УДК 687.03+677.027.6
DOI 10.47367/0021-3497_2026_3_173

БИОМЯГЧЕНИЕ И НЕСМИНАЕМАЯ ОТДЕЛКА ДЕТАЛЕЙ ЛЬНЯНОЙ ОДЕЖДЫ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ИОНОМЕРОВ*

BIO-SOFTENING AND ANTICREASE FINISH OF LINEN CLOTHING PARTS: THE DISPERSION EFFICIENCY OF POLYURETHANE IONOMERS

Ю.А. ШАММУТ, С.В. ШИПОВА, С.А. КОКШАРОВ, Н.Л. КОРНИЛОВА

Yu.A. SHAMMUT, S.E. SHIPOVA, S.A. KOKSHAROV, N.L. KORNILOVA

(Ивановский государственный политехнический университет)

(Ivanovo State Polytechnic University)

E-mail: shammut@yandex.ru

Создание экологичных методов снижения жесткости и сминаемости материалов является актуальным трендом повышения качества льняной одежды. В статье исследована возможность совмещения операций ферментативного мягчения деталей одежды и противосминаемой обработки с помощью водных полиуретановых дисперсий. Использование препаратов Аквапол 11 и Аквапол 12 в выпускной форме осложнено проявлением их пленкообразующей способности и понижением эффективности биомягчения. Анализ распределения частиц по размерам, проведенный методом динамического рассеяния света, показал наличие в дисперсиях крупных ассоциированных фракций, которые не способны проникать в структуру волокна и полимеризуются на его поверхности. Для эффективного уменьшения размера частиц полимера авторами определены условия кратковременного ультразвукового воздействия. Результаты технологических экспериментов позволили описать влияние концентрации активированных препаратов на изменение несминаемости льняных тканей в сухом и мокром состоянии. Дополнительное диспергирование многократно интенсифицирует переход отделочного препарата из раствора вглубь волокна. Необходимая концентрация препаратов в технологическом растворе понижается в 2 раза. Комбинированная модификация льняных тканей способствует снижению изгибной жесткости в 2,7…3,5 раза и повышению формуемости материалов в 1,3…1,7 раза без ухудшения прочностных характеристик.

The creation of eco-friendly methods for reducing the stiffness and crease of materials is an urgent trend in improving the quality of linen clothing. The article explores the possibility of combining the operations of enzymatic softening of clothing parts and anti-crease treatment using aqueous polyurethane dispersions. The use of Aquapol 11 and Aquapol 12 preparations in commercial form is complicated by the manifestation of their film-forming ability and a decrease in the effectiveness of bio-softening. The particle size distribution in the preparations was analyzed using the dynamic light scattering method. The results confirm the presence of large associated fractions in the dispersions, which do not penetrate the fiber structure and polymerize on its surface. To effectively reduce the polymer particle size, the authors determined the conditions for short-term ultrasonic

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-29-00078, https://rscf.ru/project/25-29-00078/. В работе использована приборная база ЦКП “Верхневолжский региональный центр физико-химических исследований”.

exposure. The results of technological experiments made it possible to describe the effect of the concentration of activated preparations on the change of crease resistance of tissues in dry and wet state. Additional dispersion repeatedly intensifies the transfer of the polymer from the solution deep into the fiber. The required concentration of the finishing agent in the process solution is reduced by half. The combined modification of linen fabrics helps to reduce bending stiffness by 2.7−3.5 times and increase the formability of materials by 1.3−1.7 times without deterioration in strength characteristics.

Ключевые слова: льняная одежда, биомягчение полуфабрикатов, водные полиуретановые дисперсии, изгибная жесткость, сминаемость.

Keywords: linen clothing, bio-softening of semi-finished products, aqueous polyurethane dispersions, bending stiffness, creasability.

Для текстильной продукции наиболее значимыми показателями ее соответствия требованиям безопасности потребителей считаются показатели химической токсичности и механической прочности [1]. Вместе с тем, по мнению специалистов [2…4], среди двух десятков потребительских свойств материалов наиболее распространенным дефектом, проявляющимся при эксплуатации одежды, является сминаемость. Образование складок и морщин является естественной реакцией материалов на действие деформаций изгиба и сжатия. При этом изделия из натуральных волокон обладают крайне низкой способностью восстанавливать форму после смятия, и в первую очередь это характерно для льняных тканей. Достаточно один раз сесть, чтобы идеально выглаженная льняная одежда потеряла эстетичный внешний вид. Проблему усугубляют трудно устраняемые замины после машинной стирки льняных изделий [5]. Кроме того, устойчивость к смятию (несминаемость) является одним из факторов, определяющих износостойкость продукции, поскольку нежелательные складки ускоряют износ материала на сгибах [6].

Практикуемые в настоящее время неэкологичные способы снижения сминаемости с применением сшивающих препаратов на N-метилольной основе, которые сопряжены с существенной потерей механической прочности продукции из хлопка [7], малопригодны для обработки льняных материалов, прежде всего, в связи с дополнительным повышением их жесткости [8]. Вместе с тем изначально высокая природная жесткость льняного волокна обусловливает технологические трудности в процессе изготовления одежды и ухудшает характеристики ее тактильного комфорта [9, 10]. Это объясняет повышенное внимание исследователей к разработке экологичных методов умягчения и повышения несминаемости льняных материалов [11]. Большие усилия направлены на получение эффектов несминаемости с помощью бесформальдегидных препаратов [12, 13].

При постановке задач данного исследования учтены противоречивые сведения о возможности эффективного снижения сминаемости целлюлозных материалов с помощью полиуретановых (ПУ) дисперсий [14…16] при наличии данных о недостаточном уровне показателей несминаемости тканей при обработке отечественными ПУ-препаратами марки Аквапол [17]. Обладая хорошей пленкообразующей способностью, эти препараты широко применяются в качестве связующего при колорировании пигментными красителями [18].

В предыдущем сообщении [19] по результатам ИК-спектроскопии и ДСК-анализа мы продемонстрировали принципиальное отличие процесса пленкообразования препаратов Аквапол 11 и Аквапол 12 от их поведения в условиях модификации льняного волокна целлюлолитическими ферментами. Результаты свидетельствуют,

что биокатализируемый разрыв гликозидной связи в макромолекулах целлюлозы инициирует взаимодействие между образующимися концевыми звеньями пиранозы и аминогруппами ПУ. Данное обстоятельство позволяет реализовать совмещенный процесс энзимного мягчения и несминаемой отделки льняных материалов [20]. При этом установлено, что препарат Аквапол 12 обеспечивает выход на требуемый уровень несминаемости в сухом и мокром состоянии при более низких концентрациях благодаря меньшему размеру частиц в сравнении с Аквaполом 11. Вместе с тем оба препарата содержат значительное количество крупноразмерных фракций, не проникающих в структуру волокна и полимеризующихся на поверхности материала, что понижает эффективность ферментативного мягчения.

Цель исследования состояла в оценке влияния дополнительной ультразвуковой (УЗ) обработки на размерные параметры ПУ-дисперсий и изменение упругодеформационных свойств биомодифицируемых льняных полуфабрикатов.

Материалы и методы

Для получения результатов, сопоставимых с предыдущим исследованием [20], эксперименты проведены с использованием тех же партий льняных тканей полотняного переплетения без умягчающей отделки с обозначениями ЛТ1 и ЛТ2, а также водных ПУ-дисперсий анионного типа Аквапол 11 (А11) и Аквапол 12 (А12) (производитель ООО "НПП "Макромер" им. В.С. Лебедева", г. Владимир). Техническая характеристика исходного состояния объектов приведена в цитируемом сообщении.

Диспергирование коммерческих образцов ПУ-дисперсий осуществляли на ультразвуковом дезинтеграторе УЗДН-2Т при частоте 22 кГц и подводимой мощности 53,6 Вт/см^3. Время УЗ-обработки варьировали в интервале до 10 с. Обработку осуществляли с охлаждением реакционной емкости на ледяной бане.

Анализ размера частиц в гидрозолях ПУ-дисперсий с разбавлением до концентрации 0,05 г/л осуществляли методом фотонной корреляционной спектроскопии на анализаторе Zetasizer Nano ZS. Временной интервал между УЗ-обработкой и анализом растворов составлял 60 мин, что соответствует длительности подготовки технологических растворов для проверки очередного технологического варианта модифицирующей обработки льняных тканей.

Описание процедур жидкостного варианта ферментативного мягчения тканей с применением специализированного целлюлазного препарата и комбинированной обработки в присутствии сопоставляемых образцов ПУ-дисперсий приведено в [20].

Изменение технологических свойств льняных материалов оценивали в соответствии с принятыми методами текстильного материаловедения:

- жесткость при изгибе консольным методом на приборе ПТ-2 (ГОСТ 10550-93);
- несминаемость по углу восстановления складки в сухом и мокром состоянии на приборе СМТ (ГОСТ 19204-73);
- разрывную нагрузку и разрывное удлинение методом одноосного растяжения (ГОСТ 3813-72);
- стойкость к истиранию по плоскости (ГОСТ 18976-73);
- формуемость по способности материалов повторять сферическую поверхность без заминов и складок [21].

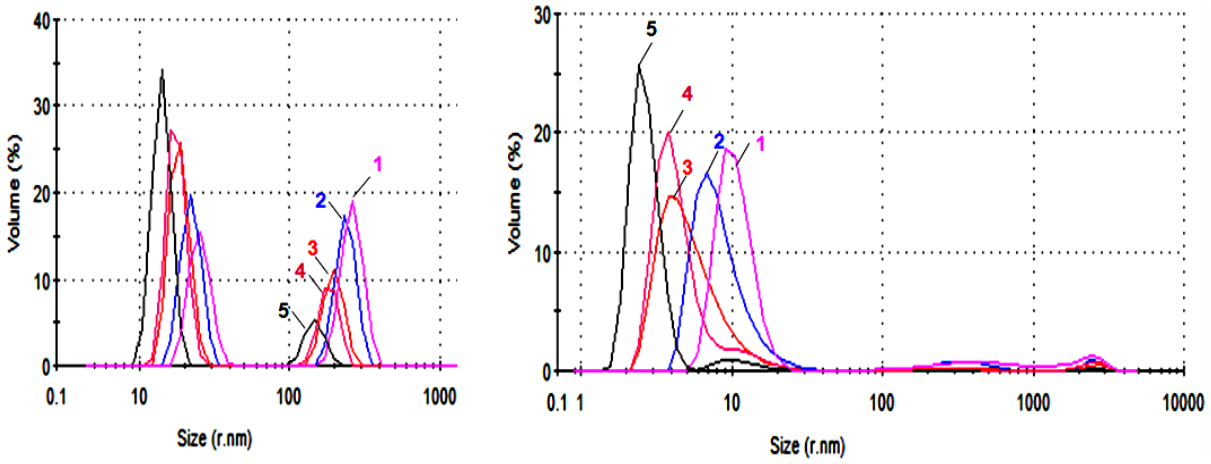
Результаты и обсуждение

В макромолекулах ПУ-иономеров в большом количестве содержатся амидные (-CONH-), уретановые (-COONH-) и мочевинные (-NHCONH-) группировки, которые способны к образованию межмолекулярных водородных связей [22]. Это обусловливает наличие в коммерческих препаратах укрупненных ассоциированных частиц, которые могут быть разрушены при подборе условий диспергирующего воздействия. Вместе с тем именно благодаря формированию плотной сетки множественных водородных связей между прилегающими макромолекулярными цепями происходит отверждение полимера с образованием монолитной пленки.

Использование воздействий УЗ-кавитации для дополнительного диспергирования ПУ-иономеров необходимо осуществлять с предельной осторожностью, поскольку при

избыточном подводе энергии, несмотря на применение внешнего охлаждения, в системе возможно протекание коагуляционных процессов. Экспериментально установлено, что для исследуемых растворов объемом 25 мл коагуляция инициируется при длительности УЗ-обработки свыше двадцати секунд.

На рис. 1 сопоставлены диаграммы распределения относительного объема дисперсной фазы (Volume) в препаратах А11 (а) и А12 (б) по размеру частиц (r) в выпускной коммерческой форме полиуретановых иономеров (кривые 1), а также после УЗ-воздействия в течение 2, 5, 7 и 10 с (кривые 2, 3, 4 и 5 соответственно).



а) б)

Рис. 1

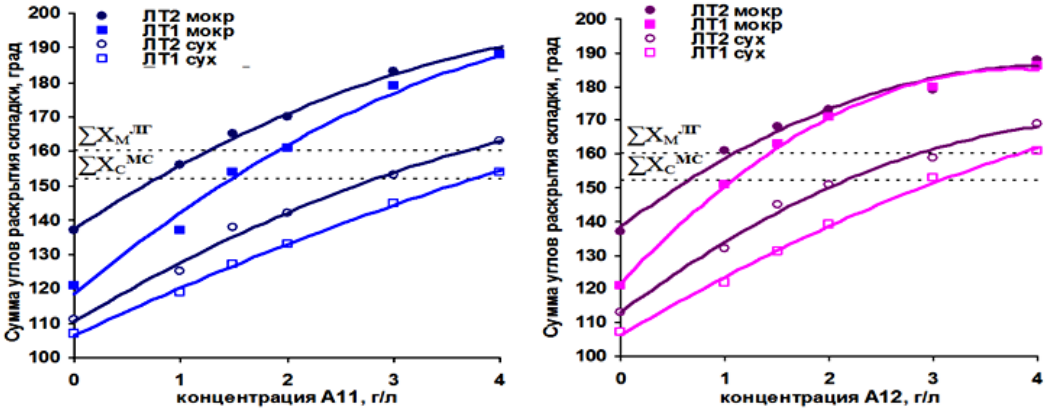
Используемый вариант жидкостной обработки льняных материалов с длительным их пребыванием в большом объеме технологического раствора (жидкостный модуль 1:40) предполагает набухание элементарных волокон с увеличением поперечных размеров внутриволоконных мезопоровых пространств до 30…35 нм [23…25]. В этих условиях лишь 40% суммарного объема дисперсной фазы в исходной форме препарата А11 обладает потенциальной способностью к проникновению вглубь волокна. Крупные ассоциаты с размером более 150 нм (свыше 55% объема дисперсной фазы) могут дислоцироваться лишь в межволоконных и межнитяных пространствах, формируя поверхностную пленку, что и лежит в основе закрепления красящего вещества при использовании препарата в процессах пигментной печати.

УЗ-обработка А11 позволяет уменьшить содержание крупноразмерных ассоциатов до 47,5% и 14,1% соответственно при минимальной и максимальной длительности воздействия. При этом диспергированию поддается и группа слабо ассоциированных фракций полимера. Положение их моды пошагово смещается от исходной величины 25,4 нм к следующим значениям: 21,9 нм → 18,9 нм → 16,3 нм → 14,1 нм. Уровень диспергирования препарата А11 можно признать достаточным при длительности воздействия 5 с – более 70% частиц имеют размеры, подходящие для диффузии в структуру волокна.

В коммерческой форме препарата А12 более 85% относительного объема дисперсной фазы приходится на доминирующую фракцию частиц с размерами от 5,8 до 21,9 нм, способных проникать в поры волокна. Вместе с тем в препарате присутствуют фракции крупных ассоциатов и агломератов с размерами до 3,2 мкм. Несмотря на немногочисленность, их неблагоприятное влияние может проявляться в блокировании входа в капиллярную систему набухших волокон. По-видимому, с этим обстоятельством связан выявленный в [20] затухающий вид зависимости изменения показателей несминаемости льняных тканей с ростом концентрации А12.

Как свидетельствуют данные рис. 1, б, двухсекундной УЗ-обработки А12 достаточно для 2-кратного снижения относительного объема микрометровых фракций, что подтверждает превалирующую роль донорно-акцепторных взаимодействий в структуре агломератов. Измельчению поддается также и группа малоразмерных фракций. Пик среднего размера частиц последовательно смещается от исходной величины 9,1 нм к следующим значениям: 6,8 нм → 3,8 нм → 3,8 нм → 2,4 нм. После 10-секундной УЗ-обработки 95% относительного объема дисперсной фазы А12 приходится на неассоциированную форму.

На рис. 2 проиллюстрирована эффективность УЗ-диспергирования препаратов А11 и А12 в течение пяти и двух секунд соответственно в виде концентрационных зависимостей изменения показателей суммарного угла восстановления складки в сухом ($\sum X_C$) и мокром ($\sum X_M$) состоянии льняных тканей. Сопоставимые условия проведения экспериментов обеспечивают возможность сравнения диаграмм с приведенными в [20] аналогичными зависимостями для вариантов обработки тканей с применением исходных ПУ-дисперсий.



а) б)

Рис. 2

Начальные значения при нулевой концентрации ПУ-дисперсий отражают уровень несминаемости контрольных образцов тканей, подвергнутых базовому варианту ферментативного мягчения. Эти данные совпадают с характеристиками умягченных тканей, которые приведены в [20].

Наиболее показательной реакцией на предобработку ПУ-дисперсии является изменение характера концентрационных зависимостей для препарата А11. При использовании А11 в выпускной форме, в отличие от диаграмм для А12, кривые нарастания значений $\sum X_C$ и $\sum X_M$ имеют вид обратной параболы с медленным ростом на начальном участке концентраций препарата до 3 г/л [20]. В данном случае уменьшение размера частиц А11 до размеров, сопоставимых с диаметром внутриволоконных поровых пространств, способствует интенсификации межфазного переноса полимера из объема технологического раствора. В результате оба ПУ-препарата в диспергированной форме по мере увеличения их концентрации дают прирост показателей несминаемости по параболической зависимости.

Совместный анализ результатов для обеих тканей с учетом соответствующих исходных значений суммарного угла раскрытия складки в сухом ($\sum X_C^0$) и мокром ($\sum X_M^0$) состоянии позволяет описать влияние концентрации препаратов (C_{A11} и C_{A12}, г/л) следующими уравнениями:

Аквапол 11:

$$\Sigma X_C = \Sigma X_C^0 + 17{,}56 \cdot C_{A11} - 1{,}12 \cdot C_{A11}^2 \; ; \; R^2 = 0{,}9752,$$

$$\Sigma X_M = \Sigma X_M^0 + 26{,}42 \cdot C_{A11} - 2{,}36 \cdot C_{A11}^2 \; ; \; R^2 = 0{,}9587.$$

Аквапол 12:

$$\Sigma X_C = \Sigma X_C^0 + 20{,}42 \cdot C_{A12} - 1{,}69 \cdot C_{A12}^2 \; ; \; R^2 = 0{,}958,$$

$$\Sigma X_M = \Sigma X_M^0 + 19{,}29 \cdot C_{A12} - 1{,}85 \cdot C_{A12}^2 \; ; \; R^2 = 0{,}9479.$$

Множитель при линейном члене уравнений характеризует динамику начального увеличения показателей несминаемости на диаграммах рис. 2. Целесообразно провести сравнение аппроксимирующих функций с аналогичными корреляционными соотношениями для совмещенной обработки тканей с применением ПУ-препаратов в выпускной форме [20]. Несложно убедиться, что после УЗ-обработки А12 величина данного множителя возрастает в 1,6 раза для зависимости $\sum X_C = f(C_{A12})$ и 1,4 раза для $\sum X_M = f(C_{A12})$, а применение диспергированной формы препарата А11 повышает начальный темп нарастания $\sum X_C$ и $\sum X_M$ соответственно в 16,6 и 5,9 раза.

По требованиям ГОСТ 15968-2014 норматив несминаемости для льняных тканей в сухом состоянии (отделка МС – малосминаемая) составляет не менее 42%; в мокром состоянии (отделка ЛГ – "легкое глажение") – не менее 45%. В соответствии с этим штриховые линии на рис. 2 отражают минимальные уровни суммарного угла раскрытия складки в сухом $\sum X_C^{МС}$ и мокром $\sum X_M^{ЛГ}$ виде. Их пересечение с кривыми аппроксимации экспериментальных значений наглядно отражает необходимое содержание диспергированных ПУ-препаратов в технологических растворах для обеспечения соответствующего вида противосминаемой обработки.

Благодаря улучшенной выбираемости диспергированных препаратов из объема технологического раствора в структуру волокна эффект "легкого глажения" льняных материалов достигается при очень невысоких значениях концентрации отделочного раствора. Выход на уровень $\sum X_M^{ЛГ}$ будет гарантирован при C_{A11} = 2 г/л и C_{A12} =1,5 г/л. Для соответствия критериям отделки МС потребуется выход на равновесное поглощение вдвое бóльших количеств ПУ-дисперсий, но это в свою очередь в 2 раза меньше необходимого содержания отделочных препаратов в выпускной форме, что выгодно не только из экономических соображений, но и в связи с улучшением ряда потребительских характеристик модифицированных льняных материалов.

В таблице суммированы результаты анализа технологических свойств исследуемых тканей после проведения базового варианта жидкостной умягчающей биообработки без применения отделочных препаратов (см.: концентрация 0) и для вариантов комбинированной модификации с указанием количества активированных ПУ-дисперсий, обеспечивающего достижение уровня отделки МС.

Таблица 1

Ткань	ПУ-дисперсия (концентрация)	Система нитей	Жесткость, $EI \pm 0,5$ мН·см^2	Формуемость, Ф ± 1,0; %	Разрывная нагрузка, Р ± 0,5 кГс	Разрывное удлинение, L ± 1,5 %	Стойкость к истиранию, СИ ± 25, циклы
ЛТ1	(0)	основа	10,1	23,2	44,0	18,7	1625
		уток	5,7	24,3	34,5	22,5	
	А11 (4 г/л)	основа	12,5	22,7	43,5	19,4	1735
		уток	6,5	23,7	34,0	22,9	
	А12 (3 г/л)	основа	11,1	23,1	44,0	20,6	1680
		уток	6,2	24,3	34,5	24,2	
ЛТ2	(0)	основа	3,6	20,7	43,5	23,7	1705
		уток	15,2	21,2	53,5	17,4	
	А11 (3 г/л)	основа	4,5	20,6	44,0	22,8	1805
		уток	16,9	20,2	52,5	18,0	
	А12 (2,5 г/л)	основа	4,1	20,6	44,5	23,7	1795
		уток	16,0	21,6	53,5	17,7	

Примечание. Значения показателей для образцов тканей в исходном состоянии (основа/уток):
ЛТ1 – EI = 33,1/18,2 мН/см^2; Ф = 15,4/18,3 %; Р = 47,0/35,5 кГс; L = 17,4/21,3 %; СИ = 1650 циклов;
ЛТ2 – EI = 14,5/45,7 мН/см^2; Ф = 11,9/15,4 %; Р = 45,5/56,0 кГс; L = 21,9/14,9 %; СИ = 1735 циклов.

Сопоставление с базовым вариантом ферментативного мягчения подтверждает, что использование для совмещенной технологии диспергированных форм ПУ-препаратов сопровождается менее критичным понижением умягчающего эффекта. Величина показателя *EI* прирастает лишь в 1,05…1,25 раза, в то время как проявление пленкообразующей способности ассоциированных фракций в составе исходных ПУ-дисперсий обусловливало получение 1,5…2-кратных различий в уровне жесткости модифицированных материалов [20].

Пользуясь указанными в примечании к таблице значениями физико-механических свойств исходных тканей, легко убедиться, что итоговый уровень показателя *EI* после совмещенной отделки образцов снижается в 2,7…3,5 раза. Введение в структуру волокна диспергированных ПУ-препаратов практически не изменяет достигаемое в результате мягчения улучшение технологичности материалов для создания пространственной формы швейных изделий. Показатель формуемости модифицированных образцов возрастает в 1,3…1,7 раза.

Для предлагаемых режимов совмещенной обработки не наблюдается компенсирующего влияния ПУ-дисперсий на величину разрывных характеристик, что регистрировали как результат поверхностного пленкообразования ассоциированных фракций в составе исходных препаратов [20]. Достигаемое понижение механической прочности всецело будет определяться свойствами используемого целлюлазного препарата и глубиной биокатализируемого воздействия в структуре клеточной стенки волокна [25]. В данном эксперименте снижение разрывной нагрузки не превышает 7,5% при наличии выраженной тенденции к возрастанию разрывного удлинения (на 4…21%) и стойкости к истиранию (на 2…5%) относительно величины показателей для исходных тканей.

ВЫВОДЫ

Подтверждена возможность дополнительного диспергирования препаратов Аквапол 11 и Аквапол 12 с использованием ультразвуковой (УЗ) обработки. По данным анализа размера частиц методом фотонной корреляционной спектроскопии определена длительность УЗ-воздействия для интенсификации проникновения препаратов в поровые пространства льняного волокна, набухающего в технологическом растворе при проведении умягчающей обработки материалов льняной одежды.

Повышение выбираемости волокном диспергированной формы Аквапола 12 ускоряет нарастание показателей несминаемости тканей в сухом и мокром состоянии в 1,6 и 1,4 раза в сравнении с откликами на увеличение концентрации исходного препарата. Диспергирование Аквапола 11 обеспечивает повышение начального темпа нарастания несминаемости сухой ткани в 16,6 раза, а увлажненных образцов в 5,9 раза. Как следствие, выход на нормативный уровень показателей для отделки МС (несминаемая) и ЛГ (легкое глажение) достигается при 2-кратном снижении содержания препаратов в технологическом растворе.

Предупреждение поверхностного пленкообразования, характерного для применения исходной формы полиуретановых дисперсий, минимизирует потерю эффектов ферментативного умягчения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мактуф М., Абулмаджид Е., Матискова З. и др.* Пересмотр деликатного права в контексте некачественной текстильной продукции и безопасности потребителей // Изв. вузов. Технология текст. промышленности. 2025. № 2. С. 121…128. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_2025_2_121.

2. *Tukhanova V.Yu., Tikhonova T.P.* Engineering confectioning of materials for garments // Eur. J. Nat. Hist. 2017. № 1. P. 55…59. – https://world-science.ru/ru/article/view?id=33699.

3. *Hu X., Sun F., Qicai W., Gao W.* In situ characterization of the morphological wrinkling of woven fibrous materials by a mechanical test // Text. Res. J. 2020. 90. 17-18. 004051752091070. – https://doi.org/10.1177/0040517520910709.

4. *Hesarian M.S., Tavoosi J.* Smooth appearance analysis of the finished cotton fabric affected by structural parameters based on Hopfield neural network // JTI. 2021. 113. 2. P. 1…11. – https://doi.org/10.1080/00405000.2021.2016146.

5. *Arslan M.H., Göcek I., Açıkgöz H. et al.* A novel algorithm for easy-care laundering of linen fabrics: A cleaner solution to the wrinkling problem during care // Text. Res. J. 2015. 86. 10. P. 1097…1108. – https://doi.org/10.1177/0040517515603811.

6. *Bukhonka N.P.* Experimental study of structural characteristics, dimensional change in washing, non-creasing properties and air permeability of Swiss double piqué flax knit fabrics // JEFF. 2023. 28. 12. P. 1…20. – https://doi.org/10.1177/15589250231181701.

7. *Ho L.-Y., Kan C.-W.* Effect of resin finishing on some properties of 100% cotton light weight woven fabric // Coatings. 2022. 12. 11. 1791. – https://doi.org/10.3390/coatings12111791.

8. *Tufail T., Naeem F., Asim F.* Effect of crosslinking agents on the strength characteristics of cellulosic fabrics using 23 32 mixed level factorial // Pigm. Resin Technol. 2021. 50. 4. P. 319…330. – https://doi.org/10.1108/PRT-06-2020-0062.

9. *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.

10. *Harwood J., McCormick P., Waldron D. et al.* Evaluation of flax accessions for high value textile end uses // Ind. Crops. Prod. 2008. 27. 1. P. 22…28. – https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.06.004.

11. *Dalbaşı E., Kayseri G.* A research on the comfort properties of linen fabrics subjected to various finishing treatments // J. Nat. Fibers. 2019. 18. 2. P. 1…14. – https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1675210.

12. *Farzana N., Haque A.N., Islam A. et al.* Comparative enactment of formaldehyde-free and formaldehyde-based cross-linkers on cotton woven fabrics // Tekstilec. 2017. 60. 2. P. 107…115. – https://doi.org/10.14502/Tekstilec2017.60.107-115.

13. *Wang J., Fang K., Liu X. et al.* A review on the status of formaldehyde-free anti-wrinkle cross-linking agents for cotton fabrics: Mechanisms and applications // Ind. Crop. Prod. 2023. 200. 116831. – https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116831.

14. *Luo X., Cheng P., Wang W. et al.* Established an eco-friendly cotton fabric treating process with enhancing anti-wrinkle performance // J. Eng. Fibers Fabr. 2021. 16. 155892502110034. – https://doi.org/10.1177/15589250211003454.

15. *Ясинская Н.Н., Скобова Н.В.* Особенности процесса сушки текстильных материалов с полиуретановым покрытием // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. 2022. Т. 58, № 4. С. 10…13. – https://doi.org/10.46418/0021-3489_2022_58_04_02.

16. *Ghonia J.R., Savani N.G., Prajapati V.S. et al.* A review on polyurethane based multifunctional materials synthesis for advancement in textile coating applications // J. Polym. Res. 2024. 31. 3. 95. – https://doi.org/10.1007/s10965-024-03941-5.

17. *Захарченко А.С., Алешина А.А., Козлова О.В.* Изучение свойств пленкообразующих полимеров, используемых в отделке текстильных материалов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 55, № 3. С. 87…91.

18. *Мищенко А.В., Мищенко Е.В., Ткач В.А. и др.* Особенности применения полиуретановых иономеров в качестве связующих пигментных печатных составов // Вестник ВГТУ. 2018. Т. 35. № 2. С. 84…94. – https://doi.org/10/24411/2079-7958-13509.

19. *Алеева С.В., Шипова С.Е., Шаммут Ю.А. и др.* Изучение превращений полиуретановых иономеров в процессе биомягчения материалов льняной одежды // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2025. Т. 68. № 7. С. 125…137. – https://doi.org/10.6060/ivkkt.20256808.7205.

20. *Шаммут Ю.А., Шипова С.Е., Корнилова Н.Л., Кокшаров С.А.* Совмещение операций биомягчения и уменьшения сминаемости материалов льняной одежды // Изв. вузов. Технология текст. промышленности. 2025. № 6. С. 205…215. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_2025_6_205.

21. *Kornilova N., Koksharov S., Arbuzova A. et al.* Development of reinforced interlining materials to regulate elastic properties // Indian J. Fibre Text. Res. 2017. 42. 2. P. 150…159. – https://doi.org /10.56042/ijftr.v42i2.7430.

22. *Евсюкова Н.В., Коваленко Г.М., Бокова Е.С.* Исследование полиуретановых водных дисперсий марки Аквапол® для производства искусственных кож // Пластические массы. 2021. № 5-6. С. 36…39. – https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-5-6-36-39

23. *Алеева С.В., Лепилова О.В., Кокшаров 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.

24. *Dutta S.K., Chakraborty S.* Pore-scale dynamics of enzyme adsorption, swelling and reactive dissolution determine sugar yield in hemicellulose hydrolysis for biofuel production // Sci Rep. 2016. 6. 38173. – https://doi.org/10.1038/srep38173.

25. *Алеева С.В., Шаммут Ю.А., Корнилова Н.Л.* Оценка преобразований в структуре волокна при биомягчении материалов льняной одежды // Изв. вузов. Технология текст. промышленности. 2025. № 3. С. 192…204. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_2025_3_192.

R E F E R E N C E S

1. *Maktoof M.A., Abdulmajeed E.N., Matiskova Z., et al.* Revisiting tort law in the context of defective textile products and consumer safety // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2025, 416, 2. P. 121…128. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_2025_2_121.

2. *Tukhanova V.Yu., Tikhonova T.P.* Engineering confectioning of materials for garments // Eur. J. Nat. Hist. 2017, N 1. P. 55…59. – https://world-science.ru/ru/article/view?id=33699. .

3. *Hu X., Sun F., Qicai W., Gao W.* In situ characterization of the morphological wrinkling of woven fibrous materials by a mechanical test // Text. Res. J. 2020, 90, 17-18, 004051752091070. – https://doi.org/10.1177/0040517520910709.

4. *Hesarian M.S., Tavoosi J.* Smooth appearance analysis of the finished cotton fabric affected by structural parameters based on Hopfield neural network // JTI. 2021, 113, 2. P. 1…11. – https://doi.org/10.1080/00405000.2021.2016146.

5. *Arslan M.H., Göcek I., Açıkgöz H. et al.* A novel algorithm for easy-care laundering of linen fabrics: A cleaner solution to the wrinkling problem during care // Text. Res. J. 2015, 86, 10. P. 1097…1108. – https://doi.org/10.1177/0040517515603811.

6. *Bukhonka N.P.* Experimental study of structural characteristics, dimensional change in washing, non-creasing properties and air permeability of Swiss double piqué flax knit fabrics // JEFF. 2023, 28, 12. P. 1…20. – https://doi.org/10.1177/15589250231181701.

7. *Ho L.-Y., Kan C.-W.* Effect of resin finishing on some properties of 100% cotton light weight woven fabric // Coatings. 2022, 12, 11, 1791. – https://doi.org/10.3390/coatings12111791.

8. *Tufail T., Naeem F., Asim F.* Effect of crosslinking agents on the strength characteristics of cellulosic fabrics using 23 32 mixed level factorial // Pigm. Resin Technol. 2021, 50, 4. P. 319…330. – https://doi.org/10.1108/PRT-06-2020-0062.

9. *Solodushenkova T.S, Kornilova N.L., Koksharov S.A., Radchenko O.V.* Influence of linen fiber polymeric compnents 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

10. *Harwood J., McCormick P., Waldron D. et al.* Evaluation of flax accessions for high value textile end uses // Ind. Crops. Prod. 2008, 27, 1. P. 22…28. – https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.06.004.

11. *Dalbaşı E., Kayseri G.* A research on the comfort properties of linen fabrics subjected to various finishing treatments // J. Nat. Fibers. 2019, 18, 2. P. 1…14. – https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1675210.

12. *Farzana N., Haque A.N., Islam A. et al.* Comparative enactment of formaldehyde-free and formaldehyde-based cross-linkers on cotton woven fabrics // Tekstilec. 2017. 60. 2. P. 107…115. – https://doi.org/10.14502/Tekstilec2017.60.107-115.

13. *Wang J., Fang K., Liu X. et al.* A review on the status of formaldehyde-free anti-wrinkle cross-linking agents for cotton fabrics: Mechanisms and applications // Ind. Crop. Prod. 2023, 200, 116831. – https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116831.

14. *Luo X., Cheng P., Wang W. et al.* Established an eco-friendly cotton fabric treating process with enhancing anti-wrinkle performance // J. Eng. Fibers Fabr. 2021. 16. 155892502110034. – https://doi.org/10.1177/15589250211003454.

15. *Yasinskaya N.N., Skobova N.V.* Study of the technological process of drying in the formation of textile materials with polyurethane coating // Technology of Light Industry. The News of higher educational institutions. 2022, 58, 4. P. 10…13. – https://doi.org/10.46418/0021-3489_2022_58_04_02.

16. *Ghonia J.R., Savani N.G., Prajapati V.S. et al.* A review on polyurethane based multifunctional materials synthesis for advancement in textile coating applications // J. Polym. Res. 2024, 31, 3, 95. – https://doi.org/10.1007/s10965-024-03941-5.

17. *Zakharchenko A.S., Alyoshina A.A., Kozlova O.V.* Studying the properties of film-forming polymers used in the decoration of textile materials // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2012, 55, 3. P. 87…91.

18. *Mishchenko A., Mishchenko E., Tkach V. et al.* Features of the application of polyurethane ionomers as binders in pigment compositions for printing // Bulletin VSTU. 2018, 35, 2. P. 84…94. – https://doi.org/10/24411/2079-7958-13509.

19. *Aleeva S.V., Shipova S.E., Shammut Yu.A. et al.* Study of polyurethane ionomers transformations in the bio-softening of materials for linen clothing // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2025, 68, 7. P. 125…137. – https://doi.org/10.6060/ivkkt.20256808.7205.

20. *Shammut Yu.A., Shipova S.E., Kornilova N.L., Koksharov S.A.* Combining bio-softening of linen clothing materials and increasing crease-resistance operations // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2025, 420, 6. P. 205…215. https://doi.org/10.47367/0021-3497_2025_6_205.

21. *Kornilova N., Koksharov S., Arbuzova A. et al.* Development of reinforced interlining materials to regulate elastic properties // Indian J. Fibre Text. Res. 2017, 42, 2. P. 150…159. – https://doi.org/10.56042/ijftr.v42i2.7430.

22. *Evsyukova N.V., Kovalenko G.M., Bokova E.S.* Investigation of polyurethane water dispersions of the Aquapol® brand for the production of artificial leather // Plasticheskie massy. 2021. N 5-6. P. 36…39. – https://doi.org/10.35164/0554-2901-2021-5-6-36-39

23. *Aleeva S.V., Lepilova O.V., Koksharov S.A. et al.* Enzymative softening treatment of linen products: the impact of cellulases in the swollen fiber structure // 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.

24. *Dutta S.K., Chakraborty S.* Pore-scale dynamics of enzyme adsorption, swelling and reactive dissolution determine sugar yield in hemicellulose hydrolysis for biofuel production // Sci Rep. 2016, 6, 38173. – https://doi.org/10.1038/srep38173.

25. *Aleeva S.V., Shammut Yu.A., Kornilova N.L.* Evaluation of transformations in the fiber structure during bio-softening of linen clothing materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2025, 417, 3. P. 192…204. – https://doi.org/10.47367/0021-3497_ 2025_3_192.

Рекомендована НОЦ "Центр компетенций текстильной и легкой промышленности" ИВГПУ. Поступила 16.09.25.