

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕХАНОФЕРМЕНТАТИВНЫХ ОБРАБОТОК ПРИ ГРАДИЕНТНОМ МЯГЧЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ЛЬНЯНОЙ ОДЕЖДЫ

THE EFFICIENCY OF COMBINED MECHANO-ENZYMATIC TREATMENTS FOR GRADIENT SOFTENING OF LINEN CLOTHING DETAILS

Т.С. СОЛОДУШЕНКОВА^{1,2}, Н.Л. КОРНИЛОВА¹, С.А. КОКШАРОВ³, Е.В. ЗОБНИНА^{1,4}

T.S. SOLODUSHENKOVA^{1,2}, N.L. KORNILOVA¹, S.A. KOKSHAROV³, E.V. ZOBNINA^{1,4}

¹Ивановский государственный политехнический университет,

²Уфимский государственный нефтяной технический университет,

³Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, г. Иваново,

⁴ООО «Лидертекс», г. Иваново)

¹Ivanovo State Polytechnic University,

²Ufa State Petroleum Technical University,

³G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo,

⁴Lidertex LLC, Ivanovo)

E-mail: nkorn@mail.ru

Метод градиентного мягчения обеспечивает регулируемое изменение жесткости льняных материалов на определенных участках одежды для достижения проектируемой объемно-силуэтной формы изделия. Метод основан на локализованном воздействии специализированных целлюлазных препаратов на макрофибриллы целлюлозы в первичной клеточной стенке волокна. Механические воздействия на поверхность волокна могут усилить тополитическое действие ферментов, дополнительно расширяя диапазон варьруемой жесткости. Первый вариант совмещения предусматривает проведение биообработки в условиях, моделирующих «стирку с камнями». Второй вариант включает дополнительную операцию ворсования после биомодификации материала. Эффективность обработок оценена с использованием стандартных методов измерения жесткости, разрывной нагрузки и стойкости к истиранию. Также определены показатели формуемости, тепло- и влагопередачи материалов. Расширение диапазона мягчения достигает 3,3 раза. Прирост показателя формуемости увеличивается в 1,2-1,64 раза. Образцы с ворсовой фактурой характеризуются повышенной теплопроводностью и улучшенными гигиеническими свойствами.

The gradient softening method provides an adjustable change in the stiffness of linen materials in certain areas of clothing to achieve the projected three-dimensional silhouette shape of the product. The method is based on the localized effect of specialized cellulases preparations on cellulose macrofibrils in the primary fiber cell wall. Mechanical effects on the fiber surface can enhance the topolytic effect of enzymes, additionally expanding the range of varying stiffness. The first combination option involves carrying out biological treatment under conditions simulating “washing with stones”. The second option includes an additional pile operation after biomodification of the material. The effectiveness of the treatments was evaluated using standard methods for measuring stiffness, breaking load and abrasion resistance. Indicators of formability, heat and moisture transfer of materials were also determined. The expansion of the

softening range reaches 3.3 times. The increment in formability increases by 1.2-1.64 times. Samples with a pile texture are characterized by increased thermal conductivity and improved hygienic properties.

Ключевые слова: льняная одежда, биомягчение полуфабрикатов, целлюлазы, «стирка с камнями», ворсование.

Keywords: linen clothing, biosoftening of semi-finished products, cellulases, "stone washing", combing the pile.

Статистические данные состояния российской легкой промышленности свидетельствуют о позитивных тенденциях развития отрасли [1]. Прирост производства текстильных изделий в 2022 г. по сравнению с 2021 г. составил 17,2 %, производства одежды – 27,4 %. Успешную динамику связывают с увеличением числа индивидуальных предпринимателей, малых и средних предприятий в сфере легкой индустрии за указанный период почти на 12 %.

Ускоренное развитие отечественной сырьевой базы требует согласованных действий специалистов разного профиля для производства высококачественной льняной продукции. О наличии потенциала и перспектив восстановления ключевых позиций на мировом рынке можно судить из сопоставления данных об основных производителях длинного льняного волокна в 2021 г. (рис. 1, а [1]) и льняных тканей в 2020 г. (рис. 1, б [2]).

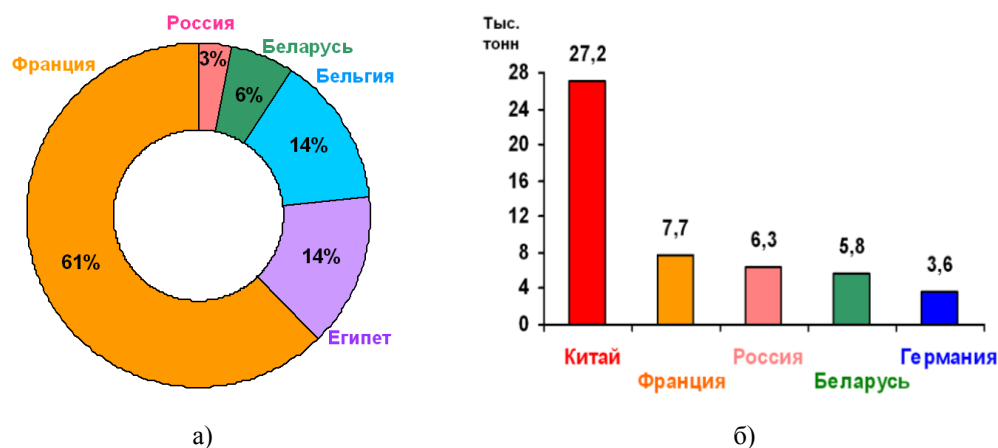


Рис. 1

Утратив позиции главного мирового поставщика льна, закрепившиеся за Россией на протяжении многих веков, наша страна и в настоящее время входит в тройку крупнейших производителей льняных полотен. Доля российской продукции в мировом выпуске тканей составляет более 9,2 %.

Льносодержащие ткани достаточно широко используются при производстве различных видов одежды. Однако в создании широкой продуктовой линейки с богатым разнообразием модельного ряда льняных изделий имеются объективные трудности, связанные с высоким уровнем жесткости льняного волокна [3...6]. Причем цикл пе-

реработки в текстильном производстве усугубляет проблему, и жесткость волокна повышается при глубоком извлечении гемицеллюлозных соединений [7]. Разветвленное строение макромолекул гемицеллюлоз обуславливает упругоэластичные свойства растительных тканей, что оправдывает существующее у биологов их наречение «мышцами» растений, обеспечивающими их устойчивость и восстановление при внешних воздействиях [8].

Использование льняных полотен с известными вариантами умягчающей отделки не решает проблему. Как показано нами ранее [9], для изделий платьево-блузоч-

ного ассортимента различных объемно-силуэтных решений требуемая величина жесткости материала на изгиб в разных конструктивных зонах варьирует в интервале от 1,1 до 32,4 мН/см². При этом исходная жесткость платьевых тканей может в полтора и более раза превышать значение верхней границы.

Обоснован новый подход к реализации зонированного мягчения льняных материалов, который может быть осуществлен в условиях малого швейного предприятия и предусматривает обработку полуфабрикатов изделия ферментными препаратами, воздействующими на макрофибриллы целлюлозы в периферийном слое первичной клеточной стенки льняного волокна [10]. Подбор ферментов для пространственно локализованного воздействия в структуре текстильного материала осуществляется с учетом экспериментально определяемых значений размера глобулы биокатализатора и прочности его адсорбционного связывания на твердофазном целлюлозном субстрате [11, 12]. Варьирование уровня каталитической активности целлюлаз в растворе, способа нанесения его на материал, а также подбор последовательности операций биообработки и стачивания деталей позволяют получать полуфабрикаты с заданными показателями деформационных свойств с учетом характеристик применяемых тканей [13].

Однако подразделение деталей на несколько групп для разных условий биообработки не позволяет обеспечить высокую дискретность эффектов мягчения. При создании группы комплектных изделий с применением одного материала необходимо максимально сокращать шаг варьирования жесткости, величина которого в идеальном варианте должна составлять менее 1 мН/см².

Предпосылкой решения указанных задач являются многочисленные сведения об эффективности комбинированного использования ферментативных и механических воздействий, например, в процессах переработки растительного сырья, фибрилляции волокон в древесной массе, выделения наноцеллюлозы или котонизации коротко-

го льняного волокна [14...17]. Несмотря на то, что исторически обработка целлюлазами (*biostouning*) стала альтернативой технологии "*stone washing*" (стирка с камнями) для депигментации джинсовых изделий, сегодня с целью умягчения материалов активно рекомендуются совмещенные воздействия, для реализации которых вместо пемзы предлагается использование «камней» из натуральных (косточки персика) или синтетических материалов [18].

Мягкость, как известно [19...21], является неотъемлемой характеристикой комфортности тканей с ворсовой фактурой. Но обычная выпускная форма льняных тканей не позволяет проводить формирование начесного ворса в связи с жесткостью элементарных волокон. Вместе с тем в [22] показано, что биомодификация делает возможным получение ворсовой фактуры. При этом под действием игольчатой гарнитуры на опорную поверхность полотна выдергиваются не кончики целостных волокон, а подвергнутые биодеструкции пучки целлюлозных фибрилл, что и обеспечивает формирование поверхностного ворсового застила. Однако данные об изменении жесткости льняных образцов после ворсования не приводятся.

Цель исследования состояла в изучении показателей жесткости и других ключевых технологических и потребительских свойств платьевых льняных тканей при реализации жидкостного способа градиентного мягчения, дополненного вариантами проведения биообработки в режиме «стирки с камнями» или одностороннего ворсования высушенных образцов.

Материалы и методы

Эксперимент проведен с использованием трех льняных тканей полотняного переплетения без умягчающей отделки, характеристики которых приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Ткань	Поверхностная плотность, г/м ²	Крутка пряжи К, круч./м	
		основа	уток
T1	124	523	695
T2	164	563	615
T3	228	746	682

Применяемый целлюлазный препарат в соответствии с рекомендациями [9] имеет следующие значения регламентируемых технологических характеристик: суммарный объем фракций с размером более 30 нм $V_m = 90\%$; константа адсорбции Генри $K_p = 0,44$ л/г. Каталитическая активность целлюлазы в растворах для всех экспериментов поддерживалась на постоянном уровне 30 ед/мл. Биомодификацию образцов осуществляли при неизменных значениях температуры раствора 40...45 °С и жидкостного модуля 40 с использованием трех технологических режимов:

1) реверсивная циркуляция раствора насосом в аппарате автоклавного типа [9];

2) в реакторе с вращающейся якорной мешалкой (10 об/мин) с введением в раствор керамических шариков (\varnothing 10 мм) для имитации эффекта "stone washing";

3) без гидродинамического воздействия; ручное ворсование высушенной ткани с изнаночной стороны: по 5 проходов ворсальной ленты ЛВС-6 в направлении нитей основы и нитей утка.

В нумерации испытуемых образцов указывается соответствующий номер режима обработки или цифра «0» для исходных льняных тканей.

Оценку технологических и потребительских свойств льняных материалов осуществляли с применением стандартных методов текстильного материаловедения:

- жесткость при изгибе консольным методом на приборе ПТ-2 (ГОСТ 10550-93);
- разрывная нагрузка методом одноосного растяжения (ГОСТ 3813-72);
- стойкость к истиранию по плоскости (ГОСТ 18976-73);
- гигроскопичность, капиллярность, водопоглощение и влагоотдача (ГОСТ 3816-81);
- теплопроводность методом ДСК (ГОСТ 57830-2017) с использованием дифференциального сканирующего калориметра с μ -сенсором DSC 204 F1 Phoenix;
- тепловое сопротивление на приборе ПТС-25 (ГОСТ 55858-2013).

Формуемость материалов определяли в соответствии с [23] по их способности повторять сферическую поверхность без заминов и складок.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 сопоставлены данные жесткости сравниваемых образцов тканей в направлении нагружаемых нитей основы и утка.

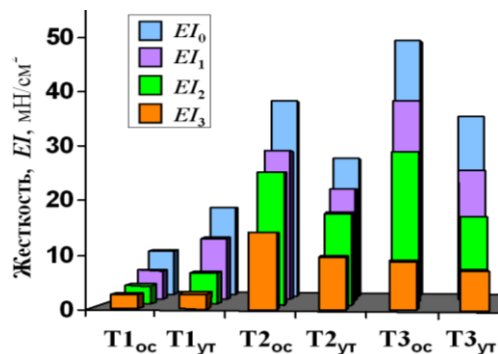


Рис. 2

Проведение ферментативной модификации в базовом режиме 1 обеспечивает относительное снижение показателя жесткости $\Delta EI_1 = (EI_0 - EI_1) / EI_0 \cdot 100\%$ на 23...37 %. В сопоставлении с данными табл. 1 можно заметить, что более высокий уровень исходного показателя EI_0 характерен для образца ткани с наибольшей поверхностной плотностью, а максимальная эффективность биомягчения (ΔEI_1) достигается для наиболее легких тканей.

Режим 2 дает дополнительную прибавку относительного снижения жесткости ($\Delta EI_2 - \Delta EI_1$) на 10...25 %. По-видимому, суммарный результат обусловлен не только фрикционным воздействием «камней» на опорную поверхность тканой структуры, но и локальными усилиями нажима, интенсифицирующими проникновение молекул биокатализатора в структуру нити.

Для режима 3 относительное снижение жесткости $\Delta EI_3 = (EI_0 - EI_3) / EI_0 \cdot 100\%$ превышает величину показателя ΔEI_1 для базового варианта биобработки в 1,9...3,3 раза, что на порядок превосходит эффективность использования режима "stone washing". Полученные результаты характеризуют возможности дополнительного расширения диапазона умягчающего воздействия, а также продуктивность применения дополнительной операции подворсовки для повышения дискретности вари-

рования жесткости определенных деталей в создаваемых моделях одежды.

Анализ вклада ворсования для отдельных групп нитей исследуемых образцов позволяет выявить приведенную на рис. 3 корреляцию между приращением изменений относительной жесткости ($\Delta EI_3 - \Delta EI_1$) и величиной показателя крутки (K).

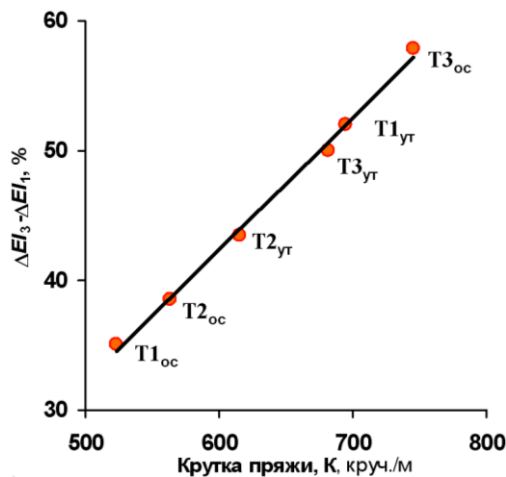


Рис. 3

Полученные экспериментальные данные с высоким уровнем адекватности аппроксимируются линейной зависимостью:

$$(\Delta EI_3 - \Delta EI_1) = -18,53 + 0,1015 \cdot K; R^2 = 0,9961. \quad (1)$$

Для понимания физического смысла полученного соотношения целесообразно зону механоферментативного расщепления волокон, выступающую на опорную поверхность ткани, уподобить гибкой цепке, благодаря которой остальные сегменты нити могут двигаться относительно друг друга. Из-за наличия крутки зона механи-

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ткань T1: } \Phi_{oc} = 21,33 - 4,55 \cdot \ln EI_{oc}; R^2 = 0,924; \Phi_{yt} = 24,81 - 4,11 \cdot \ln EI_{yt}; R^2 = 0,87. \\ \text{ткань T2: } \Phi_{oc} = 49,16 - 8,58 \cdot \ln EI_{oc}; R^2 = 0,981; \Phi_{yt} = 59,58 - 12,43 \cdot \ln EI_{yt}; R^2 = 0,958. \\ \text{ткань T3: } \Phi_{oc} = 78,91 - 17,36 \cdot \ln EI_{oc}; R^2 = 0,950; \Phi_{yt} = 63,8 - 15,67 \cdot \ln EI_{yt}; R^2 = 0,999. \end{array} \right. \quad (2)$$

Высокая степень аппроксимации экспериментальных данных подтверждает наличие корреляции между исследуемыми характеристиками материалов и для комбинированных способов умягчающей обра-

ботки. Однако имеющиеся результаты не позволяют проследить влияние структурных характеристик льняных тканей на улучшение их формуемости после модифицирующих воздействий. При этом измене-

ческого воздействия на нить постоянно смещается. Чем выше крутка, тем чаще между «жесткими» элементами системы появляются промежуточные зоны, обеспечивающие гибкость всей структуры.

Технологическая цель умягчающей отделки состоит в повышении способности материала деформироваться при создании объемной формы изделия. На рис. 4 продемонстрирована эффективность повышения показателя формуемости тканей ($\Phi, \%$) после модифицирующих обработок.

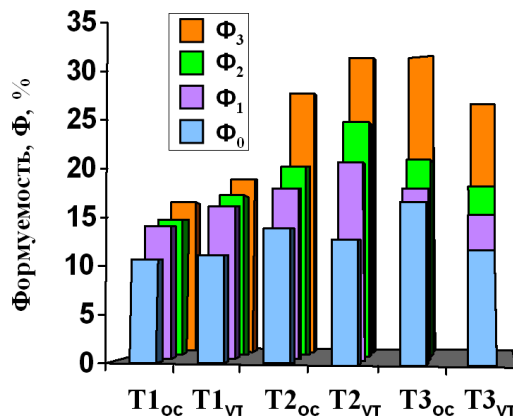


Рис. 4

Базовый режим воздействия целлюлаз увеличивает величину Φ в 1,1...1,65 раза; режим "stone washing" – в 1,3...2,0 раза. Нарастание показателя для 3-го режима обработки составляет 1,6...2,7 раза. Ранее [9] нами выявлено наличие обратной пропорциональной логарифмической зависимости $\Phi = f(-\ln EI)$. Вид соотношения соблюдается в совокупности частных решений для отдельных тканей с получением близких значений коэффициентов для обеих групп нагружаемых нитей:

ботки. Однако имеющиеся результаты не позволяют проследить влияние структурных характеристик льняных тканей на улучшение их формуемости после модифицирующих воздействий. При этом измене-

ния значений констант в системе уравнений (2) симбатны нарастанию поверхностной плотности ткани, что предопределяет

предпочтительный ассортимент льняных материалов для применения комбинированных умягчающих воздействий.

Таблица 2

Показатель, размерность	Величина показателя для образца ткани (режим обработки)												
	T1(0)	T1(1)	T1(2)	T1(3)	T2(0)	T2(1)	T2(2)	T2(3)	T3(0)	T3(1)	T3(2)	T3(3)	
Разрывная нагрузка Н	основа	196	198	195	188	225	229	226	212	321	323	319	308
	уток	207	208	206	199	216	218	215	207	291	291	289	278
Стойкость к истиранию, количество циклов		1750	1767	1762	1627	2325	2348	2336	2162	3652	3684	3661	3396
Гигроскопичность, %		9	10	10	11	7	8	8	10	10	11	11	13
Капиллярность, мм		103	107	109	122	95	104	106	120	113	119	122	135
Водопоглощение, %		55	59	60	73	45	51	53	70	57	60	64	95
Влагоотдача, %		4,2	4,3	4,3	8,3	3,3	3,4	3,3	6,9	5,2	5,1	5,3	11,1
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К		0,044	0,044	0,044	0,049	0,041	0,042	0,042	0,048	0,039	0,040	0,041	0,047
Коэффициент теплового сопротивления, м ² ·К/Вт		0,113	0,115	0,115	0,106	0,119	0,121	0,121	0,108	0,117	0,120	0,120	0,107

В табл. 2 сведены результаты оценки потребительских свойств исследуемых образцов. Как известно, высокая прочность и долговечность льняных тканей являются их важными отличительными характеристиками. Подбор целлюлазных препаратов в соответствии с критериями их молекулярного строения, обеспечивающими периферийное воздействие в первичной клеточной стенке элементарного волокна [11], надежно исключает потери механической прочности при использовании 1-го и 2-го режимов биомодификации. Имеется даже стабильная тенденция к небольшому повышению показателей разрывной нагрузки и стойкости к истиранию, что может быть связано с небольшим уплотнением материалов (технологическая усадка составляет 0,5...1,0 %) и снятием абразивных вкраплений производственных аппаратов в ходе умягчающей обработки.

Включение в технологический процесс стадии ворсования сопровождается понижением разрывной нагрузки на 3,8...5,8 % относительно уровня показателя для исходных тканей и не более 7,5 % в сравнении с базовым режимом биомодификации. Аналогичное снижение стойкости к истиранию на 6...8 % можно квалифицировать как технологически допустимые отклонения, не влияющие на срок эксплуатации изделия.

Незначительное ухудшение прочностных характеристик в полной мере компенсируется улучшением гигиенических свойств материалов, что имеет большое значение для изделий, контактирующих с телом человека. Совокупность полученных результатов демонстрирует, что при использовании 3-го режима биомодификации наблюдаются воспроизводимые эффекты, связанные с изменением состояния опорной поверхности ткани.

Формирование поверхностного слоя ворса ускоряет поглощение гигроскопической влаги в 1,2...1,4 раза и капиллярное впитывание в 1,2...1,3 раза. Примечательно, что наряду с увеличением показателя водопоглощения в 1,3...1,7 раза повышается и скорость влагоотдачи ворсованных материалов в 2...2,1 раза. В интенсификации массопереноса прослеживается влияние тех же факторов, что и в изменении параметров теплопередачи.

Для всех тканей при сравнении 1-го и 3-го вариантов умягчающей обработки зафиксировано воспроизводимое увеличение коэффициента теплопроводности в 1,11...1,21 раза и снижение в 1,08...1,12 раза показателя суммарного теплового сопротивления. Целесообразно обратить внимание на противоположное изменение теплового сопротивления при проведении ворсования хлопчатобумажной фланели. До

механической обработки величина коэффициента теплового сопротивления составляла $0,112 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, после ворсования увеличилась до $0,149 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. В данном случае снижение теплопроводности обусловлено увеличением содержания воздуха в формируемом слое начесного ворса. В противоположность этому подворсовка биомодифицированных льняных тканей не создает замкнутых воздушных пространств, увеличивая при этом площадь эффективной поверхности теплообмена.

Таким образом, полученные результаты позволяют в качестве преимуществ 3-го режима умягчающей обработки отметить улучшение микроклимата в пододежном пространстве за счет ускорения отведения влаги и устранения специфических ощущений холодной поверхности льняных тканей.

ВЫВОДЫ

Показана принципиальная возможность усиления эффектов жидкостного мягчения льняных полуфабрикатов специализированными целлюлазными препаратами в комбинации с приемами «стирки с камнями» или ворсования высушенного материала. Использование операции ворсования наряду с более легкой технической реализацией обеспечивает на порядок более существенное дополнительное снижение жесткости ткани, расширяя диапазон варьирования показателя в $1,9 \dots 3,3$ раза. Наиболее эффективно использование приема при работе с льняными полотнами повышенной поверхностной плотности. Выявлено и обосновано наличие корреляции между приростом в изменении жесткости и показателем крутки нагружаемой группы нитей тканого полотна.

Технологическую значимость используемых комбинированных воздействий демонстрирует дополнительное увеличение показателя формуемости материалов в $1,2$ раза для варианта «стирки с камнями» и в $1,45 \dots 1,64$ раза при проведении подворсовки. Анализ полученных корреляций между показателями формуемости и жесткости материалов свидетельствует о прогрессирующей эффективности обработки с ростом поверхностной плотности ткани.

Используемый режим «стирки с камнями» не вызывает дополнительных изменений прочностных и гигиенических свойств материалов. После ворсования технологически допустимые потери прочности на разрыв и на истирание не превышают $3,8 \dots 5,8 \%$ и $7,5 \%$ соответственно. При этом зафиксировано возрастание уровня гигроскопичности (до $1,4$ раза) и капиллярности (до $1,3$ раза) образцов. Увеличение показателя водопоглощения до $1,7$ раза наряду с 2-кратным нарастанием скорости влагоотдачи ворсованных материалов, а также дополнительный прирост коэффициента теплопроводности в $1,11 \dots 1,21$ раза при снижении в $1,08 \dots 1,12$ раза показателя суммарного теплового сопротивления свидетельствуют о повышении комфортности создаваемых моделей одежды из умягченных льняных полуфабрикатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Российский легпром: состояние в цифрах на 2023 год. Ключевые проблемы отрасли. – <https://dzen.ru/a/ZTC7hFjCUBbXUc-g> (дата обращения 18.01.2024).
2. Анализ мирового рынка льняных тканей в 2016-2020 гг., оценка влияния коронавируса и прогноз на 2021-2025 гг. – https://businessstat.ru/images/demo/woven_fabrics_of_flax_world_demo_businessstat.pdf?ysclid=lr18qbvalh313294885 (дата обращения 18.01.2024).
3. Смирнова Н.А., Лапшин В.В., Замышляева В.В., Хромеева И.А. Оценка способности льнохлопковых тканей к складкообразованию // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. 2021. № 4. С. 80...83. – https://doi.org/10.46418/0021-3489_2021_54_04_16.
4. Маринкина М.А., Чагина Л.Л., Смирнова Н.А. и др. Использование льна в трикотажных компрессионных изделиях спортивного назначения // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. 2020. № 3. С. 51...54. – https://doi.org/10.46418/0021-3489_2020_49_3_8
5. Зимица М.В., Груздева А.П., Чагина Л.Л. Методика исследования и прогнозирования характеристик жесткости при изгибе материалов для проектирования адаптивной одежды людей с ограниченными двигательными возможностями // Технологии и качество. 2021. Т. 54, № 4. С. 22...29. – <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-4-54-22-29>.
6. Акиндинова Т.Л., Лапшин В.В., Смирнова Н.А. и др. Прогнозирование упругих свойств бортовых тканей // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2020. № 1(38). С. 11...17. – <https://doi.org/10.24411/2079-7958-2020-13801>

7. Солодушенкова Т.С., Корнилова Н.Л., Кокшаров С.А., Радченко О.В. Влияние полимерных компонентов льняного волокна на жесткость тканого полотна // Изв. вузов. Технология текст. промышленности. 2022. № 4. С. 128...135. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_4_128
8. Gorshkova T., Chernova T., Mokshina N et al. Plant ‘muscles’: fibers with a tertiary cell wall // New Phytol. 2018, 218, 1. P. 66...72. – <https://doi.org/10.1111/nph.14997>
9. Алеева С.В., Радченко О.В., Кокишаров С.А. и др. Применение ферментативного смягчения в производстве льняных изделий платьево-блузочного ассортимента // Изв. вузов. Технология текст. промышленности. 2023. № 5. С. 155...163. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_2023_5_155
10. Koksharov S.A., Bikbulatova A.A., Kornilova N.L. et al. Justification of an approach to cellulases application in enzymatic softening of linen fabrics and clothing // Text. Res. J. 2022, 92, 21–22. P. 4208...4229. – <https://doi.org/10.1177/00405175221101018>
11. Алеева С.В., Лепилова О.В., Кокишаров С.А. и др. Ферментативная умягчающая обработка льняных изделий: воздействие целлюлаз в структуре набухшего волокна // Изв. вузов. Технология текст. промышленности. 2022. № 5. С. 126...134. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_5_126
12. Алеева С.В., Лепилова О.В., Кокишаров С.А. и др. Подбор целлюлаз для умягчающей обработки льняных изделий пропиткой растворами биопрепаратов // Изв. вузов. Технология текст. промышленности. 2022. № 6. С. 98...105. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_6_98
13. Солодушенкова Т.С., Корнилова Н.Л., Кокшаров С.А. и др. Влияние последовательности операций стачивания деталей и биообработки полуфабрикатов на жесткость льняной одежды // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2024. №1. С. 138...145.
14. Bychkov A., Podgorbunskikh E., Lomovsky O., Bychkova E. Current achievements in the mechanically pretreatment conversion of plant biomass // Biotechnology and Bioengineering. 2019, 116, 5. P. 1231...1244. – <https://doi.org/10.1002/bit.26925>.
15. Rahikainen J., Mattila O., Maloney T. et al. High consistency mechano-enzymatic pretreatment for kraft fibres: effect of treatment consistency on fibre properties // Cellulose. 2020, 27. P. 5311...5322. – <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03123-8>.
16. Aulitto M., Castaldo R., Avolio R. et al. Sustainable and green production of nanostructured cellulose by a 2-step mechano-enzymatic process // Polymers. 2023, 15, 5. 1115. <https://doi.org/10.3390/polym15051115>.
17. Карев А.С., Чешикова А.В., Белякова Т.Н. и др. Влияние влажности короткого льняного волокна на процесс ферментативно-механической котонизации // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2010. № 7. С. 34...37.
18. Ivedi I., Çay A. Use of natural and synthetic materials in denim washing process as an alternative to pumice stone // Textil ve konfeksiyon. 2022, 33, 1. P. 68...76. – <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.1076730>
19. Üdürücü N., Beşen B.S., Şerafettinoğlu S. Investigation of the effects of some pile yarn parameters on crucial properties of towels // The Journal of the Textile Institute. 2023, 115, 1. P. 1...8. – <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2193381>.
20. Luo Z., Xu W., Wu S. Performances of green velvet material (PLON) used in upholstered furniture // BioResources. 2023, 18, 3. P. 5108...5119. – <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.5108-5119>.
21. Камнева И.Н., Почанина У.Г., Денисова Д.Е. Анализ материалов для изготовления мягких игрушек в XX и XXI веке // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023, 5, № 2. С. 95...97. – <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-5-2-95-97>.
22. Алеева С.В., Кокишаров С.А. Оценка гигроскопических и теплофизических свойств льняных полотен с новыми эффектами ворсовой фактуры // Изв. вузов. Технология текст. промышленности. 2015. № 5. С. 43...47.
23. Kornilova N., Koksharov S., Arbuzova A. et al. Development of reinforced interlining materials to regulate elastic properties // Indian Journal of Fibre & Textile Research. 2017, 42, 2. P. 150...159.

REFERENCES

1. Russian light industry: the state in numbers for 2023. The key problems of the industry. – <https://dzen.ru/a/ZTC7hFjCUBbXUc-g> (accessed 18.01.2024).
2. Analysis of the global linen market in 2016-2020, assessment of the impact of coronavirus and forecast for 2021-2025. – https://businessstat.ru/images/demo/woven_fabrics_of_flax_world_demo_businessstat.pdf?ysclid=lr8q6valh313294885 (accessed 18.01.2024).
3. Smirnova N.A., Lapshin V.V., Zamyshlyayeva V.V., Khromeeva I.A. Assessment of the ability of flax-cotton fabrics to the formation of folds // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Legkoi Promyshlennosti. 2021, 54, 4. P. 80...83. – https://doi.org/10.46418/0021-3489_2021_54_04_16.
4. Marinkina M., Chagina L., Smirnova N. et al. The use of flax in knit compression products sporting destination // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Legkoi Promyshlennosti. 2020, 49, 3. P. 51...54. – https://doi.org/10.46418/0021-3489_2020_49_3_8.
5. Zimina M.V., Gruzdeva A.P., Chagina L.L. Methodology for the study and prediction of stiffness characteristics during bending trials for the design of adaptive clothing for people with motor disabilities // Technologies & Quality. 2021, 54, 4. P. 22...29. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2021-4-54-22-29>.
6. Akindinova T.L., Lapshin V.V., Smirnova N.A. et al. Prognosis of elastic properties of stiffening fabrics // Bulletin of the Vitebsk State Technological University. 2020, 38, 1. P. 11...17. – <https://doi.org/10.24411/2079-7958-2020-13801>
7. Solodushenkova T.S., Kornilova N.L., Koksharov S.A. et al. Influence of linen fiber polymeric components on the rigidity of woven fabric // Izvestiya

Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022, 400, 4. P. 128...135. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_4_128.

8. Gorshkova T., Chernova T., Mokshina N. et al. Plant 'muscles': fibers with a tertiary cell wall // *New Phytol.* 2018, 218, 1. P. 66...72. – <https://doi.org/10.1111/nph.14997>

9. Aleeva S.V., Radchenko O.V., Koksharov S.A. et al. The use of enzymatic softening in the production of linen dresses and blouses // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2023, 407, 5. P. 155...163. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_2023_5_155.

10. Koksharov S.A., Bikbulatova A.A., Kornilova N.L. et al. Justification of an approach to cellulases application in enzymatic softening of linen fabrics and clothing // *Text. Res. J.* 2022, 92, 21-22. P. 4208...4229. – <https://doi.org/10.1177/00405175221101018>.

11. Aleeva S.V., Lepilova O.V., Koksharov S.A. et al. Enzymative softening treatment of linen products: The impact of cellulases in the structure of a sweet fiber // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2022, 401, 5. P. 126...134. – http://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_5_126

12. Aleeva S.V., Lepilova O.V., Koksharov S.A. et al. Selection of cellulases for impregnation of linen textile to perform the softening treatment // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2022, 402, 6. P. 98...105. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_6_98.

13. Solodushenkova T.S., Kornilova N.L., Koksharov S.A. et al. The impact of the sequence of parts stitching and bio-processing of semi-finished products on the stiffness of linen garment // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2024, 1. P. 138...145.

14. Bychkov A., Podgorbunskikh E., Lomovsky O., Bychkova E. Current achievements in the mechanically pretreatment conversion of plant biomass // *Biotechnology and Bioengineering.* 2019, 116, 5. P. 1231...1244. – <https://doi.org/10.1002/bit.26925>.

15. Rahikainen J., Mattila O., Maloney T. et al. High consistency mechano-enzymatic pretreatment for kraft fibres: effect of treatment consistency on fibre

properties // *Cellulose.* 2020, 27. P. 5311...5322. – <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03123-8>.

16. Aulitto M., Castaldo R., Avolio R. et al. Sustainable and green production of nanostructured cellulose by a 2-step mechano-enzymatic process // *Polymers.* 2023, 15, 5. 1115. – <https://doi.org/10.3390/polym15051115>.

17. Karev A.S., Cheshkova A.V., Belyakova T.N. et al. The effect of moisture content of short flax fiber on the process of enzymatic-mechanical cottonization // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2010, 328, 7. P. 34...37.

18. Ivedi I., Çay A. Use of natural and synthetic materials in denim washing process as an alternative to pumice stone // *Textil ve konfeksiyon.* 2022, 33, 1. P. 68...76. – <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.1076730>

19. Üdürgücü N., Beşen B.S., Şerafettinoğlu S. Investigation of the effects of some pile yarn parameters on crucial properties of towels // *The Journal of the Textile Institute.* 2023, 115, 1. P. 1...8. – <https://doi.org/10.1080/00405000.2023.2193381>.

20. Luo Z., Xu W., Wu S. Performances of green velvet material (PLON) used in upholstered furniture // *BioResources.* 2023, 18, 3. P. 5108...5119. – <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.5108-5119>.

21. Kamneva I.N., Pochanina U.G., Denisova D.E. Analysis of materials for the manufacture of soft toys in the XX and XXI century // *International Journal of Humanities and Natural Sciences.* 2023, 5, 2. P. 95...97. – <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-5-2-95-97>.

22. Aleeva S.V., Koksharov S.A. Evaluation hygroscopic and thermal properties of linen fabric with new effects nap textures // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2015, 359, 5. P. 43...47.

23. Kornilova N., Koksharov S., Arbuzova A. et al. Development of reinforced interlining materials to regulate elastic properties // *Indian Journal of Fibre & Textile Research.* 2017, 42, 2. P. 150...159.

Рекомендована НОЦ «Центр компетенций текстильной и легкой промышленности» ИВГПУ. Поступила 08.02.24.