



Химический состав волокна и костры лубяных культур и продуктов их щелочной делигнификации

А.А. Корчагина, Е.К. Гладышева, В.В. Будаева, Е.А. Скиба✉

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск, Российская Федерация

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию химического состава волокна и костры льна-долгунца и конопли, полученных в России в промышленных условиях, а также химического состава продуктов щелочной делигнификации перечисленных объектов. Щелочная делигнификация осуществлялась при атмосферном давлении 4%-м раствором гидроксида натрия, химический состав определялся «мокрыми» методами. Химический состав костры конопли российских производителей исследован впервые. Установлено, что в исследованных объектах массовая доля целлюлозы составляет от 42,3 до 66,1%, а после щелочной делигнификации выход продуктов достигает 47,0–50,0%. Выявлено сходство поведения волокна льна-долгунца и конопли при щелочной делигнификации: содержание целлюлозы увеличивается в 1,2–1,3 раза, содержание пентозанов снижается в 4,3–6,3 раза, а содержание лигнина практически не изменяется. Поведение костры льна-долгунца и конопли кардинально различается при щелочной делигнификации. Костра льна-долгунца устойчива к щелочной делигнификации: содержание целлюлозы увеличивается в 1,4 раза, содержание пентозанов снижается в 4,2 раза, содержание лигнина увеличивается в 1,4 раза, что обусловлено природой лигнина. Костра конопли легко поддается щелочной делигнификации: содержание целлюлозы увеличивается в 1,8 раза, содержание пентозанов снижается в 5,8 раза, содержание лигнина снижается в 2,2 раза; в продукте щелочной делигнификации содержится 87,3% целлюлозы, 5,4% пентозанов, 8,2% лигнина. Прогнозируется высокая перспективность использования костры конопли для химической и биотехнологической трансформации.

Ключевые слова: лен-долгунец, конопля, волокно, костра, щелочная делигнификация

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН (госрегистрация темы проекта 121061500030-3).

Для цитирования: Корчагина А.А., Гладышева Е.К., Будаева В.В., Скиба Е.А. Химический состав волокна и костры лубяных культур и продуктов их щелочной делигнификации // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 4. С. 621–630. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-621-630. EDN: KSVUTY.

CHEMICAL TECHNOLOGY

Original article

Chemical composition of fiber and shive in bast-fiber crops and the products of their alkaline delignification

Anna A. Korchagina, Evgenia K. Gladysheva,

Vera V. Budaeva, Ekaterina A. Skiba✉

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russian Federation

Abstract. The present article examines the chemical composition of fiber and shive from fiber flax and hemp obtained in Russia under industrial conditions, as well as that of the products of their alkaline delignification. Alkaline delignification was carried out at atmospheric pressure with a 4% sodium hydroxide solution; the chemical composition was determined via wet analysis. The chemical composition of hemp shive from Russian producers was studied for the first time. In the studied objects, the mass fraction of cellulose was found to range from 42.3 to 66.1%, and after alkaline delignification, the yield of products reached 47.0–50.0%. The behavior of fiber flax and hemp fiber

is similar during alkaline delignification: cellulose content increases by 1.2–1.3 times, pentosan content decreases by 4.3–6.3 times, and lignin content is virtually the same. The behavior of fiber flax and hemp shive is dramatically different during alkaline delignification. The shive of fiber flax is resistant to alkaline delignification: cellulose content increases by 1.4 times, pentosan content decreases by 4.2 times, and lignin content increases by 1.4 times, which is due to the nature of lignin. Hemp shive is easily alkaline delignified: cellulose content increases by 1.8 times; the content of pentosans decreases by 5.8 times, and lignin content decreases by 2.2 times; the product of alkaline delignification contains cellulose (87.3%), pentosans (5.4%), and lignin (8.2%). The use of hemp shive for chemical and biotechnological transformation is expected to have high prospects.

Keywords: fiber flax, hemp, fiber, shive, alkaline delignification

Funding. The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. 121061500030-3) supported the work.

For citation: Korchagina A.A., Gladysheva E.K., Budaeva V.V., Skiba E.A. Chemical composition of fiber and shive in bast-fiber crops and the products of their alkaline delignification. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(4):621-630. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-4-621-630. EDN: KSVUTY.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях экологически ориентированной индустрии использование биомассы легкового возобновляемого растительного сырья является одним из ключевых аспектов устойчивого экономического развития. Лигноцеллюлозная биомасса является наиболее распространенным ресурсом на земле и имеет ряд преимуществ: быструю возобновляемость, высокую производительность в промышленных масштабах, биоразлагаемость и всемирную доступность. Среди легкового возобновляемого растительного сырья особый интерес представляют две лубяные культуры, широко распространенные на евразийском континенте: лен-долгунец и конопля [1–4].

Лен-долгунец и конопля характеризуются коротким периодом вегетации: период прироста биомассы льна-долгунца составляет от 77 до 100 дней [5], а конопля – около 105 дней [2, 6]. Производительность льна-долгунца в мире в среднем составляет $5,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ (в расчете на сухое вещество), в России – от $1,8$ до $4,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, при этом около 70–72% приходится на древесную часть (костру). Производительность конопля в среднем составляет $14,5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ (в расчете на сухое вещество), при этом 70–75% приходится на конопляную костру.

Лен и конопля подвергаются различным методам дегумирования (вымачивание, осмотическое и ферментативное дегумирование) с последующим отделением волокна от костры [7]. Массовая доля целлюлозы в волокне льна-долгунца составляет 62–79% [8, 9], а в волокне конопля – около 40–57% [10]. Массовая доля целлюлозы в костре обеих культур гораздо меньше: у льна-долгунца она равняется 31–37% [11, 12], у конопля – 33–37% [10].

Благодаря высокому содержанию в биомассе льна-долгунца и конопля основного компонента – целлюлозы, мировые исследователи интенсивно занимаются переработкой волокон обеих культур в востребованные и ценные продукты: целлюлозу [13–16], микрокристаллическую целлюлозу [17], наноцеллюлозу [18], метилцеллюлозу [19], натрий-карбоксиметилцеллюлозу [20], нитраты целлюлозы [21, 22], гидратцеллюлозное волокно [5] и регенерированные волокна [23], биокмпозиты и биопластики [1, 24]. Волокна льна и конопля являются хорошей альтернативой древесине для производства бумаги [25], могут использоваться в качестве сорбирующего

материала [26] и даже пищевых волокон [27]. Имеются сведения об использовании биомассы льна и конопля для производства биоэтанола и биогаза [4, 28, 29].

Переработка костры льна и конопля исследована слабо, но указанная задача очень важна, так как ее решение позволит повысить коэффициент использования лубяных культур. Из костры льна получают целлюлозу [10], микрокристаллическую целлюлозу [30], сорбенты [31], целлюлозосодержащие полуфабрикаты [14] и биоразлагаемую упаковку [32]. Костра конопля является недорогим сырьем для производства разлагаемых биоматериалов [33], костробетона [34], утеплителей и кирпичей [34, 35], сырьем для получения гуминово-фульватного комплекса [36], а также может использоваться в качестве дешевого мелиоранта [37].

Известно, что при переработке любого целлюлозосодержащего сырья критической стадией является его предобработка, направленная на извлечение отдельных компонентов (целлюлозы, гемицеллюлоз, лигнина и др.) из прочной лигноцеллюлозной матрицы. В данном исследовании для предобработки лубяных культур использован метод щелочной делигнификации, являющийся классическим методом для любого целлюлозосодержащего сырья [38, 39]. Нами накоплен богатый опыт переработки нетрадиционного целлюлозосодержащего сырья, т.е. не древесного и не лубяного, в продукты технической химии [40] и биоконверсии [41, 42]. Общей начальной технологической стадией этих процессов является щелочная делигнификация.

Целью настоящей работы служило исследование химического состава волокон и костры льна-долгунца и конопля двух российских производителей, а также продуктов щелочной делигнификации (ПЩД) лубяного сырья для сравнительной оценки возможности их использования в экономике страны. Приоритетным являлось исследование химического состава отходов переработки лубяных культур: коротковолокнистой фракции льна-долгунца, костры льна-долгунца и костры конопля, а также исследование поведения отходов переработки лубяных культур при щелочной делигнификации. Костра конопля российских производителей подробно исследована впервые.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Было использовано четыре объекта исследования: коротковолокнистая фракция и костра из льна-долгунца

(*Linum usitatissimum* L.), предоставленные АО «Бийская льняная компания» (г. Бийск, Алтайский край, Россия) и являющиеся отходами производства; волокно и костра из конопли (*Cannabis sativa* L.), предоставленные ООО «Мордовские пенькозаводы» (г. Инсар, Республика Мордовия, Россия). В таблице приведен химический состав объектов исследования и продуктов их ПЩД, определенный по общепринятым в мировой практике «мокрым» методам [41] на сертифицированном аналитическом оборудовании. Определение содержания целлюлозы проводилось методом Кюршнера, который основан на обработке исходных объектов исследования спиртовым раствором азотной кислоты и удалении лигнина, экстрактивных веществ и гемицеллюлоз. Определение содержания кислотонерастворимого лигнина проводилось путем обработки исходных объектов исследования концентрированными минеральными кислотами (серной и соляной). Определение содержания пентозанов основано на образовании фурфуrolа из пентозанов, полученных при обработке исходных объектов исследования 13%-м раствором соляной кислоты при нагревании, и определении отогнанного фурфуrolа спектрофотометрическим методом. Определение содержания золы проводилось путем сжигания исходных объектов исследования в фарфоровом тигле с последующим прокаливанием остатка в муфельной печи. Определение содержания жировосковой фракции (ЖВФ) проводилось путем многократного экстрагирования исходных объектов исследования хлористым метилом с последующим выпариванием экстракта, сушкой и взвешиванием нелетучего остатка [41].

Процесс щелочной делигнификации исходных объектов исследования (масса загрузки составила: для коротковолокнистой фракции льна-долгунца и волокна конопли – 100 г, для костры льна и конопли – 200 г)

проводили путем обработки раствором 4%-го гидроксида натрия при температуре от 90 до 96 °С и атмосферном давлении в течение 6 ч с последующим отжимом на вакуум-фильтре и промывкой до нейтральной реакции промывных вод [43]. Гидро модуль щелочной делигнификации составил 1:20. Степень извлечения компонента в твердую фазу рассчитана следующим образом:

$$S = \frac{M_{Д_{ПЩД}} \times \eta_{ПЩД}}{M_{Д_{исх.}}},$$

где S – степень извлечения, %; $M_{Д_{ПЩД}}$ – массовая доля компонента в ПЩД, %; $M_{Д_{исх.}}$ – массовая доля компонента в исходном объекте исследования, %; $\eta_{ПЩД}$ – выход ПЩД, %.

Работа выполнена с использованием приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнительный анализ химического состава исходных объектов исследования (см. таблицу), показал, что наибольшую массовую долю целлюлозы по Кюршнеру имеет волокно конопли (76,5%), а наименьшую – костра льна-долгунца (42,3%). Наибольшая массовая доля пентозанов содержится в костре конопли (22,8%), наименьшая – в волокне льна-долгунца (5,2%). Наибольшую массовую долю кислотонерастворимого лигнина содержит костра льна-долгунца (26,4%), наименьшую – волокно конопли (2,5%). Наибольшую массовую долю золы содержит волокно льна-долгунца (3,20%), наименьшую – костра конопли (2,3%). Все исходные объекты исследования характеризуются низким содержанием ЖВФ, наибольшее же ее значение – 2,4% – наблюдается для костры льна-долгунца. Содержание целлюлозы в волокне льна (66,1%) меньше, чем в волокне конопли

Химический состав исходных объектов исследования и продуктов их щелочной делигнификации

Chemical composition of research objects and products of their alkaline delignification

Наименование образца	Выход, %	Массовая доля компонентов*, %				
		целлюлоза по Кюршнеру	кислотонераство- римый лигнин	пентозаны	зола	жировосковая фракция
Исходные объекты исследования						
Коротковолокнистая фракция льна-долгунца	–	66,1±0,5	10,7±0,5	5,2±0,5	3,20±0,05	1,67±0,05
Костра льна-долгунца	–	42,3±0,5	26,4±0,5	18,5±0,5	2,80±0,05	1,76±0,05
Волокно конопли	–	76,5±0,5	5,5±0,5	2,5±0,5	2,50±0,05	2,40±0,05
Костра конопли	–	47,3±0,5	17,7±0,5	22,8±0,5	2,30±0,05	0,46±0,05
Продукты щелочной делигнификации						
ПЩД из коротковолокнистой фракции льна-долгунца	50,0	89,0±0,5	9,7±0,5	1,2±0,5	0,10±0,05	1,30±0,05
ПЩД из костры льна-долгунца	47,0	59,0±0,5	36,7±0,5	3,2±0,5	0,70±0,05	1,40±0,05
ПЩД из волокна конопли	47,0	91,8±0,5	5,7±0,5	0,4±0,5	0,80±0,05	0,80±0,05
ПЩД из костры конопли	47,5	87,3±0,5	8,2±0,5	5,4±0,5	1,80±0,05	0,40±0,05
Степень извлечения компонента в твердую фазу, %						
Коротковолокнистая фракция льна-долгунца	–	67,4	45,3	11,5	1,6	38,9
Костра льна-долгунца	–	66,1	65,3	8,1	11,8	37,4
Волокно конопли	–	56,4	48,7	7,5	15,0	15,7
Костра конопли	–	87,7	22,0	11,3	37,2	41,3

Примечание. * – в пересчете на абсолютно сухое сырье.

(76,5%), что связано с использованием коротковолокнистой фракции льна-долгунца. В целом химический состав волокна и костры обеих лубяных культур похожи.

Химический состав волокна льна-долгунца, согласно различным литературным источникам, для длиноволокнистой фракции представлен следующим образом: целлюлоза – 62,0–79,0%, гемицеллюлозы – 11,0–20,6%, лигнин 2,0–5,0% [8, 9]. В нашей работе определено повышенное значение массовой доли лигнина, что связано с использованием коротковолокнистой фракции, являющейся отходом производства. В литературе для костры льна-долгунца приводятся следующие показатели: целлюлоза – 30,7–37,5%, лигнин – 32,8–33,1%, зола – 1,7% [11, 12]. Костра льна-долгунца, предоставленная АО «Бийская льняная компания», имеет повышенное содержание целлюлозы и пониженное содержание лигнина.

Химический состав волокна конопли, представленный в различных литературных источниках, составляет: целлюлозы – 40,0–57,5%, гемицеллюлоз – 5,1–20,0%, лигнина – 12,4–21,9%, золы – 2,6–7,6% [9, 10]. Волокно конопли, предоставленное ООО «Мордовские пенькозаводы», характеризуется высокой массовой долей целлюлозы и низкими значениями массовой доли лигнина и пентозанов, т.е. является высококачественным. В зарубежной литературе для костры конопли приводится следующий компонентный состав: целлюлоза – 32,6–37,3%, гемицеллюлозы – 25,0–28,0%, лигнин – 17,5–23,9% [10, 23]. Костра конопли из Республики Мордовии превосходит мировые аналоги: целлюлозы в ней больше, а гемицеллюлоз меньше.

Результаты определения массовой доли ЖВФ для всех четырех исходных объектов исследования и их ПЩД получены впервые.

Предварительная химическая обработка лубяных культур методом щелочной делигнификации обеспечивает высокий выход всех четырех ПЩД (47,0–50,0%). В результате анализа химического состава ПЩД было установлено, что предварительная обработка трех объектов исследования (коротковолокнистой фракции льна-долгунца, волокна и костры конопли) позволяет получить образцы ПЩД с массовой долей целлюлозы от 89,0 до 91,8%, т.е. наблюдается концентрирование целлюлозы в продуктах щелочной обработки. Исключение составил ПЩД костры льна-долгунца, в котором массовая доля целлюлозы составляет 59,0%, в этом же образце зафиксирована наибольшая массовая доля кислотонерастворимого лигнина – 36,7%. По сравнению с исходными объектами исследования массовая доля целлюлозы во всех полученных образцах ПЩД увеличивается в 1,2–1,8 раза, наблюдается снижение массовой доли пентозанов в 4,2–6,3 раза.

Анализ степени извлечения компонентов показал, что лидером среди четырех исходных объектов исследования является костра конопли со степенью извлечения целлюлозы в образце ПЩД 87,7%, в то время как диапазон степени извлечения для трех других объектов исследования составил 56,4–67,4%. При этом степень извлечения лигнина в твердую фазу для исследованных образцов составила 22,0–45,3%, исключением стал ПЩД костры льна-долгунца, для которого степень извлечения лигнина в твердую фазу составляет 65,3%.

Относительно степени извлечения пентозанов получен

узкий диапазон для всех четырех объектов – 7,5–11,5%, что подтверждает эффективность метода щелочной делигнификации для удаления пентозанов из любого целлюлозосодержащего сырья, в том числе лубяного [44, 45]. Весьма сложно объяснить широкий диапазон значений степени извлечения золы 1,6–37,2% – возможно, это явление связано с различной химической природой зольных компонентов, например, есть представление о легкости удаления кислотонерастворимых компонентов золы методом щелочной обработки, что наблюдалось для коротковолокнистой фракции льна-долгунца [38]. Диапазон степени извлечения ЖВФ также широк: он составляет 15,7–41,3%. Как правило, использование щелочной обработки сырья позволяет значительно удалить ЖВФ, но в данном случае наиболее успешной в этом отношении была обработка волокна конопли. При обработке гидроксидом натрия ЖВФ происходит гидролиз жировых компонентов и водорастворимые продукты удаляются из твердой фазы.

Механизм щелочной делигнификации заключается в деэтерификации (омылении) межмолекулярных сложнэфирных связей между гемицеллюлозами и лигнином [38]. В результате омыления происходит расщепление этих связей, гидролиз гемицеллюлоз, частичный гидролиз аморфной части микрофибрилл целлюлозы. Особенностью данного способа является частичное растворение лигнина в щелочном растворе [39]. По определению щелочная делигнификация должна приводить к снижению массовой доли лигнина в ПЩД, однако при воздействии на лубяные культуры это наблюдается не всегда.

Поведение волокна обеих лубяных культур при щелочной делигнификации имеет общие тенденции. В образцах ПЩД коротковолокнистой фракции льна-долгунца и волокна конопли массовые доли лигнина остаются практически на том же уровне 9,7 и 5,7% соответственно. Такое явление наблюдали и другие исследователи [44, 45]. Объяснить его можно тем, что щелочная обработка волокон с низким содержанием лигнина направлена в основном на удаление низкомолекулярных соединений и гемицеллюлоз, но не самого лигнина [44, 45]. Для эффективного удаления лигнина необходимо сочетать щелочную делигнификацию с другими видами обработки, например с обработкой сульфитом натрия [44].

Поведение костры льна-долгунца и конопли при щелочной делигнификации кардинально различается. При обработке костры льна-долгунца происходит увеличение массовой доли лигнина в образце ПЩД в 1,4 раза по сравнению с кострой. На первый взгляд это аномальное поведение для целлюлозосодержащего сырья. Тем не менее подобное явление исследователи наблюдали и ранее: отмечалось увеличение лигнина в 1,1 раза после предварительной обработки гидроксидом натрия при температуре 160 °С и давлении 0,2 МПа [46]. Предположительно увеличение массовой доли лигнина после щелочной делигнификации связано с особой структурой лигнина в костре льна-долгунца [44] и концентрированием лигнина за счет эффективного удаления пентозанов и других компонентов. Костра конопли в процессе делигнификации ведет себя как типичное недревесное целлюлозосодержащее сырье. В образце ПЩД костры конопли массовая доля лигнина составила 8,2%, т.е. наблюдается эффективное снижение содержания лигнина в 2,2 раза.

Нами были использованы мягкие условия щелочной делигнификации: 4%-й раствор гидроксида натрия и атмосферное давление. Предобработка всех объектов исследования проводилась в одинаковых режимах, хотя мы понимали, что для эффективной делигнификации волокна режимы должны быть более жесткими. Однако выделение целлюлозы из волокна льна-долгунца и конопли является хорошо проработанным в мире направлением – нас как специалистов в области переработки недревесного сырья больше интересовала костра и отходы льняного производства в виде коротковолокнистой фракции, которая не использовалась для выделения целлюлозы. В связи с этим одинаковые условия щелочной делигнификации для разных объектов исследования были использованы нами для выявления разницы природы сырья и результаты оказались полезными для понимания отличий механизма щелочной делигнификации волокнистого сырья по сравнению с кострой.

Сравнить результаты полученных экспериментальных данных с литературными данными оказалось достаточно сложной задачей, так как, несмотря на достаточно широкую распространенность щелочной обработки как для нативной биомассы льна и конопли, так и для выделенных отдельно волокна и костры этих культур, авторы не приводят полного химического состава ПЩД. Полученные продукты используются преимущественно в качестве компонента бумаги или входят в состав композитных материалов, поэтому исследователи уделяют внимание не химическому составу, а механическим характеристикам продуктов. Исходя из литературных данных о возможности применения продуктов щелочной обработки, можно прогнозировать успешность получения полуфабрикатов бумажно-картонного производства, фибриллированных и композитных материалов, в том числе таргетных, на основе образцов ПЩД волокна льна-долгунца и конопли [8, 9, 11, 16, 44, 47, 48].

Другим направлением является биотехнологическая переработка целлюлозосодержащего сырья с целью получения продуктов с высокой добавленной стоимостью [10]. Экспериментально подтверждена возможность получения биоэтанола с концентрацией 10,5 г/л из биомассы конопли, предварительно обработанной методом щелочной делигнификации (1,5–3,0%-й раствор гидроксида натрия) [3, 4]. Таким образом, проведенные исследования имеют высокий потенциал для дальнейшего практического применения. Волокно лубяных культур – это слишком ценное сырье для превращения его в продукты микробного синтеза, но для переработки костры это очень перспективное направление. Особенности химического состава костры

льна-долгунца (36,7% лигнина) исключают использование ПЩД из нее для переработки по биотехнологическому маршруту. Химический состав и высокий выход ПЩД костры конопли позволяют дать оптимистический прогноз для дальнейшей трансформации ПЩД в раствор редуцирующих сахаров методом ферментативного гидролиза и в продукты микробиологического синтеза, авторская технология которых хорошо отработана нами на шелухе овса и мискантусе сахароцветном. При этом успешно были синтезированы биоэтанол [41], бактериальная целлюлоза [42], молочная кислота [49], кормовой белок [50].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе исследования впервые проведен сравнительный анализ химического состава четырех объектов исследования: коротковолокнистой фракции и костры льна-долгунца, являющихся отходом производства АО «Бийская льняная компания», а также волокна и костры конопли производства ООО «Мордовские пенькозаводы». Установлено, что все исследованные объекты характеризуются высокой массовой долей целлюлозы от 42,3 до 66,1%. Впервые исследован полный химический состав костры конопли российского производителя и установлено, что образец превосходит мировые аналоги: в нем зафиксировано повышенное содержание целлюлозы (47,3%) и пониженное содержание пентозанов (22,8%), содержание же лигнина (17,7%) в костре конопли российского производителя соответствует мировым аналогам. Выход ПЩД перечисленных объектов исследования достигает 47,0–50,0%.

Выявлено сходство поведения волокна льна-долгунца и конопли при щелочной делигнификации: содержание целлюлозы увеличивается в 1,2–1,3 раза, содержание пентозанов снижается в 4,3–6,3 раза, а содержание лигнина практически не изменяется.

Поведение при щелочной делигнификации костры льна-долгунца и конопли принципиально различается. Костра льна-долгунца устойчива к щелочной делигнификации: содержание целлюлозы в ней увеличивается в 1,4 раза, содержание пентозанов снижается в 4,2 раза, содержание лигнина увеличивается в 1,4 раза, что обусловлено природой лигнина. Костра конопли легко поддается щелочной делигнификации: содержание целлюлозы увеличивается в 1,8 раза, содержание пентозанов снижается в 5,8 раза, содержание лигнина снижается в 2,2 раза. Прогнозируется высокая перспективность использования костры конопли для химической и биотехнологической трансформации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ma H., Guna V., Raju T., Murthy A.N., Reddy N. Converting flax processing waste into value added bio-composites // *Industrial Crops and Products*. 2023. Vol. 195. P. 116434. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116434.
2. Yano H., Fu W. Hemp: a sustainable plant with high industrial value in food processing // *Foods*. 2023. Vol. 12, no. 3. P. 651. DOI: 10.3390/foods12030651.
3. Wawro A., Batog J., Gieparda W. Chemical and enzymatic treatment of hemp biomass for bioethanol production // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 24. P. 5348. DOI: 10.3390/app9245348.
4. Wawro A., Batog J., Gieparda W. Polish varieties of industrial hemp and their utilisation in the efficient production of lignocellulosic ethanol // *Molecules*. 2021. Vol. 26, no. 21. P. 6467. DOI: 10.3390/molecules26216467.
5. Макаров И.С., Голова Л.К., Виноградов М.И., Егоров Ю.А., Куличихин В.Г., Михайлов Ю.М. Новое гидратцеллюлозное волокно из льняной целлюлозы // *Российский химический журнал*. 2020. Т. 64. N 1. С. 13–21. DOI: 10.6060/rcj.2020641.2. EDN: RDRPRG.
6. Дымникова Н.С., Ерохина Е.В., Морыганов А.П. Лубяные волокна – новые возможности для «зеленой» нанотехно-

- логии // Российский химический журнал. 2020. Т. 64. N 1. С. 22–31. DOI: 10.6060/rcj.2020641.3. EDN: ZEWAPE.
7. Kozłowski R.M., Mackiewicz-Talarczyk M., Wielgus K., Praczyk M., Allam A.M. Bast fibres: flax // Handbook of natural fibres. Vol. 1: Types, properties and factors affecting breeding and cultivation. Woodhead Publishing, 2020. P. 93–162. DOI: 10.1016/B978-0-12-818398-4.00006-2.
8. Yan L., Chouw N., Jayaraman K. Flax fibre and its composites – a review // Composites Part B: Engineering. 2014. Vol. 56. P. 296–317. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.08.014.
9. Khan S.H., Rahman M.Z., Haque M.R., Hoque M.E. Characterization and comparative evaluation of structural, chemical, thermal, mechanical, and morphological properties of plant fibers // Annual Plant: Sources of Fibres, Nanocellulose and Cellulosic Derivatives. Singapore: Springer, 2023. P. 1–45. DOI: 10.1007/978-981-99-2473-8_1.
10. Ji A., Jia L., Kumar D., Yoo C.G. Recent advancements in biological conversion of industrial hemp for biofuel and value-added products // Fermentation. 2021. Vol. 7, no. 1. P. 6. DOI: 10.3390/fermentation7010006.
11. Каретникова Н.В., Чендылова Л.В., Пен Р.З. Делигнификация льняной костры // Химия растительного сырья. 2018. N 1. С. 155–162. DOI: 10.14258/jcprm.2018012757. EDN: YRVTOE.
12. Shaimerdenov Zh.N., Temirova I.Zh., Aldieva A.B., Iztayev A. Use of oilseed flax waste for production of technical cellulose // Ғылым және білім. 2020. No. 1-2 (58). P. 12–16.
13. Azhar S.W., Xu F., Qiu Y. Evaluation and characterization of cellulose nanofibers from flaxseed fiber bundles // AATCC Journal of Research. 2021. Vol. 8, no. 4. P. 8–14. DOI: 10.14504/ajr.8.4.2
14. Lialina N., Yudicheva O., Samoilenko A., Berezovsky Yu., Moroz O., Bondar-Pidhurska O., et al. Evaluation of the quality of cellulose semi-finished products from technical hemp and the possibility of their further use // Fibres and Textiles. 2023. Vol. 30, no. 3. P. 48–54. DOI: 10.15240/tul/008/2023-3-006.
15. Малюшевская А.П., Малюшевский П.П., Ющишина А.Н. Получение целлюлозы из льняного волокна с использованием электроразрядной объемной кавитации // Электронная обработка материалов. 2020. Т. 56. N 2. С. 49–54. DOI: 10.5281/zenodo.3747835.
16. Валишина З.Т., Александров А.А., Хасанова К.В., Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Дебердеев Р.Я. Оптимизация фазы делигнификации конопляного волокна // Вестник технологического университета. 2023. Т. 26. N 8. С. 47–51. DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_8_47. EDN: DNBWKW.
17. Pen R.Z., Shapiro I.L. Microcrystalline peracetic cellulose from hemp // Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA: Materials of International University Scientific Forum (United Arab Emirates, 24 February 2023). United Arab Emirates, 2023. P. 61–66. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115582.
18. Aguado R., Tarrés Q., Mutjé P., Pèlach M.À., Delgado-Aguilar M. Non-covalently cationized nanocellulose from hemp: kinetics, key properties, and paper strengthening // Industrial Crops and Products. 2022. Vol. 188. Part A. P. 115582. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115582.
19. Ye D., Farriol X. Preparation and characterization of methylcelluloses from some annual plant pulps // Industrial Crops and Products. 2007. Vol. 26, no. 1. P. 54–62. DOI: 10.1016/j.indcrop.2007.01.004.
20. Аксенчик К.В. Получение натрий-карбоксиметилцеллюлозы из льняной целлюлозы твердофазным способом в лабораторных условиях // Ползуновский вестник. 2018. N 2. С. 91–95. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2018.02.017. EDN: VADOBE.
21. Городнев И.О., Иванова И.П., Ибрагимов Н.Г., Голубев А.Е. Изучение кинетики пластификации и надмолекулярной структуры нитратов целлюлозы, полученных из различного целлюлозосодержащего сырья // Российский химический журнал. 2017. Т. 61. N 4. С. 14–34. EDN: VNQLFS.
22. Rizkiah R., Kencanawati K., Rosidin A., Wibowo L. Sintesis nitroselulosa dari serat rami (*Boechmerianivea*) menggunakan trietilamin // Jurnal Sains dan Teknik. 2021. Vol. 3, no. 1. P. 21–26. DOI: 10.37577/sainteks.v3i1.231.
23. Lawson L., Degenstein L.M., Bates B., Chute W., King D., Dolez P.I. Cellulose textiles from hemp biomass: opportunities and challenges // Sustainability. 2022. Vol. 14, no. 22. P. 15337. DOI: 10.3390/su142215337.
24. Mostafa N.A., Farag A.A., Abo-dief H.M., Tayeb A.M. Production of biodegradable plastic from agricultural wastes // Arabian Journal of Chemistry. 2018. Vol. 11, no. 4. P. 546–553. DOI: 10.1016/j.arabjc.2015.04.008.
25. Plazonić I., Džimbeg-Malčić V., Bates I., Barbarić-Mikočević Ž. Effects of photo-oxidation on the properties of hemp office papers // International Journal of Technology. 2020. Vol. 11, no. 2. P. 215–224. DOI: 10.14716/ijtech.v11i2.3196.
26. Akl M.A., El-Zeny A.S., Hashem M.A., El-Gharkawy E.-S.R.H., Mostafa A.G. Flax fiber based semicarbazide biosorbent for removal of Cr(VI) and Alizarin Red S dye from wastewater // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. P. 8267. DOI: 10.1038/s41598-023-34523-y.
27. Golshenas P. The usage of flax as biodiesel and biomass // The Canadian Science Fair Journal. 2023. Vol. 5, no. 1. Available from: <https://csfjournal.com/volume-5-issue-4-1/2023/1/12/the-usage-of-flax-as-biodiesel-and-biomass> (accessed: 20.09.2023).
28. Batog J., Wawro A., Gieparda W., Bujnowicz K., Foksowicz-Flaczyk J., Rojewski S., et al. Effective use of flax biomass in biorefining processes // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 13. P. 7359. DOI: 10.3390/app13137359.
29. Asquer C., Melis E., Scano E.A., Carboni G. Opportunities for green energy through emerging crops: biogas valorization of *Cannabis sativa* L. residues // Climate. 2019. Vol. 7, no. 12. P. 142. DOI: 10.3390/cli7120142.
30. Bocek A.M., Shevchuk I.L., Lavrent'ev V.N. Fabrication of microcrystalline and powdered cellulose from short flax fiber and flax straw // Russian Journal of Applied Chemistry. 2003. Vol. 76. P. 1679–1682. DOI: 10.1023/B:RJAC.0000015737.07117.12.
31. Пучков Е.М., Галкин А.В., Ущаповский И.В. Технология производства сорбентов из костры масличного льна // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019. Т. 20. N 5. С. 517–525. DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.5.517-525. EDN: HXBZL.
32. Badretdinova I., Kasatkina N., Khrameshin A., Spiridonov A., Litvinyuk A. Universal eco-friendly biodegradable packaging for storage and transportation of food and industrial goods based on shives of bast plants // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 380. P. 01014. DOI: 10.1051/e3sconf/202338001014.
33. Скворцова Н.К., Матыс Е.Г., Филимонова Л.А., Валиуллина Е.Р. Поиск способов решения проблем пере-

работки отходов: биоразлагаемые материалы из конопли // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. 2021. N 11. С. 90–99. DOI: 10.37882/2223-2974.2021.11.31. EDN: MVLHQO.

34. Жарких О.А. О перспективах глубокой переработки коноплепродукции // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2021. N 23. С. 184–187. EDN: RDKSUU.

35. Исламутов Д.Р., Бикбаева Г.Г. Состояние и перспективы развития коноплеводства // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2020. N 4. С. 36–40. DOI: 10.31563/1684-7628-2020-56-4-36-40. EDN: UQQQBA.

36. Белопухов С.А., Хамидреза Б., Байбеков Р.Ф. Влияние гуминово-фульватного комплекса на рост, развитие и качество продукции базилика (*Ocimum basilicum* L.) // Молочно-жирный вестник. 2020. N 2. С. 31–40. EDN: CSNTST.

37. Белопухов С.А., Барыкина Ю.А., Федяев В.В., Жарких О.А., Дмитриевская И.И. Мелиоранты из отходов льняного комплекса // Природообустройство. 2019. N 2. С. 28–34. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-2-28-34. EDN: VNGCFN.

38. Kim J.S., Lee Y.Y., Kim T.H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass // Bioresource Technology. 2016. Vol. 199. P. 42–48. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.08.085.

39. Karimi K., Taherzadeh M.J. A critical review of analytical methods in pretreatment of lignocelluloses: composition, imaging, and crystallinity // Bioresource Technology. 2016. Vol. 200. P. 1008–1018. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.11.022.

40. Shavyrkina N.A., Budaeva V.V., Skiba E.A., Gismatulina Y.A., Sakovich G.V. Review of current prospects for using *miscanthus*-based polymers // Polymers. 2023. Vol. 15, no. 14. P. 3097. DOI: 10.3390/polym15143097.

41. Ovchinnikova E.V., Mironova G.F., Banzaraktseva S.P., Skiba E.A., Budaeva V.V., Kovgan M.A., et al. Bioprocessing of oat hulls to ethylene: Impact of dilute HNO_3 - or NaOH -pretreatment on process efficiency and sustainability // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2021. Vol. 9, no. 49. P. 16588–16596. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c05112.

42. Skiba E.A., Gladysheva E.K., Golubev D.S., Budaeva V.V., Aleshina L.A., Sakovich G.V., Self-standardization of quality of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii*

in nutrient media derived from *Miscanthus* biomass // Carbohydrate Polymers. 2021. Vol. 252. P. 117178. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117178.

43. Kashcheyeva E.I., Gismatulina Y.A., Budaeva V.V. Pretreatments of non-woody cellulosic feedstocks for bacterial cellulose synthesis // Polymers. 2019. Vol. 11, no. 10. P. 1645. DOI: 10.3390/polym11101645.

44. Liu M., Thygesen A., Summerscales J., Meyer A.S. Targeted pre-treatment of hemp bast fibres for optimal performance in biocomposite materials: a review // Industrial Crops and Products. 2017. Vol. 108. P. 660–683. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.07.027.

45. Shadhin M., Rahman M., Jayaraman R., Chen Y., Mann D., Zhong W. Natural biomass & waste biomass fibers – structures, environmental footprints, sustainability, degumming methods, & surface modifications // Industrial Crops and Products. 2023. Vol. 204. Part A. P. 117252. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117252.

46. Tarabanko V.E., Vigul D.O., Kaygorodov K.L., Kosivtsov Yu., Tarabanko N., Chelbina Yu.V. Influence of mass transfer and acid prehydrolysis on the process of flax shives catalytic oxidation into vanillin and pulp // Biomass Conversion and Biorefinery. 2022. DOI: 10.1007/s13399-022-02366-8.

47. Baksi S., Saha D., Saha S., Sarkar U., Basu D., Kuniyal J.C. Pre-treatment of lignocellulosic biomass: review of various physico-chemical and biological methods influencing the extent of biomass depolymerization // International Journal of Environmental Science and Technology. 2023. Vol. 20. P. 13895–13922. DOI: 10.1007/s13762-023-04838-4.

48. Богданова О.Ф., Домбровська О.П., Бабіч С.С., Домбровський А.Г. Визначення можливості одержання волокнистих напівфабрикатів з ненаркотичних конопель // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2018. N 1. С. 67–74.

49. Шавыркина Н.А., Скиба Е.А. Получение молочной кислоты из шелухи овса // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. N 1. С. 99–106. DOI: 10.21285/2227-2925-2021-11-1-99-106. EDN: NRZZIE.

50. Скиба Е.А. Биосинтез кормовых дрожжей на средах, полученных из плодовых оболочек овса // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2016. Т. 6. N 3. С. 140–142. DOI: 10.21285/2227-2925-2016-6-3-140-142. EDN: WZQKFV.

REFERENCES

1. Ma H., Guna V., Raju T., Murthy A.N., Reddy N. Converting flax processing waste into value added biocomposites. *Industrial Crops and Products*. 2023;195:116434. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116434.

2. Yano H., Fu W. Hemp: a sustainable plant with high industrial value in food processing. *Foods*. 2023;12(3):651. DOI: 10.3390/foods12030651.

3. Wawro A., Batog J., Gieparda W. Chemical and enzymatic treatment of hemp biomass for bioethanol production. *Applied Sciences*. 2019;9(24):5348. DOI: 10.3390/app9245348.

4. Wawro A., Batog J., Gieparda W. Polish varieties of industrial hemp and their utilisation in the efficient production of lignocellulosic ethanol. *Molecules*. 2021;26(21):6467. DOI: 10.3390/molecules26216467.

5. Makarov I., Golova L., Vinogradov M., Egorov Y.,

Kulichikhin V., Mikhailov Y. New flax cellulose hydrate cellulose fiber. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2020;64(1):13–21. (In Russian). DOI: 10.6060/rcj.2020641.2. EDN: RDRPRG.

6. Dymnikova N.S., Erohina E.V., Moryganov A.P. Bast fibers – new opportunities for “green” nanotechnology. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2020;64(1):22–31. (In Russian). DOI: 10.6060/rcj.2020641.3. EDN: ZEWAPE.

7. Kozłowski R.M., Mackiewicz-Talarczyk M., Wielgus K., Praczyk M., Allam A.M. Bast fibres: flax. In: *Handbook of natural fibres*. Vol. 1: Types, properties and factors affecting breeding and cultivation. Woodhead Publishing; 2020, p. 93–162. DOI: 10.1016/B978-0-12-818398-4.00006-2.

8. Yan L., Chouw N., Jayaraman K. Flax fibre and its composites – a review. *Composites Part B: Engineering*. 2014;56:296–317. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.08.014.

9. Khan S.H., Rahman M.Z., Haque M.R., Hoque M.E. Characterization and comparative evaluation of structural, chemical, thermal, mechanical, and morphological properties of plant fibers. In: *Annual Plant: Sources of Fibres, Nanocellulose and Cellulosic Derivatives*. Singapore: Springer; 2023, p. 1-45. DOI: 10.1007/978-981-99-2473-8_1.
10. Ji A., Jia L., Kumar D., Yoo C.G. Recent advancements in biological conversion of industrial hemp for biofuel and value-added products. *Fermentation*. 2021;7(1):6. DOI: 10.3390/fermentation7010006.
11. Karetnikova N.V., Chendylova L.V., Pen R.Z. Delignification of flax shive. *Khimija rastitel'nogo syr'ja = Chemistry of plant raw material*. 2018;1:155-162. (In Russian). DOI: 10.14258/jcprm.2018012757. EDN: YRVTOE
12. Shaimerdenov Zh.N., Temirova I.Zh., Aldieva A.B., Iztayev A. Use of oilseed flax waste for production of technical cellulose. *Nauka i obrazovanie = Science and Education*. 2020;1-2:12-16.
13. Azhar S.W., Xu F., Qiu Y. Evaluation and characterization of cellulose nanofibers from flaxseed fiber bundles. *AATCC Journal of Research*. 2021;8(4):8-14. DOI: 10.14504/ajr.8.4.2
14. Lialina N., Yudicheva O., Samoilenko A., Berezovsky Yu., Moroz O., Bondar-Pidhurska O., et al. Evaluation of the quality of cellulose semi-finished products from technical hemp and the possibility of their further use. *Fibres and Textiles*. 2023;30(3):48-54. DOI: 10.15240/tul/008/2023-3-006.
15. Malyushevskaya A.P., Malyushevskii P.P., Yushchishina A.N. Production of cellulose from flax fiber using electric-discharge volumetric cavitation. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2020;56(2):49-54. (In Russian). DOI: 10.5281/zenodo.3747835.
16. Valishina Z.T., Alexandrov A.A., Khasanova K.V., Momzyakova K.S., Deberdeev T.R., Deberdeev R.Ya. Optimization of the delignification phase of hemp fiber. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Technological University*. 2023;26(8):47-51. (In Russian). DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_8_47. EDN: DNBWKW.
17. Pen R.Z., Shapiro I.L. Microcrystalline peracetic cellulose from hemp. *Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA: Materials of International University Scientific Forum*. 24 February 2023, United Arab Emirates. United Arab Emirates; 2023, p. 61-66. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115582.
18. Aguado R., Tarrés Q., Mutjé P., Pèlach M.À., Delgado-Aguilar M. Non-covalently cationized nanocellulose from hemp: kinetics, key properties, and paper strengthening. *Industrial Crops and Products*. 2022;188(A):115582. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.115582.
19. Ye D., Farriol X. Preparation and characterization of methylcelluloses from some annual plant pulps. *Industrial Crops and Products*. 2007;26(1):54-62. DOI: 10.1016/j.indcrop.2007.01.004.
20. Aksenchik K.V. Preparation of sodium carboxymethylcellulose from flaxseed cellulose by solid-phase method in laboratory conditions. *Polzunovskii vestnik*. 2018;2:91-95. (In Russian). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2018.02.017. EDN: VADOBE.
21. Gorodnyev I.O., Ivanova I.P., Ibragimov N.G., Golubev A.E. Studying of kinetics of plasticization and supermolecular structure of the nitrate celluloses received from cellulose-containing raw materials. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2017;61(4):14-34. (In Russian). EDN: VNQLFS.
22. Rizkiah R., Kencanawati K., Rosidin A., Wibowo L. Synthesis nitrocellulose from hempen using triethyleamin (*Boechmerianivea*). *Jurnal Sains dan Teknik*. 2021;3(1):21-26. (In Indonesian). DOI: 10.37577/sainteks.v3i1.231.
23. Lawson L., Degenstein L.M., Bates B., Chute W., King D., Dolez P.I. Cellulose textiles from hemp biomass: opportunities and challenges. *Sustainability*. 2022;14(22):15337. DOI: 10.3390/su142215337.
24. Mostafa N.A., Farag A.A., Abo-dief H.M., Tayeb A.M. Production of biodegradable plastic from agricultural wastes. *Arabian Journal of Chemistry*. 2018;11(4):546-553. DOI: 10.1016/j.arabjc.2015.04.008.
25. Plazonić I., Džimbeg-Malčić V., Bates I., Barbarić-Mikočević Ž. Effects of photo-oxidation on the properties of hemp office papers. *International Journal of Technology*. 2020;11(2):215-224. DOI: 10.14716/ijtech.v11i2.3196.
26. Akl M.A., El-Zeny A.S., Hashem M.A., El-Gharkawy E.-S.R.H., Mostafa A.G. Flax fiber based semicarbazide biosorbent for removal of Cr(VI) and Alizarin Red S dye from wastewater. *Scientific Reports*. 2023;13:8267. DOI: 10.1038/s41598-023-34523-y.
27. Golshenas P. The usage of flax as biodiesel and biomass. *The Canadian Science Fair Journal*. 2023;5(1). Available from: <https://csfjournal.com/volume-5-issue-4-1/2023/1/12/the-usage-of-flax-as-biodiesel-and-biomass> [Accessed 20th September 2023].
28. Batog J., Wawro A., Gieparda W., Bujnowicz K., Foksowicz-Flaczyk J., Rojewski S., et al. Effective use of flax biomass in biorefining processes. *Applied Sciences*. 2023;13(13):7359. DOI: 10.3390/app13137359.
29. Asquer C., Melis E., Scano E.A., Carboni G. Opportunities for green energy through emerging crops: biogas valorization of *Cannabis sativa* L. residues. *Climate*. 2019;7(12):142. DOI: 10.3390/cli7120142.
30. Boček A.M., Shevchuk I.L., Lavrent'ev V.N. Fabrication of microcrystalline and powdered cellulose from short flax fiber and flax straw. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2003;76:1679-1682. DOI: 10.1023/B:RJAC.0000015737.07117.12.
31. Puchkov E.M., Galkin A.V., Ushchapovsky I.V. The technology of producing sorbents from linseed flax shive. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2019;20(5):517-525. (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.5.517-525. EDN: HXBOZL.
32. Badretdinova I., Kasatkina N., Khrameshin A., Spiridonov A., Litvinyuk A. Universal eco-friendly biodegradable packaging for storage and transportation of food and industrial goods based on shives of bast plants. *E3S Web of Conferences*. 2023;380:01014. DOI: 10.1051/e3sconf/202338001014.
33. Skvortsova N.K., Matys E.G., Filimonova L.A., Valullina E.R. Finding ways to solve problems of waste recycling: biodegradable hemp materials. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Ekonomika i pravo = Modern Science: Actual Problems of Theory & Practice. Economics and Law*. 2021;11:90-99. (In Russian). DOI: 10.37882/2223-2974.2021.11.31. EDN: MVLHQO.
34. Zharkikh O.A. On the prospects for deep processing of hemp products. *Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii sel'skogo khozyaistva*. 2021;23:184-187. (In Russian). EDN: RDKSUU.

35. Islamgulov D., Bikbaeva G. State and prospects of hemp farming. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020;4:36-40. (In Russian). DOI: 10.31563/1684-7628-2020-56-4-36-40. EDN: UQQQBA.
36. Belopukhov S.L., Hamidreza B., Baybekov R.F. Influence of the humic-fulvate complex on growth, development and quality of basil production (*Ocimum basilicum* L.). *Molochnokhozyaistvennyi vestnik*. 2020;2:31-40. (In Russian). EDN: CSNTST.
37. Belopukhov S.L., Barykina Ju.A., Fediaev V.V., Zharkikh O.A., Dmitrievskaya I.I. Ameliorants from the flax complex waste. *Prirodobustroistvo = Environmental Engineering*. 2019;2:28-34. (In Russian). DOI: 10.34677/1997-6011/2019-2-28-34. EDN: VNGCFN.
38. Kim J.S., Lee Y.Y., Kim T.H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 2016;199:42-48. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.08.085.
39. Karimi K., Taherzadeh M.J. A critical review of analytical methods in pretreatment of lignocelluloses: composition, imaging, and crystallinity. *Bioresource Technology*. 2016;200:1008-1018. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.11.022.
40. Shavyrkina N.A., Budaeva V.V., Skiba E.A., Gismatulina Y.A., Sakovich G.V. Review of current prospects for using *miscanthus*-based polymers. *Polymers*. 2023;15(14):3097. DOI: 10.3390/polym15143097.
41. Ovchinnikova E.V., Mironova G.F., Banzarakt-saeva S.P., Skiba E.A., Budaeva V.V., Kovgan M.A., et al. Bioprocessing of oat hulls to ethylene: Impact of dilute HNO₃- or NaOH-pretreatment on process efficiency and sustainability. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2021;9(49):16588-16596. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c05112.
42. Skiba E.A., Gladysheva E.K., Golubev D.S., Budaeva V.V., Aleshina L.A., Sakovich G.V. Self-standardization of quality of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii* in nutrient media derived from *Miscanthus* biomass. *Carbohydrate Polymers*. 2021;252:117178. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117178.
43. Kashcheyeva E.I., Gismatulina Y.A., Budaeva V.V. Pretreatments of non-woody cellulosic feedstocks for bacterial cellulose synthesis. *Polymers*. 2019;11(10):1645. DOI: 10.3390/polym11101645.
44. Liu M., Thygesen A., Summerscales J., Meyer A.S. Targeted pre-treatment of hemp bast fibres for optimal performance in biocomposite materials: a review. *Industrial Crops and Products*. 2017;108:660-683. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.07.027.
45. Shadhin M., Rahman M., Jayaraman R., Chen Y., Mann D., Zhong W. Natural biomass & waste biomass fibers – structures, environmental footprints, sustainability, degumming methods, & surface modifications. *Industrial Crops and Products*. 2023;204(A):117252. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117252.
46. Tarabanko V.E., Vigul D.O., Kaygorodov K.L., Kosivtsov Yu., Tarabanko N., Chelbina Yu.V. Influence of mass transfer and acid prehydrolysis on the process of flax shives catalytic oxidation into vanillin and pulp. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2022. DOI: 10.1007/s13399-022-02366-8.
47. Baksi S., Saha D., Saha S., Sarkar U., Basu D., Kuniyal J.C. Pre-treatment of lignocellulosic biomass: review of various physico-chemical and biological methods influencing the extent of biomass depolymerization. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023;20:13895-13922. DOI: 10.1007/s13762-023-04838-4.
48. Bogdanova O., Dombrovskaya O., Babich S., Dombrovskiy A. Determination of the possibility of obtaining fiber semi-finished products from drug-free hemp. *Vestnik Khersonskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta = Visnyk of Kherson National Technical University*. 2018;1:67-74. (In Ukrainian).
49. Shavyrkina N.A., Skiba E.A. Obtaining lactic acid from oat husks. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotehnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(1):99-106. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2021-11-1-99-106. EDN: NRZZIE.
50. Skiba E.A. Biosynthesis of fodder yeasts in broths derived from oat hulls. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotehnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2016;6(3):140-142. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2016-6-3-140-142. EDN: WZQKFV.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корчагина Анна Александровна,

к.т.н., научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
yakusheva89_21.ru@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3633-2392>

Гладышева Евгения Константиновна,

к.т.н., научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
evg-gladysheva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6567-9662>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anna A. Korchagina,

Cand. Sci. (Engineering), Researcher,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
yakusheva89_21.ru@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3633-2392>

Evgenia K. Gladysheva,

Cand. Sci. (Engineering), Researcher,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
evg-gladysheva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6567-9662>

Будаева Вера Владимировна,

к.х.н., доцент, ведущий научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
budaeva@ipcet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1628-0815>

Vera V. Budaeva,

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Leading Researcher,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
budaeva@ipcet.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1628-0815>

Скиба Екатерина Анатольевна,

д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
✉ eas08988@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8897-347X>

Ekaterina A. Skiba,

Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Leading Researcher,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
✉ eas08988@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8897-347X>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 26.10.2023.
Одобрена после рецензирования 16.11.2023.
Принята к публикации 30.11.2023.

Information about the article

*The article was submitted 26.10.2023.
Approved after reviewing 16.11.2023.
Accepted for publication 30.11.2023.*