина Г.Ю., Воронов М.С., Староверов Д.В., Козловский И.А., Козловский Р.А., Тарасова Н.П., Занин А.А., Кривобородов Е.Г., Каримов О.Х., Флид В.Р., Логинова М.Е. Возобновляемые природные сырьевые ресурсы, строение, свойства, перспективы применения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 9. С. 4-121. DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465.

REFERENCES

1. Samohin V.A. State support for the development of sheep breeding: advanced world experience. *Russ. J. Manag.* 2025. V. 13. N 3. P. 153-160. DOI: 10.29039/2500-1469-2025-13-3-153-160.
2. Imigeev Ya.I., Mamaev S.Sh., Razumeev K.E. Problem of improving and preserving wool quality in the modern world. *Coll. sci. works Stavropol. NII zhivotnovodstva i kormoproizvodstva.* 2007. V. 3. N 3-3. P. 108-111 (in Russian).
3. Tepтерева G.A., Pakhomov S.I., Chetvertneva I.A., Karimov E.H., Egorov M.P., Movsumzade E.M., Evstigneev E.I., Vasiliev A.V., Sevastyanova M.V., Voloshin A.I., Nifantsev N.E., Nosov V.V., Dokichev V.A., Babaev E.R., Rogovina S.Z., Berlin A.A., Fakhreeva A.V., Baulin O.A., Kolchina G.Yu., Voronov M.S., Staroverov D.V., Kozlovsky I.A., Kozlovsky R.A., Tarasova N.P., Zanin A.A., Krivoborodov E.G., Karimov O.Kh., Flid V.R., Loginova M.E. Renewable natural raw materials, structure, properties, application prospects. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2021. V. 64. N 9. P. 4-121 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216409.6465.

4. Соловьёва А.А., Владимирцева Е.Л., Кулакова В.А. Модификация свойств шерстяного волокна с применением фторированного алумосиликата. *Рос. хим. журн.* 2025. Т. 69. Вып. 4. С. 30-34. DOI: 10.6060/rcj.2025694.4.
5. Абонеев В.В. Отечественному овцеводству - достойное научное обеспечение. *Сб. науч. тр. Ставропол. НИИ животновод. и кормопроизв.* 2005. Т. 1. № 1. С. 3-12.
6. Маршалл Р.К. Электронная микроскопия: структура поверхности и биохимия твердого кератина млекопитающих. М.: Мир. 1991. 630 с.
7. Бутман М.Ф., Овчинников Н.Л., Виноградов Н.М., Гордина Н.Е., Иванов В.К. Наследование вторичной структуры кератина при кристаллизации диоксида титана в гидротермальных условиях с использованием волокон шерсти в качестве биотемплата. *Рос. хим. журн.* 2023. Т. 67. Вып. 3. С. 36-44. DOI: 10.6060/rcj.2023673.5.
8. Алехина А.Ф., Ерзунов К.А., Одинцова О.И., Петрова Л.С. Прогрессивные технологии иммобилизации микрокапсулированных веществ с фазовым переходом для получения функциональных текстильных материалов. *Рос. хим. журн.* 2025. Т. 69. Вып. 4. С. 5-12. DOI: 10.6060/rcj.2025694.1.
9. De Fries W., Altenhofen U., Föhles J., Zahn H. A protein chemical investigation of the chlorine-hercosett process. *J. Soc. Dyers Colourists.* 2008. V. 99. N 1. P. 13-16. DOI: 10.1111/j.1478-4408.1983.tb03649.x.
10. Binnig G., Quate C.F., Gerber C. Atomic Force Microscope. *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 56. N 9. P. 930-933. DOI: 10.1103/PhysRevLett.56.930.
11. Cardamone J.M. Recent advances in wool chemistry. *Textile Res. J.* 2002. V. 72. N 10. P. 928-934. DOI: 10.1177/004051750207201008.
12. France Tribe S.R., Lee P.X., Czibula C., Simões M.G., Bleher R., Duncan K. E., Thoman M., Topp C.N., Dravid V. P., Chazo C.A.C. The hierarchical structure of sheep wool and its impact on physical properties. *Adv. Funct. Mater.* 2025. V. 35. N 52. P. 10035. DOI: 10.1002/adfm.202510035.
13. Новорядовская Т.С., Фролов С.Ф. Химия и химическая технология шерсти. М.: Легпромбытиздат. 1986. 200 с.
14. Соловьёва А.А., Владимирцева Е.Л., Смирнова С.В. Эффективные технологии модификации шерстяных текстильных материалов (обзор). *Рос. хим. журн.* 2025. Т. 69. Вып. 4. С. 23-29. DOI: 10.6060/rcj.2025694.3.
15. Одинцова О.И., Владимирцева Е.Л., Козлова О.В., Смирнова С.В., Липина А.А., Петрова Л.С., Ерзунов К.А., Константинова З.А., Зимнуров А.Р., Быков Ф.А., Мельников А.Г. Отделка текстильных материалов микрокапсулами и наночастицами функциональных веществ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 173-184. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6844j.
16. Алехина А.Ф., Ерзунов К.А., Малыгина А.А., Одинцова О.И. Создание текстильных материалов с терморегулирующими свойствами на основе использования микрокапсулированных веществ с фазовым переходом. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2025. Т. 68. Вып. 11. С. 6-24. DOI: 10.6060/ivkkt.20256811.7241.
17. Jaber Mofrad F., Ahmadpour A., Ostad Movahed S. The effect of modified carbon black and nano-silica, individually and in combination, on the curing, mechanical, and dynamical properties of butyl rubber (IIR). *Polym. Polym. Compos.* 2024. V. 32. N 1. P. 1-15. DOI: 10.1177/09673911241256553.
4. Solovyova A.A., Vladimirtseva E.L., Kulakova V.A. Modification of wool fiber properties using fluorinated aluminosilicate. *Ross. Khim. Zhurn.* 2025. V. 69. N 4. P. 30-34 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2025694.4.
5. Aboneev V.V. Worthy scientific support for domestic sheep breeding. *Coll. sci. works Stavropol. NII zhivotnovodstva i kormoproizvodstva.* 2005. V. 1. N 1. P. 3-12 (in Russian).
6. Marshall R.K. Electron microscopy: surface structure and biochemistry of mammalian hard keratin. M.: Mir. 1991. 630 p. (in Russian).
7. Butman M.F., Ovchinnikov N.L., Vinogradov N.M., Gordina N.E., Ivanov V.K. Inheritance of the Secondary Structure of Keratin during Titanium Dioxide Crystallization under Hydrothermal Conditions Using Wool Fibers as a Biotemplate. *Ross. Khim. Zhurn.* 2023. V. 67. N 3. P. 36-44 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2023673.5.
8. Alekhina A.F., Erzunov K.A., Odintsova O.I., Petrova L.S. Advanced technologies for immobilization of microencapsulated substances with phase transition for obtaining functional textile materials. *Ross. Khim. Zhurn.* 2025. V. 69. N 4. P. 5-12 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2025694.1.
9. De Fries W., Altenhofen U., Föhles J., Zahn H. A protein chemical investigation of the chlorine-hercosett process. *J. Soc. Dyers Colourists.* 2008. V. 99. N 1. P. 13-16. DOI: 10.1111/j.1478-4408.1983.tb03649.x.
10. Binnig G., Quate C.F., Gerber C. Atomic Force Microscope. *Phys. Rev. Lett.* 1986. V. 56. N 9. P. 930-933. DOI: 10.1103/PhysRevLett.56.930.
11. Cardamone J.M. Recent advances in wool chemistry. *Textile Res. J.* 2002. V. 72. N 10. P. 928-934. DOI: 10.1177/004051750207201008.
12. France Tribe S.R., Lee P.X., Czibula C., Simões M.G., Bleher R., Duncan K. E., Thoman M., Topp C.N., Dravid V. P., Chazo C.A.C. The hierarchical structure of sheep wool and its impact on physical properties. *Adv. Funct. Mater.* 2025. V. 35. N 52. P. 10035. DOI: 10.1002/adfm.202510035.
13. Novoradovskaya T.S., Frolov S.F. Chemistry and chemical technology of wool. M.: Legprombytizdat. 1986. 200 p. (in Russian).
14. Solovyova A.A., Vladimirtseva E.L., Smirnova S.V. Effective technologies for modification of wool textile materials (review). *Ross. Khim. Zhurn.* 2025. V. 69. N 4. P. 23-29 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2025694.3.
15. Odintsova O.I., Vladimirtseva E.L., Kozlova O.V., Smirnova S.V., Lipina A.A., Petrova L.S., Erzunov K.A., Konstantinova Z.A., Zimnurov A.R., Bykov F.A., Melnikov A.G. Finishing of textile materials with microcapsules and nanoparticles of functional substances. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2023. V. 66. N 7. P. 173-184 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6844j.
16. Alekhina A.F., Erzunov K.A., Malygina A.A., Odintsova O.I. Development of textile materials with thermoregulating properties based on phase change microencapsulated substances. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2025. V. 68. N 11. P. 6-24 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20256811.7241.
17. Jaber Mofrad F., Ahmadpour A., Ostad Movahed S. The effect of modified carbon black and nano-silica, individually and in combination, on the curing, mechanical, and dynamical properties of butyl rubber (IIR). *Polym. Polym. Compos.* 2024. V. 32. N 1. P. 1-15. DOI: 10.1177/09673911241256553.

18. **Ponnamma D., Maria H.J., Chandra A.K.** Rubber nanocomposites: latest trends and concepts. In: *Advances in Elastomers II: Composites and Nanocomposites*. Washington, DC: Am. Chem. Soc. 2013. P. 69-107.
19. **Wang J., Jia H.** The effects of carbon-silica dual-phase filler on the crosslink structure of natural rubber. *Polymers*. 2022. V. 14. N 18. P. 3897. DOI: 10.3390/polym14183897.
20. **Al-Hartomy O.A., Al Ghamdi A.A., Farha Al Said S.A.** Influence of carbon black/silica ratio on the physical and mechanical properties of composites based on epoxidized natural rubber. *J. Compos. Mater.* 2016. V. 50. N 3. P. 377-386. DOI: 10.1177/0021998315577226.
21. **Wang S., Hou W., Wei L.** Antibacterial activity of nano-SiO₂ antibacterial agent grafted on wool surface. *Surf. Coat. Technol.* 2007. V. 202. N 3. P.460-465. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.06.012.
22. **Shavandi A., Azam Ali M.** Progress in organic coatings designing and performance evaluation of polyelectrolyte multilayered composite smart coatings. *Progr. Org. Coat.* 2019. V. 130. P. 182-199. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2019.01.054.
23. **Monier M., Nawar N., Abdel-Latif D.A.** Preparation and characterization of chelating fibers based on natural wool for removal of Hg(II), Cu(II) and Co(II) metal ions from aqueous solutions. *J. Hazard. Mater.* 2010. V. 184. N 1. P. 118-125. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.08.013.
24. **Yu J., Pang Z., Zhang J., Zhou H., Wei Q.** Conductivity and antibacterial properties of wool fabrics finished by polyaniline/chitosan. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2018. V. 548. P. 117-124. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.03.065.
25. **Canal C., Gaboriau F., Villeger S.** Studies on antibacterial dressings obtained by fluorinated post-discharge plasma. *Int. J. Pharm.* 2009. V. 367. P.155-161. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2008.09.038.
26. **Wang X., Zhao Y., Li W., Wang H.** Effect of surface modifications on the thermal and moisture behavior of wool fabric. *Appl. Surf. Sci.* 2015. V. 342. P. 101-105. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.03.027.
27. **Соловьева А.А., Токарева А.А., Галлямова П.Ф., Владимирцева Е.Л.** Перспективный способ антибактериальной отделки текстильных материалов. Мат. II Всерос. конф. с междунар. участием «Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий (Материаловедение-2024)». Казань: КНИТУ. 2024. С. 373-375.
28. **Владимирцева Е.Л., Константинова З.А., Соловьева А.А.** Получение капсулированных препаратов серебра для отделки ткани с применением β-циклодекстрина. *Рос. хим. журн.* 2025. Т. 69. № 4. С. 64-68. DOI: 10.6060/rcj.2025694.10.
29. **Соловьева А.А., Кулакова В.А., Шибанова А.К., Владимирцева Е.Л.** Обработка шерстяного волокна водной дисперсией полимеров и её влияние на прочность. Сб. тр. XV Всерос. науч. и студ. конф. с междунар. участием им. проф. А.А. Лысенко «Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы». СПб.: СПбГУПТД. 2025. С. 92-94.
30. **Киселев А.М., Демидов А.В.** Методы исследований и обработки экспериментальных результатов. СПб.: Нестор-История. 2018. 392 с.
31. **ГОСТ 20269-93.** Шерсть. Методы определения разрывной нагрузки. М.: ИПК Издательство стандартов. 1999. 12 с.
18. **Ponnamma D., Maria H.J., Chandra A.K.** Rubber nanocomposites: latest trends and concepts. In: *Advances in Elastomers II: Composites and Nanocomposites*. Washington, DC: Am. Chem. Soc. 2013. P. 69-107.
19. **Wang J., Jia H.** The effects of carbon-silica dual-phase filler on the crosslink structure of natural rubber. *Polymers*. 2022. V. 14. N 18. P. 3897. DOI: 10.3390/polym14183897.
20. **Al-Hartomy O.A., Al Ghamdi A.A., Farha Al Said S.A.** Influence of carbon black/silica ratio on the physical and mechanical properties of composites based on epoxidized natural rubber. *J. Compos. Mater.* 2016. V. 50. N 3. P. 377-386. DOI: 10.1177/0021998315577226.
21. **Wang S., Hou W., Wei L.** Antibacterial activity of nano-SiO₂ antibacterial agent grafted on wool surface. *Surf. Coat. Technol.* 2007. V. 202. N 3. P.460-465. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.06.012.
22. **Shavandi A., Azam Ali M.** Progress in organic coatings designing and performance evaluation of polyelectrolyte multilayered composite smart coatings. *Progr. Org. Coat.* 2019. V. 130. P. 182-199. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2019.01.054.
23. **Monier M., Nawar N., Abdel-Latif D.A.** Preparation and characterization of chelating fibers based on natural wool for removal of Hg(II), Cu(II) and Co(II) metal ions from aqueous solutions. *J. Hazard. Mater.* 2010. V. 184. N 1. P. 118-125. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.08.013.
24. **Yu J., Pang Z., Zhang J., Zhou H., Wei Q.** Conductivity and antibacterial properties of wool fabrics finished by polyaniline/chitosan. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 2018. V. 548. P. 117-124. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2018.03.065.
25. **Canal C., Gaboriau F., Villeger S.** Studies on antibacterial dressings obtained by fluorinated post-discharge plasma. *Int. J. Pharm.* 2009. V. 367. P.155-161. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2008.09.038.
26. **Wang X., Zhao Y., Li W., Wang H.** Effect of surface modifications on the thermal and moisture behavior of wool fabric. *Appl. Surf. Sci.* 2015. V.342. P. 101-105. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.03.027.
27. **Solovyova A.A., Tokareva A.A., Gallyamova P.F., Vladimirtseva E.L.** Promising method for antibacterial finishing of textile materials. Mat. II All Russ. conf. with interpeople particip. "Sovremennye metody polucheniya materialov, obrabotki poverkhnosti i naneseniya pokrytii (Materialovedenie-2024)". Kazan': KNITU. 2024. P. 373-375 (in Russian).
28. **Vladimirtseva E.L., Konstantinova Z.A., Solovyova A.A.** Preparation of encapsulated silver preparations for fabric finishing using β-cyclodextrin. *Russ. Khim. Zhurn.* 2025. V. 69. N 4. P. 64-68 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2025694.10.
29. **Solovyova A.A., Kulakova V.A., Shibanova A.K., Vladimirtseva E.L.** Treatment of wool fiber with aqueous polymer dispersion and its effect on strength. Coll. works XV All Russ. sci. and stud. conf. with interpeople particip. named after prof. A.A. Lysenko "Nanostруктурные, voloknistye i kompozitsionnye materialy". SPb.: SPbGUPTD. 2025. P. 92-94 (in Russian).
30. **Kiselev A.M., Demidov A.V.** Research methods and processing of experimental results. SPb.: Nestor-Istoriya. 2018. 392 p. (in Russian).
31. **GOST 20269-93.** Wool. Methods for determining breaking load. M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 1999. 12 p. (in Russian).

32. Терморегулятор цифровой двухканальный STC - 3008 [Электронный ресурс] / Ampero : сайт. — URL: <https://ampero.ru/stc-3008-termoregulyator-tsifrovoy-dvuhkanalnyi.html?ysclid=mnpyvp1eag888462099> (дата обращения: 14.02.2026).
33. Лабораторный практикум по химической технологии текстильных материалов. Под ред. Г.Е. Кричевского. М.: РосЗИТЛП. 1994. 400 с.
34. **Соловьёва А.А., Кулакова В.А., Шибанова А.К., Владимирцева Е.Л.** Влияние поверхностной модификации на прочностные свойства шерстяного волокна. Молодежная наука в развитии регионов: материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых (Березники, 23 апреля 2025 г.). Пермь: Изд-во ПНИПУ. 2025. С. 229-232.
35. **Кричевский Г.Е.** Химическая технология текстильных материалов. Т.3. М.: МГУ. 2001. 298 с.
36. **Haji A., Barani H.** Physical and chemical modification of wool. In: Advanced Functional Textiles: Materials, Processes and Applications. Elsevier. 2023. P. 255-280.
32. Digital two-channel thermoregulator STC - 3008 [Electronic resource] / Ampero: website. — URL: <https://ampero.ru/stc-3008-termoregulyator-tsifrovoy-dvuhkanalnyi.html?ysclid=mnpyvp1eag888462099> (accessed: 14.02.2026). (in Russian).
33. Laboratory workshop on chemical technology of textile materials. Ed. by G.E. Krichevskii. M.: RosZITLP. 1994. 400 p. (in Russian).
34. **Solovyova A.A., Kulakova V.A., Shibanova A.K., Vladimirtseva E.L.** Influence of surface modification on strength properties of wool fiber. Molodezhnaya nauka v razvitii regionov: materials of all Russ. sci.-pract. conf. stud. and young sci. (Berezniki, 23 april 2025). Perm': Izd-vo PNIPU. 2025. P. 229-232 (in Russian).
35. **Krichevsky G.E.** Chemical Technology of Textile Materials. V. 3. Moscow: MGU. 2001. 298 p. (in Russian).
36. **Haji A., Barani H.** Physical and chemical modification of wool. In: Advanced Functional Textiles: Materials, Processes and Applications. Elsevier. 2023. P. 255-280.

Поступила в редакцию 16.03.2026

Принята к опубликованию 16.04.2026

Received 16.03.2026

Accepted 16.04.2026