

**ВЛИЯНИЕ ФЕРМЕНТНОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ЛЬНЯНОГО КОТОНИНА****EFFECT OF ENZYMATIC TREATMENT ON THE PROPERTIES OF LINEN COTTONIN**

УДК 677.11/027.2

**Д.Л. Лисовский\*, Н.Н. Ясинская***Витебский государственный технологический университет*<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2022-2-94-103>**D. Lisouski\*, N. Yasinskaya***Vitebsk State Technological University***РЕФЕРАТ****ЛЕН, КОТОНИЗИРОВАННОЕ ВОЛОКНО, БИООТВАРКА, ФЕРМЕНТНАЯ ОБРАБОТКА, ПЕКТИНОЛИТИЧЕСКИЕ И ЦЕЛЛЮЛОЛИТИЧЕСКИЕ ФЕРМЕНТЫ**

*В статье представлены результаты исследования процесса биохимической котонизации льняного волокна с использованием мультиферментных композиций, включающих пектинолитические и целлюлолитические ферменты. Приведены методики и результаты определения активности используемых ферментов. Проведена биоотварка котонизированного льняного волокна с последующим пероксидным белением с использованием пектолитических и целлюлолитических ферментов. Обработка целлюлолитическими ферментами в высокой концентрации существенно увеличила индекс коротких волокон и снизила прочность волокна. Предварительная энзимная обработка пектиназами и их смесями с целлюлазой привела к получению котонизированного волокна со степенью белизны выше на 4,3–4,5 %, линейной плотностью ниже на 12–25 %, потерей массы на 52–54 % ниже в сравнении с традиционно подготовленным волокном. Установлена оптимальная концентрация пектиназы в варочном растворе (2–3 г/л). Предварительная ферментная обработка позволила получить котонизированное льняное волокно с улучшенными физико-механическими свойствами.*

**ABSTRACT****FLAX, COTTONIZED FIBER, BIOSCOURING, ENZYME TREATMENT, PECTINOLYTIC AND CELLULOLYTIC ENZYMES**

*The article presents the results of a study of the process of biochemical flax fiber cottonization using multi-enzyme compositions, including pectinolytic and cellulolytic enzymes. The methods and results of determining the activity of the enzymes used are presented. Bioscouring of cottonized flax fiber was carried out, using pectolytic and cellulolytic enzymes with following peroxide bleaching. Treatment with high concentrations of cellulolytic enzymes significantly increased the short fiber index and reduced fiber strength. Enzyme treatment with pectinases and their mixtures with cellulase led to the production of cottonized fiber with a degree of whiteness higher by 4.3–4.5 %; a linear density lower by 12–25 %; a weight loss by 52–54 % lower in comparison with the traditionally prepared fiber. The optimal concentration of pectinase in the cooking solution (2–3 g/l) was determined. Thus, the preliminary enzymatic treatment made it possible to obtain cottonized flax fiber with improved physical and mechanical properties.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Льноводство – исторически традиционная отрасль сельского хозяйства в Республике Беларусь, которая позволяет до определенной степени удовлетворить потребность в тканях

и текстильных изделий [1]. Однако в последнее время наблюдается спад производства. Так, в сравнении с 2020 годом площади посевов и объемы выработки волокна в 2021 году снизились на 14 и 25 %, соответственно [2]. Вероятно,

\* E-mail: [lisouskid@gmail.com](mailto:lisouskid@gmail.com) (D. Lisouski)

это связано, прежде всего, со снижением рентабельности производства ввиду высоких затрат на его возделывание и низких цен на продукцию из льна.

Одним из способов повышения рентабельности льноводства является импортозамещение хлопка, чего можно достичь в результате переработки отходов трепания льнотресты и короткого льноволокна, для рационального использования которого нужно наращивать производство модифицированного волокна, свойства которого приближены к свойствам хлопка (котонина). При смешивании котонина с хлопком и другими волокнами снижается себестоимость полученной продукции, а следовательно, снижается и рентабельность производства льна.

Сравнивая волокна льна и хлопка, следует отметить, что волокна льна имеют большую длину, а волокна хлопка – меньшую линейную плотность. Для того, чтобы приблизить льняное волокно к хлопковому, его необходимо подвергнуть процессу так называемой котонизации, который представляет собой расщепление на более мелкие волокна, результатом чего является котонин.

Такого рода волокно можно смешивать с другими волокнистыми материалами: с хлопком, вискозой или шерстью, что дает возможность получить ткани различного назначения с достойным внешним видом, высокой несминаемостью, которые помимо всего прочего будут сохранять гигиенические свойства льна.

Котонизированное волокно, помимо его использования для получения смешанных пряжи и тканей, можно применять в производстве мебельной, одежной и медицинской ваты. Изделия, произведенные из такой ваты, будут обладать высокими антистатическими свойствами, достаточной влагоемкостью и воздухопроводимостью. Кроме того, утилизация таких волокон не требует специальных мер, что безусловно благоприятно сказывается на экологической безопасности.

Традиционный процесс химической переработки котонизированного льняного волокна заключается в его обработке высокощелочными растворами при высокой температуре с последующим белиением пероксидом водорода в присутствии метасиликата натрия. Помимо высоких

затрат на электроэнергию, традиционные химические способы обработки текстильных материалов наносят существенный урон экологии и требуют большого расхода воды.

Альтернативой щелочной отварке является применение ферментных технологий для обработки льняного волокна в более мягких условиях и безопасно для окружающей среды. Цель данной работы заключалась в подборе ферментных препаратов и режимов их использования для получения отбеленного котонина с улучшенными физико-механическими характеристиками из механически котонизированного льноволокна.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

### Объект исследования

Объектом исследования являлось льняное котонизированное волокно, полученное механическим способом на линии котонизации фирмы «ТЕМАФА» на производственных мощностях РУПТП «Оршанский льнокомбинат» (г. Орша, Республика Беларусь).

### Ферменты и методы определения активности

Исследовали эффективность различных ферментных препаратов и их комбинаций в процессе биообработки льняного котонизированного волокна. В настоящей работе использовали следующие ферментные препараты: пектиназа, NC720 и ЭНЗИТЕКС ЦКС (ООО «Фермент», Республика Беларусь).

Полигалактуроназную активность определяли титриметрическим методом. В качестве субстрата использовали 1 % водный раствор пектина из кожуры цитрусовых (Sigma P9135). Раствор ферментного препарата для анализа готовили путем его растворения в 0,1 *М* цитратном буфере с *pH* 3,5 с дальнейшим разбавлением до необходимого значения активности. Ферментативную реакцию проводили в течение 30 минут при температуре 50 °С, смешивая 5 *см*<sup>3</sup> раствора пектина, 4 *см*<sup>3</sup> 0,1 *М* цитратного буфера и 1 *см*<sup>3</sup> раствора фермента. Ферментативную реакцию останавливали путем кипячения реакционной смеси в течение 5 минут на водяной бане. После этого отбирали 5 *см*<sup>3</sup> реакционной смеси, добавляли 2 *см*<sup>3</sup> 1 *М* раствора карбоната натрия и 5 *см*<sup>3</sup> 0,05 *М* стандартного раствора йода. Полученную смесь оставляли на 20 минут в темном месте для протекания реакции между

йодом и выделившейся в процессе ферментативной реакции галактуроновой кислотой, после чего добавляли  $2 \text{ см}^3$   $1 \text{ М}$  раствора серной кислоты и титровали  $0,05 \text{ М}$  стандартным раствором тиосульфата натрия оставшийся йод до исчезновения синей окраски, в конце титрования добавляя в качестве индикатора  $1 \%$  раствор крахмала. За единицу полигалактуроназной активности принимали такое количество фермента, при действии которого на пектин образуется  $1 \text{ мг}$  галактуроновой кислоты за один час при температуре  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\text{pH}$  3,5.

Пектатлиазную активность определяли спектрофотометрическим методом по количеству ненасыщенных продуктов деструкции полигалактуроновой кислоты под действием ферментного препарата на полигалактуроновую кислоту по известной методике [3] с небольшими изменениями. В качестве субстрата использовали  $0,2 \%$  раствор полигалактуроновой кислоты (Sigma 81325) в  $0,2 \text{ М}$  глицин- $\text{NaOH}$  буферном растворе с  $\text{pH}$  9,0, содержащем  $1 \text{ мМ}$  хлорида кальция. За единицу пектатлиазной активности принимали такое количество фермента, при действии которого на полигалактуроновую кислоту за одну минуту при температуре  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\text{pH}$  9,0 образуется  $1$  микромоль ненасыщенных олигосахаридных продуктов реакции.

Целлюлазную активность определяли спектрофотометрическим методом с 3,5-динитросалициловой кислотой (ДНС реактивом), основанной на протоколе Миллера [4]. В качестве субстрата использовали  $1 \%$  раствор натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (Sigma 21902, medium viscosity) в  $0,1 \text{ М}$  ацетатном буферном растворе с  $\text{pH}$  5,0 при определении активности кислой целлюлазы и в  $0,1 \text{ М}$  фосфатном буферном растворе с  $\text{pH}$  6,0 при определении активности нейтральной целлюлазы. За единицу целлюлазной активности принимали такое количество фермента, при действии которого на натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы за одну минуту при температуре  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\text{pH}$  5,0 ( $6,0$ ) образуется  $1$  микромоль восстанавливающих сахаров в пересчете на глюкозу.

#### Методика ферментативной обработки волокна

Ферментативную отварку волокна проводили с использованием ферментных препаратов и их комбинаций. Волокно обрабатывали в

растворе ферментного препарата с заданным  $\text{pH}$  с продолжительностью 120 минут. Процесс биоотварки проводили при температуре  $50$  и  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Концентрацию ферментного препарата в растворе варьировали от  $0$  до  $10 \text{ г/л}$  для щелочной пектиназы и от  $0$  до  $5 \text{ г/л}$  – для целлюлазы NC720, концентрация ЭНЗИТЕКС ЦКС составляла  $0,2 \text{ г/л}$ . Помимо этого, варочный раствор содержал смачиватель NR520 на основе фосфорных эфиров этоксилированных спиртов (поставщик ООО «Фермент», Республика Беларусь) в концентрации  $1 \text{ г/л}$ . Модуль ванны составлял  $1$  к  $15$ . После окончания обработки волокно промывали последовательно горячей и холодной водой, отжимали, сушили при температуре  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  в сушильном шкафу, определяли потерю массы и подвергали процедуре беления.

#### Методика традиционной обработки волокна

Волокнистый материал подвергали обработке в течение 120 минут при температуре  $98 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  в растворе, который содержал  $7 \text{ г/л}$  гидроксида натрия и  $1 \text{ г/л}$  смачивателя. Модуль ванны составлял  $1$  к  $15$ . Затем волокно промывали горячей и холодной водой, отжимали и сушили при температуре  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  в сушильном шкафу, определяли потерю массы и подвергали процедуре беления.

Беление биообработанного и отваренного льняного волокна осуществляли при температуре  $98 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 90 минут в растворе, содержащем  $4,0 \text{ г/л}$  пероксида водорода,  $1,2 \text{ г/л}$  гидроксида натрия,  $6 \text{ г/л}$  метасиликата натрия и  $1 \text{ г/л}$  смачивателя.

#### Методики оценки физико-механических свойств волокна

Физико-механические характеристики исходного и обработанного котонина определяли на системе USTER LVI (Low Volume Instrument), которая установлена в лаборатории кафедры «Технология текстильных материалов» Витебского государственного технологического университета и представляет собой комплекс приборов.

С использованием прибора Fibrograph 730 определяли следующие характеристики длины волокна: средняя длина волокна ML (Mean Length); верхняя средняя длина волокна UHML (Upper Half Mean Length); индекс равномерности UI (Uniformity Index); индекс коротких во-

локон SFI (Short Fibers Index). Предварительно формировали штапель волокна с использованием устройства USTER LVI Fibrosampler 192.

Для оценки коэффициента отражения (степени белизны) и степени желтизны использовали прибор USTER LVI 760 Color/Trash Meter. Для проведения испытаний отбирали пробу волокна массой около 10 г размером 10 см на 10 см, укладывали на стекло прибора, прижимали крышкой и проводили измерение.

Разрывную нагрузку котонина определяли на разрывной машине WDW-20E. Для этого готовили штапель волокна, закрепляли между зажимами на расстоянии 3 мм и подвергали деформированию со скоростью 10 мм/с.

Линейную плотность ( $T$ ) рассчитывали по следующей формуле:

$$T = \frac{m}{k \times UHML \times N}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса штапеля льняных волокон, г;  $k$  – экспериментально установленный коэффициент, равный 3,4;  $UHML$  – верхняя средняя длина волокна, км;  $N$  – количество волокон в штапеле.

Потерю массы ( $\Delta m$ , %) определяли как соотношение разницы массы волокна до обработки и после к массе волокна до обработки с учетом влажности образца.

#### Методики определения химического состава волокна

Определение влажности проводили методом высушивания до постоянной массы при температуре 105 °С [5].

Содержание пектиновых веществ определяли путем их экстракции раствором лимоннокислого аммония из волокна, которое предварительно обрабатывали спиртобензольной смесью и водой [6], с последующим спектрофотометрическим анализом экстракта по окрашенному комплексу полимеров с о-толуидиновым реагентом при длинах волн 365, 385 и 630 нм [7].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения ферментативных активностей ферментных препаратов, которые использовали в настоящем исследовании, приведены в таблице 1. Два из исследованных ферментных препарата NC720 и ЭНЗИТЕКС ЦКС представляют собой целлюлолитические энзимы с различными оптимумами действия  $pH$ . Ферментный препарат пектиназы представляет собой комплексный продукт, содержащий как полигалактуроназную, так и пекаттлазную активности.

Известно, что физико-механические свойства льняного волокна непосредственно зависят от химического состава и степени извлечения полимерных примесей (лигнина, гемицеллюлоз, пектиновых веществ) из него [8]. Пектиновые вещества являются одним из важнейших полимерных примесей льняного волокна, которые содержатся как в срединных пластинках, так и в инкрустах – поверхностных отложениях на волокне остатков камбия и паренхимных тканей [9].

Для установления закономерности изменения содержания пектиновых веществ в зависимости от концентрации фермента пектиназы в процессе биоотварки, мы провели серию экспериментов по обработке механически кото-

Таблица 1 – Характеристика ферментных препаратов

Ферментный препарат	Ферментативная активность	Оптимальный диапазон работы $pH$
NC720	Целлюлазная 1 460 ед/см <sup>3</sup> (при $pH$ 6,0)	5–7
ЭНЗИТЕКС ЦКС	Целлюлазная 1 568 ед/см <sup>3</sup> (при $pH$ 5,0)	5,0–5,5
Пектиназа	Полигалактуроназная 360 ед/см <sup>3</sup> Пекаттлазная 324 ед/см <sup>3</sup>	8–10

низированного льняного волокна варочным раствором, содержащем от 0 до 10 г/л фермента пектиназы при  $pH$  8,1 и температуре 50 °С в течение двух часов (рисунок 1).

Установлено, что с увеличением концентрации ферментного препарата содержание пектиновых веществ уменьшается. Данную зависимость можно описать экспоненциальным уравнением вида  $y = a - b \cdot e^{c \cdot x}$  ( $R^2 = 0,89$ ). При этом концентрация ферментного препарата в варочном растворе выше 2–3 г/л уже не оказывает существенного влияния на остаточное содержание пектиновых веществ. Таким образом, использование ферментного препарата в концентрации выше 2–3 г/л, вероятно, является нецелесообразным. Следует также отметить, что при традиционной обработке льняного волокна остаточное содержание пектиновых веществ составило 0,72 масс. %, из чего следует, что биообработка волокна позволяет извлекать пектины в большей степени, чем при традиционном процессе.

Массив данных физико-механических свойств обработанного льняного котонина представлен в таблице 2.

Потеря массы волокна в процессе отварки существенно меньше в случае использования ферментных препаратов, нежели традиционной щелочной обработки при высокой температуре. Зависимость потери массы волокна от концентрации пектолитического фермента не установлена, что говорит о его низкой деструктурирующей способности. Напротив, увеличение концентрации целлюлозолитического фермента NC720 в процессе отварки вызывало незначительный рост потери массы волокна. Зависимость потери массы волокна в процессе беления от типа предварительной обработки также не установлена.

Длина волокна характеризуется двумя величинами – средней длиной ( $ML$ ) и верхней средней длиной ( $UHML$ ). Физический смысл верхней средней длины заключается в том, что она равна средней массодлине наиболее длинных волокон пробы волокон, составляющих 50 %

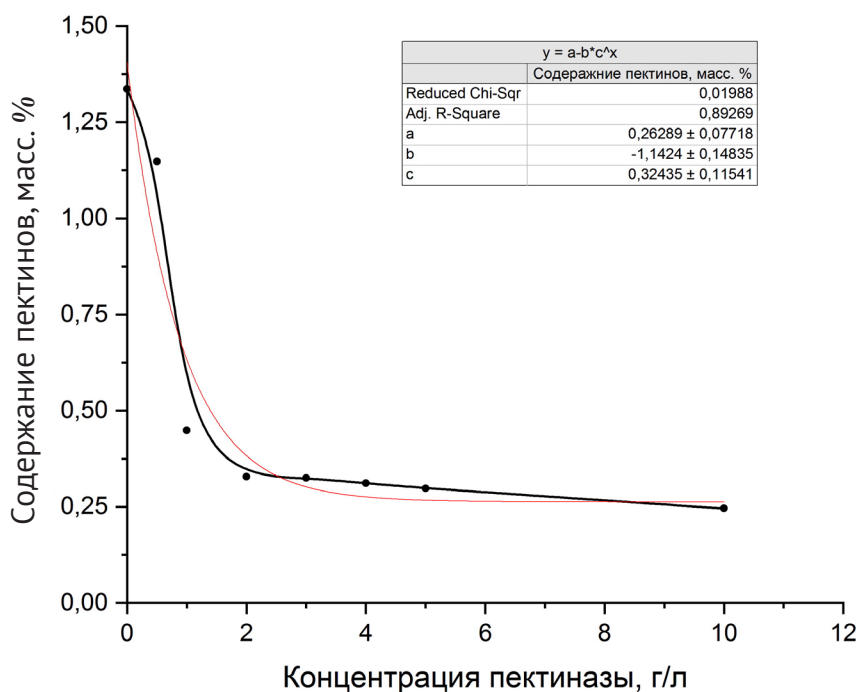


Рисунок 1 – Зависимость остаточного содержания пектиновых веществ в льняном волокне от концентрации ферментного препарата пектиназы в процессе биоотварки

Таблица 2 – Физико-механические свойства обработанного льняного котонина

Условия обработки	Концентрация фермента, г/л	Средняя длина волокна, мм	Верхняя средняя длина волокна, мм	Индекс равномерности, %	Индекс коротких волокон, %	Коэффициент отражения, %	Степень желтизны, %	Линейная плотность, текс	Потеря массы после отварки, %	Потеря массы после беления, %
	<i>C</i> , г/л	<i>ML</i> , мм	<i>UHML</i> , мм	<i>UI</i> , %	<i>SF</i> , %	<i>Rd</i> , %	<i>+b</i> , %	<i>T</i> , текс	$\Delta m_o$ , %	$\Delta m_B$ , %
суровый котонин	-	36,04	43,66	82,5	5,2	-	-	1,74	-	-
пектиназа, 1,0 г/л смачиватель, 2 ч, 50 °С, <i>pH</i> 8,1	0,0	30,11	40,98	73,6	6,5	73,82	10,57	1,66	6,60	13,59
	0,5	27,72	38,15	72,7	7,3	75,70	10,36	1,11	10,26	12,89
	1,0	31,39	41,55	75,6	6,1	77,37	9,25	1,11	10,44	13,15
	2,0	26,53	35,20	75,4	9,3	80,51	9,40	1,15	10,17	10,74
	3,0	26,00	35,34	73,6	9,1	80,88	9,85	1,33	10,45	11,94
	4,0	27,74	36,41	76,3	7,9	80,67	8,85	1,33	10,60	9,25
	5,0	28,87	37,75	75,2	6,9	80,92	8,77	1,22	10,48	13,50
целлюлаза NC720, 1,0 г/л смачиватель, 2 ч, 50 °С, <i>pH</i> 6,0	0,0	28,09	38,67	72,2	8,6	73,98	10,26	1,69	7,32	11,45
	1,0	23,52	33,17	70,9	13,1	75,61	10,23	1,49	10,98	10,02
	3,0	21,01	30,06	69,9	22,5	77,25	10,00	1,38	11,77	10,95
	5,0	17,52	25,40	68,9	43,4	81,19	8,77	1,13	12,41	11,01
6 г/л NaOH, 1 г/л смачиватель, 2 ч, 98 °С	0,0	27,85	35,52	78,4	7,2	77,04	10,15	1,48	23,23	10,23
ЭНЗИТЕКС ЦКС, 1,0 г/л смачиватель, 2 ч, 50 °С, <i>pH</i> 8,1	0,2	23,86	32,55	73,3	11,6	75,46	11,48	1,26	10,07	10,56
пектиназа/ЭНЗИТЕКС ЦКС, 1,0 г/л смачиватель, 2 ч, 50 °С, <i>pH</i> 8,1	2,5/0,2	22,36	31,65	70,7	13,8	76,41	10,29	1,12	13,70	12,36
пектиназа/NC720, 1,0 г/л смачиватель, 2 ч, 50 °С, <i>pH</i> 8,1	2,0/0,2	23,97	30,69	72,5	21,0	80,37	9,41	1,29	10,95	12,15

ее массы. Верхняя средняя длина является аналогом штапельной длины.

Независимо от типа обработки показатели длины *ML* и *UHML* подготовленного льноволокна снизились в сравнении с исходным котонином. С увеличением концентрации пектиназы до 2 г/л наблюдалось уменьшение средней длины волокна и линейной плотности волокна, то есть его толщины, что связано с удалением пектиновых веществ и разрушением инкрустов, и, как следствие, более полным продоль-

ным дроблением пучков технических волокон. При этом, видимо, также частично разрушаются стыковые спайки между волокнами, что приводит к уменьшению длины волокна. Дальнейшее увеличение концентрации фермента привело к обратному эффекту – линейная плотность и длина льноволокна увеличились. Данный эффект сложно поддается объяснению. Вероятно, при высокой концентрации фермента за короткий промежуток времени выделяется большое количество продуктов гидролиза, что ингибирует



дальнейшее действие ферментного препарата, тем самым снижая эффект от его применения. Индекс равномерности длины волокна не зависит от концентрации пектиназы, а его значение было несколько ниже, чем при традиционной обработке.

С увеличением концентрации пектиназы на стадии отварки наблюдалось увеличение степени белизны льноволокна после беления. В сравнении с традиционной технологией предварительная ферментативная обработка пектиназой в концентрации 2 г/л и выше позволила получить волокна со степенью белизны более чем на 4 % выше, чем при традиционной подготовке. Обратный эффект от применения пектиназы наблюдался для степени желтизны волокна – с увеличением концентрации фермента степень желтизны снижалась. Наблюдаемые явления, вероятно, связаны с более доступной структурой льняного волокна для действия отбеливающих агентов при его предварительной ферментативной подготовке.

С увеличением концентрации нейтральной целлюлазы NC720 показатели длины волокна

стремительно снижались, а индекс коротких волокон, который показывает количество волокон длиной меньше 16 мм, существенно увеличился. Очевидно, что в данном случае основной биополимер льноволокна целлюлоза подвергается значительной деструкции. При этом значительных потерь в массе волокна в процессе ферментативной отварки не наблюдалось, а коэффициент отражения отбеленного волокна с увеличением концентрации целлюлазы, как и в случае применения пектиназы, возрастал. Отваренное в растворе целлюлазы и отбеленное волокно в сравнении с традиционно подготовленным обладает меньшей толщиной, что, вероятно, связано в высокой степенью дробления льняных пучков вследствие действия целлюлазы.

При этом деструктурирующий эффект целлюлазы проявил себя при оценке прочностных характеристик подготовленного льноволокна. Так, волокно, предварительно обработанное целлюлазой, было практически в 10 раз менее прочным, чем обработанное пектиназой или щелочным раствором (рисунок 2).

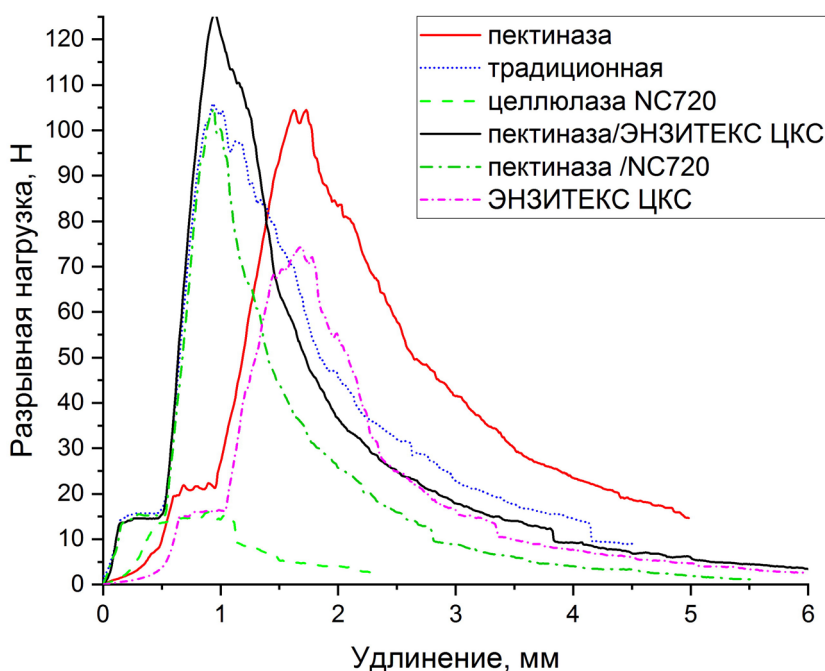


Рисунок 2 – Диаграмма растяжения предварительно обработанного и отбеленного льняного котонина

Для изучения влияния кислой целлюлазы и совместного применения пектиназы и целлюлазы в процессах предварительной отварки на физико-механические свойства льноволокна осуществили ряд опытов. Ферментативную отварку с использованием кислой целлюлазы ЭН-ЗИТЕКС ЦКС провели при существенно меньшей концентрации препарата, чем в изначальных экспериментах с целлюлазами, чтобы избежать катастрофического снижения прочности волокна. И действительно, после обработки прочность волокна сохранилась на достаточно высоком уровне, при этом средняя длина волокна была меньше, чем при традиционной обработке, а коэффициент отражения отбеленного волокна был ниже более чем на 2 %. В то же время удалось получить более тонкое льноволокно, на что указывает показатель линейной плотности.

Использование смеси пектиназы и целлюлазы также позволило получить более тонкое волокно, чем при использовании щелочной отварки. Прочность такого волокна не уступала прочности волокна, подготовленного традиционным способом, несмотря на высокое содержание коротких волокон, индекс которых в случае применения смеси пектиназы и целлюлазы NC720 составил более 20 %.

## ВЫВОДЫ

В результате экспериментальных исследований установлено, что:

- содержание пектиновых веществ в волокне снижалось с увеличением концентрации пектиназы в варочном растворе, а ее оптимальная концентрация составила 2–3 г/л;

- при использовании высоких концентраций целлюлолитических ферментов прочностные характеристики льняного котонина критически снизились, что ставит под сомнение возможность его дальнейшей переработки в пряжу;

- использование пектолитических ферментов, а также их смесей с целлюлазами, на стадии предварительной отварки и последующим пероксидным белием позволило получить льняное котонизированное волокно со степенью белизны на 4,3–4,5 % выше, линейной плотностью на 12–25 % ниже, потерей массы на 52–54 % ниже в сравнении с традиционно подготовленным волокном.

Таким образом, предварительная ферментная обработка позволила получить котонизированное льняное волокно с улучшенными физико-механическими свойствами.

*Работа финансировалась в рамках выполнения задания Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект № T22УЗБ-062.*

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пестис, М. В. (2011), *Состояние и перспективы производства и переработки льна в условиях Гродненской области: монография*, Гродно, ГГАУ, 168 с.
2. Национальный статистический комитет Республики Беларусь (2022), *Статистический ежегодник 2022*, Минск, Национальный статистический комитет Республики Беларусь, режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/da7/2ofs6kwxniiwet4h4icu0kdlu0roip08.pdf>. – Дата доступа: 25.10.2022.

## REFERENCES

1. Pestis, M. V. (2011), *Sostojanje i perspektivy proizvodstva i pererabotki l'na v uslovijah Grodnenskoj oblasti: monografija* [State and prospects for the production and processing of flax in the conditions of the Grodno region: monography], Grodno, GSAU, 168 p.
2. National Statistical Committee of the Republic of Belarus (2022), *Statistical Yearbook 2022*, Minsk, National Statistical Committee of the Republic of Belarus, available at: <https://www.belstat.gov.by/upload/iblock/da7/2ofs6kwxniiwet4h4icu0k>



3. Xueyun Zheng, Yimin Zhang, Xiaoxiao Liu, Cheng Li, Ying Lin and Shuli Liang (2020), High-Level Expression and Biochemical Properties of A Thermo-Alkaline Pectate Lyase From Bacillus sp. RN1 in Pichia pastoris With Potential in Ramie Degumming, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2020, Vol. 8, article 850, available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2020.00850/full>.
4. Miller, G. L. (1959), Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar, *Anal. Chem.*, 31(3), pp. 426–428.
5. Оболенская, А. В., Щеголев, В. П., Аким, Г. Л., Аким, Э. Л., Коссович, Н. Л., Емельянова, И. З. (1965), *Практические работы по химии древесины и целлюлозы*, М., 1965, 411 с.
6. Иванов, А. Н. (1989), *Физико-химические основы технологии приготовления льнотресты: дисс. ... докт. техн. наук*, Кострома, 1989, 535 с.
7. Усов, А. И., Яроцкий, С. В. (1974), Раздельное определение гексоз и пентоз при помощи о-толуидинового реагента, *Известия АН СССР. Серия химическая*, 1974, № 4, С. 877–880.
8. Кокшаров, С. А., Алеева, С. В., Скобелева, О. А., Кудряшов, А. Ю. (2011), Полимерный состав трепаного льняного волокна селекционных сортов льна-долгунца «Зарянка» и «Могилевский-2», *Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология*, 2011, Т. 54, № 6, С. 93–96.
9. Алеева, С. В. (2014), *Методологические основы совершенствования процессов биохимической модификации льняных текстильных материалов: дисс. ... докт. техн. наук*, Иваново, 2014, 396 с.
3. Xueyun Zheng, Yimin Zhang, Xiaoxiao Liu, Cheng Li, Ying Lin and Shuli Liang (2020), High-Level Expression and Biochemical Properties of A Thermo-Alkaline Pectate Lyase From Bacillus sp. RN1 in Pichia pastoris With Potential in Ramie Degumming, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2020, Vol. 8, article 850, available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2020.00850/full>.
4. Miller, G. L. (1959), Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar, *Anal. Chem.*, 31(3), pp. 426–428.
5. Obolenskaja, A. V., Shhegolev, V. P., Akim, G. L., Akim, Je. L., Kossovich, N. L., Emel'janova, I. Z. (1965), *Prakticheskie raboty po himii drevesiny i celljulozy* [Practical works on wood chemistry and cellulose], М., 1965, 411 p.
6. Ivanov, A. N. (1989), *Fiziko-himicheskie osnovy tehnologii prigotovlenija l'notresty* [Physical-chemical foundations of preparing rotted straw]: dissertation for doctor of technical science, Kostroma, 1989, 535 p.
7. Usov, A. I., Jarockij, S. V. (1974), *Separate determinations of hexoses and pentoses with the help of an o-toluidine reagent* [Razdel'noe opredelenie geksoz i pentoz pri pomoshhi o-toluidi-novogo reagenta], *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Chemical series – Izvestija AN SSSR. Serija himicheskaja*, 1974, № 4, pp. 877–880.
8. Koksharov, S. A., Aleeva, S. V., Skobeleva, O. A., Kudryashov, A. Yu. (2011), *Polymer composition of scutched flax fiber of varieties of long-fibred flax "Zaryanka" and "Mogilev-2"* [Polimernyj sostav trepanogo l'njanogo volokna selekcionnyh sortov l'na-dolgunca "Zarjanka" i "Mogilevskij-2"], *News of higher educational institutions. Series: chemistry and chemical technology – Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Serija: himija i*

*himicheskaja tehnologija*, 2011, Vol. 54, № 6, pp. 93–96.

9. Aleeva, S. V. (2014), *Metodologicheskie osnovy sovershenstvovanija processov biohimicheskoy modifikacii l'njanyh tekstil'nyh materialov* [Methodological foundations of improving the processes of biochemical modification of linen textile materials]: dissertation for doctor of technical science, Ivanovo, 2014, 396 p.

*Статья поступила в редакцию 31. 10. 2022 г.*