

ФЕРМЕНТАТИВНАЯ МОДИФИКАЦИЯ КОТОНИНА ЛЬНА В ТЕХНОЛОГИЯХ ПОЛУЧЕНИЯ ОТБЕЛЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

А.В. Чешкова¹, К.К. Горюнов¹, В.А. Логинова², В.А. Козлов²

¹Кафедра химической технологии волокнистых материалов, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметьевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

²АО «Химброкер», Дмитровское ш., 85, Москва, Российская Федерация, 125504

E-mail: a_cheshkova@mail.ru, kirillgoryunov@list.ru, vera.loginovanew@gmail.com, kozlov@isuct.ru

В работе представлены сравнительные результаты анализа геометрических свойств, химического состава котонизированной лигноцеллюлозы и отбеленной целлюлозы на ее основе. Оценена возможность применения ферментативной модификации кислыми ферментами как предварительной стадии к щелочно-перекисному отбеливанию льняного котонина по сокращенной периодической технологии. Новый подход к процессу освобождения целлюлозы от сопутствующих примесей основан на ферментативном селективном гидролизе пектинов и гемицеллюлоз, а также удалении лигнина за счет нарушения лигноуглеводной структуры льноволокна. Осуществлен выбор композиции кислых ферментов класса гидролаз, пригодных для проведения ферментативной модификации за счет гидролитической деструкции нецеллюлозных полисахаридов и удаления продуктов деструкции их на стадии промывки. Оптимизирована концентрация пероксида водорода в составе белящего раствора для окислительной деструкции остаточных нецеллюлозных примесей и обесцвечивания окрашенных полифенолов. Полученные отбеленные хлопкоподобные льняные волокна пригодны в качестве альтернативного источника целлюлозы для производства материалов широкого назначения, в том числе сырья для легкой промышленности.

Ключевые слова: ферменты, пектиназа, ксиланаза, льняное волокно, ферментативный гидролиз, пероксидное беление, целлюлоза, полисахариды

ENZYMATIC MODIFICATION OF COTTON IN BLEACHED PULP PRODUCTION TECHNOLOGIES

A.V. Cheshkova¹, K.K. Goryunov¹, V.A. Loginova², V.A. Kozlov²

¹Department of Chemical Technology of Fibrous Materials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetievsky Ave., 7, Ivanovo, 153000, Russian Federation

²AO 'Himbroker', Dmitrovskoye Shosse, 85, Moscow, 125504, Russian Federation

E-mail: a_cheshkova@mail.ru, kirillgoryunov@list.ru, vera.loginovanew@gmail.com, kozlov@isuct.ru

The paper presents comparative results of the analysis of the geometric properties and chemical composition of cottonised flax cellulose and bleached flax cellulose based on it. The possibility of using enzymatic modification with acid enzymes as a preliminary stage to alkaline-peroxide bleaching of flax cottonin using a shortened periodic technology has been assessed. A new approach to the process of removing impurities from cellulose is based on the enzymatic selective hydrolysis of pectins and hemicelluloses, as well as the removal of lignin by disrupting the lignocellulosic structure of flax fibre. A selection of acid enzymes of the hydrolase class suitable for enzymatic modification by hydrolytic destruction of non-cellulose polysaccharides and removal of their destruction products at the washing stage has been made. The concentration of hydrogen peroxide in the bleaching solution was optimised for the oxidative destruction of residual non-

cellulose impurities and the decolourisation of coloured polyphenols. The resulting bleached cotton-like flax fibres are suitable as an alternative source of cellulose for the production of general-purpose materials, including raw materials for light industry.

Keywords: enzymes, pectinase, xylanase, flax fibre, enzymatic hydrolysis, peroxide bleaching, cellulose, polysaccharides

Для цитирования:

Чешкова А.В., Горюнов К.К., Логинова В.А., Козлов В.А. Ферментативная модификация котонина льна в технологиях получения отбеленной целлюлозы. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 4. С. 92–98. DOI: 10.6060/rcj.2025694.15.

For citation:

Cheshkova A.V., Goryunov K.K., Loginova V.A., Kozlov V.A. Enzymatic modification of cotton in bleached pulp production technologies. *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 4. P. 92–98. DOI: 10.6060/rcj.2025694.15.

ВВЕДЕНИЕ

Хлопкоподобные волокна льна актуальны как сырье при получении смесовой пряжи и тканей, волокнистой массы для производства нетканых материалов, отбеленной целлюлозы для химической и целлюлозно-бумажной промышленности [1–3]. Высокое содержание целлюлозы в льняном волокне, наряду со значительно меньшим, чем у пеньки (технической конопли) или древесины количеством лигнина, является веским аргументом, характеризующим данный вид сырья с точки зрения экономичности технологического процесса переработки в высокоочищенную целлюлозу. Для сокращения зависимости России от импортного хлопка и, соответственно, развития легкой промышленности, внедрение технологии котонизации льна, очистки его от сопутствующих примесей и технологий сокращенного беления, то есть переработка волокна до хлопкообразного состояния, является приоритетной стратегической задачей.

Анализ литературных сведений по исследуемому вопросу показывает особый интерес к получению отбеленной целлюлозы по требованиям ГОСТ 5556-2022 (вата гигроскопическая) и ГОСТ 595-79 (хлопковая целлюлоза), а также порошковой целлюлозы (ПЦ), микрокристаллической целлюлозы (МКЦ). Большинство известных способов производства отбеленной целлюлозы основано на восстановительной щелочной варке, окислении серной кислотой с последующим белением пероксидом водорода [4–10]. Для активации процессов деструкции и удаления сопутствующих хлопковой, льняной или древесной целлюлозы примесей применяется сульфатная (растворами NaOH и Na₂S) или сульфитная варка (растворами гидросульфита кальция, магния, натрия, содержащими свободный SO₂). Интенсификация процесса достигается путем

повышения температуры процесса до 120–140 °C и давления до 1,2–1,25 МПа, введением в состав поверхностно-активных веществ, серосодержащих восстановителей, таких как ронгалит, бисульфит натрия NaHSO₃ или сульфит натрия Na₂SO₃, а также комплексонов, например, на основе этилидендифосфоновой кислоты. Основными недостатками способов с применением щелочной варки являются высокая энергоемкость процесса, возможность протекания реакций конденсации продуктов разрушения примесей и особенно полифенолов (лигнина). Образование темноокрашенных продуктов реакции и процессы ресорбции их на волокно, применительно к оборудованию периодического действия, затрудняет отбеливание волокна. Копирование технологий получения древесной целлюлозы или хлопковой целлюлозы применительно к льняному волокну требует повышенных концентраций белящих реагентов, приводит к большому расходу технологической воды на промывки и энергоемкости процесса, загрязнению стоков, их зашлаковыванию, что является неприемлемым с экономической и экологической точки зрения. Общая длительность известных процессов превышает 10–15 ч, что снижает производительность производств.

Поскольку в льняном волокне в отличие от хлопкового волокна нет воскообразных веществ, то нами предложено заменить стадию щелочной отварки на биоотварку с применением кислых гидролаз (ферментов), катализирующих гидролиз нецеллюлозных примесей льна (пектинов и гемицеллюлоз). Использование низкотемпературных ферментативных процессов применительно к растительной целлюлозе и технологиям делигнификации льна рассматривается как перспективное направление и широко представлено в научно-исследовательской литературе как российских научных школ, так и зарубежных. Ксиланазы широко

используются в процессах обработки сульфатной древесной целлюлозы начиная с 70-х г. XX века, а технологии с применением пектиназ и высокоспецифичных целлюлаз с тополитической активностью применяются для селективного катализа гидролиза нецеллюлозных полисахаридов, в том числе и льна [11-21].

Целью настоящей работы являлось обоснование применения ферментации как стадии процесса щелочно-перекисного беления котонизированного льняного волокна с целью сокращения технологического цикла получения отбеленной целлюлозы пригодной для нужд легкой промышленности.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объектом исследования являлось льняное котонизированное волокно, полученное механическим способом из короткого льняного волокна (ГОСТ 9394-76) на линии котонизации Кашинского льнокомбината (Тверская область), стандартизируемое по ГОСТ Р 53483-2009 «Волокно льняное модифицированное суровое». Экспериментальные исследования проводили с применением физических и физико-химических методов анализа, стандартных методик ГОСТ 53226-2008 (Хлопковая целлюлоза), ГОСТ 5556-2022 (Вата медицинская гигроскопическая). В настоящем исследовании выбор ферментов для модификации льняного волокна перед пероксидным белением обусловлен необходимостью гидролиза полигалактоуридов, галактоманнанов, арабиногалактанов и других сложных полисахаридов льна. В эксперименте использованы препараты Концерн Микробиопром (Россия) производимые на предприятиях РФ, а именно Пектиназа (эндо- α -1,4-полигалактуроназа, пекто-

лаза, 60 ед/г), катализирующая гидролиз внутренних 1-4-связанных α -D-галактуронозидных связей полисахаридов, Ксиланаза (ES 3.2.1.8, 10000 ед/г), катализирующая гидролиз 1,4- β -D-ксилозидных связей в ксилане и Маннаназа (10000 ед/г), катализирующая неупорядоченный гидролиз внутренних β -1,4-маннозидных связей галакто(-глюко)маннанов. Обработку льняного котонина в растворе композиции ферментов (5 г/л) проводили при pH 4,8, создаваемой серной кислотой, температуре 37–40 °C, модуле раствора 1:10 на установке, моделирующей работу котлового оборудования периодического действия. Масса образца составляла 100 г. После ферментации проводилась промывка-нейтрализация щелочным раствором, слив промывных и промывка холодной водой 20 °C. Белиение щелочно-пероксидным способом осуществляли в одну стадию. Сушка образцов после промывок в сушильной камере проводилась при температуре 80 °C до остаточной влажности 13%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом электронной растровой микроскопии показано наличие на поверхности комплексного льноволокна и в межклеточном пространстве лигноуглеводных армирующих структур, плотного гемцеллюлозного барьера (рис. 1, а, б). Этот слой создает условия, препятствующие набуханию клеящих веществ, диффузии белящих реагентов и пероксида водорода в объем лубяного пучка, а также сорбции их на поверхности многокомпонентного субстрата. Показано, что глубокая ферментная котонизация котонина композицией ферментов обеспечивает эффективный гидролиз нецеллюлозных примесей и как следствие очищение поверхности (рис. 1, в, г).

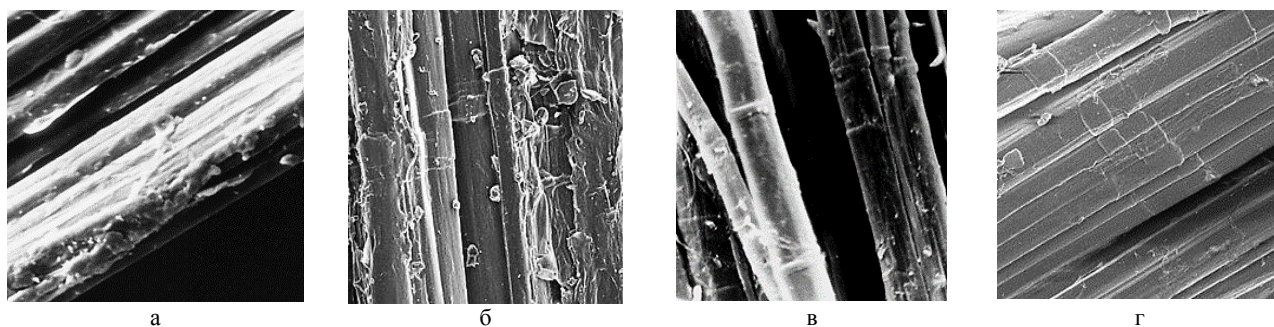


Рис. 1. Микрофотографии льняного волокна в процессе котонизации (электронный микроскоп Tescan VEGA 3 SBH): нативное короткое комплексное льноволокно с элементами паренхимных структур (а, б), волокно ферментативно-модифицированного льна (в, г)

Fig.1. Micrographs of flax fiber during cottonization (Tescan VEGA 3 SBH electron microscope): native short complex flax fiber with elements of parenchymal structures (a, b), enzymatically modified flax (v, g)

Таблица 1

Содержание сопутствующих примесей льняной целлюлозы и котонина льна

Table.1. Content of concomitant admixtures of flax pulp and cottonin flax

Наименование образца/ технологии	Пектины, % ±0,1	Гемицеллюлозы КФ*, % ±0,2	Гемицеллюлозы ЩФ*, % ±0,1	Лигнин, % ±0,1	Суммарное содержание примесей, % ±1
Короткое льно волокно (исходное сырье)	4,6	15,9	9,8	11,9	42,2
Котонин без обработки	2,9	14,9	8,0	9,9	35,7
Ферментация с пектиназой	1,8	7,5	5,1	5,7	20,0
Ферментация композицией	0,8	3,1	3,5	3,5	10,9
Щелочная варка, 100 °С, 60 мин	0,6	3,8	4,5	1,5	10,4
Окислительная варка ^a	0,19	3,2	0,5	0,7	4,59

Примечание: *КФ – кислоторастворимая фракция, ЩФ – щелочерастворимая фракция

^a – хлопковая технология (щелочная варка, щелочно-перекисное белиение)Note: ^a – cotton technology (alkaline cooking, alkaline peroxide bleaching)

Таблица 2

Сорбция и геометрия волокон льна различными способами котонизации

Table 2. Sorption and geometry of flax fibers by various cottonizing methods

Обработка	Тонина комплекс, мкм ± 0,1	Средняя длина, мм ± 1	Диаметр моноволокон, мкм, ± 1		S _{уд} Микро/ S _{уд} Макро м ² /г ± 0,1	Капиллярность, мм/мин	Поглотительная способность, г/г
			сухое	в воде 20 °С			
Исходное сырье	78,3	421,9	35	37	1,1/10,1	3-5	11,9
Котонин без обработки	43,3	48,5	30	38	2,1/11,9	8-10	16,3
Ферментация пектиназой	40,2	45,1	26	29	10,9/70,9	30-35	16,3
Ферментация композицией	35,9	40,1	24	30	12,7/74,5	45-55	17,4
Щелочная варка, 100 °С, 60 мин	30,1	36,2	23	31	10,2/70,0	32-38	17,2
Окислительная варка*	29,7	32,1	16	19	13,0/75,0	60-65	18,9

Примечание: * по хлопковой технологии

Note: * by cotton technology

Установлено, что содержание лигнина, определенного гидролитически-весовым методом в котонине, обработанном мультиэнзимным составом составляет в среднем 3,5%, пектинов – 0,8%, гемицеллюлоз (кислоторастворимая фракция: галактан, арабан) – 4,1%, гемицеллюлоз (щелочерастворимая фракция: ксилан, маннан) – 3,5%, при суммар-

ном снижении сопутствующих примесей относительно исходного волокна, определяемых по мутности сернокислотных растворов более чем на 50% (Табл. 1).

Изменение микрорельефа поверхности волокон, рост удельной поверхности (S_{уд}), в результате расщепления комплексного волокна в процессе ферментации, частичного удаления лигнина

и ороговевших гемицеллюлоз, выполняющих роль гидрофобного “аморфного наполнителя”, имеющих с лигнином ковалентные связи и занимающих пространство между микрофибриллами целлюлозы, обеспечивает повышение способности к набуханию и рост капиллярных свойств (табл. 2).

Оценена отбеливаемость льняных волокон после ферментации (табл. 3). Белящий раствор содержал в г/л: гидроксид натрия – 1, пероксид водорода – X; соду кальцинированную – 10; мочевины – 10; силикат натрия – 10; ПАВ-сульфосид – 0,1. Белиение при 98–100 °С проводили в течение 45 мин. Установлено, что при концентрации пероксида водорода 12 г/л льняное ферментированное волокно имеет требуемую по ГОСТ белизну более 88% при этом потери массы находятся в допустимых пределах, сравнимых с удалением сопутствующих при-

месей. О делигнификации котонина льна, деструкции и удалении окрашенных полифенолов и дубильных веществ, имеющих желто-коричневый цвет, свидетельствует снижение показателя красноты (а) и желтизны (б). Можно отметить, что хлопковое волокно (контроль) при повышении концентрации пероксида водорода не дает прирост белизны до требуемых значений (88%).

Полупроизводственными испытаниями, проведенными на аппаратах периодического действия в условиях отбельного цеха показано, что технология перекисного белиения с предварительной ферментацией позволяет получить котонин с высоким содержанием альфа-целлюлозы (ГОСТ 6840-78 Метод определения содержания альфа-целлюлозы) (табл. 4). Степень полимеризации целлюлозы и динамическая вязкость превышают результаты химической технологии белиения.

Таблица 3

Влияние концентрации пероксида водорода в белящем растворе на технические свойства льняного и хлопкового волокна

Table. 3. Effect of the concentration of hydrogen peroxide in the bleaching solution on the technical properties of bleached flax and cotton fibers

Образец	Потеря массы, ±0,5 %	Белизна, ±0,2 %	L Светлота ±0,1 %	а +краснее (-) зеленее	б +желтее (-) синее
H ₂ O ₂ г/л – 12 (100%)					
Без ферментации	24	84,3	90,5	-0,21	8,8
Ферментация	30	88,5	92,9	-0,23	4,2
Хлопок	3	86,6	96,1	0,20	1,9
H ₂ O ₂ г/л – 6 (100%)					
Без ферментации	21	80,0	88,5	-0,17	10,8
Ферментация	26	84,5	90,8	0,18	6,2
Хлопок	1	85,6	94,1	0,15	2,1
H ₂ O ₂ г/л – 2 (100%)					
Без ферментации	10	75,4	85,0	0,17	9,4
Ферментация	18	79,2	88,1	-0,11	13,9
Хлопок	1	84,6	93,0	-0,14	3,3

Таблица 4

Сравнительные результаты полупроизводственных испытаний технологий белиения котонина льна

Table. 4. Comparative results of semi-production tests of the technology of reduced bleaching of cotton flax

Образец	Влажность, %, ± 0,5	Зольность, % ± 0,1	Смолы/жиры, % ± 0,01	Лигнин, % ± 0,05	Пыль, % ± 0,1	Степень полимеризации ± 10	α-целлюлоза, %	Капиллярность, мм	Белизна, %	Смачиваемость, г	Поглотительная способность, г/г волокна ± 0,1	Динамическая вязкость, ед.
1	5,9	0,5	0,12	0,59	0,9	2993	96,6	80-84	88,1	120	19,4	150
2	5,8	5,8	0,23	0,66	0,9	2285	95,7	108-110	86,5	130	20,6	146

Примечание: Образец 1 - Технология белиения с применением ферментации 3 стадии (5 ч); образец 2 - Химическая технология белиения в 4 стадии с кислотообразованием, щелочной отваркой (8 ч) без учета загрузки-выгрузки волокна, нагрева-охлаждения
Note: Bleaching technology using 3-stage fermentation (5 h); 2- Chemical bleaching technology in 4 stages with acidification and alkaline boiling (8 hours), excluding fiber loading and unloading, heating and cooling

ВЫВОДЫ

1. Обосновано применение ферментативной модификации котонина льна, сопровождающейся селективной деструкцией нецеллюлозных полисахаридов с сохранением высокомолекулярной целлюлозы, позволяющий исключить длительную энергоемкую щелочную отварку как самостоятельную стадию, что значимо для разработки энерго- и ресурсоэкономных режимов.

2. Показано, что ферментативная деструк-

ция нецеллюлозных полисахаридов льна, экранирующих целлюлозу, на первом этапе обработки котонина позволяет обеспечить высокую степень белизны (более 88%) и очистки целлюлозы от сопутствующих примесей на стадии последующего перексидного беления.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карелина А.А., Алашкевич Ю.Д., Кожухов В.А. // *Химия растительного сырья*. 2024. № 2. С. 55-75. DOI: 10.14258/jcprm.20240213401.
2. Корчагина А.А., Будаева В.В., Алешина Л.А., Люханова И.В., Бычин Н.В., Сакович Г.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 6. С. 64-74. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6598.
3. Александров А.А., Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Канарский А.В., Дебердеев Р.Я., Ямашев Т.А., Канарская З.А. // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2024. Т. 249. С. 297-309. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.297-309.
4. Завадский А.Е., Стокозенко В.Г., Мoryганов А.П., Ларин И.Ю. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2017. Т. 60. Вып. 6. С. 102-108. DOI: 10.6060/tcct.2017606.5437.
5. Бармин М.И., Гребенкин А.Н., Бойко А.И. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2004. Т. 47. Вып. 3. С. 156-158.
6. Вураско А.В., Симонова Е.И., Первова И.Г., Минакова А.Р. // *Химия растительного сырья*. 2019. № 3 (30). С. 269-276. DOI: 10.14258/jcprm.2019035203.
7. Дымникова Н.С., Ерохина Е.В. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2020. Т. 64. № 2. DOI: 10.6060/rcj.2020642.5.
8. Стокозенко В.Г., Мoryганов А.П., Ларин И.Ю., Воронина Е.Р. // *Химия растительного сырья*. 2017. № 2. С. 143-148. DOI: 10.14258/jcprm.2017021564.
9. Лисовский Д.Л., Ясинская Н.Н. // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2023. № 6 (408). DOI: 10.47367/0021-3497_2023_6_119.
10. Корчагина А.А. и др. // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2023. Т. 13. № 4. С. 621-630. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-621-630.
11. Голованова Л.В., Скропышева Е.В., Салеба Л.В. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 3/6 (51). С. 47-50.
12. Чешкова А.В., Логинова А.В., Кувшинова С.А., Буров А.А. // *Изв. Вузов. Технология легкой промышленности*. 2016. Т. 32. № 2. С. 55-59.
13. Бадретдинова И.В., Воронцова Е.А., Касаткин В.В., Спиридонов А.Б. // *Вестник ИГСА*. 2021. № 1 (65). С. 33-38. DOI: 10.48012/1817-5457_2021_1_33.
14. Никифорова Т.Е., Козлов В.А., Багровская Н.А. // *Химия растительного сырья*. 2005. №4. С.45-52.
15. Новожилов Е.В., Пошина Д.Н. // *Северный (Арктический) федеральный университет, Химия растительного сырья*. 2012. № 3. С. 15-32. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00850.
16. Алеева С.В., Лепилова О.В., Курзанова П.Ю., Кокшаров С.А. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 2. С. 80-85. DOI: 10.6060/tcct.20186102.5512.

REFERENCES

1. Karelina A.A., Alashkevich Yu.D., Kozhukhov V.A. // *Chemistry of vegetable raw materials*. 2024. N 2. P. 55-75. DOI: 10.14258/jcprm.20240213401.
2. Korchagina A.A., Budaeva V.V., Aleshina L.A., Lyukhanova I.V., Bychin N.V., Sakovich G.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 6. P. 64-74. DOI: 10.6060/ivkkt.20226506.6598.
3. Alexandrov A.A., Momzyakova K.S., Deberdeev T.R., Kanarsky A.V., Deberdeev R.Ya., Yamashev T.A., Kanarskaya Z.A. // *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2024. V. 249. P. 297-309. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.297-309.
4. Zavadsky A.E., Stokozenko V.G., Moryganov A.P., Larin I.Yu. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2017. V. 60. N 6. P. 102-108. DOI: 10.6060/tcct.2017606.5437.
5. Barmin M.I., Grebenkin A.N., Boyko A.I. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2004. V. 47. N 3. P. 156-158.
6. Vurasko A.V., Simonova E.I., Pervova I.G., Minakova A.R. // *Chemistry of vegetable raw materials*. 2019. N 3 (30). P. 269-276. DOI: 10.14258/jcprm.2019035203.
7. Dymnikova N.S., Erokhina E.V. // *Ros. Khim. Zh.* 2020. V. 64. N 2. DOI: 10.6060/rcj.2020642.5.
8. Stokozenko V.G., Moryganov A.P., Larin I.Yu., Voronina E.R. // *Chemistry of plant raw materials*. 2017. N 2. P. 143-148. DOI: 10.14258/jcprm.2017021564.
9. Lisovsky D.L., Yasinskaya N.N. // *Izv. vuzov. Technology of the textile industry*. 2023. N 6 (408). DOI: 10.47367/0021-3497_2023_6_119.
10. Korchagina A.A. et al. // *Izvestiya vuzov. Applied chemistry and biotechnology*. 2023. V. 13. N 4. P. 621-630. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-621-630.
11. Golovanova L.V., Skropysheva E.V., Saleba L.V. // *East European Journal of Advanced Technologies*. 2011. N 3/6 (51). P. 47-50.
12. Cheshkova A.V., Loginova A.V., Kuvshinova S.A., Burov A.A. // *Izv. Vuzov. Technology of light industry*. 2016. V. 32. N 2. P. 55-59.
13. Badretdinova I.V., Vorontsova E.A., Kasatkin V.V., Spiridonov A.B. // *Bulletin of IGSA*. 2021. N 1 (65). P. 33-38. DOI: 10.48012/1817-5457_2021_1_33.
14. Nikiforova T.E., Kozlov V.A., Bagrovskaya N.A. // *Chemistry of vegetable raw materials*. 2005. N 4. P. 45-52.
15. Novozhilov E.V., Poshina D.N. // *Northern (Arctic) Federal University, Chemistry of plant raw materials*. 2012. N 3. P. 15-32. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00850.
16. Aleeva S.V., Lepilova O.V., Kurzanova P.Y., Koksharov S.A. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim.*

17. Zheng X., Zhang Y., Liu X., Li C., Lin Y., Liang S. // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. № 8. article 850. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00850.
18. De Prez J., Van Vuure A.W., Ivens J., Aerts G., Van de Voorde I. // *Advances in Natural Fibre Composites*. 2018. P. 37-49. DOI: 10.1177/0731684419884645.
19. Qing Q., Yang B., Wyman C.E. // *Bioresource Technology*. 2010. N 101 (2010). P. 9624-9630. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.06.137
20. Kozłowski R., Czaplicki Z., Zaręba S., Mańkowski J. // *Journal of Natural Fibers*. 2012. V. 9. N 3. P. 137-149. DOI: 10.1080/15440478.2011.630224.
21. Лисовский Д.Л., Ясинская Н.Н. // *Вестник Витебского государственного технологического университета*. 2022. № 2. С. 94–103. DOI: 10.24412/2079-7958-2022-2-94-103.
17. Zheng X., Zhang Y., Liu X., Li C., Lin Y., Liang S. // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. N 8. article 850. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00850.
18. De Prez J., Van Vuure A.W., Ivens J., Aerts G., Van de Voorde I. // *Advances in Natural Fibre Composites*. 2018. P. 37-49. DOI: 10.1177/0731684419884645.
19. Qing Q., Yang B., Wyman C.E. // *Bioresource Technology*. 2010. N 101 (2010). P. 9624-9630. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.06.137.
20. Kozłowski R., Czaplicki Z., Zaręba S., Mańkowski J. // *Journal of Natural Fibers*. 2012. V. 9. N 3. P. 137-149. DOI: 10.1080/15440478.2011.630224.
21. Lisovsky D.L., Yasinskaya N.N. // *Bulletin of the Vitebsk State Technological University*. 2022. N 2. P. 94-103. doi.org/10.24412/2079-7958-2022-2-94-103.

Поступила в редакцию 09.07.2025
Принята к опубликованию 14.10.2025

Received 09.07.2025
Accepted 14.10.2025