

БИОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОТОНИЗИРОВАННОГО ЛЬНЯНОГО ВОЛОКНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФЕРМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПЕКТИНАЗ

BIOCHEMICAL TECHNOLOGY FOR PRODUCING COTTONIZED FLAX FIBER USING ENZYME COMPOSITIONS BASED ON PECTINASES

УДК 677.11/027.2

Д.Л. Лисовский*, Н.Н. Ясинская, А.А. Кузнецов
Витебский государственный технологический университет

<https://doi.org/10.24412/2079-7958-2023-1-18-25>

D. Lisouski*, N. Yasinskaya, A. Kuznetsov
Vitebsk State Technological University

РЕФЕРАТ

ЛЕН, КОТОНИЗИРОВАННОЕ ВОЛОКНО, БИООТВАРКА, ФЕРМЕНТНАЯ ОБРАБОТКА

Классическая технология щелочной отварки с последующим белением, используемая в текстильном производстве для химической котонизации льняного волокна, обладает рядом недостатков. Она включает в себя применение агрессивных химических реагентов, высокое потребление энергии и воды, а также негативное воздействие на окружающую среду.

В статье рассмотрен потенциал применения ферментных композиций на основе пектиназ в качестве альтернативы классической технологии щелочной отварки. Проведена биоотварка котонизированного льняного волокна с использованием ферментных композиций различного состава на основе пектиназ в промышленных условиях РУПТП «Оршанский льнокомбинат». Биохимический способ получения отбеленного котонизированного волокна включает операции биохимической и окислительной варки. Полученное отваренное волокно обладало меньшей массодлиной, ее снижение было более выраженным, а диаметр на 6,5 % меньше в сравнении с волокном, полученным традиционным способом. Предварительно обработанное ферментными композициями льняное волокно с последующим белением продемонстрировало сопоставимую величину диаметра с волокном, полученным в результате щелочной отварки. Содержание целлюлолитической активности в композиции

ABSTRACT

FLAX, COTTONIZED FIBER, BIOSCOURING, ENZYME TREATMENT

The classical technology of alkaline decoction followed by bleaching, used in the textile industry for the chemical cottonization of flax fiber, has a number of disadvantages. It includes the environmental impact of aggressive chemicals, high energy and water consumption, and negative environmental impacts.

Using production facilities of Orsha Linen Mill, bioscouring of cottonized flax fiber was carried out by introducing various enzyme compositions based on pectinases. The biochemical method for producing bleached cottonized fiber includes the operations of biochemical and oxidative pulping. The produced scoured fiber had a smaller mass length, its decrease was more evident, and the diameter was 6.5 % smaller in comparison with the fiber produced by the traditional method. The pretreated with enzymes and bleached flax fiber showed a comparable diameter value with the fiber obtained as a result of alkaline scouring. The content of cellulolytic activity in the composition increased the content of short fibers, but contributed to a decrease in the average diameter by more than 35 %. It has been proven that pre-enzymatic treatment makes it possible to produce fine cottonized flax fiber suitable for the production of yarn with improved quality indicators.

* E-mail: lisouskid@gmail.com (D. Lisouski)

увеличивало содержание коротких волокон, но способствовало снижению среднего диаметра на более чем на 35 %. Доказано, что предварительная ферментная обработка позволяет получить тонкое котонизированное льняное волокно, пригодное для производства пряжи с улучшенными качественными показателями.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время льняная отрасль Республики Беларусь олицетворяет собой одну из стратегически важных отраслей национальной экономики. Производство льняных тканей и изделий на их основе в Республике Беларусь имеет долгую историю и значительный опыт, что позволяет конкурировать на мировом рынке текстильной продукции. Однако рентабельность льноводства может колебаться из-за различных факторов, таких как изменение мировых цен, урожайность и качество льна [1].

Переработка отходов льняной промышленности и короткого льняного волокна является одним из способов увеличения рентабельности льноводства в Республике Беларусь. Примером такой переработки является получение котонизированного льняного волокна. Котонизация льна – это технологический процесс, при котором льняное волокно подвергается специальной обработке, благодаря чему оно становится мягким, пластичным, происходит его расщепление, и волокно приобретает свойства, схожие с хлопковым [2].

Котонизация может стать одним из способов увеличения рентабельности льноводства по следующим причинам:

- Расширение рынка сбыта: котонизированный лен может использоваться в производстве разнообразной текстильной продукции, такой как одежда, домашний текстиль, текстиль для гостиниц и ресторанов. Это поможет привлечь больше покупателей и повысить спрос на льняные изделия.
- Диверсификация продукции: производство котонизированного льна позволяет разнообразить ассортимент товаров, производимых из льна, что может привлечь новых потребителей и увеличить доходы производителей.

- Замена импортного хлопка: в некоторых случаях котонизированный лен может заменить импортный хлопок, что позволит снизить зависимость от импорта и улучшить баланс внешней торговли страны.

- Экологическая устойчивость: лен является более экологичным и устойчивым растением по сравнению с хлопком, поскольку требует меньше воды, пестицидов и минеральных удобрений. Это может стать конкурентным преимуществом котонизированных льняных изделий перед хлопчатобумажными.

- Уникальные свойства льна: льняные волокна обладают уникальными свойствами, такими как высокая прочность, гигроскопичность, антибактериальность и терморегуляция. Котонизированный лен сохраняет эти свойства, что делает его привлекательным для потребителей.

РУПТП «Оршанский льнокомбинат» является одним из крупнейших предприятий в Республике Беларусь, специализирующихся на производстве льняных текстильных изделий. Комбинат был основан в 1940-х годах и с тех пор развился до крупного производителя льняных изделий на мировом рынке. На РУПТП «Оршанский льнокомбинат» реализована химико-механическая технология котонизации льняного волокна, которая включает механическую стадию котонизации на линии фирмы ТЕМАФА, и стадию химической обработки полученного волокна щелочным раствором при высокой температуре с последующим белением пероксидом водорода в аппаратах «Эко блок X-1600». Это позволяет получать котонин, пригодный для переработки в пряжу пневмомеханическим способом.

Тем не менее классическая технология щелочной отварки льняного волокна с последующим белением, используемая в производстве, обладает рядом недостатков. Она включает в

себя применение агрессивных химических реагентов, высокое потребление энергии и воды, а также негативное воздействие на окружающую среду.

В связи с вышеизложенным, выполненная работа была направлена на разработку новых подходов к производству котонизированного льняного волокна, базирующихся на использовании ферментных композиций на основе пектиназ, что позволяющих снизить экологический след процесса и повысить экономическую эффективность. В статье рассмотрен потенциал применения ферментных композиций на основе пектиназ в качестве альтернативы классической технологии щелочной отварки.

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 композиций на основе пектиназ производства ООО «Фермент», Республика Беларусь.

Полигалактуронозную 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 см³ раствора пектина, 4 см³ 0,1 М цитратного буфера и 1 см³ раствора фермента. Ферментативную реакцию останавливали путем кипячения реакционной смеси в течение 5 минут на водяной бане. После этого отбирали 5 см³ реакционной смеси, добавляли 2 см³ 1 М раствора карбоната натрия и 5 см³ 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 галактуронозой кислоты, после чего добавляли 2 см³ 1 М раствора серной кис-

лоты и титровали 0,05 М стандартным раствором тиосульфата натрия оставшийся йод до исчезновения синей окраски, в конце титрования добавляя в качестве индикатора 1 % раствор крахмала. За единицу полигалактуронозной активности принимали такое количество фермента, при действии которого на пектин образуется 1 мг галактуронозой кислоты за один час при температуре 50 °С и pH 3,5.

Пектатлиазную активность определяли спектрофотометрическим методом по количеству ненасыщенных продуктов деструкции полигалактуронозой кислоты под действием ферментного препарата на полигалактуронозную кислоту по известной методике [3] с небольшими изменениями. В качестве субстрата использовали 0,2 % раствор полигалактуронозой кислоты (Sigma 81325) в 0,2 М глицин-NaOH буферном растворе с pH 9,0, содержащем 1 мМ хлорида кальция. За единицу пектатлиазной активности принимали такое количество фермента, при действии которого на полигалактуронозную кислоту за одну минуту при температуре 45 °С и pH 9,0 образуется 1 микроль 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%-ый раствор натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (Sigma 21902, medium viscosity) в 0,1 М ацетатном буферном растворе с pH 5,0 при определении активности кислой целлюлазы и в 0,1 М фосфатном буферном растворе с 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 °С и pH 6,0 образуется 1 микроль восстанавливающих сахаров в пересчете на глюкозу.

Определение липазной активности проводили согласно [5] с модификациями. Метод основан на фотометрическом определении *p*-нитрофенола, образующегося в результате действия липазы на субстрат *p*-нитрофенилпальмитат. За единицу липазной активности принято такое количество фермента, при действии которого на

субстрат образуется 1 мкмоль п-нитрофенола за одну минуту при температуре 40 °С и рН 8,0.

Методики оценки физико-механических свойств волокна

Физико-механические характеристики (линейная плотность, массовая доля сорных примесей и костры, массовая доля коротких волокон до 15 мм, массовая доля волокон длиной свыше 40 мм, средняя массодлина волокна) исходного и обработанного котонина определяли по [6, 7].

Диаметр волокна определяли на микроскопе Альтами MET 5Т, предварительно подготавливая штапель путем расчесывания пучка волокон. Для каждого образца проводили 210 измерений. Статистическую обработку полученных данных, а также значения среднего диаметра, процентов D10, D50 и D90 получали при помощи программного обеспечения TIBCO Statistica 13.5.017.

Результаты и обсуждение

Опираясь на результаты предыдущей работы [8] были разработаны ферментные композиции нескольких составов, характеристика которых приведена в таблице 1.

Апробация ферментных композиций состава № 1 и состава № 3 была проведена на производственных мощностях РУПТП «Оршанский льнокомбинат» по технологической схеме, приведенной на рисунке 1, а ферментной композиции состава № 2 – по технологической схеме, приведенной на рисунке 2. Традиционный процесс на предприятии реализуется с использованием щелочной отварки при температуре 100–110 °С в течение 3 часов при общей щелочности раствора 11 г/л при получении отваренного волокна, и в течение 1 часа при общей щелочности раствора 5,5–5,7 г/л с последующим белением при получении отбеленного волокна.

Таблица 1 – Характеристика ферментных композиций

Ферментная композиция	Ферментативная активность*, ед/мл			
	ПГ	ПЛ	Ц	Л
Состав № 1	360	330	-	-
Состав № 2	320	300	205	-
Состав № 3	320	300	400	300

Примечание: *ПГ – полигалактуроназная, ПЛ – пектацелиазная, Ц – целлюлазная, Л – липазная

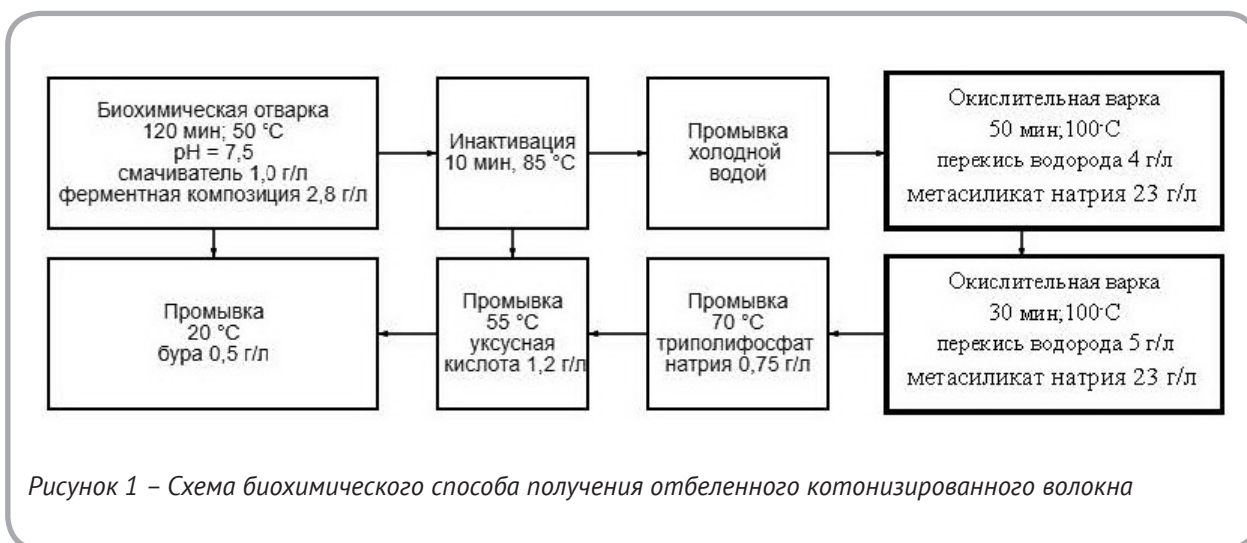


Рисунок 1 – Схема биохимического способа получения отбеленного котонизированного волокна



Рисунок 2 – Схема биохимического способа получения отваренного котонизированного волокна

Для подтверждения эффективности предложенной биохимической технологии были проведены исследования физико-механических свойств обработанного льняного волокна в сравнении с волокном, обработанным традиционным способом (ходовой режим) (таблица 2).

Сравнивая два технологических режима, можно заметить, что в отваренном волокне по предложенному технологическому режиму с ферментной композицией наблюдается небольшое увеличение массовой доли коротких волокон до 15 *мм* и снижение массовой доли волокон длиной свыше 40 *мм*.

Снижение средней массодлины волокна после обработки по предложенному технологическому режиму с ферментной композицией составляет 7,5 *мм*, тогда как для ходового технологического режима это снижение составляет всего 1,2 *мм*. Это означает, что снижение массодлины волокна при использовании предложенного технологического режима с ферментной композицией оказывается более выраженным, чем при ходовом технологическом режиме. Это может указывать на то, что биохимическая обработка с использованием ферментной композиции может вызывать некоторое разрушение волокон.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики исходного (сурового) и отваренного льняного волокна

Волокно	Линейная плотность, <i>текс</i>	Массовая доля сорных примесей и костры, %	Массовая доля коротких волокон до 15 <i>мм</i> , %	Массовая доля волокон длиной свыше 40 <i>мм</i> , %	Средняя массодлина волокна, <i>мм</i>
Суровое волокно для предложенного технологического режима	1,82	1,7	9	59,5	51,6
Отваренное волокно по предложенному технологическому режиму с ферментной композицией (состав № 2)	1,38	1,4	17	48,5	44,1
Суровое волокно для ходового технологического режима	1,74	0,8	10	56,0	48,0
Отваренное по ходовому технологическому режиму	1,47	1,1	19	53,0	46,8

Однако стоит отметить, что предложенный технологический режим с ферментной композицией позволяет получить волокно с меньшей линейной плотностью, что указывает на более мягкие и гибкие волокна. Кроме того, этот метод также обеспечивает более высокую эффективность удаления сорных примесей и костры.

Результаты анализа отбеленного волокна, полученного традиционным способом и по предложенной биохимической технологии представлены в таблице 3.

В опыте I предложенный технологический режим с использованием ферментной композиции (состав № 1) приводит к менее значительному снижению средней массодлины волокна по

сравнению с ходовым технологическим режимом. В тоже время среднее значение диаметра полученного волокна обоими методами сопоставимо, что указывает на возможность использования полученного биохимическим способом волокна для производства тонких пряж и тканей. Однако массовая доля коротких волокон увеличивается по сравнению с традиционным способом, что может влиять на качество готовой продукции.

В опыте II предложенный технологический режим с использованием ферментной композиции (состав № 3) показывает различные результаты в зависимости от эксперимента. В целом, средняя массодлина волокна снижается, а

Таблица 3 – Физико-механические характеристики исходного (сурового) и отбеленного льняного волокна

Волокно	Массовая доля сорных примесей и костры, %	Массовая доля коротких волокон до 15 м.м, %	Массовая доля волокон длиной свыше 40 м.м, %	Средняя массодлина волокна, м.м	Среднее значение диаметра, мк.м	Минимальное значение диаметра, мк.м	Максимальное значение диаметра, мк.м	D10, мк.м	D50, мк.м	D90, мк.м
Опыт I										
Суровое волокно	1,7	10	61	53,9	44,6	10	204	14	30	95
Отбеленное волокно по предложенному технологическому режиму с ферментной композицией (состав № 1)	1,5	20	49	44,6	39,8	10	208	16	27	85
Обработанное по ходовому технологическому режиму	0,4	14	42	37,1	38,7	9	164	12	24	93
Опыт II										
Суровое волокно для предложенного технологического режима	2,3	13	54,5	45,2	44,6	10	198	15	32	97
Отбеленное волокно по предложенному технологическому режиму с ферментной композицией (состав № 3). Опыт № 1	1,8	22	34,5	31,5	27,9	9	175	12	18	56
Отбеленное волокно по предложенному технологическому режиму с ферментной композицией (состав № 3). Опыт № 2	1,7	18	34,5	33,2	23,5	8	133	13	19	38
Отбеленное волокно по предложенному технологическому режиму с ферментной композицией (состав № 3). Опыт № 3	1,7	23	39,5	33,6	23,2	8	125	13	20	36

массовая доля коротких волокон увеличивается в сравнении с опытом I. Вероятная причина этого явления связана с наличием целлюлазной активности в ферментной композиции (состав №3).

Волокно, обработанное предложенным биохимическим технологическим режимом с использованием ферментных композиций (составы № 1 и № 3), демонстрирует снижение среднего значения диаметра волокна по сравнению с суровым волокном. Это указывает на эффективность ферментной обработки в разрушении и удалении нежелательных примесей, и создании более однородной структуры волокна. Предложенная ферментная композиции (состав № 3), содержащая целлюлазу и липазу, позволила получить льняное волокно с диаметром более чем на 35 % меньше, чем с композицией, не содержащей данных активностей.

Результаты также показывают, что биохимическая технология обработки льняного волокна приводит к снижению разброса значений диаметра волокна, что может свидетельствовать о более контролируемом и стабильном процессе обработки.

Предложенный биохимический способ обработки льняного волокна также показывает положительные изменения в параметрах D10, D50 и

D90, что свидетельствует о более узком распределении размеров волокон и более однородной структуре.

В целом, результаты анализа диаметра волокна указывают на положительное влияние биохимических способов подготовки льняного волокна. Это открывает новые возможности для применения таких технологий в текстильной промышленности, снижая затраты и уменьшая экологическую нагрузку.

ВЫВОДЫ

Предложенный биохимический способ получения льняного котонина с использованием ферментных композиций на основе пектиназ позволяет улучшить качество льняного волокна, при этом снизив негативное воздействие на окружающую среду. Результаты исследований, представленные в данной статье, могут стать основой для внедрения новых технологий в льняную отрасль Республики Беларусь и повышения ее конкурентоспособности на мировом рынке.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шаршунов, В. А., Алексеенко, А. С., Цайц, М. В. (2019), Состояние льноводческой отрасли Республики Беларусь и пути повышения ее эффективности, *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*, 2019, № 2, С. 267–271.
2. Науменко, А. М., Рыклин, Д. Б. (2015), Разработка технологии льнохлопковой пряжи пневмомеханического способа формирования, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2015, № 28, С. 86–94.

REFERENCES

1. Sharshunov, V. A., Alekseenko, A. S., Cajc, M. V. (2019), State of the flax industry in the Republic of Belarus and ways to improve its efficiency [Sostojanie l'novodcheskoj otrasli Respubliki Belarus' i puti povyshenija ee jeffektivnosti], *Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel'skhozajstvennoj akademii – Bulletin of Belarussian State Agricultural Academy*, 2019, № 28, pp. 267–271.
2. Naumenko, A. M., Ryklin, D. B. (2015), Development of technology for flax-cotton yarn of the pneumo-mechanical method of formation [Razrabotka tehnologii l'nohlopkovoj prjazhi pnevmomehanicheskogo sposoba

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, *Journal of Analytical Chemistry*, 1959, Vol. 31, Is. 3, pp. 426–428.
5. Daniel R Lewis, Dongzhou J Liu (2012), Direct Measurement of Lipase Inhibition by Orlistat Using a Dissolution Linked In Vitro Assay, *Clinical Pharmacology & Biopharmaceutics*, 2012, № 01(03), available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25419492/>.
6. ГОСТ Р 53483-2009. Волокно льняное модифицированное суровое. Методы испытаний. Введ. 01.01.2011, Москва, Стандартинформ, 12 с.
7. ГОСТ Р 53232-2008. Волокно хлопковое. Методы определения длины. Введ. 01.01.2010, Москва, Стандартинформ, 16 с.
8. Лисовский, Д. Л., Ясинская, Н. Н. (2022), Влияние ферментной обработки на свойства льняного котонина, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2022, № 2 (43), С 94–103.
- formirovanija], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2015, № 28, pp. 86–94.
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, *Journal of Analytical Chemistry*, 1959, Vol. 31, Is. 3, pp. 426–428.
5. Daniel R Lewis, Dongzhou J Liu (2012), Direct Measurement of Lipase Inhibition by Orlistat Using a Dissolution Linked In Vitro Assay, *Clinical Pharmacology & Biopharmaceutics*, 2012, № 01(03), available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25419492/>.
6. GOST R 53483-2009. *Modified harsh flax fiber. Testing methods*. Vved. 01.01.2011, Moscow, Standartinform, 12 p.
7. GOST R 53232-2008. *Cotton fiber. Methods for determining the length*. Vved. 01.01.2010, Moscow, Standartinform, 16 p.
8. Lisouski, D. L., Yasinskaya, N. N. (2022), The effect of enzyme treatment on the properties of cottonized flax fiber [Vlijanie fermentnoj obrabotki na svojstva l'njnogo kotonina], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2022, № 2 (43), pp. 94–103.

Статья поступила в редакцию 15. 05. 2023 г.