

## МЕТОД ЖИДКОСТНОГО БИОМЯГЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЛЬНЯНОЙ ОДЕЖДЫ: РОЛЬ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ТКАНЕЙ

### METHOD OF LIQUID BIOSOFTENING OF LINEN CLOTHING MATERIALS: THE ROLE OF FABRIC SURFACE DENSITY

Ю.А. ШАММУТ, С.В. АЛЕЕВА, Н.Л. КОРНИЛОВА

Yu.A. SHAMMUT, S.V. ALEEVA, N.L. KORNILOVA

(Ивановский государственный политехнический университет)

(Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo)

E-mail: shammut@yandex.ru

*Анализ поясной одежды разных объемно-силуэтных форм позволил оценить отличия требуемых уровней жесткости материалов на участках изделия. Льняные ткани обладают избыточной жесткостью и низкой формуемостью. Пригодность материалов к образованию формы снижается по мере увеличения их поверхностной плотности. Вариант жидкостного мягчения полуфабрикатов швейного изделия реализован в аппарате автоклавного типа с реверсивной циркуляцией раствора адсорбирующихся целлюлаз с размером глобулы более 30 нм. Расширенные испытания проведены с использованием пяти льняных тканей с поверхностной плотностью  $MA = 120...230 \text{ г/м}^2$ . Результаты сопоставлены с данными предыдущей оценки эффективности мягчения легких тканей с  $MA = 70...90 \text{ г/м}^2$ . Оценено влияние активности целлюлаз в растворе в диапазоне 20...40 ед./мл на изменение жесткости при изгибе и формуемости тканей, а также жесткости мест ниточных соединений с разной конструкцией шва. Массив экспериментальных данных отражает притормаживание умягчающего действия адсорбирующихся целлюлаз в структуре тканей с большей толщиной. Получены обобщенные модели регулируемого мягчения деталей и узлов изделия и повышения их формуемости с учетом поверхностной плотности ткани. Выявленные соотношения позволяют подбирать условия биомягчения полуфабрикатов из всего ассортимента льняных тканей для получения требуемого уровня жесткости на участках создаваемых моделей одежды.*

*The analysis of waist wears of different volumetric and silhouette shapes allowed to assess the differences in the required levels of stiffness of materials in different zones of the product. Linen fabrics have excessive rigidity and low formability. Suitability of materials for shape formation decreases as their surface density increases. The fluid softening version of semi-finished garments is implemented in an autoclave-type apparatus with reversible circulation of a solution of sorption-active cellulases with a molecule size of more than 30 nm. Extended tests were carried out using five linen fabrics with a areal density  $MA = 120...230 \text{ g/m}^2$ . The results were compared with the data of the previous assessment of the effectiveness of softening of light tissues ( $MA = 70...90 \text{ g/m}^2$ ). The effect of cellulose activity in solution in the range of 20...40 units/ml on the change in bending stiffness and formability of tissues, as well as the stiffness of thread seams with different signs, was estimated. The experimental data array reflects the slowing down of the softening effect of adsorbed cellulases in the structure of tissues with a greater*

*thickness. Generalized models of adjustable softening of parts and assemblies of the product and increasing their formability, taking into account the density of the fabric, are obtained. The revealed ratios make it possible to select the conditions for bio-softening semi-finished products from the entire range of linen fabrics to obtain the required level of rigidity in the areas of the created clothing models.*

**Ключевые слова:** льняная одежда, биомягчение полуфабрикатов, активность целлюлазы, поверхностная плотность ткани, жесткость при изгибе, формуемость.

**Keywords:** linen clothing, bio-softening of semi-finished products, cellulose activity, areal density of fabric, bending stiffness, formability.

Успех коммерческой деятельности швейных предприятий во многом определяется темпами обновления выпускаемой продукции в соответствии с требованиями моды. Оперативность и качество разработки изделий зависит от подбора материала и его способности воспроизводить задуманные дизайнером модельные и конструктивные особенности одежды. В англоязычной литературе пригодность материала к пошиву характеризуется термином *tailorability* – адаптируемость (технологичность), т. е. способность тканей в результате кроя и стачивания деталей принимать форму в соответствии с определенным стилем одежды и параметрами фигуры [1]. В создании одежды, отвечающей запросам потребителя, большое значение имеет возможность модифицирования материалов, чтобы их свойства соответствовали создаваемым объемно-силуэтным решениям [2]. Начиная с работ Пирса [3], наиболее важной характеристикой при выборе ткани считается показатель жесткости при изгибе [4]. Этот фактор непосредственно влияет на возможность образования объемной формы и ее устойчивость к деформациям [5].

Повышенные трудности возникают при создании облегчающих моделей одежды из льняных тканей в связи с отмечаемой многими исследователями, например [6, 7], природной грубостью льняного волокна. Жесткость льняных материалов снижается в результате извлечения связующих веществ из структуры льняных комплексов в процессах подготовки волокна к прядению и отбеливания тканей [8, 9]. Вместе с тем

льняные полотна даже после прохождения полного цикла подготовки и крашения сохраняют высокий уровень жесткости, достигающий  $50 \text{ мН/см}^2$  и более [10]. В немалой степени этому способствует преимущественно применяемое в льноткачестве полотняное переплетение, характеризующееся наибольшей устойчивостью к механическим деформациям [11, 12].

Известны варианты улучшения адаптируемости и сенсорной комфортности льняных тканей при проведении умягчающей отделки с применением неионогенных и катионных смягчителей, силиконовых или ферментных препаратов, а также комбинированных воздействий [7, 13...15]. Однако наряду с низкой ценностью отделки для потребителя в связи с вымыванием химических смягчителей в процессах стирки предварительное смягчение тканей не улучшает их пошивочные свойства. В этом случае также не устраняются основные трудности получения объемной формы изделия, поскольку на разных его участках требуются материалы с существенно различающимся уровнем жесткости. Ранее показано [16], что в конструкции женского платья разных объемно-силуэтных форм требуемая величина показателя жесткости материалов ( $EI$ ) варьирует в диапазоне от 1,1 до  $32,4 \text{ мН/см}^2$ . В дополнение к этому проиллюстрируем предпочтительные характеристики свойств материалов на разных участках поясной одежды согласно схеме их распределения на передних ( $\Pi_i$ ) и задних ( $Z_i$ ) полотнищах изделий (рис. 1).

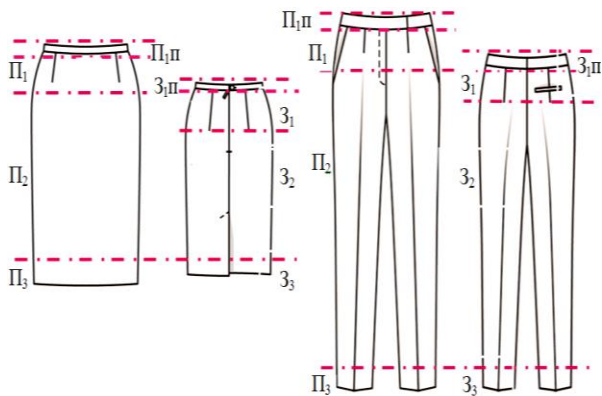


Рис. 1

В табл. 1 приведены диапазоны значений жесткости соответствующих зон  $EI_3$  с учетом подразделения объемно-силуэтных форм создаваемых изделий по степени пластичности и объемности формы. Рекомендации получены на основании результатов исследования разных моделей одежды из шерстяных, хлопчатобумажных и смесовых материалов, адаптируемость которых считается эталонной.

Т а б л и ц а 1

Условная зона изделия	Величина показателя $EI_3$ (мН·см <sup>2</sup> ) для вариантов пластичности и объемной формы изделия								
	мягкопластичная			мягкофиксированная			каркасная		
	большая	умеренная	малая	большая	умеренная	малая	большая	умеренная	малая
П <sub>1</sub> ; З <sub>1п</sub>	5,5-9,0	3,4-6,2	2,3-4,2	9,9-16,6	6,9-13,9	4,8-8,5	22,0-35,1	16,1-26,3	11,0-17,5
П <sub>2</sub> ; З <sub>2</sub>	2,5-5,0	1,7-3,0	1,1-2,0	5,1-8,5	3,6-6,8	2,1-4,5	10,1-20,0	7,6-15,0	5,1-10,0
П <sub>3</sub> ; З <sub>3</sub>	3,4-6,3	2,1-3,9	1,4-2,5	7,0-11,5	5,0-8,5	2,7-5,8	13,5-27,5	9,6-19,0	6,4-13,0

Величина показателя  $EI_3$  в зонах свободного падения материалов (П<sub>2</sub>; З<sub>2</sub>) в 1,5...2 раза ниже диапазона значений для зоны опорной поверхности (П<sub>1</sub>; З<sub>1п</sub>) и в 1,2...1,4 раза меньше соответствующих параметров для зоны низа (П<sub>3</sub>; З<sub>3</sub>). При этом уменьшение объемности модели потребует 2-кратного снижения величины  $EI_3$  в каждой из зон, а последовательный переход от каркасной формы к мягкопластичному варианту возможен при снижении жесткости соответствующих участков в 3...4 раза. Лишь жесткость деталей пояса (П<sub>1п</sub> и З<sub>1п</sub>) практически не зависит от свойств основной ткани и объемно-силуэтных решений, поскольку придается с помощью дополнительных материалов (прокладки, корсажная лента), обеспечивающих необходимое сопротивление растяжению по длине и смятию по ширине.

Широкие возможности для варьирования упругодеформационных свойств материалов в конструкции изделия открываются при реализации развиваемых нами технологических подходов к изготовлению предметов льняной одежды с применением биохимического мягчения отдельных деталей кроя и узлов перед проведением

операций окончательной сборки и формообразования [17]. Метод предполагает использование особых целлюлазных препаратов, действие которых в структуре элементарного льняного волокна ограничивается тонким периферийным слоем первичной клеточной стенки без повреждения целлюлозы во вторичной клеточной стенке [18]. Критериями подбора ферментов являются характеристики их адсорбционного связывания на твердофазном субстрате и размер глобулы с учетом изменения диаметра внутриволоконных поровых пространств при маломодульном нанесении растворов биопрепарата либо биообработке в большом объеме жидкости, обеспечивающем развитие поровой системы в результате набухания волокна (жидкостной метод) [19...20].

Для жидкостной биообработки легких плательных тканей с поверхностной плотностью менее 100 г/м<sup>2</sup> выявлена зависимость влияния активности биопрепарата на изменение жесткости материала [21]:

$$EI_s = EI_0(1 - 0,0059A - 0,0002A^2), (1)$$

где  $EI_0$  и  $EI_S$  – величина жесткости исходной и умягченной ткани,  $\text{мН}\cdot\text{см}^2$ ;  $A$  – величина каталитической активности целлюлаз в растворе, ед./мл.

Практическая значимость уравнения (1) связана с подбором условий последовательных обработок разных деталей края для постепенного понижения эффективности их мягчения с учетом истощения раствора ферментов на предыдущей стадии.

Предпосылкой для дальнейшего развития исследований являются многочисленные сведения о влиянии плотности текстильных полотен на их механические свойства и формообразующую способность [22, 23], а также на изменение доступности волокна для реагентов, в частности красителей [24]. Логично допустить, что при переходе от модификации легких плательных и сорочечных тканей к более тяжелому костюмному ассортименту необходима будет корректировка условий ферментативного воздействия, что требует восполнения отсутствующих знаний о действии адсорбирующихся целлюлаз в структуре плотных текстильных материалов.

Цель работы состояла в изучении закономерностей повышения адаптируемости материалов льняной одежды при реализации жидкостного способа биомягчения полуфабрикатов для расширенной группы тканей с разной поверхностной плотностью.

#### Материалы и методы

В экспериментах использованы пять льняных тканей полотняного переплетения без умягчающей отделки, характеристики которых приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Ткань	Поверхностная плотность $M_A \pm 2$ ; г/м <sup>2</sup>	Системы нитей	Жесткость $EI_0 \pm 0,5$ ; $\text{мН}\cdot\text{см}^2$	Формуемость $F_0 \pm 0,7$ ; %
ЛТ1	124	основа	9,1	18,7
		уток	18,1	15,1
ЛТ2	147	основа	28,9	12,5
		уток	21,2	14,4
ЛТ3	164	основа	40,2	10,3
		уток	28,3	12,7
ЛТ4	182	основа	39,3	11,9
		уток	41,0	11,2
ЛТ5	228	основа	52,7	9,8
		уток	36,8	12,2

Для обработки льняных образцов применяли целлюлазный препарат с рекомендованными [19] значениями регламентированных характеристик: константа адсорбции Генри  $K_p = 0,44$  л/г; содержание фракций с размером частиц более 30 нм – 90%.

Содержание биопрепарата в растворах оценивается показателем каталитической активности целлюлазы ( $A$ , ед./мл), который определяли по скорости образования глюкозы при гидролизе фильтровальной бумаги [25]. Две полоски субстрата размером 1×6 см помещали в пробирки. В одну добавляли 10 мл ферментного раствора, в другую – 10 мл 0,05 М ацетатного буфера (рН 5). Пробирки термостатировали при 50 °С в течение 60 мин, после чего из каждой пробирки отбирали по 1 мл раствора и определяли в них содержание редуцирующих сахаров по методу Нельсона-Шомоди. Единица активности соответствует количеству фермента, которое за 1 ч освобождает из субстрата 1 мкмоль эквивалентов глюкозы. Уровень активности целлюлазы в рабочих растворах варьировали в интервале от 20 до 40 ед./мл с шагом 5 ед./мл.



Рис. 2

Модификацию образцов осуществляли в аппарате автоклавного типа, схема которого приведена в работе [21], а внешний вид изображен на рис. 2. Обработка проводилась с реверсивной циркуляцией раствора в течение 40 мин при температуре 45 °С и величине жидкостного модуля 40.

Для стачивания образцов применяли универсальную швейную машину челночного стежка DDL 8700 JUKI. Швы разных конструкций выполнены хлопколавсановыми нитками №44ЛХ; тип стежка – стачивающий челночный, частота – 4 стежка/см.

Эффективность модификации льняных материалов оценивали по величине показателя жесткости при изгибе консольным методом на приборе ПТ-2 (ГОСТ 10550-93). Результаты анализа для удобства их математической обработки представлены в размерности мН·см<sup>2</sup>. Формуемость материалов определяли в соответствии с запатентованной методикой [26] по их способно-

сти повторять без заминов и складок сферическую поверхность радиусом 10 см.

Математическая обработка экспериментальных данных проведена с помощью аппарата многофакторных линейных регрессий на базе программы Statgraphics PLUS 2000 Professional.

#### Результаты и обсуждение

В табл. 3 представлены результаты экспериментального определения жесткости умягченных образцов льняных тканей ( $EI_S^A$ ) при соответствующих значениях активности раствора биопрепарата в диапазоне  $A = 20 \dots 40$  ед./мл.

Таблица 3

Ткань	Системы нитей	$EI_S^{20}$ , мН·см <sup>2</sup>			$EI_S^{25}$ , мН·см <sup>2</sup>			$EI_S^{30}$ , мН·см <sup>2</sup>			$EI_S^{35}$ , мН·см <sup>2</sup>			$EI_S^{40}$ , мН·см <sup>2</sup>		
		$\delta(1)$ , %	$\delta(2)$ , %	$\delta(2)$ , %	$\delta(1)$ , %	$\delta(2)$ , %	$\delta(2)$ , %	$\delta(1)$ , %	$\delta(2)$ , %	$\delta(2)$ , %	$\delta(1)$ , %	$\delta(2)$ , %	$\delta(2)$ , %	$\delta(1)$ , %	$\delta(2)$ , %	
ЛТ1	основа	7,2	1,4	-1,4	6,5	1,5	-1,5	5,6	3,4	-3,6	4,6	4,7	-4,3	3,5	4,3	-2,7
	уток	14,3	1,4	-0,7	12,8	3,1	-1,6	11,0	3,5	-1,8	9,0	5,0	-2,2	7,0	4,4	-2,6
ЛТ2	основа	23,5	-1,3	0,4	21,9	-4,1	-1,4	19,6	-5,1	-2,6	19,0	-16,8	0,5	13,7	-6,6	-2,2
	уток	17,2	-1,2	0,6	16,2	-4,9	-2,5	14,2	-4,2	-1,4	12,4	-6,4	-3,2	10,2	-7,9	-3,9
ЛТ3	основа	33,3	-3,3	0,9	31,0	-2,6	0,6	29,6	-12,8	1,4	24,0	-8,3	2,5	22,5	-20,9	-2,7
	уток	23,4	-3,0	0,9	22,0	-6,4	-1,4	20,9	-12,9	5,7	17,5	-11,4	-1,1	14,5	-13,1	1,4
ЛТ4	основа	32,8	-4,0	2,1	30,6	-6,5	1,9	27,8	-9,0	2,5	25,1	-14,3	1,6	22,3	-22,0	0,9
	уток	34,5	-4,6	1,1	32,2	-7,5	0,9	29,5	-10,5	1,0	26,2	-14,1	1,9	23,2	-21,6	1,3
ЛТ5	основа	47,0	-10,0	-1,1	43,5	-12,0	1,1	39,4	-14,0	4,7	36,1	-14,9	5,3	33,8	-30,8	2,1
	уток	33,5	-11,9	-3,0	29,7	-9,8	3,4	28,6	-17,1	0,7	26,2	-15,3	1,1	23,7	-31,2	1,7

Для всех вариантов обработки по уравнению (1) определены расчетные значения жесткости образцов  $EI_S^{\text{расч}}$  с оценкой величины относительного отклонения расчетных и эмпирических данных  $\delta(1) = (EI_S^{\text{расч}} - EI_S^A) / EI_S^A \cdot 100\%$ . В табл. 3 величина  $\delta(1)$  указана справа от соответствующего экспериментального значения  $EI_S^A$ . Отрицательный знак при  $\delta(1)$  отражает заниженный уровень расчетных параметров жесткости. Величина отклонения нарастает при последовательном переходе от ткани ЛТ1 к ЛТ5 симбатно повышению поверхностной плотности (см. табл. 1). Прирост  $\delta(1)$  увеличивается также и с нарастанием концентрации фермента в растворе. Фиксируемое отставание изменений эмпирических данных однозначно свидетельствует об усилении стерических затруднений для равномерного распределения целлюлаз в структуре более плотных текстильных материалов.

Математическая обработка массива новых данных в совокупности с представленными в [21] результатами модификации легких тканей с  $M_A = 70 \dots 90$  г/м<sup>2</sup> позволила получить следующий вид корреляционной зависимости  $EI_S = f(A)$ , учитывающей торможение умягчающего действия адсорбирующихся целлюлаз при нарастании поверхностной плотности ткани:

$$EI_S = EI_0 \left( 1 - 0,732 \frac{A}{M_A} - 0,031 \frac{A^2}{M_A} \right). \quad (2)$$

Высокий уровень адекватности описания экспериментальных данных с помощью откорректированной формулы демонстрируют представленные в табл. 3 величины относительного отклонения  $\delta(2)$ . В большинстве случаев погрешность расчетного определения эффективности мягчения не превышает 5%, что подтверждает хорошую прогностическую способность урав-

нения (2) для всего ассортимента льняных тканей.

Основополагающей характеристикой пригодности ткани к пошиву специалисты считают ее формовочную способность [27]. В табл. 4 проиллюстрировано изменение показателя формуемости умягченных тканей  $F_S^A$  при соответствующих значениях ферментативной активности. Сравнение с уровнем показателя для исходных тканей  $F_0$  (см. табл. 1) свидетельствует о синхронном увеличении прироста показателя с 1,4...1,6 раза при  $A = 20$  ед./мл до 1,9...2,3 раза при  $A = 40$  ед./мл.

Т а б л и ц а 4

Ткань	Системы нитей	Формуемость, %				
		$F_S^{20}$	$F_S^{25}$	$F_S^{30}$	$F_S^{35}$	$F_S^{40}$
ЛТ1	основа	28,9	31,4	33,0	34,5	36,9
	уток	24,6	27,9	29,9	32,3	34,8
ЛТ2	основа	20,7	22,4	25,1	26,5	28,3
	уток	23,2	24,3	27,1	28,1	29,2
ЛТ3	основа	18,5	21,4	22,8	24,5	25,8
	уток	21,1	22,9	23,8	25,3	26,4
ЛТ4	основа	19,2	21,7	22,7	23,7	24,4
	уток	17,3	20,7	22,0	23,0	23,7
ЛТ5	основа	14,8	17,8	20,5	20,9	21,5
	уток	16,6	20,4	21,9	22,2	22,7

Примечателен эффект повышения адаптируемости материалов, зафиксированный для неравноплотных тканей ЛТ1, ЛТ3 и ЛТ5. В исходных образцах показатели формуемости в продольном (основа) и поперечном (уток) направлениях различаются в 1,23...1,24 раза. После мягчения различие сокращается до 1,12...1,17 раза при  $A = 20$  ед./мл и практически нивелируется после обработки в растворе с максимальной активностью целлюлаз.

В работе [21] обосновано наличие обратно пропорциональной логарифмической зависимости между показателями формуемости и жесткости умягченных тканей. Расширенный массив экспериментальных данных позволяет уточнить характер зависимости и вычленить вклад поверхностной плотности материала. Изменение прироста формуемости биомодифицированных образцов относительно уровня исходного по-

казателя ( $\Delta F = F_S - F_0$ ) адекватно описывается корреляционным уравнением:

$$\Delta F = 239 + 124,6 \ln(EI_S/EI_0) / \sqrt{M_A}; R^2 = 0,890. \quad (3)$$

Логично, что в полученном выражении разность логарифмов преобразуется в логарифм отношения значений жесткости для умягченного и исходного материалов.

При проектировании модели швейного изделия необходимо учитывать, что уровень жесткости участка зависит не только от свойств материала, но и от количества и характеристик мест ниточных соединений деталей. Согласно [28] показатель жесткости узла швейного полуфабриката ( $EI_y$ ,  $\text{мН}\cdot\text{см}^2$ ) может быть определен исходя из параметров ткани на данном участке и совокупности характеристик швов:

$$EI_y = \frac{EI_T \cdot S_T + \sum EI_{ш} \cdot S_{ш}}{100}, \quad (4)$$

где  $EI_T$  – среднее значение жесткости ткани в направлении основы и утка,  $\text{мН}\cdot\text{см}^2$ ;  $S_T$  – доля площади участка без швов, %;  $EI_{ш}$  – величина жесткости шва определенной конструкции,  $\text{мН}\cdot\text{см}^2$ ;  $S_{ш}$  – доля площади участков со швами, %.

Величина показателя  $EI_{ш}$  в умягченных материалах зависит от последовательности выполнения операций биообработки и стачивания деталей [28]. Учитывая литературные сведения об уменьшении влияния на жесткость шва свойств соединяемых тканей по мере увеличения их плотности [29], важно оценить влияние фактора  $M_A$  на изменение упругодеформационных характеристик ниточного соединения деталей для различных вариантов мягчения полуфабрикатов.

Для расширенных исследований выбраны 4 вида швов, конструктивные параметры которых и уровень жесткости образцов из исходных неумягченных тканей приведены в табл. 5. В работе [16] предложено подразделение конструкции швов на три группы исходя из соотношения значений жесткости шва и жесткости ткани по направлению шва. Исследуемые вариан-

ты ниточного соединения относятся к числу наиболее употребляемых при изготовлении льняной одежды и представляют все

выделенные группы: Ш1 и Ш2 – группа I (каркасные), Ш3 – группа II (средней жесткости), Ш4 – группа III (мягкие).

Т а б л и ц а 5

№ шва	Конструкция шва	Группа швов	Число слоев ткани в шве $N_T$	Количество строчек $N_C$	$EI_{ш}$ , мН·см <sup>2</sup>				
					ЛТ1	ЛТ2	ЛТ3	ЛТ4	ЛТ5
Ш1	Обтачной продольный	I-каркасные	4	1	309	966	1854	1414	2350
Ш2	Обтачной с отделочной строчкой поперечный		4	2	898	987	1128	2035	1905
Ш3	Стачной втаупожку продольный	II – средней жесткости	3	1	274	918	1326	1351	1983
Ш4	Стачной втаупожку продольный	III – мягкие	2	1	497	626	867	1302	1312

Т а б л и ц а 6

Ткань	$A$ , ед./мл	Жесткость швов $EI_{ш}$ , мН·см <sup>2</sup>			
		Ш1	Ш2	Ш3	Ш4
ЛТ1	20	78 / 98	217 / 273	35 / 76	118 / 196
	30	54 / 68	154 / 183	25 / 55	74 / 128
	40	31 / 40	85 / 109	14 / 30	42 / 73
ЛТ2	20	269 / 335	258 / 342	122 / 276	139 / 243
	30	198 / 248	197 / 251	90 / 205	103 / 175
	40	126 / 162	123 / 161	58 / 127	66 / 116
ЛТ3	20	392 / 486	379 / 459	182 / 401	192 / 336
	30	301 / 382	361 / 394	146 / 317	156 / 259
	40	211 / 272	196 / 246	104 / 229	97 / 175
ЛТ4	20	395 / 496	562 / 717	183 / 421	302 / 526
	30	289 / 375	420 / 709	142 / 316	232 / 397
	40	212 / 267	314 / 376	105 / 226	166 / 268
ЛТ5	20	619 / 795	597 / 747	292 / 628	309 / 561
	30	467 / 596	356 / 596	219 / 488	238 / 421
	40	366 / 455	333 / 433	175 / 393	179 / 323

В [28] выявлена корреляция жесткости участков ниточного соединения полуфабрикатов с параметрами умягченной ткани и конструкции швов. Верификация представленной математической модели проведена на базе приведенных в табл. 6 результатов оценки влияния активности целлюлазы и последовательности операций стачивания и смягчения образцов на жесткость формируемых швов.

Математическая обработка совокупности данных табл. 1, 2, 3, 5 и 6 позволяет описать изменение жесткости участков ниточного соединения льняных тканей швами разных конструкций следующим корреляционным уравнением:

$$EI_u = EI_0 \left( 1 - 0,732 \frac{A}{M_A} - 0,031 \frac{A^2}{M_A} \right) \frac{0,078M_A + 2,35N_T + 12,9N_C}{k}, \quad (5)$$

где  $N_T$  – число слоев ткани в шве;  $N_C$  – количество строчек;  $k$  – коэффициент, понижающий эффективность действия фермента в швах сложной конструкции.

Условия применения выражения (5) для оценки жесткости швов на исходных неумягченных материалах соблюдаются при использовании значений каталитической активности  $A = 0$  и понижающего коэффициента  $k = 1$ . В интервале рабочих значений  $A = 20...40$  ед./мл понижающий коэффициент  $k$  определяется уровнем активности ферментов:  $k = n \cdot \ln A$ , где вели-

чина множителя  $n$  зависит от вариантов выполнения операций стачивания и смягчения деталей, а также группы приведенной жесткости швов:

- вариант 1 (до смягчения)  $n_{гpI} = 1$ ;  $n_{гpII} = 1,5$ ;  $n_{гpIII} = 1,2$ ;
- вариант 2 (после смягчения)  $n_{гpI} = 0,8$ ;  $n_{гpII} = 0,9$ ;  $n_{гpIII} = 0,7$ .

Использование полученных математических выражений позволит осуществить

качественную модификацию полуфабрикатов льняной одежды и существенно расширить ее ассортимент для максимального удовлетворения запросов потребителей.

## ВЫВОДЫ

Определены рациональные уровни жесткости материалов на разных участках поясной одежды: показатель в зонах отдельного изделия различается в 1,5...2 раза. Требуемое снижение жесткости в каждой из зон при уменьшении объемности формы изделия и при переходе от каркасных моделей к мягкопластичной форме составляет соответственно 2 раза и 3...4 раза. Дополнительный объем экспериментальных данных для пяти льняных тканей с поверхностной плотностью 120...230 г/м<sup>2</sup> демонстрирует многократное превышение исходного уровня их жесткости при изгибе и возможность достижения требуемых значений показателя при обработке узлов и деталей швейного изделия в растворе адсорбирующихся целлюлаз с размером глобулы более 30 нм. Получено корреляционное уравнение для регулирования эффективности смягчения льняных тканей при изменении активности целлюлазы в растворе в диапазоне 20...40 ед./мл с учетом ухудшения равномерности распределения ферментов в структуре более плотных материалов. Установлена возможность повышения до 2,3 раза формуемости умягченных полуфабрикатов; получен уточненный вид взаимосвязи параметров формуемости и жесткости материалов с учетом поверхностной плотности тканей. По результатам экспериментального исследования влияния активности целлюлаз на жесткость швов разных конструкций, сформированных перед операцией смягчения или из умягченных материалов, получены уточненные математические выражения для прогнозирования жесткости узлов в определенных зонах умягченного швейного изделия с учетом числа швов, параметров ниточного соединения деталей и поверхностной плотности исходной неумягченной ткани.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ukey P.H.* Tailorability of Fabrics – A Review // Int. J. Bus. Innov. Res. 2023, 1, 3. P. 135...140. – <https://doi.org/10.61552/JIBI.2023.03.00>.
2. *Shishoo R.L.* Relation between fabric mechanical properties and garment design and tailorability // Int. J. Cloth. Sci. Technol. 1990, 2, 3. P. 40...47. – <https://doi.org/10.1108/eb002965>.
3. *Peirce F.* The handle of cloth as a measurable quantity // J. Text. Inst. 1930, 21, 9, T377...T416. – <https://doi.org/10.1080/19447023008661529>.
4. *Sadeghi M., Jeddi A., Najjar S.S.* Theoretical and experimental analysis of bending rigidity of plain and twill woven fabrics // J. Text. Inst. 2017, 108, 10. P. 1700...1706. – <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1280760>.
5. *Allaoui S., Hivet G., Hivet A. et al.* Experimental approach for optimizing dry fabric formability // 14th European Conference on Composite Materials, Budapest: Hungary. 2010. ID: 347-ECCM14. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.1110.5179>.
6. *Kamalha E., Zeng Y., Mwasiag J. et al.* The comfort dimension; a review of perception in clothing // J. Sensor. Stud. 2013, 28, 6. – <https://doi.org/10.1111/joss.12070>.
7. *Senthil N., Dhurai B.* Knittability enhancement study of 100 % linen yarn using softeners // J. Nat. Fibers. – 2021, 19, 12. P. 1...10. – <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1863287>.
8. *Behera B.K.* Comfort and handle behaviour of linen-blended fabrics // Autex Res. J. 2007, 7, 1. P. 33...47. – <http://www.autexj.org/No1-2007/0177.pdf>.
9. *Алеева С.В.* Влияние содержания лигнина и гемицеллюлоз на жесткость тканых полотен // Изв. вузов. Технологии текстильн. промышленности. 2013. № 5. С. 129...131.
10. *Радченко О.В., Овсянникова П.А., Шаммут Ю.А.* Исследование жесткости чистольняных тканей // Сб. науч. тр. междунар. науч. конф., посвященной 110-летию со дня рождения проф. А.Г. Севостьянова. М., 2020. Ч. 2. С. 70...76.
11. *Jahan I.* Effect of fabric structure on the mechanical properties of woven fabrics // Adv. Res. Text. Eng. 2017, 22, 1018. – <https://doi.org/10.26420/advrestexteng.2017.1018>.
12. *Alam S., Majumdar A., Ghosh A.* Investigation on bending and shear rigidities of plain woven fabrics having similar areal density // Int. J. Cloth. Sci. Technol. 2019, 31, 3. P. 403...414. – <https://doi.org/10.1108/IJCST-12-2017-0191>.
13. *Namlıgöz E.S., Kayseri G.Ö.* 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>.
14. *Özkan E.T.* Comparing sensorial comfort properties of cotton, cotton/linen and linen knitted fabrics // J. Nat. Fibers. 2024, 21, 1. 2364262. – <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2364262>.
15. *Ленько К.А., Ясинская Н.Н., Скобова Н.В.* Инновационный подход к решению проблемы умягчения льняных материалов // Физика волокнистых

материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2020). Иваново: ИВГПУ, 2020. С.324...328. – [https://doi.org/10.47367/2413-6514\\_2020\\_1\\_324](https://doi.org/10.47367/2413-6514_2020_1_324).

16. *Овсянникова П.А., Радченко О.В., Шаммут Ю.А., Шолохова Е.А.* Исследование жесткости изделий платьево-блузочного ассортимента // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2020). Иваново: ИВГПУ, 2020. С. 355...360. – [https://doi.org/10.47367/2413-6514\\_2020\\_1\\_355](https://doi.org/10.47367/2413-6514_2020_1_355)

17. *Солодушенкова Т.С., Корнилова Н.Л., Шаммут Ю.А.* Технологии изготовления льняной одежды легкого и костюмного ассортимента, совмещенной с биомодификацией тканей // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2021). Иваново: ИВГПУ, 2021. С. 312...318. – [https://doi.org/10.47367/2413-6514\\_2021\\_1\\_312](https://doi.org/10.47367/2413-6514_2021_1_312).

18. *Koksharov S.A., Bikbulatova A.A., Kornilova N.L. et al.* Justification of an approach ocellulases application in enzymatics often in goflinen fabrics and clothing // *Text. Res. J.* 2022, 92, 21–22. P. 4208...4229. – <https://doi.org/10.1177/00405175221101018>.

19. *Алеева С.В., Лепилова О.В., Кокиаров 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](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_5_126)

20. *Алеева С.В., Лепилова О.В., Кокиаров 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](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_6_98)

21. *Алеева С.В., Радченко О.В., Кокиаров С.А. и др.* Применение ферментативного мягчения 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](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2023_5_155).

22. *Abteu M., Boussu F., Bruniaux P. et al.* Influences of fabric density on mechanical and moulding behaviours of 3D warp interlock paraaramid fabrics for soft body armour application // *Compos. Struct.* 2018, 204. P. 402...418. – <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.101>.

23. *Gnaba I., Omrani F., Wang P. et al.* Mechanical behavior of flax/polypropylene commingled nonwoven at dry scale: Influence of process parameters // *Text. Res. J.* 2018, 89, 5. – <https://doi.org/10.1177/0040517518755789>.

24. *Cay A., Atav R., Duran K.* Effects of warp-weft density variation and fabric porosity of the cotton fabrics on their colour in reactive dyeing // *Fibres and Textiles in Eastern Europe.* 2007, 15, 1. P. 91...94.

25. *Родионова Н.А., Туинова Н.А., Фениксова П.В.* Методы определения це ллюлазной активности // *Прикладная биохимия микробиология.* 1966. Т.2. № 2. С. 197...205.

26. Пат. RU 2343477C2. Способ определения формовочной способности текстильного материала.

27. *Leung M.Y., Lo T.Y., Dhingra R.C. et al.* Relations ships between fabric formability, bias extension and behaviour of outerwear materials // *RJTA.* 2002, 6, 1. P. 39...52. – <https://doi.org/10.1108/RJTA-06-01-2002-B004>.

28. *Солодушенкова Т.С., Корнилова Н.Л., Кокиаров С.А. и др.* Влияние последовательности операций стачивания деталей и биообработки полуфабрикатов на жесткость льняной одежды // *Изв. вузов. Технология текст. промышленности.* 2024. №1. С. 139...145. – [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2024\\_1\\_138](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2024_1_138).

29. *Tohidi S.D., Jeddi A.A.A., Nosrati H.* Analyzing of the woven fabric geometry on the bending rigidity properties // *Int. J. Text. Sci.* 2013, 2, 4. P. 73...80. – <https://doi.org/10.5923/j.textile.20130204.01>.

## REFERENCES

1. *Ukey P.H.* Tailorability of Fabrics – A Review // *Int. J. Bus. Innov. Res.* 2023, 1, 3. P. 135...140. – <https://doi.org/10.61552/JIBI.2023.03.00>.

2. *Shishoo R.L.* Relation between fabric mechanical properties and garment design and tailorability // *Int. J. Cloth. Sci. Technol.* 1990, 2, 3. P. 40...47. – <https://doi.org/10.1108/eb002965>.

3. *Peirce F.* The handle of cloth as a measurable quantity // *J. Text. Inst.* 1930, 21, 9, T377...T416. – <https://doi.org/10.1080/19447023008661529>

4. *Sadeghi M., Jeddi A., Najar S.S.* Theoretical and experimental analysis of bending rigidity of plain and twill woven fabrics // *J. Text. Inst.* 2017, 108, 10. P. 1700...1706. – <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1280760>.

5. *Allaoui S., Hivet G., Hivet A. et al.* Experimental approach for optimizing dry fabric formability // 14th European Conference on Composite Materials, Budapest: Hungary. 2010. ID: 347-ECCM14. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.1110.5179>.

6. *Kamalha E., Zeng Y., Mwasiag J. et al.* The comfort dimension; a review of perception in clothing // *J. Sensor. Stud.* 2013, 28, 6. – <https://doi.org/10.1111/joss.12070>.

7. *Senthil N., Dhurai B.* Knittability enhancement study of 100 % linen yarn using softeners // *J. Nat. Fibers.* 2021, 19, 12. P. 1...10. – <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1863287>.

8. *Behera B.K.* Comfort and handle behaviour of linen-blended fabrics // *Autex Res. J.* 2007, 7, 1. P. 33...47. – <http://www.autexj.org/No1-2007/0177.pdf>.

9. *Aleeva S.V.* Influence of lignin and hemicellulose content on stiffness of linen fabrics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2013, 347, 5. P. 129...131.

10. *Radchenko O.V., Ovsyannikova P.A., Shammut Yu.A.* Research of rigidity of pure flax fabric // *Collection of scientific papers of the International Scientific Conference dedicated to the 110th anniversary of the birth of Professor A.G. Sevostyanov. M., 2020. Part 2. P. 70...76.*

11. *Jahanl.* Effect of fabric structure on the mechanical properties of woven fabrics // *Adv.Res.Text.Eng.* 2017, 2, 2.1018. – <https://doi.org/10.26420/advrestexteng.2017.1018>.
12. *Alam S., Majumdar A., Ghosh A.* Investigation on bending and shear rigidities of plain woven fabrics having similar areal density // *Int. J. Cloth. Sci. Technol.* 2019, 31, 3. P. 403...414. – <https://doi.org/10.1108/IJCST-12-2017-0191>.
13. *Namlıgöz E.S., Kayseri G.Ö.* 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>.
14. *Özkan E.T.* Comparing sensorial comfort properties of cotton, cotton/linen and linen knitted fabrics // *J. Nat. Fibers.* 2024, 21, 1. 2364262. – <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2364262>.
15. *Lenko K.A., Yasinskaya N.N., Skobova N.V.* Innovative approach to solving the problem of softening of linen materials // *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemkiye tekhnologii i materialy (SMARTEX-2020)*. Ivanovo: IVGPU, 2020. P. 324...328. – [https://doi.org/10.47367/2413-6514\\_2020\\_1\\_324](https://doi.org/10.47367/2413-6514_2020_1_324).
16. *Ovsyannikova P.A., Radchenko O.V., Shammut Yu.A., Sholokhova E.A.* Research of the stiffness of the dress and blouse range clothes // *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemkiye tekhnologii i materialy (SMARTEX-2021)*. Ivanovo: IVGPU, 2021. P. 355...360. – [https://doi.org/10.47367/2413-6514\\_2021\\_1\\_355](https://doi.org/10.47367/2413-6514_2021_1_355).
17. *Solodushenkova T.S., Kornilova N.L., Shammut Yu.A.* Technologies for the manufacture of linen clothing light and costume assortment combined with tissue biomodification // *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemkiye tekhnologii i materialy (SMARTEX-2021)*. Ivanovo: IVGPU, 2021. P. 312...318. – [https://doi.org/10.47367/2413-6514\\_2021\\_1\\_312](https://doi.org/10.47367/2413-6514_2021_1_312).
18. *Koksharov S.A., Bikbulatova A.A., Kornilova N.L. et al.* Justification of an approach to cellulase 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>.
19. *Aleeva S.V., Lepilova O.V., Koksharov S.A. et al.* Enzymatic softening treatment of linen products: the impact of cellulases in the swollen fiber structure // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2022, 401, 5. P. 126...134. – [http://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2022\\_5\\_126](http://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_5_126).
20. *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 Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2022, 402, 6. P. 98...105. – [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2022\\_6\\_98](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2022_6_98).
21. *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 Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2023, 407, 5. P. 155...163. – [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2023\\_5\\_155](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2023_5_155).
22. *Abtew M., Boussu F., Bruniaux P. et al.* Influences of fabric density on mechanical and moulding behaviours of 3D warp interlock paraaramid fabrics for soft body armour application // *Compos. Struct.* 2018, 204. P. 402...418. – <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.101>.
23. *Gnaba I., Omrani F., Wang P. et al.* Mechanical behavior of flax/polypropylene commingled nonwoven at dry scale: Influence of process parameters // *Text. Res. J.* 2018, 89, 5. – <https://doi.org/10.1177/0040517518755789>.
24. *Cay A., Atav R., Duran K.* Effects of warp-weft density variation and fabric porosity of the cotton fabrics on their colour in reactive dyeing // *Fibres and Textiles in Eastern Europe.* 2007, 15, 1. P. 91...94.
25. *Rodionova N.A., Tiunova N.A., Feniksova R.V.* Metody opredeleniya tsellyulaznoy aktivnosti // *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya.* 1966, 2, 2. P. 197...205. (in Russian).
26. Patent RU 2343477C2. G01N 33/36. Method for determining the molding ability of a textile material. – <https://patents.google.com/patent/RU2343477C2/ru> (accessed 22.10.2024).
27. *Leung M.Y., Lo T.Y., Dhingra R.C. et al.* Relationships between fabric formability, bias extension and behaviour of outerwear materials // *RJTA.* 2002, 6, 1. P. 39...52. – <https://doi.org/10.1108/RJTA-06-01-2002-B004>.
28. *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 Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2024, 409, 1. P. 139...145. – [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2024\\_1\\_138](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2024_1_138).
29. *Tohidi S.D., Jeddi A.A.A., Nosrati H.* Analyzing of the woven fabric geometry on the bending rigidity properties // *Int. J. Text. Sci.* 2013, 2, 4. P. 73...80. – <https://doi.org/10.5923/j.textile.20130204.01>.

Рекомендована НОЦ «Центр компетенций текстильной и легкой промышленности» ИВГПУ. Поступила 05.11.24.