

УДК 687.03:677.11+677.027.625.11
DOI 10.47367/0021-3497_2022_6_98

**ПОДБОР ЦЕЛЛЮЛАЗ ДЛЯ УМЯГЧАЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ
ЛЬНЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРОПИТКОЙ РАСТВОРАМИ БИОПРЕПАРАТОВ***

**SELECTION OF CELLULASES FOR IMPREGNATION
OF LINEN TEXTILE TO PERFORM THE SOFTENING TREATMENT**

*С.В. АЛЕЕВА¹, О.В. ЛЕПИЛОВА¹, С.А. КОКШАРОВ¹,
Т.С. СОЛОДУШЕНКОВА^{2,3}, Н.Л. КОРНИЛОВА², Е.Н. НИКИФОРОВА²*

*S.V. ALEEVA, O.V. LEPILOVA, S.A. KOKSHAROV,
T.S. SOLODUSHENKOVA, N.L. KORNILOVA, E.N. NIKIFOROVA*

¹Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, г. Иваново,
²Ивановский государственный политехнический университет,
³Уфимский государственный нефтяной технический университет)

(G.A. Krestov Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Ivanovo,
Ivanovo State Polytechnical University,
Ufa State Petroleum Technical University)

E-mail: sva@isc-ras.ru

Статья продолжает комплекс исследований, направленных на совершенствование методов финишной отделки для уменьшения жесткости льняных изделий. Моделируются условия обработки отбеленной ткани с воздействием целлюлазных препаратов на волокно в ненабухшем состоянии. Свойства целлюлазных препаратов оценены по уровню эндоглюканазной активности в растворе, размеру молекул и степени адсорбционного связывания твердофазным субстратом с использованием методов электронной и фотонной корреляционной спектроскопии. Методы низкотемпературной газовой адсорбции и сканирующей электронной микроскопии применены для анализа состояния льняного волокна. Стандартные методы текстильного материаловедения были использованы для измерения жесткости ткани при изгибе, прочности при одноосном растяжении и изменения линейных размеров. Обработка экспериментальных данных проведена с использованием методов поверхности отклика и многофакторного корреляционного анализа. Градация размерного параметра целлюлаз проведена на

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Фонда содействия инновациям № 3480ГС1/57516 «Разработка лабораторной технологии градиентного смягчения льняных полуфабрикатов с использованием жидкостной и маломодульной ферментативной обработки и лабораторных образцов ферментных препаратов, изготовление и исследование лабораторных образцов швейных изделий легкого и костюмного ассортимента» с применением приборной базы ЦКП «Верхневолжский региональный центр физико-химических исследований».

основании данных о доминирующем диаметре мезопор в структуре ненабухшего волокна. В отбеленной ткани его величина составляет 20 нм. Обоснована определяющая роль адсорбционной способности целлюлаз в эффективности умягчающего воздействия. Показано, что результат достигается за счет образования на поверхности волокна множества наноразмерных полостей, нарушающих целостность сетки микрофибрилл целлюлозы в первичной клеточной стенке. Получены зависимости для проектирования технологических свойств тканого полотна при варьировании адсорбционных и размерных характеристик целлюлазных препаратов. Определены оптимальные сочетания свойств ферментов для регулируемого понижения жесткости льняного материала в 1,1...4,5 раза при сопутствующей усадке не более 2% и потерях прочности не более 5%.

This article continues the complex of studies aimed at improving the methods of finishing reducing the rigidity of linen textile. The conditions of bleached fabrics treatment including the effect of cellulase preparations to non-swollen fibres were modeled. The properties of cellulases were evaluated by the level of endoglucanase activity in solution, the molecule sizes and the adsorption binding degree by a solid-phase substrate using electron and photon correlation spectroscopy methods. Methods of low-temperature gas adsorption and scanning electron microscopy was used to analyze of the flax fiber state. Standard methods of textile materials engineering were used to measure the stiffness of the fabric during bending, strength under uniaxial tension and changes in linear dimensions. The experimental data were processed using the methods of the response surface and multivariate correlation analysis. The gradation of the size parameter of cellulases was carried out according to data on the dominant diameter of mesopores in the structure of the non-swollen fiber. Its value was 20 nm in bleached fabric. The main role of the adsorption capacity of cellulases to effectivity of softening effect was substantiated. It was shown that the result was achieved due to the formation of many nanoscale cavities on the fiber surface that violate the integrity of the mesh of cellulose microfibrils in the primary cell wall. Dependences for the design of technological properties of woven fabric are obtained with varying adsorption and dimensional characteristics of cellulases. Optimal combinations of enzyme properties were determined to controlling the decrease in the stiffness of linen material by 1,1...4,5 times with concomitant shrinkage of not more than 2% and strength losses of not more than 5%.

Ключевые слова: структура волокон льна, биомодификация, целлюлазные препараты, размер и адсорбционная способность ферментов, деформационные свойства ткани.

Keywords: flax fiber structure, biomodification, cellulases, size and adsorption capacity of enzymes, deformation properties of fabric.

Целлюлазные препараты занимают третье место на мировом рынке промышленных ферментов [1], [2]. Текстильная индустрия входит в число важных отраслей потребления целлюлаз наряду с такими традиционными сферами, как пищевая, целлюлозно-бумажная промышленность, производство моющих средств и кормов, сель-

ское хозяйство, а также с развивающимся их использованием в фармацевтике и производстве биоэтанола [3], [4]. Ассортимент целлюлазных препаратов достаточно широк, и, как показывает практика [5...7], требуемые свойства ферментов специфичны не только в разных производственных направлениях, но и для решения спектра

различающихся задач, как, например, в цикле технологических операций переработки волокнистых материалов.

Актуален поиск оптимальных режимов ферментативной умягчающей отделки льняной продукции для устранения известных недостатков, связанных с усадкой и снижением прочности материала. Ранее установлено [8], что при периодических способах обработки отбеленной льняной ткани в растворе целлюлаз эффективное смягчение обеспечивается не только при воздействии ферментов в объеме набухшего волокна, но и за счет регулируемой модификации его первичной клеточной стенки. В последнем случае трехкратное снижение жесткости может быть достигнуто при минимизации усадки (менее 5%) и потерь прочности (не более 10%).

Ключевым фактором в реализации локализованного действия целлюлаз является не размер глобул, ограничивающий их диффузию в поры набухшего волокна, а способность к необратимому связыванию на твердофазном субстрате. Прочность адсорбционных взаимодействий зависит от наличия или отсутствия в молекуле фермента целлюлозосвязывающего домена, а также его строения [9].

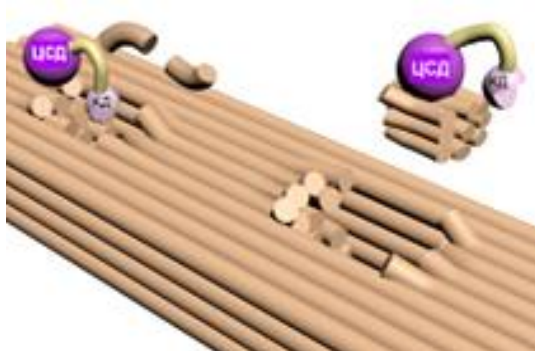


Рис. 1

Молекула адсорбирующихся энзимов состоит из двух структурных единиц: каталитического домена (КД) и целлюлозосвязывающего домена (ЦСД), которые соединены между собой гибкой полипептидной цепью – линкером. В структуре ЦСД имеются функциональные группировки, взаимодействующие с гидроксилами целлю-

лозы, что обеспечивает устойчивое закрепление фермента на поверхности субстрата. Механизм каталитической деструкции полимеров прочно адсорбирующимися ферментами показан на рис. 1.

Реакционный центр в составе КД осуществляет серию каталитических актов на участке, ограничиваемом длиной линкера, без разрыва связи ЦСД с субстратом. Такой механизм биокатализа получил название "множественной атаки" [10]. При этом одна молекула фермента, адсорбировавшись в аморфной области микрофибриллярного пучка целлюлозы, может обеспечить полное его поперечное повреждение. Разрывы в сетке микрофибрилл целлюлозы первичной клеточной стенки волокна способствуют понижению его жесткости.

Выявленная достаточность периферийного воздействия целлюлаз для достижения эффектов смягчения [8] открывает возможность перехода от периодических методов обработки льняных материалов с выдержкой в растворе биопрепарата к применению более производительных непрерывных и полунепрерывных технологических процессов, которые не предполагают набухания волокна и диффузии энзимов в его структуру. Это могут быть плюсовочнокатные способы обработки ткани в текстильном производстве или обработка деталей швейного изделия с нанесением малых объемов раствора ферментов методами шаблонной печати, шпредингования или аэрозольного распыления.

Цель работы состоит в выявлении закономерностей изменения технологических свойств тканого полотна при варьировании адсорбционных и размерных характеристик целлюлазных препаратов для варианта нанесения раствора с помощью валкового пропиточного устройства.

Материалы и методы

Для сопоставимости с результатами [8] применяли те же объекты исследования.

Отбеленная льняная ткань арт. 590 (Вологодский текстиль) имеет исходные значения анализируемых свойств (основа / уток): жесткость $E_{исх} = 83,5 / 79,4$ мН·см²; разрывная нагрузка $P_{исх} = 870 / 790$ сН; усадка при

пропитке буферным раствором без фермента $Y_{исх} = 0,2 / 0,1 \%$.

Целлюлазным препаратам: ЦеллоЛюкс А и ЦеллоЛюкс F (Сиббиофарм, РФ); Ультрафло Коре (Русфермент, РФ); Энзитекс и Фекорд 2012С (Фермент, Беларусь); Cellusoft Ultra и Stonezyme P (Novozymes, Дания); Conzyme TM90 (Sunson group, Китай); Целлюзим ультра (Энзим, Украина); KAC® 500 (Genencor, США); Rucolase ZLL (Rudolf Chemie, Германия) – случайным отбором присвоены номера от Ф1 до Ф11.

Активность эндоглюканазы (СА) в реакции гидролиза фильтровальной бумаги [11] и адсорбцию целлюлаз на микрокристаллической целлюлозе [12] определяли с применением метода электронной спектроскопии на спектрофотометре UNICO 2800. Степень адсорбционного связывания белка (**a**, отн. ед.) выражали в долевого отношении к содержанию в исходном растворе.

Размер ферментов в гидрозоле определяли методом фотонной корреляционной спектроскопии на анализаторе Zetasizer Nano ZS. С учетом рекомендаций [13] по распределению относительного числа частиц рассчитано долевого содержание фракций с размером менее 20 нм (**b**, отн. ед.).

Ткань модифицировали, моделируя плюсовочно-накатный способ обработки. Образцы пропитывали на двухвальной плюсовке с отжимом 100%, укладывали в пакеты и выдерживали в воздушном термостате при 40...45°C в течение 40 мин. Подбором концентрации препаратов обеспечивали постоянный уровень активности эндоглюканазы в растворе СА= 150 ед./мл. Оптимальный уровень рН для каждого препарата поддерживали с помощью натрий-ацетатных буферных смесей.

Состояние поверхности и поровой системы волокна исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (микроскоп Quattro S) и низкотемпературной адсорбции-десорбции паров азота (газовый анализатор Nova Series 1200e). Расчет распределения пор по размерам осуществлен компьютерной программой на основании анализа ниспадающей ветви адсорбционно-десорбционной кривой методом ВЈН (Barrett-Joyner-Halenda).

Для анализа технологических свойств ткани использовали стандартные методы текстильного материаловедения: жесткость при изгибе (EI) – консольный метод, прибор ПТ-2 (ГОСТ 10550-93); разрывная нагрузка (P) – метод одноосного растяжения, разрывная машина РМ-30 (ГОСТ 3813-72); технологическая усадка (Y) – определение линейных размеров текстильных изделий (ГОСТ 3811-72).

Оценка результатов совместного влияния свойств биопрепаратов на характеристики ткани проведена в рамках методологии поверхности отклика и многофакторного корреляционного анализа с использованием программ Origin Pro v 9.5.1.195, Statgraphics PLUS 2000 Professional.

Результаты и обсуждение

Требования к регламентации размерного параметра биокатализаторов для исследуемых условий модификации льняной ткани установлены на основании анализа параметров поровой системы волокна в ненабухшем состоянии. По данным адсорбции паров азота определено, что удаление примесей при подготовке ткани обеспечивает увеличение внутреннего свободного объема $V_{п}$ с 0,009 до 0,017 см³/г. На рис. 2 показано дифференциальное распределение внутреннего свободного объема по диаметру пор ($dV_{п}/dD$) в образцах волокна, выделенного из суровой (1) и отбеленной (2) льняной ткани.

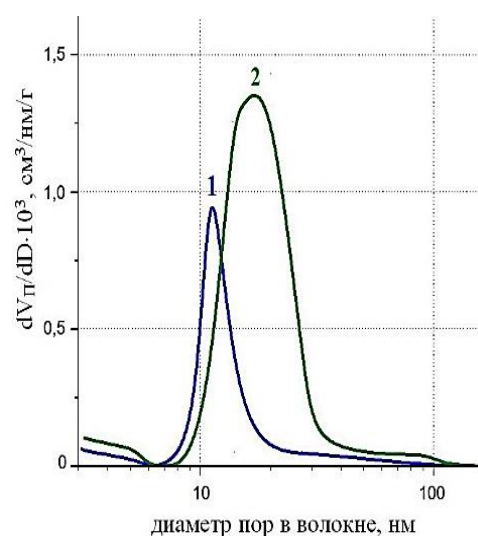


Рис. 2

Основной вклад в величину V_{II} вносят мезопоровые пространства. Диаметр доминирующих фракций мезопор в отбеленном волокне возрастает до 20 нм. Это значение принято для измененной градации размер-

ного параметра b применяемых целлюлазных препаратов. Характеристика свойств биопрепаратов, являющихся регулирующими параметрами модифицирующей обработки, приведена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Биопрепарат	Адсорбционное связывание, a , отн. ед.	Содержание фракций с размером менее 20 нм, b , отн. ед.	Группа адсорбция – размер
Ф1	0,46	0,91	3а – 2б
Ф2	0,37	0,04	3а – 3б
Ф3	0,32	0,89	3а – 2б
Ф4	0,47	0,09	3а – 3б
Ф5	0,65	0	2а – 1б
Ф6	0,52	0,70	2а – 2б
Ф7	0,55	0,01	2а – 1б
Ф8	0,10	0	1а – 1б
Ф9	0,52	0,25	2а – 3б
Ф10	0,34	0,03	3а – 3б
Ф11	0,15	0,01	1а – 1б

По адсорбционной способности градация не изменена: гр. 1а – слабо адсорбирующиеся целлюлазы $a \leq 0,15$; гр. 2а – прочно адсорбирующиеся $a > 0,5$; гр. 3а – средне адсорбирующиеся $0,15 < a < 0,5$.

По относительной доле фракций, соразмерных с диаметром пор ненабухшего волокна (менее 20 нм), подразделение целлюлаз следующее: гр. 1б – периферийного действия $b = 0 \dots 0,01$ (отсутствие малоразмерных фракций в пределах точности определения показателя b); гр. 2б – объемного действия $b > 0,5$; гр. 3б – смешанного проявления активности $0,01 < b \leq 0,5$.

На рис. 3 показано построение поверхности отклика по данным изменения величины жесткости по нитям основы (а) и проекции линий равного отклика на плоскость независимых переменных a и b (б).

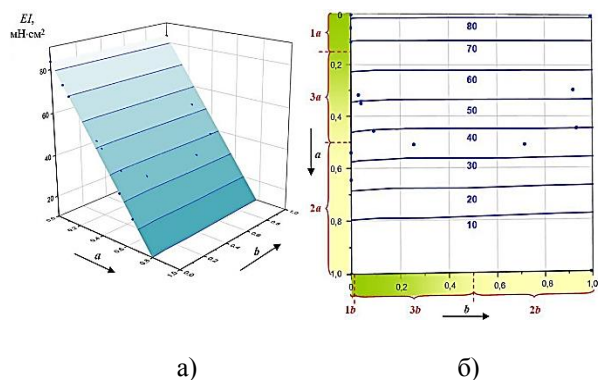


Рис. 3

Максимальное снижение показателя EI достигает 3,5 раза по основе и 3,9 раза по утку (23,7 и 20,5 мН·см² соответственно). Результат получен при использовании препарата Ф5, отнесенного к группе прочно адсорбирующихся целлюлаз периферийного действия (гр. 2а–1б) и имеющего наибольшее значение параметра a . Применение малоразмерных целлюлаз, способных к проникновению вглубь волокна, проявляется лишь при наличии выраженной адсорбционной способности и может обеспечить усиление эффекта мягчения не более чем на 10%.

Вклад индивидуального и совместного влияния адсорбционного и размерного факторов целлюлаз на величину жесткости ткани в направлении нитей основы (1) и нитей утка (2) может быть оценен с помощью следующих зависимостей:

$$EI_{\text{осн}} = 83,49 - 92,3a - 0,154b - 2,03ab; r = 0,9999, \quad (1)$$

$$EI_{\text{ут}} = 79,3 - 90,51a - 3,08b - 8,2ab; r = 0,9892. \quad (2)$$

Свободные члены уравнений (1) и (2) соответствуют значениям показателя для каждой группы нитей в исходной ткани. Это позволяет получить объединенное выражение для проектирования понижения жесткости ткани (ΔEI) при биомодифика-

ции методом пропитки с учетом уровня показателя для исходного материала:

$$\Delta EI = EI_{\text{исх}} - EI_{\text{био}} = 91,41a + 1,62b + 5,1ab; r = 0,9803. \quad (3)$$

На рис. 4 приведены проекции линий равного отклика для изменений по нитям основы показателей разрывной нагрузки (а) и технологической усадки (б).

Диаграммы имеют схожий вид с главным отличием в том, что показатель P прогрессирующе понижается, а величина Y прогрессирующе возрастает по мере одновременного приближения значений адсорбционного и размерного параметров биопрепарата к единице. То есть и в условиях непрерывных технологических процессов с нанесением ферментного препарата методом пропитки существует вероятность значимого проявления сопутствующих потерь прочности и усадки ткани.

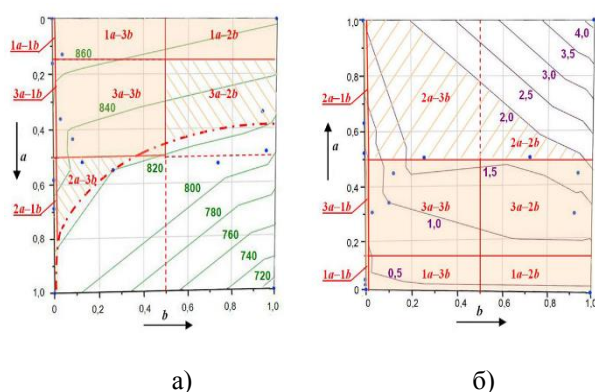


Рис. 4

Поверхности отклика для изменений разрывной нагрузки в продольном и поперечном направлении полотна описываются следующими уравнениями для нитей основы (4) и нитей утка (5):

$$P_{\text{осн}} = 870 - 65,96a - 2,41b - 85,76ab; r = 0,9493, \quad (4)$$

$$P_{\text{ут}} = 791 - 50,14a - 3,45b - 58,22ab; r = 0,9498. \quad (5)$$

Для проектирования возможных потерь разрывной нагрузки после биомодификации (ΔP) с учетом уровня показателя для исходной ткани и свойств целлюлазных

препаратов можно использовать объединенную зависимость:

$$\Delta P = P_{\text{исх}} - P_{\text{био}} = 58,05a + 2,93b + 71,99ab; r = 0,9888. \quad (6)$$

Соотношения, описывающие поверхность отклика изменений линейных размеров по основе (7) и утку (8) для варьируемых свойств биопрепаратов, имеют вид:

$$Y_{\text{осн}} = 0,21 + 1,27a + 0,002b + 2,55ab; r = 0,9267. \quad (7)$$

$$Y_{\text{ут}} = 0,07 + 2,81a + 0,38b + 1,13ab; r = 0,9286. \quad (8)$$

Прогнозирование ожидаемого изменения линейных размеров ткани после биомодификации (ΔY) с учетом усадки исходной ткани в холостом эксперименте возможно по обобщенному уравнению:

$$\Delta Y = Y_{\text{исх}} - Y_{\text{био}} = 2,04a + 0,2b + 1,84ab; r = 0,9201. \quad (9)$$

Дополнительные построения на диаграммах рис. 4 позволяют графически провести отбор параметров целлюлазного препарата, обеспечивающих получение умягчающей отделки при допустимом уровне побочных нежелательных изменений свойств материала. Как следует из рис. 4-б, все используемые в эксперименте препараты (см. значения, нанесенные точками) удовлетворяют условиям ограничения допустимой усадки ткани величиной 2%. Этим условиям полностью удовлетворяют группы, выделенные на поле независимых переменных a и b дополнительной заливкой, а также заштрихованные части, отражающие приемлемые сочетания параметров a и b в группах 2a-3b и 2a-2b.

Более жесткие ограничения для свойств биопрепаратов должны быть установлены, исходя из значений прочностных показателей. Штрихпунктирная линия на рис. 4-а ограничивает область допустимого снижения разрывной нагрузки – не более 5%. В эту область попадают все варианты слабо адсорбирующихся целлюлаз (гр. 1a-1b, 1a-2b, 1a-3b), две группы средне адсорбирующихся ферментов (гр. 3a-1b, 3a-3b), группа

прочно адсорбирующихся препаратов с крупными размерами молекул (2а-1b), а также заштрихованная часть, охватывающая 80% группы 3а-2b и 15% группы 2а-3b.

Использование препаратов, входящих в перечисленные группы, обеспечит регулируемое снижение жесткости ткани в 1,1...4,5 раза в зависимости от требуемого уровня показателя для получения проектируемой объемно-пластической формы швейного изделия. Минимальный уровень усадки позволяет осуществлять умягчающую обработку деталей швейного изделия после операции кроя, обеспечивая при этом соответствие получаемых изделий проектируемым размерным параметрам одежды.

Из совокупности исследуемых биопрепаратов наилучшее сочетание технологических свойств ткани получено при пропитке раствором препарата Ф9, относящегося к группе прочно адсорбирующихся целлюлаз со смешанным проявлением активности (гр. 2а-3b). Характер действия ферментов подтвержден результатами микроскопических исследований состояния поверхности волокна. На рис. 5 приведено СЭМ-изображение волокна отбеленной льняной ткани после обработки препаратом Ф9.

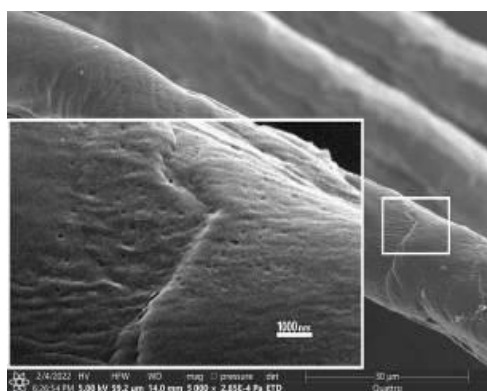


Рис. 5

Выделенный фрагмент изображения увеличен дополнительно. Это позволяет зафиксировать появление на поверхности волокна микрокаверн с размерами, превышающими 100 нм, а также большое количество более мелких полостей.

Наблюдаемые изменения полностью согласуются с принципом действия прочно адсорбирующихся целлюлаз, изображенным на

рис. 1. В результате необратимого связывания с субстратом ресорбция молекулы фермента в раствор (рис. 1) происходит только вместе с прикрепленным к ЦСД остатком целло-олигосахарида, образовавшимся в результате серии каталитических актов по механизму "множественной атаки". Совокупность локализованных воздействий молекул ферментного препарата нарушает целостность целлюлозного корсета в РW-слое первичной клеточной стенки льняного волокна. Благодаря этому достигается целевой эффект умягчающей отделки льняной ткани.

ВЫВОДЫ

Показана возможность проведения качественной умягчающей отделки льняной ткани по технологии, включающей пропитку раствором целлюлазного препарата. Обосновано проведение градации размерного параметра ферментов на основании данных о величине доминирующего размера мезопор в ненабухшем льняном волокне 20 нм. Выявлено определяющее влияние адсорбционной способности ферментов на эффективность снижения жесткости ткани. Сопутствующие проявления усадки и снижения механической прочности ткани достигают критического уровня при одновременном нарастании значений адсорбционного и размерного параметров в диапазоне от 0,5 до 1. Получены математические модели для проектирования качественных показателей умягченных льняных материалов с учетом свойств исходной ткани и характеристик используемых ферментов. Выявлены предпочтительные характеристики биопрепаратов, обеспечивающих регулируемое понижение показателя жесткости в 1,1...4,5 раза с сопутствующими потерями прочности менее 5 % и усадкой менее 2%. Результаты позволяют реализовать технологию градиентного мягчения деталей швейного изделия с необходимым уровнем жесткости для получения проектируемой объемно-силуэтной формы и обеспечения заданных размерных параметров одежды из льняных тканей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bhardwaj N., Kumar B., Agrawal K. et al. Current perspective on production and applications of microbial cellulases: a review // *Bioresources and Bioprocessing*. – 2021, 8, 1. P. 1...34.

2. Transparency Market Research (2021) Cellulase market - global industry analysis, size, share, growth, trends, and forecast 2018–2026. Rep Id: TMRGL60753 /<https://www.transparencymarketresearch.com/cellulase-market.html> (Дата обращения 10.08.2022)

3. Sharma R., Nehra S., Kumar D. Microbial cellulases: An approach toward recent advances in research, their application, and future perspectives / In: *Current Status and Future Scope of Microbial Cellulases*, 2021, Chapter 14. P. 295...311. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821882-2.00014-4>

4. Kumar B., Verma P. Enzyme mediated multi-product process: a concept of bio-based refinery // *Industrial Crops and Products*. – 2020, 154, 112607.

5. Besegatto S., Costa F.N., Damas M.S.P. et al. Enzyme treatment at different stages of textile processing: a review // *Industrial Biotechnology*. – 2018, 14, 6. P.298...307.

6. Koksharov S., Aleeva S., Lepilova O. Nanostructural biochemical modification of flax fiber in the processes of its preparation for spinning // *Autex Research Journal*. – 2015, 15, 3. P. 215...225.

7. Алеева С.В., Кокишаров С.А. Химия и технология биокатализируемого наноконструирования льняных текстильных материалов // *Российский химический журнал*. – 2011, 55, 3. P. 46...58.

8. 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 текстильной промышленности*. – 2022, № 5. С.126...134.

9. Linder M., Teeri T.T. The roles and function of cellulose-binding domains // *Journal of Biotechnology*. – 1997, 57, 1–3. P. 15...28.

10. Rabinovich M.L., Melnick M.S., Bolobova A.V. The structure and mechanism of action of cellulolytic enzymes // *Biochemistry*. – 2002, 67, 8. P. 850...871.

11. Ghose T.K. Measurement of cellulase activities // *Pure and Applied Chemistry*. – 1987, 59. P. 257...268.

12. Короткова О.Г., Семенова М.В., Рубцова Е.А. и др. Сравнительный анализ рекомбинантной эндо-1,4-глюкоказы II и ее химерных форм с целлюлозосвязывающим модулем // *Вестник Московского университета. Сер. 2: Химия*. – 2019, 60, 5. С. 296...303.

13. Кокишаров С.А., Алеева С.В., Корнилова Н.Л. и др. Модифицирование межфазного слоя армированных полимерных композитов нанодисперсным диоксидом кремния // *Перспективные материалы*. – 2021, № 4. С. 37...55.

crobial cellulases: a review // *Bioresources and Bioprocessing*. – 2021, 8, 1. P. 1...34.

2. Transparency Market Research (2021) Cellulase market - global industry analysis, size, share, growth, trends, and forecast 2018–2026. Rep Id: TMRGL60753 /<https://www.transparencymarketresearch.com/cellulase-market.html> (date of the application 10.08.2022).

3. Sharma R., Nehra S., Kumar D. Microbial cellulases: An approach toward recent advances in research, their application, and future perspectives / In: *Current Status and Future Scope of Microbial Cellulases*, 2021, Chapter 14. P. 295...311. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821882-2.00014-4>

4. Kumar B., Verma P. Enzyme mediated multi-product process: a concept of bio-based refinery // *Industrial Crops and Products*. – 2020, 154, 112607.

5. Besegatto S., Costa F.N., Damas M.S.P. et al. Enzyme treatment at different stages of textile processing: a review // *Industrial Biotechnology*. – 2018, 14, 6. P.298...307.

6. Koksharov S., Aleeva S., Lepilova O. Nanostructural biochemical modification of flax fiber in the processes of its preparation for spinning // *Autex Research Journal*. – 2015, 15, 3. P. 215...225.

7. Aleeva S., Koksharov S. Chemistry and technology of biocatalyzed nanoengineering of linen textile materials // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2012, 82, 13. P. 2279...2293.

8. 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 Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2022, 401, 5. P. 128...135.

9. Linder M., Teeri T.T. The roles and function of cellulose-binding domains // *Journal of Biotechnology*. – 1997, 57, 1–3. P. 15...28.

10. Rabinovich M.L., Melnick M.S., Bolobova A.V. The structure and mechanism of action of cellulolytic enzymes // *Biochemistry*. – 2002, 67, 8. P.850...871.

11. Ghose T.K. Measurement of cellulase activities // *Pure and Applied Chemistry*. – 1987, 59. P. 257...268.

12. Korotkova O.G., Semenova M.V., Rubtsova E.A., et al. Comparative analysis of the properties of recombinant endo-1,4-β-glucanase II and its chimeric form with a cellular binding module // *Moscow University Chemistry Bulletin*. – 2019, 74, 5. P.223...228.

13. Koksharov S.A., Aleeva S.V., Kornilova N.L. et al. Modification of the interfacial layer of reinforced polymer composites with nanodispersed silicon dioxide // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2021, 11, 5. P. 1243...1256.

Рекомендована лабораторией "Химия и технология модифицированных волокнистых материалов" ИХР РАН. Поступила 23.08.22.

REFERENCES

1. Bhardwaj N., Kumar B., Agrawal K. et al. Current perspective on production and applications of mi-