

УДК 687.03:677.11+677.027.625.11
DOI 10.47367/0021-3497_2022_5_126

**ФЕРМЕНТАТИВНАЯ УМЯГЧАЮЩАЯ ОБРАБОТКА ЛЬНЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ:
ВОЗДЕЙСТВИЕ ЦЕЛЛЮЛАЗ В СТРУКТУРЕ НАБУХШЕГО ВОЛОКНА***

**ENZYMATIC SOFTENING TREATMENT OF LINEN PRODUCTS:
THE IMPACT OF CELLULASES IN THE SWOLLEN FIBER STRUCTURE**

С.В. АЛЕЕВА, О.В. ЛЕПИЛОВА, С.А. КОКШАРОВ, Т.С. СОЛОДУШЕНКОВА, Н.Л. КОРНИЛОВА
S.V. ALEEVA, O.V. LEPILOVA, S.A. KOKSHAROV, T.S. SOLODUSHENKOVA, N.L. KORNILOVA

(Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, г. Иваново,
Ивановский государственный политехнический университет,
Уфимский 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

Актуально совершенствование методов биохимической отделки льняных тканей для устранения существующих барьеров, связанных с сопутствующим проявлением усадки и потерь прочности текстильного материала. Сопоставлены результаты модификации отбеленного полотна в растворах одиннадцати коммерческих целлюлазных препаратов. На основе экспериментальных данных получена комплексная характеристика влияния способности ферментов к диффузии в структуру волокна на величину целевых и побочных нежелательных изменений деформационных свойств ткани. Оценка свойств целлюлазных препаратов проведена по уровню эндогликаназной активности в растворе, размеру молекул и степени адсорбционного связывания твердофазным субстратом с использованием методов электронной и фотонной корреляционной спектроскопии. Для анализа свойств ткани применены метод сканирующей электронной микроскопии и стандартные методы текстильного материаловедения для измерения

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Фонда содействия инновациям № 3480ГС1/57516 "Разработка лабораторной технологии градиентного мягчения 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".

жесткости при изгибе, прочности при одноосном растяжении и изменения линейных размеров. Впервые показана возможность и сопоставимость достигаемых эффектов смягчения материала за счет объемной модификации клеточной стенки волокна и периферийного воздействия на микрофибриллы целлюлозы в первичной клеточной стенке. Показано, что усадка и потери прочности ткани обусловлены действием целлюлаз в толще волокна. Сопоставлен вклад каждого из варьируемых свойств биопрепаратов и их совместное влияние на изменение свойств ткани. Предложены зависимости для подбора ферментных препаратов. Наилучшее сочетание характеристик ткани обеспечивает обработка в растворе целлюлаз с высоким или средним уровнем сорбционного связывания на волокне и размерами молекул более 30 нм.

The article is devoted to the methods of biochemical finishing of linen fabrics improving in order to eliminate the existing barriers associated with the accompanying manifestation of shrinkage and loss of the textile material strength. The authors have carried out the modification of the bleached fabric in solutions of eleven commercial cellulase preparations, as a result of which a complex characteristic of the enzymes ability effect to penetrate into the fiber structure has been obtained. We have found that the value of target and side undesirable changes in tissue deformation properties is affected by the following properties of cellulase preparations: the level of endoglucanase activity in solution, the degree of adsorption binding by a solid-phase substrate, and the size of molecules, which were determined using electron and photon correlation spectroscopy. To analyze the properties of fabric, the method of scanning electron microscopy and standard methods of textile materials science were used to measure bending stiffness, uniaxial tensile strength, and changes in linear dimensions. The article shows the possibility of softening the material due to the volumetric modification of the fiber cell wall and the peripheral effect on cellulose microfibrils in the primary cell wall. We found that shrinkage and loss of tissue strength are due to the action of cellulases in the thickness of the fiber. The contribution of each of the varied biological preparations properties and their combined effect on the change in tissue properties are compared. Dependences for the selection of enzyme preparations are proposed. We have also found out that the best combination of tissue characteristics is provided by the treatment in a solution of cellulases with a high or medium level of sorption binding on the fiber and molecular sizes of more than 30 nm.

Ключевые слова: многослойная структура волокон льна, биомодификация, свойства ферментных препаратов, деформационные свойства ткани.

Keywords: multilayer structure of flax fibers, biomodification, properties of enzyme preparations, deformation properties of fabric.

Неуклонно возрастает спрос на умягченные льняные ткани для производства одежды [1]. Улучшение грифа льняных полотен отмечают при использовании целлюлазных препаратов на стадии их подготовки к крашению как сопутствующий эффект к повышению качества окраски [2]. Мягчение целлюлазами рекомендуют также и для заключительной отделки льняных

полотен [3], [4]. Однако снижение жесткости сопряжено с более или менее существенным проявлением усадки и потерей прочности тканей. Предполагают [5], что уровень позитивных и негативных отклонений в свойствах материалов зависит от глубины проникновения биокатализаторов в толщу волокнистого материала.

Предпосылкой для постановки задач исследования являются современные представления о формировании многослойной структуры волокон льна в динамике развития растительных клеток на двух последовательно протекающих стадиях: первоначального удлинения и дальнейшего утолщения [6], [7]. Строение льняного волокна с принятыми обозначениями слоев и схематическим изображением ориентации микрофибрилл целлюлозы показано на рис. 1.

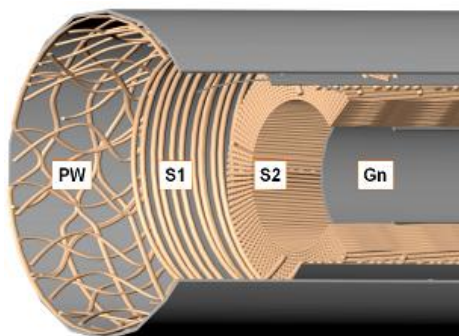


Рис. 1

Механические свойства зрелого волокна определяются основным S2-слоем вторичной клеточной стенки, который на 90% состоит из целлюлозы. Высокую жесткость и низкую деформируемость волокна связывают с тем, что спирально расположенные микрофибриллы целлюлозы в S2-слое имеют очень малый угол наклона к продольной оси волокна (не более 10°).

С увеличением микрофибриллярного угла деформационная способность клеточной стенки возрастает. В S1-слое микрофибриллярный угол целлюлозы достигает $60...80^\circ$ [8]. Следовательно, целлюлозный компонент S1-слоя не вносит существенного вклада в величину жесткости волокна, как и Gn-слой вторичной клеточной стенки, сформированный преимущественно разветвленными макромолекулами галактана [9] и практически отсутствующий в зрелых волокнах льна.

Особое строение имеет целлюлозный компонент первичной клеточной стенки, формирующейся на первой стадии развития растительных клеток (удлинение), в конце которой толщина волокна не превышает 5 мкм [10]. Содержание целлюлозы в

PW-слое составляет 25...40%, а ее микрофибриллы имеют сетчатое переплетение [11]. На стадии утолщения поперечные размеры клетки возрастают до 20 мкм за счет расширения вторичной клеточной стенки. При этом под влиянием тургорного давления внутренних слоев происходит уплотнение целлюлозной сетки в PW-слое с объединением участков микрофибрилл в удлиненные пучки, концентрирующие внутренние растягивающие усилия. В таком состоянии целлюлоза формирует своеобразный каркас, стягивающий клетку элементарного льняного волокна.

Цель работы состоит в выявлении связи между биокатализируемой деструкцией целлюлозы в разных структурных зонах льняного волокна и отклонениями технологических свойств тканого полотна. Факторами, регулирующими проникновение ферментов в структуру волокна, являются размерные параметры молекулы энзимов и необратимость их адсорбционных взаимодействий с твердофазным субстратом.

Материалы и методы

Объект исследования – отбеленная льняная ткань полотняного переплетения арт. 590 (ОАО "Вологодский текстиль"). Сведения об исходном уровне модифицируемых свойств ткани приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Наименование показателя, обозначение, размерность	Величина показателя	
	основа	уток
Жесткость на изгиб, $E_{исх}$, мкН·см ²	83,5	79,4
Разрывная нагрузка, $R_{исх}$, сН	870	790
Технологическая усадка*, $Y_{исх}$, %	0,2	0,15

П р и м е ч а н и е. * – усадка при обработке в воде, моделирующей условия обработки ферментными препаратами.

Для биомодификации ткани применены коммерческие целлюлазные препараты: Ультрафло Коре ("Русфермент", Россия); ЦеллоЛюкс А и ЦеллоЛюкс F ("Сиббиофарм", Россия); Энзитекс и Фекорд 2012С ("Фермент", Беларусь); Stonezyme Р и Cellusoft Ultra ("Novozymes", Дания); Цел-

люзим ультра ("Энзим", Украина); Conzyme TM90 ("Sunson group", Китай); Rucolase ZLL ("Rudolf Chemie", Германия); KAC® 500 ("Genencor International Inc.", США). Биопрепаратам случайным образом присвоены порядковые номера от Ф1 до Ф11.

Активность эндоглюканазы в растворах (СА, ед./мл) определяли по образованию сахаров при гидролизе фильтровальной бумаги в течение 60 мин при 50°C [12].

Для оценки сорбционных свойств целлюлаз суспензию микрокристаллической целлюлозы (50 г/л) в растворе ферментов перемешивали 30 мин при 8°C, центрифугировали и определяли в супернатанте остаточную концентрацию белка по поглощению на длине волны 280 нм [13]. Степень адсорбционного связывания белка (а, отн. ед.) выражали в долевого отношении к его содержанию в исходном растворе.

Размер глобулы ферментов определяли методом фотонной корреляционной спектроскопии на анализаторе Zetasizer Nano ZS с учетом рекомендаций [14]. По распределению относительного числа частиц определяли долевого содержание фракций с размерами менее 30 нм (b, отн. ед.), что соответствует максимальному диаметру мезопор в набухшем льняном волокне [15].

Обработку ткани растворами биопрепаратов проводили при 40...45°C в течение 40 мин. Подбором концентрации препаратов обеспечивали постоянный уровень активности эндоглюканазы (СА = 26 ед./мл). Оптимальный уровень рН для каждого препарата поддерживали с помощью натрий-ацетатных буферных смесей.

Для оценки состояния волокна в исследуемой ткани использовали сканирующий электронный микроскоп Quattro S.

Измерение жесткости образцов ткани при изгибе (EI, мкН·см²) осуществляли консольным методом на приборе ПТ-2 в соответствии с ГОСТ 10550–93.

Величину разрывной нагрузки образцов ткани (Р, сН) определяли методом одноосного растяжения на разрывной машине согласно ГОСТ 3813–72.

Технологическую усадку (У, %) оценивали по изменению размера образцов до и

после биообработки в соответствии с ГОСТ 3811–72 в части определения линейных размеров текстильных изделий.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены СЭМ-изображения нити (а) и волокна (б), выделенных из исследуемой отбеленной льняной ткани.

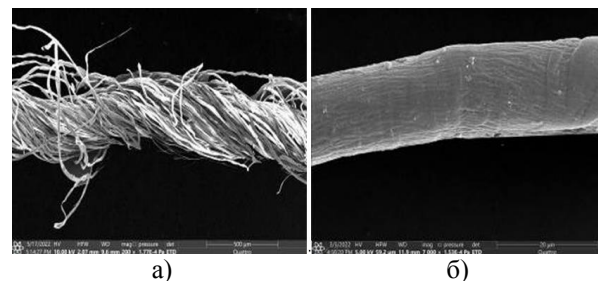


Рис. 2

В отличие от изделий из серого льняного волокна, содержащего значительные количества нецеллюлозных примесей [4], в отбеленной ткани полимерные спутники целлюлозы достаточно полно удалены на стадиях подготовки при получении пряжи и облагораживании тканого полотна. Достигается элементаризация лубяных пучков (рис. 2-а). Структурное единство нити обеспечивается за счет сплетения (спутывания) волокон в процессе крутки пряжи. Поверхность элементарного волокна (рис. 2-б) полностью освобождена от примесей. Четко просматривается рельеф обнаженной сетки микрофибрилл целлюлозы в первичной клеточной стенке волокна.

Данные рис. 2 аргументируют применение целлюлаз для финишной отделки отбеленной ткани в отличие от возможных альтернативных вариантов воздействия на разные биополимерные системы на начальной стадии биоскоринга льняного волокна [16]. Вместе с тем, эффективность действия целлюлаз будет определяться их способностью к внедрению в поровую структуру набухшего льняного волокна. Характеристика свойств биопрепаратов, используемых в качестве регулирующих параметров, представлена в табл. 2.

С учетом величины анализируемых показателей проведено подразделение ферментных препаратов. По данным необратимого связывания с целлюлозой выделяем 3 группы: 1а – слабо адсорбирующиеся; 2а –

прочно адсорбирующиеся и 3а – средне адсорбирующиеся ферменты. По содержанию фракций, соразмерных с диаметром поровой структуры набухшего волокна,

градация препаратов имеет следующий вид: 1b – объемного действия; 2b – периферийного действия; 3b – смешанного проявления активности.

Т а б л и ц а 2

Биопрепарат	Адсорбционное связывание а, отн. ед.	Содержание малоразмерных фракций b, отн. ед.	Группа адсорбция – размер
Ф1	0,46	1	3а – 1b
Ф2	0,37	0,59	3а – 3b
Ф3	0,32	0,98	3а – 1b
Ф4	0,47	0,67	3а – 3b
Ф5	0,65	0,25	2а – 3b
Ф6	0,52	0,94	2а – 1b
Ф7	0,55	0,03	2а – 2b
Ф8	0,10	0,12	1а – 2b
Ф9	0,52	0,81	2а – 1b
Ф10	0,34	0,36	3а – 3b
Ф11	0,15	0	1а – 2b

В соответствии с рекомендациями [17] уровень адсорбционной способности для группы 1а ограничиваем величиной показателя $a \leq 0,15$. К группе 1а причислены препараты Ф8 и Ф11. Для группы 2а устанавливаем значение $a > 0,50$. В эту группу входят препараты Ф5, Ф6, Ф7 и Ф9. Оставшиеся препараты отнесены к группе 3а. Пониженный уровень адсорбционных свойств для этих препаратов может быть обусловлен как меньшей энергией взаимодействий, так и наличием в их составе нескольких разновидностей целлюлаз с разным типом сорбционного связывания.

Группа 1b включает препараты Ф1, Ф3, Ф6 и Ф9 с наибольшей диффузионной способностью. В их составе доля молекул, соразмерных с диаметром пор набухшего волокна, составляет от 0,8 до 1. К группе 2b отнесены препараты Ф11, Ф7 и Ф8 с величиной показателя $b \leq 0,15$. Препараты Ф2, Ф4, Ф5 и Ф10 (группа 3b) проявляют активность как на поверхности волокна, так и в объеме вторичной клеточной стенки.

Анализ влияния варьируемых свойств биопрепаратов на характеристики ткани после модификации проведен с помощью методологии поверхности отклика [18]. На рис. 3 показано построение 3d-поверхности по данным изменения величины жесткости по нитям основы (а) и проекции линий равного отклика на плоскость независимых переменных а и b (б).

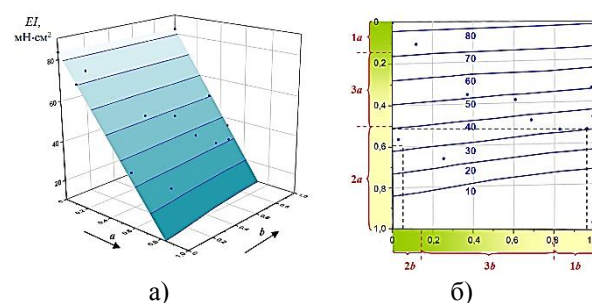


Рис. 3

Наличие в препарате целлюлаз с размерами, обеспечивающими их проникание в поры набухшего волокна (гр. 1б), не гарантирует достижения эффективного мягчения. Для слабо адсорбирующихся целлюлаз (гр. 1а) величина показателя b практически не оказывает влияния на эффект мягчения. Варьирование размера ферментов проявляется только при использовании препаратов адсорбционной группы 2а.

Результаты эксперимента позволяют констатировать, что умягчение льняной ткани может быть достигнуто не только в результате воздействия ферментов в объеме вторичной клеточной стенки, но и за счет модификации целлюлозы в PW-слое волокна. При этом определяющим фактором являются адсорбционные свойства ферментов. Дополнительными построениями на рис. 3-б показано, что для 3-кратного снижения жесткости при уменьшении доли малоразмерных ферментов с 0,95 до 0,05 необходимый уровень показателя а по-

вышается с 0,51 лишь до 0,59. То есть любая размерная форма прочно адсорбирующихся целлюлаз обеспечивает снижение жесткости отбеленной льняной ткани в 3 раза и более.

Аналогичный вид поверхности отклика получен и для изменения жесткости ткани по утку. Функции, описывающие совместное влияние адсорбционного и размерного факторов целлюлаз на величину жесткости модифицированного материала в направлении нитей основы (1) и нитей утка (2), имеют одинаковый вид:

$$EI_{\text{осн}} = 83,49 - 88,03a - 0,91b - 13,12ab; r = 0,9915, \quad (1)$$

$$EI_{\text{ут}} = 79,39 - 92,32a - 0,71b - 15,20ab; r = 0,9909. \quad (2)$$

Свободные члены уравнений (1) и (2) соответствуют значениям показателя для каждой группы нитей в исходной ткани (табл. 1). Это позволяет получить объединенную зависимость для расчета снижения жесткости ткани (ΔEI) после биомодификации с учетом уровня показателя для исходного материала:

$$\Delta EI = EI_{\text{исх}} - EI_{\text{био}} = 90,17a + 0,81b + 14,16ab; r = 0,9486, \quad (3)$$

На рис. 4 проиллюстрировано влияние адсорбционного и размерного факторов биопрепаратов на изменение разрывной нагрузки ткани в направлении нитей основы в виде поверхности (а) и проекции линий равного отклика (б).

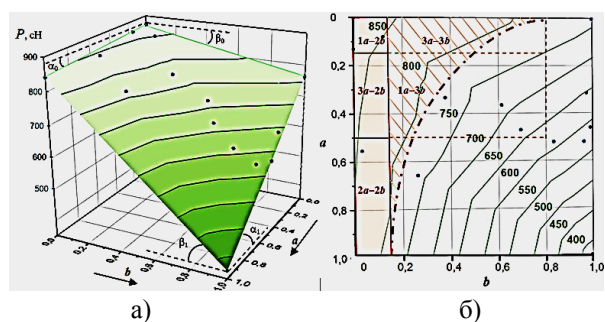


Рис. 4

Снижение прочности ткани в продольном направлении составляет от 0,6 до 33,3%, в поперечном направлении – от 0,5 до 53,3%. В отличие от зависимостей, пред-

ставленных на рис. 3, в данном случае наклон направляющих к оси b значительно больше, чем к оси a. Величина соотношения $\text{tg}\beta_1/\text{tg}\beta_0 = 4,36$ (рис. 4-а) характеризует нарастающее влияние размерного фактора при переходе от адсорбционной группы 1а к группе 2а. При этом значение $\text{tg}\alpha_1$ превышает величину $\text{tg}\alpha_0$ в 14 раз, что демонстрирует усиление опасности сопутствующих потерь механической прочности с ростом адсорбционной способности малоразмерных целлюлаз, воздействующих на микрофибрилярную основу S2-слоя вторичной клеточной стенки волокна.

Штрихпунктирная линия на рис. 4-б ограничивает область допустимого снижения разрывной нагрузки (не более 10%). В эту область попадают ферменты периферийного действия групп 1а–2б, 2а–2б и 3а–2б, а также значительная часть группы 1а–3б и около 20% возможных сочетаний параметров в группе 3а–2б.

Однотипный характер изменений разрывной нагрузки в продольном и поперечном направлении полотна демонстрируют уравнения функции отклика для нитей основы (4) и нитей утка (5):

$$P_{\text{осн}} = 874 - 31,70a - 111,29b - 456,11ab; r = 0,9927, \quad (4)$$

$$P_{\text{ут}} = 793 - 24,20a - 125,67b - 519,13ab; r = 0,9818. \quad (5)$$

Сопоставление величины приращенных множителей позволяет количественно охарактеризовать весомость размерного и адсорбционного факторов и критичность их совместного увеличения. Вместе с тем, при воздействии крупноразмерных целлюлаз ($b \rightarrow 0$) два слагаемых в уравнениях (4) и (5) обращаются в ноль, и даже при максимальных значениях параметра a (55%) снижение показателя P составляет не более 2% от уровня исходной ткани.

Для прогноза потерь разрывной нагрузки после биомодификации (ΔP) с учетом уровня показателя для исходной ткани и свойств целлюлазных препаратов можно использовать объединенную зависимость:

$$\Delta P = P_{\text{исх}} - P_{\text{био}} = 27,95a + 118,48b + 487,62ab; r = 0,9088. \quad (6)$$

На рис. 5 приведены конфигурация поверхности отклика (а) и проекции линий сечения (б) для изменений технологической усадки ткани по нитям основы.

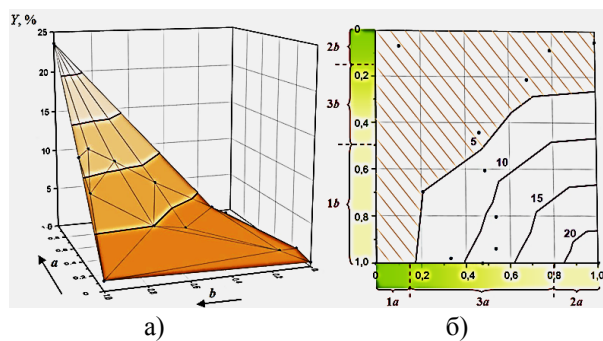


Рис. 5

Важной особенностью поверхности, описывающей усадку, является слабое влияние фактора b при его значениях до 0,4 с резким нарастанием отклика по мере приближения значений b и a к единице. Таким образом, за усадку ткани отвечает биодеградация целлюлозы в микрофибриллярной структуре S2-слоя вторичной клеточной стенки. Вместе с тем, если допустимый уровень усадки ограничить значением 5%, то этому условию удовлетворяет более половины (заштрихованная часть) поля независимых переменных.

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

$$Y_{\text{осн}} = 0,21 + 0,34a + 0,94b + 22,11ab; r = 0,9846, \quad (7)$$

$$Y_{\text{ут}} = 0,12 + 0,68a + 1,08b + 21,90ab; r = 0,9877. \quad (8)$$

Зависимости демонстрируют, что наибольшую весомость имеет последнее слагаемое и наиболее опасным сочетанием свойств биопрепарата является высокое содержание целлюлаз с размерами менее 30 нм и прочное их связывание на полимерном субстрате (группа 2а–1б). Очевидно, диффузия малоразмерных целлюлаз в поры набухшего S2-слоя клеточной стенки с закреплением и локализованным воздействием на целлюлозные микрофибриллы способствует структурной релаксации внутренних напряжений в волокне, что

проявляется в сокращении длины волокон.

Неблагоприятное действие целлюлаз нивелируется при условии $b \rightarrow 0$, что удовлетворяет компромиссному решению задачи безусловного умягчения льняной ткани. Обобщенное уравнение для прогноза ожидаемого изменения линейных размеров ткани после биомодификации (ΔY) с учетом усадки исходной ткани в холостом эксперименте имеет вид:

$$\Delta Y = Y_{\text{исх}} - Y_{\text{био}} = 0,51a + 1,01b + 22,01ab; r = 0,9113. \quad (9)$$

ВЫВОДЫ

Экспериментально обоснована возможность комплексной оценки качества умягчающей отделки льняной ткани целлюлазами на основании данных о размере молекул ферментов и степени их адсорбционного связывания на твердофазном материале. Показано, что наиболее эффективное снижение жесткости достигается при воздействии малоразмерных адсорбирующихся целлюлаз на микрофибриллярную структуру S2-слоя вторичной клеточной стенки набухшего льняного волокна. Однако это сопровождается максимальным побочным проявлением технологической усадки и потерей прочности материала. Предложен подход к минимизации неблагоприятных последствий биомягчения за счет локализованного воздействия прочно адсорбирующихся целлюлаз с размерами частиц более 30 нм на целлюлозный компонент первичной клеточной стенки волокна. Получены математические модели для оценки применимости целлюлазных препаратов и проектирования качественных показателей умягченных льняных материалов с учетом свойств исходной ткани и характеристик используемых ферментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dalbaşı E.S.N., Kayseri G.Ö. A research on the comfort properties of linen fabrics subjected to various finishing treatments // Journal of Natural Fibers. – 2019, 18, 2. P.1...14.
2. Kan C., Yuen C.W.M., Lam Y.L. Effect of enzyme treatment and dyeing on the mechanical properties of linen // Color. Technol. – 2009, 125, 5. P. 269...276.

3. Головина Л.А., Садова С.Ф., Переволоцкая В.К. Исследование применения ферментных препаратов целлюлолитического действия в заключительной отделке льняных тканей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008, № 3. С. 65...69.
4. Солодушенкова Т.С., Корнилова Н.Л., Кокшаров С.А. и др. Влияние полимерных компонентов льняного волокна на жесткость тканого полотна // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2022, № 4. С. 128...135.
5. Koksharov S.A., Bikbulatova A.A., Kornilova N.L. et al. Justification of an approach to cellulases application in enzymatic softening of linen fabrics and clothing // Text. Res. J. – 2022. P. 1...22. <https://doi.org/10.1177/00405175221101018>
6. Rihouey C., Paynel F., Gorshkova T. et al. Flax fibers: assessing the non-cellulosic polysaccharides and an approach to supramolecular design of the cell wall // Cellulose. – 2017, 24. P. 1985...2001.
7. Goudenhooff C., Bourmaud A., Baley C. Flax (*Linum usitatissimum* L.) fibers for composite reinforcement: Exploring the link between plant growth, cell walls development, and fiber properties // Front Plant Sci. – 2019, 10, 411.
8. Barnett J.R., Bonham V.A. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres // Biol. Rev. – 2004, 79. P. 461...472.
9. Gorshkova T., Chernova T., Mokshina N. et al. Plant ‘muscles’: fibers with a tertiary cell wall // New Phytol. – 2018, 218, 1. P. 66...72.
10. Снегирева А.В., Агеева М.В., Аменицкий С.И. и др. Интрузивный рост волокон склеренхимы // Физиология растений. – 2010, 57, №3. С.361...375.
11. Baracat A., Winter H., Rondeau-Mouro C. et al. Studies of xylan interactions and cross-linking to synthetic lignins formed by bulk and end-wise polymerization: a model study of lignin carbohydrate complex formation // Planta. – 2007, 226. P. 267...281.
12. Ghose T.K. Measurement of cellulase activities // Pure Appl. Chem. – 1987, 59. P. 257...268.
13. 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.
14. Кокшаров С.А., Алеева С.В., Лепилова О.В. и др. Свойства гидроколлоидов альгината натрия при сорбционном связывании папаина // Коллоидный журнал. – 2021, 83, № 6. С. 660...675.
15. 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.
16. Bahtiyari M.I., Dalbaşı E.S.N., Körlü A.E. et al. Effect of different enzymes on mechanical properties of linen fabrics // Ind. Textila. – 2011, 62, 1. P. 3...8.
17. Lai W., Wu G., Liu Y. et al. Method for treating textile with endoglucanase. – Pat. US 8802423B2. 2014.
18. Box G.E.P., Wilson K.B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions // J R Stat Soc Series B Stat Methodol. – 1951, 13, 1. P. 1...45. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067>.
1. Dalbaşı E.S.N., Kayseri G.Ö. A Research on the comfort properties of linen fabrics subjected to various finishing treatments // Journal of Natural Fibers. – 2019, 18, 2. P. 1...14.
2. Kan C., Yuen C.W.M., Lam Y.L. Effect of enzyme treatment and dyeing on the mechanical properties of linen // Color. Technol. – 2009, 125, 5. P. 269...276.
3. Golovina L.A., Sadova S.F., Perevolotskaya V.K. Study of the use of enzyme preparations of cellulolytic action in the final finishing of linen fabrics // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2008, 3. P. 65...69.
4. Solodushenkova T.S., Kornilova N.L., Koksharov S.A. et al. Influence of linen fiber polymeric components on the rigidity of woven fabric // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2022, N 4. P. 128...135.
5. Koksharov S.A., Bikbulatova A.A., Kornilova N.L. et al. Justification of an approach to cellulases application in enzymatic softening of linen fabrics and clothing // Text. Res. J. – 2022. P. 1...22. <https://doi.org/10.1177/00405175221101018>
6. Rihouey C., Paynel F., Gorshkova T. et al. Flax fibers: assessing the non-cellulosic polysaccharides and an approach to supramolecular design of the cell wall // Cellulose. – 2017, 24. P. 1985...2001.
7. Goudenhooff C., Bourmaud A., Baley C. Flax (*Linum usitatissimum* L.) fibers for composite reinforcement: Exploring the link between plant growth, cell walls development, and fiber properties // Front Plant Sci. – 2019, 10, 411.
8. Barnett J.R., Bonham V.A. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres // Biol. Rev. – 2004, 79. P. 461...472.
9. Gorshkova T., Chernova T., Mokshina N. et al. Plant ‘muscles’: fibers with a tertiary cell wall // New Phytol. – 2018, 218, 1. P. 66...72.
10. Snegireva A.V., Ageeva M.V., Amenitskii S.I. et al. Intrusive growth of sclerenchyma fibers // Russ. J. Plant. Physiol. – 2010, 57, 3. P. 342...355.
11. Baracat A., Winter H., Rondeau-Mouro C. et al. Studies of xylan interactions and cross-linking to synthetic lignins formed by bulk and end-wise polymerization: a model study of lignin carbohydrate complex formation // Planta. – 2007, 226. P. 267...281.
12. Ghose T.K. Measurement of cellulase activities // Pure Appl. Chem. – 1987, 59. P. 257...268.
13. 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 Univ. Chem. Bull. – 2019, 74, 5. P. 223...228.
14. Koksharov S.A., Aleeva S.V., Lepilova O.V. et al. The properties of sodium alginate hydrocolloids upon sorption binding of papain // Colloid J. – 2021, 83, 6. P. 722...736.
15. 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.

16. *Bahtiyari M.I., Dalbaşı E.S.N., Körlü A.E. et al.* Effect of different enzymes on mechanical properties of linen fabrics // *Ind. Textila.* – 2011, 62, 1. P. 3...8.

17. *Lai W., Wu G., Liu Y. et al.* Method for treating textile with endoglucanase. – Pat. US 8802423B2. 2014.

18. *Box G.E.P., Wilson K.B.* On the Experimental Attainment of Optimum Conditions // *J R Stat Soc Se-*

ries B Stat Methodol. – 1951, 13, 1. P. 1...45.
<https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067>.

Рекомендована лабораторией "Химия и технология модифицированных волокнистых материалов" ИХР РАН. Поступила 06.10.22.
