

УДК 676.024

НЕДРЕВЕСНОЕ СЫРЬЕ КАК ИСТОЧНИК ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ВОЛОКОН. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ, ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ (ОБЗОР)

© А.А. Карелина*, Ю.Д. Алашкевич, В.А. Кожухов

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. им. газеты Красноярский рабочий, 31, Красноярск, 660037, Россия, karelina.alexandra@mail.ru

В статье рассматриваются различные недревесные растения в качестве источников волокнистого сырья для целлюлозно-бумажной промышленности. Авторы приводят основные категории недревесного волокнистого сырья: сельскохозяйственные отходы, естественнорастущие растения и технические культуры. Приводится информация о положении волокон в растении: волокна внутренней части стебля, лубяные (наружной части стебля) волокна, волокна листьев и волокна плодов, а также способы их выделения. Из всего многообразия недревесных растений авторы выделяют техническую коноплю как наиболее перспективное сырье, имеющее прочные волокна и высокое содержание целлюлозы. Выявлено, что использование недревесного сырья способствует сокращению давления на лесные ресурсы и улучшению экологической устойчивости производства целлюлозы и бумаги. Также рассматриваются технологические аспекты производства бумажной продукции из недревесного сырья. Приводятся преимущества и недостатки использования альтернативного сырья, а также его перспективы. Указывается на необходимость дальнейшего исследования и разработки новых методов и технологий для оптимизации эффективности использования недревесного сырья в целлюлозно-бумажной промышленности. В заключении делается вывод о значимости применения недревесного сырья для снижения негативного влияния производства бумаги на окружающую среду и обеспечения устойчивого развития данной отрасли промышленности.

Ключевые слова: недревесное сырье, целлюлозно-бумажная промышленность, техническая конопля, сельскохозяйственные отходы, технические культуры.

Для цитирования: Карелина А.А., Алашкевич Ю.Д., Кожухов В.А. Недревесное сырье как источник целлюлозных волокон. Перспективы использования, проблемы и решения (обзор) // Химия растительного сырья. 2024. №2. С. 55–75. DOI: 10.14258/jcprn.20240213401.

Введение

В настоящее время недревесное растительное сырье получило обширное распространение в различных отраслях экономики, будь то текстильная, пищевая или медицинская промышленность. Однако существует проблема переработки отходов недревесного сырья. Особо остро вопрос повторного использования стоит для регионов, где возделывание текстильных культур, а также крупяных и хлебных злаков является одной из важных отраслей экономики.

Одним из перспективных направлений использования недревесного сырья является целлюлозно-бумажная промышленность. Обилие источников, содержащих целлюлозное волокно, а также их морфологическое разнообразие может позволить диверсифицировать сырьевую базу, снизить нагрузку на традиционные источники сырья и получить дополнительный доход от использования нетрадиционных волокнистых материалов.

Термин «недревесное волокно» охватывает ряд растений с сильноразличающимися характеристиками. Недревесные волокна, также называемые «альтернативными волокнами», представляют собой целлюлозные материалы, из которых могут быть получены волокна для производства бумаги. Наиболее широко используемыми недревесными материалами для производства бумаги являются солома, жмых сахарного тростника, бамбук, кенаф, конопля, джут, сизаль, абака, хлопковый линт и тростник. Большинство недревесных растений являются однолетними растениями, которые развивают полный потенциал волокна в один вегетационный период [1].

* Автор, с которым следует вести переписку.

Недревесные волокна содержат больше целлюлозы и меньше лигнина. Недревесные волокна используются для производства целлюлозы и бумаги различного качества и прочности. Недревесные волокна можно производить в течение года по сравнению с длительными циклами роста древесины [2].

Различный химический состав недревесных растений зависит от типа почвы, условий выращивания и климатических условий. Недревесные волокна имеют более высокое содержание силикатов, питательных веществ и гемицеллюлозы, чем волокна древесины. Низкая объемная плотность недревесного сырья позволяет легко получить доступ к содержащейся целлюлозе по сравнению с древесным сырьем. Химический состав недревесного волокнистого сырья также варьирует в более широком диапазоне, чем у древесины [2].

По своему происхождению недревесные волокна делятся на три основных типа (рис. 1): сельскохозяйственные отходы; естественнорастущие растения; технические культуры [3, 4].

В зависимости от положения волокна в растениях недревесные растительные волокна можно разделить на четыре типа, а именно: волокна внутренней части стебля, лубяные (наружной части стебля) волокна, волокна листьев и волокна плодов (рис. 2) [2, 5].

Помимо вышеуказанной классификации также существует деление на такие категории, как древесное, недревесное сырье и макулатура [6].

Существует около 2000 видов растений, используемых в качестве источника натуральных волокон, но лишь немногие из них имеют коммерческое значение, составляя около 90% натуральных волокон в мире. Основные из них представлены в таблице [7].

Использование недревесного растительного сырья в России может показаться неактуальным, поскольку страна занимает лидирующие позиции по лесным запасам. Однако высокий рыночный спрос на бумажную продукцию, экологические проблемы, возникающие в результате широкого использования древесины, увеличение дефицита доступного древесного сырья создали запрос на поиск более быстрорастущих видов высококачественного волокна и более экологически безопасных процессов производства.

Изучение особенностей произрастания, физических и химических характеристик недревесных растений позволит дать им дополнительное применение в качестве сырья для целлюлозно-бумажной промышленности.

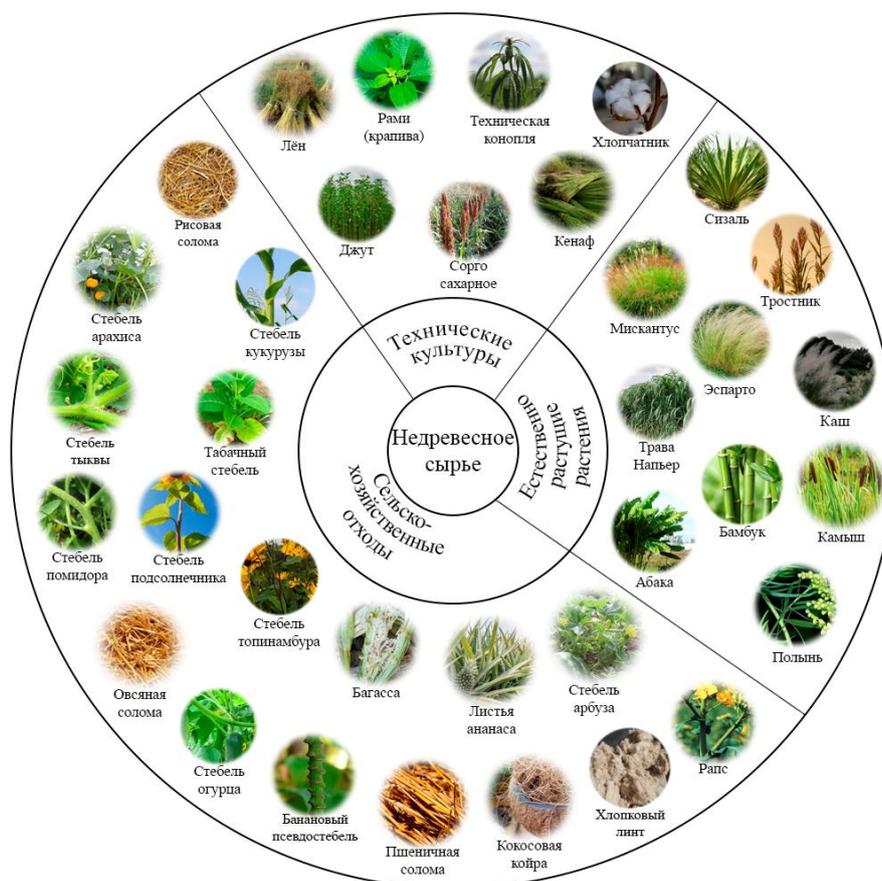


Рис. 1. Источники недревесного сырья

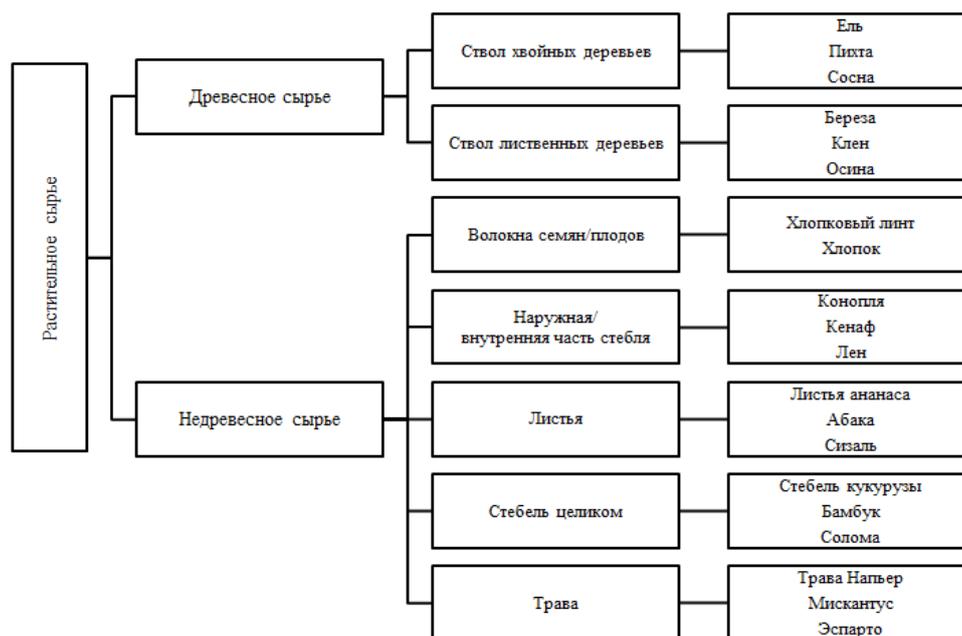


Рис. 2. Источники растительных волокон

Характеристика недревесного сырья

Вид растения	Длина волокна, мм	Диаметр волокна, мкм	Урожайность, т/га	Выход целлюлозы, т/га	Содержание целлюлозы, %	Относительное удлинение при разрыве, %
Конопля техническая	20	22	12	6.7	73–77	1.6–4.5
Багасса (отходы сахарного тростника)	1.5–1.7	81–390	9	4.2	30.2	1–3
Мискантус	0.45	20–25	10–16	8	28–43	1.8
Бамбук	1.36–4.03	8–30	4	1.6	26–43	2
Кенаф	2.74	20	15	6.5	51.8	2.7–6.9
Эспарто	1.10	20–25	25–40	...	62–71	...
Джут	1.06	26	1.8	...	...	1.5–3.1
Сизаль	3.03	17	1	...	...	1.9–3
Хлопковый линт	3.5	21	...	...	90–96	...
Абака	60	20	0.6	...	66.43	...
Стебли кукурузы	1.5	18	1.7–4.5	...	70–95	22.7
Рисовая солома	1.4	9	3	1.2	39.2	...
Пшеничная солома	1.4	15	2.5	1.9	30–45	...
Тростник	1.2	15	9	...	29–42	...
Рапи (крапива)	120	5–6	1.5	...	68.6–76.2	2–4
Лен	28	21	2–2.5	...	75–82	1.2–3
Трава Напьер	0.75	...	40	5.7	...	...
Каш	1.52	16	...	...	...	...
Банановый псевдостебель	2–12	16–32	...	...	49.33	3–10
Листья ананаса	30–750	10–205	...	...	66.2	1–3
Сорго сахарное	1.38–16	...	20–30	...	40–50	...
Капок	18	30–36	...	...	35–65	3
Рапс	0.8–2.2	12–31	5–10	...	17.8–43.2	...
Подсолнечник	9–40	3.28–10.77	2.47–14.83	...	20–45	...

Актуальность обзора, выполненного авторами, заключается в систематизации данных различных исследователей, а также в описании растений, наиболее подходящих для использования в качестве сырья в целлюлозно-бумажной промышленности. Особое внимание уделяется растениям, которые наиболее распространены на территории России и являются доступной сырьевой альтернативой. Цель обзора – описание характеристик одних из наиболее распространенных видов недревесного сырья, их классификация, способы

выделения и обработки волокон, а также преимущества и недостатки их использования в целлюлозно-бумажной промышленности.

Сельскохозяйственные отходы

Хлопковый линт представляет собой короткое волокно, которое остается на оболочке хлопкового семени. Хлопковый линт короче, чем хлопок-волокно, но они имеют одинаковую зрелость. Хлопковый линт имеет повышенное содержание целлюлозы, является волокнистым материалом для легкой, военной, химической и медицинской промышленности.

Хлопковый линт имеет высокое содержание целлюлозы и низкое содержание лигнина, хлопковая масса легко отбеливается и трудно желтеет. Содержание хлоридов в хлопковой массе низкое, а подходящее содержание пентозана определяет хорошее водопоглощение хлопкового волокна, высокое содержание золы и может быть удалено специальными методами. Зрелость является ключевым показателем качества хлопкового линта, она находится в тесной связи с другими показателями. Чем выше зрелость, тем больше содержание целлюлозы и меньше содержание нецеллюлозных примесей [8].

Длина волокна хлопкового линта составляет примерно 3–7 мм; первые надрезы – 5–7 мм и вторые надрезы – 3–5 мм. Средний диаметр волокна – 0.03 мм. В смесях различных пропорций он используется для изготовления высококачественной бумаги [4].

Жмых сахарного тростника (Багасса). Средняя длина волокна сахарного тростника составляет 1.7 мм (0.8–2.8 мм), а средняя ширина волокна – 0.02 мм (0.01–0.034 мм). Волокна толстостенные с тупыми концами. В смесях различных пропорций используется для производства бумаги для печати и письма, картона, папиросной бумаги, пергамента, жиронепроницаемой бумаги, а также мешочной и газетной бумаги [4].

Морфологически сахарный тростник состоит из четырех различных типов клеток: волокнистых клеток (~50%), паренхиматозных клеток (~30%), сосудистых клеток (~15%) и клеток эпидермиса (~5%). При сравнении эти клетки имеют очень разные характеристики. В то время как волокнистые и сосудистые элементы имеют длину ~1.1 мм, паренхиматозные клетки – длину ~0.3 мм. Волокнистые клетки имеют гораздо меньший диаметр (~20 мкм) по сравнению с клетками сосудов (~80 мкм) и паренхиматозными клетками (~60 мкм). Следовательно, бумага из сахарного тростника с разным содержанием таких клеток может давать бумагу с определенными механическими характеристиками. При исследованиях производства бумаги из сахарного тростника и ее промышленного производства используют жмых сахарного тростника без сердцевинки, поскольку сердцевинная фракция (мелкие частицы, менее 0.4 мм, в основном паренхиматозные клетки и поврежденные клетки) способствует более медленному обезвоживанию в бумагоделательной машине [9].

Сахарный тростник выращивают в большинстве тропических и субтропических стран из-за высокого содержания сахарозы. После обработки тростника через серию прессов или диффузоров доудалют сахарный сок, волокнистый остаток багассы обычно сжигают в котлах сахарного завода. Однако во многих областях багасса имеет большую экономическую ценность, если она измельчается. На самом деле, это удовлетворяет требованиям к волокну для производства бумаги лучше, чем любое другое растительное волокно. Багасса широко использовалась в Южном Китае в качестве сырья для производства бумаги [4, 10].

Пшеничная солома. Волокна пшеничной соломы имеют среднюю длину 1.4 мм (0.4–3.2 мм) и ширину 0.015 мм (0.08–0.034 мм). Обычно волокна довольно узкие, толстостенные и имеют тупые или заостренные концы. В смесях различных пропорций используется для изготовления бумаги для печати и письма, пергамента и жиронепроницаемой бумаги, гофрокартона, картона и оберточной бумаги.

Солома была основным источником волокон для бумажной промышленности в Северной Америке до тех пор, пока не была полностью создана целлюлозно-бумажная промышленность. В настоящее время солома используется в районах с дефицитом древесины (например, в Европе, Азии, Африке, Центральной и Южной Америке) [4].

Подсолнечник (Helianthus annuus) – однолетняя культура, стебли которой состоят из двух частей, включающих внутреннюю нецеллюлозную сердцевину и наружное одревесневшее кольцо лигноцеллюлозных волокон. Принимая во внимание отношение веса стебля к семени около 2 : 3, соотношение стенки к сердцевине около 9 : 1 и плотность наружной части стебля 0.44 г/см³, большое количество остатков ежегодно доступно для получения бумажной массы, а не для сжигания, как это часто происходит в настоящее время [11].

Потенциал волокон подсолнечника аналогичен стеблям хлопка и бамбука, которые являются одними из самых ценных ресурсов сельскохозяйственных волокон в мире. Обработка стеблей подсолнечника для любых целей требует базовых знаний об их анатомическом и химическом строении.

После сои, пальмы и рапса подсолнечник является четвертым основным источником растительного масла в мире, не считая его нового применения для фиторемедиации почв, загрязненных металлами. Подсолнечное масло, которое коммерчески извлекают из семян подсолнечника, в основном используется для приготовления пищи, масла-носителя и производства биодизельного топлива. В связи с постоянно растущим спросом на растительное масло объемы выращивания ежегодно увеличиваются на 10–20%, что приводит к значительному увеличению стеблеобразования подсолнечника [12].

Помимо вышеперечисленных источников недревесного сырья из категории сельскохозяйственных отходов целлюлозу выделяют также из ячменной соломы, стебля арахиса, стебля тыквы, стебля помидора, стебля огурца, кокосовой койры, камыша, топинамбура, банановых стеблей, листьев ананаса, стеблей кукурузы, рапсовой и рисовой соломы, табака [13–28].

Далее приведены примеры использования в целлюлозно-бумажной промышленности не только сельскохозяйственных отходов, а также естественнорастущих растений и технических культур.

Естественнорастущие растения

Бамбук (Dendrocalamus strictus) – одно из самых универсальных растений в мире. Это самые быстрорастущие растения, доступные для получения целлюлозы, они достигают полной высоты 15–30 м в 2–4 месяца при суточных приростах 20–100 см. Диаметр стебля – обычно 5–15 см. Длина волокон бамбука варьируется от вида к виду.

Средняя длина волокна бамбука составляет 2.7–4.0 мм, а средний диаметр – 0.015 мм. В смесях различных пропорций используется для приготовления бумаги для печати и письма, картона, оберточной бумаги и мешочной бумаги.

В мире насчитывается более 1000 видов бамбука, произрастающих в самых разных климатических условиях и регионах. Бамбук широко используется в качестве волокнистого сырья для производства бумаги благодаря своему длинному волокну и химическому составу, близкому к листовым породам. Бамбук стал очень полезным армирующим волокном в азиатских странах, особенно в Индии и Китае, с одной стороны, из-за большой доступности, а с другой – из-за нехватки хвойной древесины в этих регионах [4, 29, 30].

Трава Напьер, также называемая «слоновья трава», принадлежит к семейству *Poaceae* видов *Pennisetum purpurum schum.* Слоновья трава (*Pennisetum purpureum*) представляет собой быстрорастущее растение с высокой продуктивностью биомассы в диапазоне 30–45 т/га/год в сухом состоянии [31–33].

Трава Напьер родом из Африки, и столетия назад растение было завезено в Южную Америку, Азию и Австралию в качестве растения для домашнего скота. Это многолетняя крепкая межузловая мочковатая трава. Одно куртинное растение может дать до 50 побегов и обычно достигает 4 м в высоту. Трава Напьер является диким и быстрорастущим видом и требует очень небольшого количества питательных веществ. Ее можно собирать через 3–4 месяца после посадки, и его продолжают собирать с интервалом в 6–8 недель в течение до 5 лет, годовой урожай сухой массы достигает до 40 тонн с гектара.

Слоновья трава имеет полезные характеристики для производства целлюлозы, такие как большое количество волокна (аналогично сахарному тростнику) и ее химический состав. В некоторых работах показано содержание 40, 30 и 17.7% целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина соответственно. Эти значения хороши для производства целлюлозы, особенно низкое содержание лигнина, что свидетельствует о высокой пригодности этого материала к варке [31–34].

Каш (Saccharum spontaneum L.) представляет собой многолетнюю высокую траву, которая может естественным образом расти в экстремальных условиях и на пустырях. Этот вид является заброшенным и малоиспользуемым растением, но он выполняет множество функций по восстановлению экосистем пустырей с производством биомассы. Это важный аспект управления окружающей средой и смягчения последствий изменения климата. Каш имеет сходные анатомические характеристики с багассой (*Saccharum officinarum*). Кукурузный стебель также похож на багассу в структуре. Каш может быть заменителем багассы в производстве целлюлозы [23].

Эспарто (Stipa tenacissima). Волокна эспарто тонкие и круглые, диаметром около 0.01 мм и длиной чуть более 1 мм. У них очень маленький просвет, и поэтому они очень упругие. Из них производят объемную, гладкую, хорошо сформированную бумагу.

Трава эспарто в диком виде произрастает в Северной Африке и в степных районах Средиземноморья. Листья длинные и скрученные серовато-зеленого цвета. Растение грубое и крепкое, растет пучками или кустами около 3 м в диаметре.

Начиная с середины прошлого века трава эспарто, выращиваемая в Алжире и части Южной Испании, стала важным источником сырья для тонкой бумаги [4].

Тростник (Phragmites communis Trinius). Длина волокна стебля колеблется примерно от 0.35 до 3.35 мм при среднем значении 1.8 мм, а ширина волокна варьируется от 0.006 до 0.022 мм в среднем 0.014 мм. В смесях различных пропорций используется для изготовления бумаги для печати и письма, материала для гофрирования и оберточной бумаги.

Наиболее часто используемый тростник (*Phragmites communis*) представляет собой высокую многолетнюю траву, которая обычно растет на болотах, в руслах рек и дельтовых районах России, Румынии, Египта, Северного Китая, Северной Кореи и Испании. В зависимости от условий, таких как характеристики почвы, гидрологическое состояние, количество питательных веществ и рН, диаметр будет варьироваться от 9 до 22 мм, а высота – от 2.5 до 5 м.

Растение созревает к концу сентября – началу октября, но необходимо дать еще 4–6 недель для завершения накопления питательных веществ в корне, который обеспечит воспроизводство в следующем году. В апреле молодые стебли содержат до 80% влаги. К июлю эта влажность снижается до 60–65% и до 26–27% в декабре. Снижение влажности помогает контролировать деградацию тростника при хранении и снижает стоимость транспортировки [4].

Абака (манильская конопля) (Musa textilis). Представляет собой растение семейства Musaceae, похожее на банановое дерево, но имеющее несъедобный плод и стебель, который дает высококачественные волокна. Абака возникла на Филиппинах и начала выращиваться в Эквадоре во время Второй мировой войны [35].

Растение абака имеет среднюю длину волокна 6.0 мм и средний диаметр 0.024 мм. В смесях различных пропорций он используется для приготовления специальных бумаг, таких как сверхтонкая, легкая, банкнотная бумага, чайная бумага, фильтры, вкладыши, оберточная и мешочная бумага.

На качество целлюлозы абаки влияет тип очистки, который определяет сорт волокон. Превосходные сорта волокна перерабатываются в целлюлозу для очень пористых и высокопрочных материалов. Например, для чайных пакетиков, специальной бумаги с высокой прочностью на разрыв и растяжение, такой как вакуумные пакеты и оберточная бумага [4].

Сизаль (Agave sisalana). Недревесное листовое растение, произрастающее в Мексике. Он успешно растет в полузасушливых районах Бразилии, Танзании и Кении. Листья сизали имеют ширину около 10 см, длиной около 1–1.5 м и массой 500–700 г. Сизаль растет круглый год, а первый урожай можно снимать через 2–2.5 года после посадки. Сизаль дает 180–240 листьев на протяжении всего продуктивного периода, составляющего 4–6 лет.

Листья сизали собирают вручную и поперечно обрезают до длины 50 мм. Сок и смола удаляются через вертикальные сита, а сизаль измельчается. Волокна транспортируются конвейерами для сушки. Масса сизалевого волокна после сушки прессуется в тюки для варки.

Листья сизали имеют среднюю длину волокна 3.0 мм и среднюю ширину волокна 0.02 мм. В смесях различных пропорций он используется для получения сверхтонких, легких, денежной и ценной бумаги, чайных пакетиков, фильтров, оберточной и мешочной бумаги [4].

Мискантус (Miscanthus), род многолетних травянистых растений семейства злаков. Известно около 25 видов, распространенных от тропической и Южной Африки до Восточной и Юго-Восточной Азии. На территории бывшего СССР произрастают три вида: Мискантус сахароцветковый (*Miscanthus sacchariflorus*), Мискантус краснеющий (*Miscanthus purpurascens*), Мискантус китайский (*Miscanthus sinensis*). Последние двадцать лет ученые активно занимаются выведением новых сортов Мискантуса. В связи с неприхотливостью этой древесной травы и чрезвычайно высокой урожайностью биомассы (10–30 т сухой массы с 1 га) Мискантус является типичным представителем энергетических растений. Его севооборот составляет 10–15 лет. Растение практически не требует подготовки почвы, и после посадки дальнейшая обработка и сбор урожая осуществляется без больших затрат. При использовании правильной технологии посадки и ухода

Мискантус может улучшить состояние истощенной почвы. Глубокие корни (до 2.5 м в глубину) укрепляют структуру почвы, увеличивают содержание органических веществ в ней и служат своего рода фильтрами для грунтовых вод. Отсутствие ежегодного вспахивания также оказывает положительное влияние на почву (уменьшается эрозия). Для культуры характерен не только быстрый рост, особенно жарким летом (к третьему году урожай составляет 10–16 т/га), но и удовлетворительная морозостойкость [36, 37].

Важно иметь в виду, что средняя длина волокна *Miscanthus sinensis* может варьироваться в зависимости от различных факторов, таких как сорт, местоположение и метод измерения [38].

Вследствие высокой урожайности биомасса Мискантуса рассматривается как сырьевой источник недревесной целлюлозы. Результаты определения химического состава зарубежных видов Мискантуса подтверждают содержание целлюлозы в пределах 40–44% и лигнина 18–23% [37].

Технические культуры

Рами (*Boehmeria nivea*), также известен как китайская трава, род растений семейства крапивных Urticaceae, произрастает в Китае и соседних странах. Это многолетнее растение высотой 1.5–2.5 м. Коммерчески выращивается в умеренном климате во многих странах, включая Китай, Японию, Россию, Египет, Ливию и Северную и Южную Америку [4].

Среди лигноцеллюлозных материалов волокна рами (*Boehmeria nivea*) выделяются за счет их превосходной механической стойкости с пределом прочности при растяжении от 400 до 1600 МПа и более высокой концентрации α -целлюлозы (80–85%) по сравнению с хлопковыми и шелковыми волокнами. И с морфологической точки зрения длина этих волокон обычно колеблется от 120 до 150 мм, но может достигать 620 мм, тогда как их диаметр может варьироваться от 40–60 мкм до 126 мкм [39].

Хлопчатник (*Gossypium*) – род как древесных, так и травянистых форм многолетних растений семейства мальвовых (*Malvaceae*). Известно около 60 диких и культурных видов, большинство из которых выращивается в основном для получения хлопкового волокна и масла из семян. Волокно затем используется в текстильной промышленности для изготовления тканей и нитей, а масло применяется для различных технических целей или употребляется в пищу. Отходы семян – жмых и шрот – входят в состав высокобелкового корма для скота.

В зависимости от сорта и от условий произрастания куст хлопчатника может достигать в высоту 0.5–2.0 м. Стебель растения прямой, прочный, покрыт волосками; на нем образуются два типа ветвей: ростовые (моноподиальные) и плодовые (симподиальные). После образования 12–18 симподиальных ветвей рост стебля прерывают, удаляя верхушечные почки, так как наиболее качественный урожай образуется лишь на нижних ветвях растения. Корневая система у хлопчатника стержневая и уходит в землю на 50 см, а у некоторых видов может достигать 3 м. Листья с длинными черешками расположены очередно, их поверхность тонкоопушенная. На них, а также на стеблях, имеется множество темных вкраплений, которые представляют собой места скопления госсипола – специфичного для хлопчатника биологически активного вещества фенольной природы.

Цветки различной окраски, обычно светлой – желтой или кремовой, одиночные со сросшимися лепестками. Цветки раскрываются примерно через 10 недель после посева, распыляют пыльцу и в этот же день к вечеру увядают [40, 41].

Хлопковая целлюлоза входит в композицию многих видов бумаги: ее применяют для бумаги, к которой предъявляются повышенные требования к сохранности, чертежной, картографической, основы фотокопирования, бумаги для хроматографического и электрофоретического анализа и др. Хлопковая целлюлоза по своему строению и свойствам существенно отличается от целлюлозы из древесины. Она, самая прочная и чистая среди природных волокон, состоит из альфа-целлюлозы более чем на 90%. Повышенная кристалличность, а также нативные особенности хлопка затрудняют его фибриллирование при размоле. В то время как у древесной целлюлозы пучки фибрилл параллельны оси волокна и окружены гемицеллюлозными и лигнинными компонентами, облегчающими их разделение, у хлопкового волокна фибриллы расположены под углом 45° к оси волокна. Поэтому у хлопковой целлюлозы при размоле происходит преимущественно укорочение волокна, а не его фибриллирование [42].

Джут (*Corchorus capsularis*). Джут характеризуется высоким содержанием целлюлозы, а его волокна довольно длинные. Химические и морфологические свойства благоприятствуют его использованию в производстве целлюлозы. Растение вырастает до 2.5–3.5 м в высоту. Джут состоит из пучков волокон от 1.8 до

3 м в длину. Отдельные волокна имеют длину 2–5 мм и собраны параллельно с перекрытием концов для получения непрерывных нитей, содержащих 10–30 волокон за сечение.

Средняя длина волокна джута составляет 2.5 мм, а средний диаметр волокна – 0.02 мм. В смесях различных пропорций используется для печати и писчей бумаги, а также бирочной, оберточной и мешочной бумаги. Джут в основном выращивают в Бангладеше, Индии, Китае и Тайланде [4].

Кенаф (Hibiscus cannabinus). Это однолетнее растение с одиночным прямым неразветвленным стеблем, состоящим из внешней волокнистой коры и внутренней одревесневшей основной. Стебли кенафа вырастают до 5–6 м в длину и 25–30 мм в диаметре в течение 5–6 месяцев, в которые его собирают.

Волокна луба имеют длину 3–4 мм, а сердцевинки – 0.6 мм. Их средний диаметр составляет 0.02 и 0.03 мм соответственно. В смесях различных пропорций он используется для изготовления бумаги для печати и письма, газетной бумаги, папиросной бумаги, мелованного картона [43].

Сырое волокно кенафа, полученное из внешней части стебля, на самом деле представляет собой пучок волокон, составляющий около 40% веса ствола, а внутренняя древесная сердцевина – около 60%. Кенаф использовался в ограниченных масштабах в качестве заменителя древесины в целлюлозно-бумажной промышленности Таиланда и Китая. Он содержит примерно 65.7% целлюлозы, 21.6% лигнина и пектины [4].

Лен (Linum usitatissimum L.) – один из видов семейства Linaceae, включающего 13 родов и 300 видов. Элементарное волокно льна представляет собой одну растительную клетку веретенообразной формы с толстыми стенками и узким каналом. Концы волокна острые, канал замкнут. Высота и диаметр стебля льна составляют примерно 1–1.3 м и 4–5 мм соответственно. Растение происходит из регионов Средиземноморья и Юго-Западной Азии и в настоящее время является одной из наиболее важных сельскохозяйственных культур. Льняное волокно ранее использовалось в качестве текстильного материала, но в последнее время оно нашло применение и в других областях, например, в целлюлозно-бумажной промышленности [4, 44].

Лен имеет среднюю длину волокна 30 мм и средний диаметр волокна 0.02 мм. Сырье для льняной целлюлозы получают из следующих источников: текстильные отходы (тряпье); волокнистые отходы, остающиеся при удалении лубяных волокон из текстильного льна (относительно чистое сырье, известное как «текстильная льняная пакля»); стебель растения после извлечения семян.

В смесях различных пропорций он используется для изготовления специальной бумаги, такой как бумага печатная книжно-журнальная, бумага для печати типографская, конденсаторная бумага, банкнотная бумага и папиросная бумага.

Лен имеет исключительное значение в процессе решения проблем экологизации товаров. Продукция, производимая на основе льняного материала, по своему технологическому уровню может удовлетворить как производственные, так и непроизводственные запросы всех членов общества [4, 45, 46].

Сорго сахарное (Sorghum saccharatum L.) – однолетнее растение семейства злаков, относится к наиболее засухоустойчивым культурам в мире и характеризуется тем, что в соке его стебля содержится более 10–20% сахаров. Растение сахарного сорго представляет собой высокорослый куст (200–350 см) с сочными стеблями (до 60% от общей массы). Урожайность стеблей сорго – 20–30 т/га. Биологические особенности этой культуры позволяют получать хороший урожай зеленой массы даже на очень бедных почвах и солончаках в условиях выпадения около 200 мм осадков в год [43].

Конопля (Cannabis sativa). Волокнистая конопля – однолетнее растение, достигающее высоты 4–5 м и дающее урожай 12–14 т. сухого вещества/год с га. В виде волокнистой массы можно собрать около 10–12 тонн сухого вещества/год с га. 35% из них – длинные лубяные волокна и 65% – короткие сердцевинные волокна. Содержание целлюлозы в конопляном волокне увеличивается по мере созревания растения.

Диаметр стебля варьируется от 5 до 20 мм в зависимости от местоположения, роста на гектар и способа посева.

Чтобы растения созрели для сбора волокна, требуется около 80–150 дней. Необходимо собирать коноплю в нужное время, чтобы максимизировать качество волокна. Результат раннего сбора урожая – слабые волокна, в то время как отсроченный сбор урожая может привести к образованию стеблей, которые трудно отделить в процессе вымачивания. Поздно собранные растения производят клетчатку намного грубее и жестче.

В смесях при различных пропорциях конопля используется для изготовления специальной бумаги, такой как высококачественная бумага для письма и печати, банкнотная бумага, фильтровальная бумага, изоляционная бумага, жиронепроницаемая бумага, чайная бумага, бумага рисовальная [4, 47, 48].

Среди всего многообразия недревесных волокнистых материалов наиболее ценным являются лубяные волокна конопли. Коноплю можно выращивать повторно уже через 4 месяца после сбора урожая, а деревьям, наоборот, требуется от 20 до 80 лет. Кроме того, конопляная бумага служит на сотни лет дольше, чем бумага из древесины, которая со временем разлагается и желтеет. Конопляная бумага не требует токсичных отбеливающих веществ. Кроме того, конопля может стерилизовать почву, убивать грибки и сорняки и предотвращать эрозию. Ее корни лучше связаны с почвой, чем обычно используемые для этой цели овес и рожь. Исследования показывают, что один гектар конопли поглощает из земли 0.5 кг меди, 160 г свинца и много кадмия. Конопляная бумага может быть переработана от 7 до 8 раз по сравнению с 3-кратной переработкой бумаги из древесной массы [48–50].

В поперечном сечении стебли конопли состоят из двух основных частей (рис. 3). Во-первых, это ткань вне сосудистого камбия, которую часто называют корой или лубом, и, во-вторых, ткани внутри сосудистого камбия, которые часто называют ядром или кострой и содержащие ксилему. Наружная часть состоит из двух составных частей: эпидермиса и коры. Вместе они часто называются лубом. Эпидермис покрыт тонким слоем воска, называемым кутикулой, который является барьером, предотвращающим чрезмерную потерю влаги и обеспечивающим некоторую защиту растения (рис. 3) [51].

Волокна конопли расположены в коре двумя отдельными пучками: первичные волокна (длиной около 20 мм и диаметром 10–40 мкм) и вторичные волокна (длиной около 2 мм и диаметром 15 мкм). Первичные волокна используются для производства текстиля, поскольку вторичные волокна слишком короткие. Корневой слой содержит пучки волокон и проходит по всей длине стебля растения. Длина конечных волокон колеблется от 2 до 60 мм при средней длине от 40 до 50 мм. Волокна имеют тенденцию быть более толстыми в нижней части стебля по сравнению с верхней частью. Внутреннее ядро составляют камбий и ксилема. Камбий состоит из ткани, которая отделяет слой волокон от древесной ткани ксилемы, иногда называемой кострой. Ксилема состоит из сосудистых элементов, лучевых и паратрахеальных клеток и либриформных волокон. Сердцевинную полость окружает центральная полость, проходящая по всей длине стебля. Волокна либриформа имеют длину примерно 0.5–0.8 мм и ширину около 25 микрон. Это внутреннее ядро отделяется от внешнего слоя коры в процессе первичного получения волокна при декорткации и впоследствии используется в качестве побочного продукта производства волокна. Извлечение волокон из стеблей конопли обычно достигается механическим способом. Целью этого этапа обработки является полное извлечение волокон путем полного отделения их от древесной сердцевины стебля конопли. Этот процесс называется декорткацией [52–54].

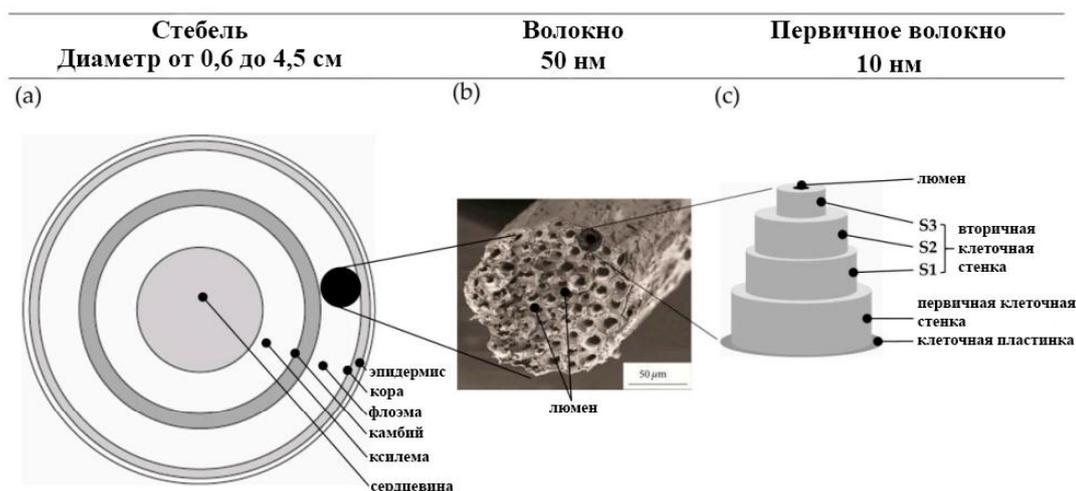


Рис. 3. Структура волокна конопли: (а) поперечное сечение стебля конопли, (б) морфология поперечного сечения пучка волокон конопли и (с) схематическое изображение морфологии пучка волокон конопли и (с) схематическое изображение элементарного волокна конопли

Большая часть видов сырья, представленных в обзоре, не произрастает на территории России из-за климатических условий или распространена в очень малом количестве. В связи с этим целесообразно обра-

тратить внимание на доступные растения, которые представлены в основном лубяными культурами, крупными и хлебными злаками. На территории России обширное распространение получили такие растения, как лен, техническая конопля, пшеница, рапс, подсолнечник. Наибольший интерес из них представляют лубяные культуры, поскольку они имеют прочное и длинное волокно, а также большое количество целлюлозы.

Способы выделения волокон из лубяных культур

Наиболее актуальным недревесным сырьем в качестве альтернативы для целлюлозно-бумажной промышленности являются лубяные культуры. Для последующего применения стебли необходимо подвергать разделению, поскольку они состоят из внутренней части с короткими одревесневшими волокнами и наружной части с длинными волокнами.

Первым шагом в получении волокон является их извлечение из стебля. В этом процессе внешний слой пучков волокон отделяется от других частей растения, таких как ксилема, кора или костра. Следовательно, извлечение можно определить как разрыв связей между пучками волокон и ядром. В процессе экстракции пучки волокон разделяются на части, длина которых может достигать высоты стебля растения. Каждый пучок волокон содержит от одного до десяти одиночных волокон. Схематическая диаграмма этой обработки растительного волокна показана на рисунке 4.

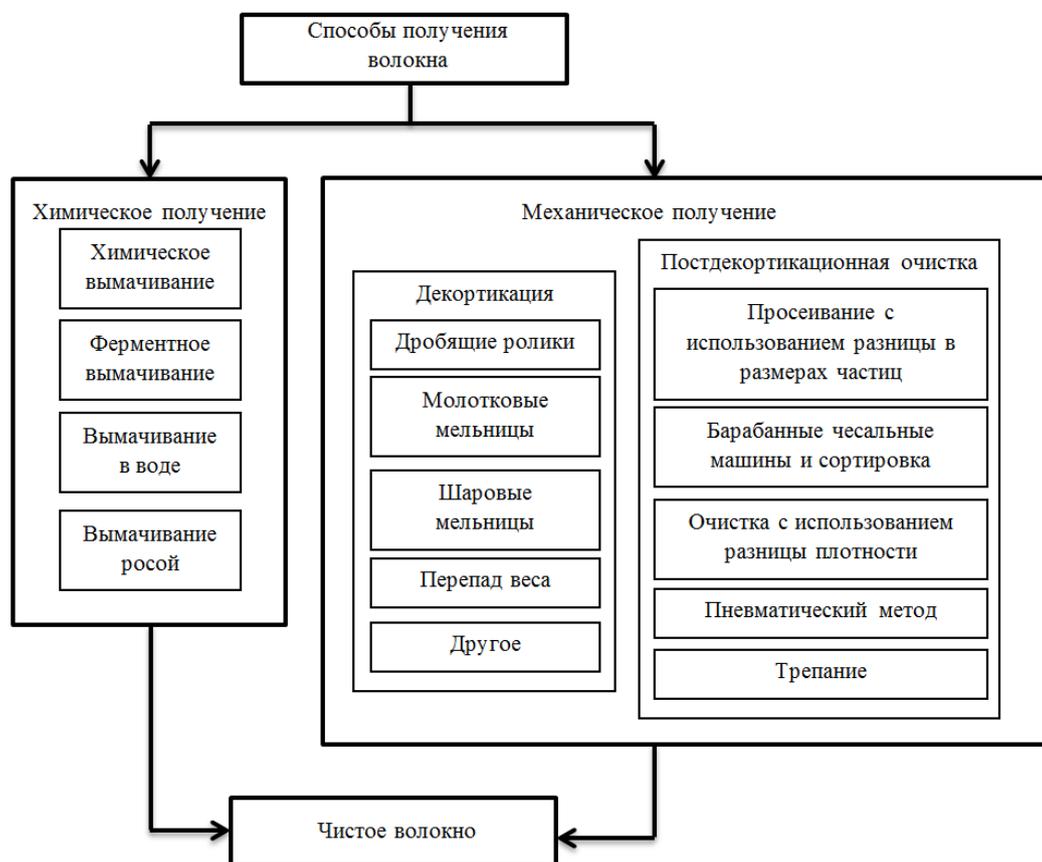


Рис. 4. Способы выделения волокон из лубяных культур

Существует три основных метода извлечения лубяных волокон из растений: вымачивание, механическое извлечение или их комбинация. Вымачивание – это биологический процесс, при котором пучки волокон отделяются от окружающей ткани с минимальным разрушением волокна. Существует тесная связь между качеством извлеченных волокон и условиями вымачивания (например, продолжительностью и температурой). Чрезмерное вымачивание приводит к разрыву связей между клетками одного волокна, что делает волокна более слабыми. Недостаточное вымачивание приводит к образованию пучков волокон, которые все еще прикреплены к сердцевине, что неблагоприятно влияет на чистоту волокна. Механическое получение включает в себя использование механических сил для разрыва связей между волокном и его сердцевинной. Этот метод

намного эффективнее, чем вымачивание, с точки зрения обработки тонн в час. Однако трудно контролировать механические силы, приложенные к стеблю растения. Кроме того, этот метод позволяет получить волокна с очень разной длиной волокна, что является еще одним недостатком механической экстракции. Таким образом, только механическая экстракция не очень эффективна. Предварительное вымачивание стеблей растений может улучшить отделение волокон с помощью механического извлечения.

Таким образом, комбинацию вымачивания и механического извлечения целесообразно использовать для повышения эффективности и продуктивности получения волокна [55–57].

Применение недревесных волокон в целлюлозно-бумажной промышленности

Бумага представляет собой материал, состоящий из целлюлозных волокон, которые извлекаются из растительной биомассы химическим или механическим путем. Неволокнистые материалы, такие как наполнители, добавляются в процессе производства бумаги для улучшения свойств при ее конечном использовании [58].

По статистике ежегодно в мире потребляется около 400 млн тонн бумаги. Этот показатель вырос в 4 раза за последние 40 лет. На снижение данного показателя не повлияло ни использование электронного документооборота, ни снижение спроса на бумажную прессу, ни переход многих компаний в «онлайн» сферу. Мировое потребление бумаги и картона ежегодно растет на 1.1% и к 2030 году достигнет 482 млн тонн [59].

Подсчитано, что во всем мире ежегодно вырубается около 1.3×10^{11} м² лесов, и около 40% из них используются исключительно для производства бумаги. Основные последствия обезлесения включают разрушение экосистем, потерю естественной среды обитания, которая может привести к исчезновению видов, и глобальное потепление, связанное с тем, что около 15% выбросов парниковых газов связано с уничтожением лесов.

Неуклонный рост мирового потребления бумаги объясняется демографическим ростом, индустриализацией и прогрессом в образовании, особенно в развивающихся странах [58].

Для удовлетворения постоянно растущего спроса на целлюлозу и бумагу в странах, где древесина недоступна в достаточных количествах, важным сырьем являются недревесные растения и сельскохозяйственные отходы. Хотя в настоящее время основными недревесными растениями являются солома злаков и багасса, другие источники, такие как лен, конопля, сизаль, бананы, джут и т.д., также могут стать важным сырьем для производства бумаги в будущем [58].

Сырье, используемое для производства бумаги, должно содержать большое количество целлюлозы, что является критерием, которому удовлетворяет лигноцеллюлозная биомасса, состоящая из трех основных компонентов, а именно целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. В действительности, чем выше содержание целлюлозы и чем ниже содержание лигнина в биомассе, тем выше будет прочность бумаги и, следовательно, ее эксплуатационные качества. На самом деле, большое количество недревесной растительной биомассы, состоящей из всей вегетативной биомассы, кроме биомассы, поступающей от деревьев (за исключением листьев), корней и коры, может быть использовано в качестве сырья для производства бумаги [58].

Существующая нехватка древесных волокон побуждает целлюлозно-бумажную промышленность к более обширному применению недревесного сырья в производстве готовой продукции. Помимо этого, обилие недревесного сырья в некоторых странах также является причиной его использования в производстве бумаги. Иногда использование недревесных волокон в производстве бумаги – наилучший способ их применения. Например, в Европе и Америке использование недревесных волокон при получении целлюлозы имеет следующее преимущество: исключается необходимость уничтожения агроотходов, что в настоящее время увеличивает затраты на сельское хозяйство и провоцирует порчу зеленого волокна из-за вредителей.

В настоящее время недревесное растительное сырье применяют для производства волокнистых полуфабрикатов различного назначения более чем в 30 странах мира. Предлагаются новые способы получения волокнистых полуфабрикатов, особое внимание при разработке новых технических решений уделяется снижению энергозатрат на проведение процессов и расход химикатов [60].

Некоторые недревесные растительные волокна пользуются спросом при производстве бумаги благодаря особым свойствам, которые делают их более предпочтительными, чем у древесных волокон. Волокнистая масса из недревесного сырья в настоящее время используется почти во всех типах бумаги, таких как мешочная, оберточная, полиграфическая, писчая, туалетная бумага, полотенца, пергамин, наполнитель для гофрирования, подкладочный картон, отбеленный картон и основы для покрытий. Хлопковые линты используются для изготовления высококачественной бумаги для бланков, денежной бумаги, растворимой целлюлозы и других

специальных продуктов. Багасса и солома отлично подходят для производства бумаги и могут заменить химическую целлюлозу листовных пород для производства бумаги для печати и письма. Целлюлоза, изготовленная из недревесных однолетних растений (например, рисовая и пшеничная солома, багасса, кенаф), подходит в качестве армирующих волокон в целлюлозе, изготовленной из макулатуры. Пшеничная солома считается подходящим источником бумаги для письма и печати. Лубяные волокна конопли используются в качестве источника специальной бумаги, такой как сигаретная, изоляционная бумага [61–63].

Способы получения волокнистых материалов

Целлюлоза является наиболее распространенным органическим полимером (биополимером) в природе. Хотя содержание целлюлозы в недревесных растениях, как правило, больше, древесина является наиболее важным источником сырья для получения технической целлюлозы [64].

Производство целлюлозы относится к различным процессам преобразования волокнистого сырья в массу из разработанных волокон путем удаления лигнина, который связывает целлюлозные волокна вместе. Это преобразование может быть достигнуто либо химическим, либо механическим путем, либо путем сочетания этих двух видов обработки [65–69].

Основным способом получения целлюлозы является химическая обработка (варка), именно она наиболее часто применяется в целлюлозно-бумажной промышленности для различных видов сырья. Основной задачей варки целлюлозы является обработка сырья химическими веществами в водном растворе при повышенных температуре и давлении для удаления лигнина с сохранением волокон целлюлозы. Удаление лигнина делает волокна гибкими и увеличивает контакт между ними, что способствует производству более прочной бумаги. Выход целлюлозы при химической обработке составляет 40–55% [69–75].

Однако учитывая природную прочность недревесных волокон, большую длину и высокое содержание целлюлозы, для получения готовой продукции целесообразно применять механический способ обработки. Это позволит минимизировать экологические риски путем исключения из производственного процесса химической обработки при варке.

Механическая обработка волокнистого сырья включает применение механической энергии, которая разрушает связи волокнистого сырья, что приводит к разделению и укорочению волокон. В процессе сохраняются волокна, содержащие как лигнин, так и целлюлозу.

Основным способом механической обработки волокнистой массы является размол. Размол – одна из важнейших технологических операций, определяющих свойства готовой продукции. Этот процесс – наиболее энергоемкий в бумажном производстве, на его осуществление расходуется до 60–70% энергии от общего потребления при изготовлении бумаги [76].

Назначение размола – придание волокнам определенной структуры и размеров по длине и толщине, гибкости и пластичности, необходимой степени гидратации для обеспечения хорошего формования (просвета) и заданных свойств бумаги.

В процессе размола происходит внешняя и внутренняя фибрилляция волокна. Внешняя фибрилляция заключается в полном или частичном отделении от волокна фибрилл, что способствует увеличению наружной поверхности волокон и числа свободных гидроксильных групп на их поверхности. Вместе с тем внешняя фибрилляция ослабляет прочность самого волокна. Внутренняя фибрилляция приводит к необратимым перегруппировкам структурных элементов внутри набухшей вторичной стенки волокна, не уменьшая его прочности [77].

Перспективы и преимущества использования недревесного сырья в целлюлозно-бумажной промышленности

В настоящее время недревесное волокно составляет лишь небольшую часть сырья для производства бумаги и картона. При этом такой материал обладает богатым разнообразием превосходных физических и оптических свойств, который позволит создать изделия без применения древесины или улучшить качество бумажной продукции.

Поскольку спрос на бумагу растет, существующего древесного сырья может оказаться недостаточно для удовлетворения растущего спроса на бумагу. Следовательно, важно рассматривать недревесную целлюлозу для покрытия возможного дефицита древесного волокна для производства бумаги. Кроме того, это

также приведет к разработке альтернативных технологий производства целлюлозы, которые могут стать более экологически чистыми.

К тому же это поможет получить дополнительный доход аграриям. Поскольку большая часть отходов сейчас закапывается или сжигается, применение их в качестве целлюлозного сырья значительно увеличит используемость недревесных культур.

Существует ряд немаловажных преимуществ использования недревесных растений в качестве сырья для целлюлозно-бумажной промышленности:

- 1) недревесное сырье – быстрорастущий ресурс, который ежегодно возобновляется;
- 2) более высокие годовые урожаи с гектара (например, среднегодовая урожайность кенафа с гектара примерно вдвое больше, чем у быстрорастущих хвойных пород);
- 3) для подготовки сырья не требуется окорка;
- 4) содержание лигнина в недревесной биомассе ниже, чем в древесине, что свидетельствует о возможности использования более щадящих условий переработки, это в свою очередь приводит к меньшему потреблению энергии и потреблению ресурсов при использовании недревесной биомассы в качестве сырья [61, 78, 80];
- 5) для достижения той же степени делигнификации, как и у древесного сырья, требуется меньшее количество щелочи;
- 6) недревесные волокна отбеливаются легче, чем древесные;
- 7) с сельскохозяйственной точки зрения использование недревесных волокнистых материалов в ЦБП может принести дополнительный доход фермерам [79];
- 8) использование недревесного сырья снижает нагрузку на леса;
- 9) относительно невысокая стоимость. Использование недревесного сырья может снизить производственные затраты и обеспечить более устойчивый и ресурсосберегающий подход к производству бумаги. Например, неиспользованные сельскохозяйственные отходы могут быть получены с меньшими затратами, чем древесина;
- 10) высокая прочность волокон отдельных видов недревесных растений;
- 11) хорошая совместимость с большим количеством природных и синтетических веществ [81];
- 12) стимуляция экономики стран с обилием недревесных ресурсов за счет сокращения импорта древесины;
- 13) благодаря разнообразию морфологических характеристик волокон и их химическому составу можно изготовить широкий спектр бумаги [80, 81].

Проблемы использования недревесного сырья в целлюлозно-бумажной промышленности и их решения

В связи с растущим глобальным спросом на волокнистый материал, нехваткой древесины во всем мире во многих областях и повышением осведомленности об окружающей среде недревесные волокна стали одним из важных альтернативных источников волокнистых материалов в XXI веке.

Недревесное сырье является важным источником волокна в регионах с нехваткой лесных ресурсов. Нагрузка на окружающую среду, ограничения на использование лесов и значительное увеличение затрат на древесину и переработанное волокно также вынуждает многие целлюлозно-бумажные предприятия в традиционно богатых лесами странам по-новому взглянуть на недревесные ресурсы. Это сырье в изобилии доступно во многих странах и является основным источником волокна для производства бумаги в некоторых развивающихся странах, особенно в Китае и Индии, на которые в совокупности приходится около 80% всех мощностей по производству недревесной целлюлозы [1].

Использование недревесной биомассы является возможной альтернативой древесине. Эта точка зрения хоть и популярна, но имеет определенные присущие ей недостатки:

- 1) использование недревесного сырья представляет изменение технологии для ЦБП, влекущее значительные капитальные затраты, эксплуатационные расходы;
- 2) обеспечение постоянного круглогодичного запаса сырья требует наличия вместительных хранилищ. Это связано с тем, что большая часть недревесного сырья имеет низкую плотность и большой объем по сравнению с древесиной;
- 3) из-за низкой плотности и большого объема возникают сложности с транспортировкой сырья;

4) низкая плотность также влечет за собой увеличение посевных площадей для заготовления достаточного количества сырья;

5) короткий срок хранения (в пределах одного года). При неправильном хранении (во влажном и теплом помещении) в результате действия нежелательных микроорганизмов происходит порча сырья, которая приводит к снижению выхода целлюлозы, а также к изменению цвета. Из-за низкой начальной белизны эти материалы плохо отбеливаются [61, 80, 81].

Существует ряд недостатков, характерных для недревесного сырья с коротковолокнистой структурой и неволокнистыми включениями (например, пшеничная солома, багасса):

1) высокое содержание кремнезема, который во время варки растворяется и переходит в черный щелок, что приводит к ряду проблем в системе химической регенерации, включая более высокую вязкость черного щелока при высокой концентрации твердых веществ. Образование твердых отложений в котле-утилизаторе и твердых отложений в испарителе снижает эффективность работы некоторого оборудования и фактически может его закупорить;

2) при производстве бумаги из недревесного сырья бумагоделательные машины имеют более низкую скорость, чем при производстве из древесины. Это связано с высокой водоудерживающей способностью сырья;

3) выход целлюлозы, изготавливаемой из сельскохозяйственных отходов ниже, чем из древесины. Это связано с тем, что отходы являются побочными продуктами производства продуктов питания и кормов, а следовательно, не собираются в лучших условиях.

Основным элементом рационального использования недревесных волокон является знание их особого характера и того, как они влияют на соответствующие технические аспекты.

Для решения проблем, связанных с существующими недостатками, проводятся различные исследования. Так, например, необходимо разработать эффективные методы хранения, чтобы предотвратить или уменьшить порчу недревесного сырья. Проблема порчи наиболее характерна для жмыха сахарного тростника. Это происходит в результате действия нежелательных микроорганизмов, которые способствуют процессу биодegradации багассы. Солома также подвержена микробной деградации и гниению, однако ее возможно хранить на открытом воздухе в течение года, если предварительно обработать муравьиной кислотой. Также солому можно хранить без дополнительной обработки, если ее влажность будет составлять 10–12% [61].

Проблемы, связанные с низкой плотностью сырья, могут быть решены с помощью предварительного измельчения материала.

Отбеливание недревесной целлюлозы также представляет определенную сложность. Как правило, целлюлоза из сельскохозяйственных отходов легко отбеливается из-за ее низкой плотности и более низкого содержания лигнина по сравнению с древесной массой. Для такой целлюлозы требуется меньше химикатов, чем для древесной целлюлозы. Во время хранения недревесные материалы имеют тенденцию обесцвечиваться, и поэтому полученная целлюлоза имеет низкую первоначальную белизну. Чтобы придать этой целлюлозе желательную белизну, ее необходимо подвергнуть предварительной ферментативной обработке или более жесткому отбеливанию. Исследования показывают, что предварительная ферментативная обработка может повысить белизну на 2% по ISO [61].

Заключение

Таким образом, опираясь на вышеизложенную информацию, можно заключить, что использование недревесных волокон в качестве сырья для целлюлозно-бумажной промышленности несет в себе следующее:

- возможно применять меньше химикатов в производственном процессе;
- механическую массу из недревесного сырья можно получать путем механической обработки, не используя химикаты;
- недревесное растительное сырье имеет большую доступность и разнообразие;
- природная прочность и большая длина отдельных видов волокон позволит недревесному сырью конкурировать наравне с древесиной;
- недревесное сырье может служить добавкой к древесному или макулатуре, что в свою очередь может не только улучшить качество готовой продукции, но и увеличить добавленную стоимость;
- использование недревесных волокон даст дополнительный доход сельскохозяйственным производителям;

– применение недревесных материалов поможет снизить зависимость от древесного сырья, особенно в странах с отсутствием лесов;

– использование недревесного сырья создаст условия для дополнительных научных исследований с целью повышения экологической составляющей их обработки и более полного использования потенциала;

– применение недревесного сырья позволит частично решить вопрос утилизации сельскохозяйственных отходов. Кроме того, это даст возможность без вреда увеличить посевные площади, поскольку также увеличившееся количество отходов пойдет на переработку;

– использование сельскохозяйственных отходов позволит создать дополнительные рабочие места, так как переработка сырья может осуществляться локально на небольших фабриках.

Наличие и концентрация древесины в легкодоступных местах, содержание волокна, стоимость транспортировки, простота хранения, а также стабильность сырья и его характеристики в процессе производства целлюлозы способствовали использованию древесины в целлюлозно-бумажной промышленности. Тем не менее благодаря многочисленным преимуществам некоторых альтернативных видов сырья они оказались жизнеспособным вариантом в качестве исходного сырья для производства различной бумажной продукции.

Однако необходимо учитывать особенности каждого вида недревесного сырья и правильно подбирать его для конкретных целей производства. Также важно учесть возможные технологические сложности и адаптировать процесс производства под использование недревесных волокон.

Более широкое применение недревесного сырья в целлюлозно-бумажной промышленности имеет потенциал для развития и укрепления устойчивости этой отрасли. С учетом постепенного истощения лесных ресурсов поиск альтернативных источников сырья становится все актуальнее. Чистые технологии, повышение эффективности производства и использования новых материалов на основе недревесного сырья – все это позволит сократить негативное влияние на окружающую среду и обеспечить устойчивое развитие данной отрасли.

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Ashori A. Nonwood Fibers – A Potential Source of Raw Material in Papermaking // Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2006. Vol. 45. Pp. 1133–1136. DOI: 10.1080/03602550600728976.
2. Azeez M.A. Pulping of Non-Woody Biomass // Pulp and Paper Processing. InTech, 2018. DOI: 10.5772/INTECHOPEN.79749.
3. Sridach W. The environmentally benign pulping process of non-wood fibers // Suranaree J. Sci. Technol. 2010. Vol. 17, no. 2. Pp. 105–123.
4. Chandra M. Use of Nonwood Plant Fibers for Pulp and Paper Industry in Asia: Potential in China. Blacksburg, 1998. 91 p.
5. Petroudy S.R. Physical and mechanical properties of natural fibers // Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction. 2017. Pp. 59–83. DOI: 10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0.
6. Liu Z., Wang H., Hui L. Pulping and Papermaking of Non-Wood Fibers // Pulp and Paper Processing. InTech, 2018. DOI: 10.5772/INTECHOPEN.79017.
7. Sajjonkari-Pahkala K. Non-wood plants as raw material for pulp and paper // Agricultural and Food Science. 2001. Vol. 10. 101 p. DOI: 10.23986/AFSCI.5707.
8. Поллютов А.А., Пен Р.З., Бывшев А.В. Технология целлюлозы. Экологически чистое производство. Красноярск, 2012. 294 с.
9. Novo L.P., Bras J., Belgacem M.N., Curvelo A.A. Pulp and Paper from Sugarcane: Properties of Rind and Core Fractions // Journal of Renewable Materials. 2017. Vol. 6. Pp. 160–168. DOI: 10.7569/JRM.2017.634165.

10. Rainey T.J., Covey G. Pulp and paper production from sugarcane bagasse // *Sugarcane Based Biofuels and Bioproducts*. John Wiley & Sons, 2016. Pp. 259–280. DOI: 10.1002/9781118719862.CH10.
11. Rudi H., Resalati H., Eshkiki R.B., Keranian H. Sunflower stalk neutral sulfite semi-chemical pulp: an alternative fiber source for production of fluting paper // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 127. Pp. 562–566. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.04.049.
12. Mehdikhani H., Jalali Torshizi H., Dahmardeh Ghalehno M. Deeper insight into the morphological features of sunflower stalk as Biorefining criteria for sustainable production // *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2019. Vol. 34. Pp. 250–263. DOI: 10.1515/npprj-2019-0032.
13. Норматов Г.А., Примкулов М.Т. Изучение процесса получения целлюлозы из стеблей различных однолетних бахчевых культур // *Universum: технические науки*. 2018. №11(56). С. 8–10.
14. Норматов Г.А., Примкулов М.Т. Получение чистой целлюлозы из стеблей помидора (*Solanum lycopersicum*) // *Universum: технические науки*. 2018. №12(57). С. 107–110.
15. Шахворостов А.В., Ибраева Ж.Е., Кудайбергенов С.Е. Исследование физико-химических свойств целлюлозных материалов, полученных из недревесного однолетнего растительного сырья // *Новости науки Казахстана*. 2017. №3(133). С. 132–140.
16. Vargas F., Gonzalez Z., Sánchez R.M., Jiménez L., Rodríguez A. Cellulosic pulps of cereal straws as raw material for the manufacture of ecological packaging // *BioResources*. 2012. Vol. 7(3). Pp. 4161–4170. DOI: 10.15376/BIORES.7.3.4161-4170.
17. Fišerová M., Gigac J., Majtnerová A., Szeiffova G. Evaluation of annual plants (*Amaranthus caudatus* L., *Atriplex hortensis* L., *Helianthus tuberosus* L.) for pulp production // *Cellulose Chemistry and Technology*. 2006. Vol. 40. Pp. 405–412.
18. Елисеева Т., Тарантул А. Банан (*Musa*) // *Журнал здорового питания и диетологии*. 2018. №5. С. 31–42.
19. Ramdhonee A., Jeetah P. Production of wrapping paper from banana fibres // *Journal of environmental chemical engineering*. 2017. Vol. 5. Pp. 4298–4306. DOI: 10.1016/J.JECE.2017.08.011.
20. Елисеева Т., Тарантул А. Ананас (лат. *Ananas comosus*) // *Журнал здорового питания и диетологии*. 2018. №6. С. 55–65.
21. Sibaly S., Jeetah P. Production of paper from pineapple leaves // *Journal of environmental chemical engineering*. 2017. Vol. 5. Pp. 5978–5986. DOI: 10.1016/J.JECE.2017.11.026.
22. Chesca A.M., Nicu R., Tofanica B.M., Puițel A.C., Vlase R., Gavrilescu D. Pulping of corn stalks – assessment for bio-based packaging materials // *Cellulose Chem. Technol.* 2018. Vol. 52 (7-8). Pp. 645–653.
23. Ferdous T., Quaiyyum M.A., Salam A., Jahan M.S. Pulping of bagasse (*Saccharum officinarum*), kash (*Saccharum spontaneum*) and corn stalks (*Zea mays*) // *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*. 2020. Vol. 3. 100017. DOI: 10.1016/j.crgsc.2020.100017.
24. Mousavi S.M., Hosseini S.Z., Resalati H., Mahdavi S., Garmaroody E.R. Papermaking potential of rapeseed straw, a new agricultural-based fiber source // *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 52. Pp. 420–424. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2013.02.016.
25. Deykun I., Halysh V., Barbash V. Rapeseed straw as an alternative for pulping and papermaking // *Cellulose Chemistry and Technology*. 2018. Vol. 52. Pp. 833–839.
26. Торгашов В.И., Герт Е.В., Зубец О.В., Капуцкий Ф.Н. Получение и бумагообразующие свойства целлюлозы из стеблей рапса и сои // *Вестник БГУ. Серия 2: Химия. Биология. География*. 2008. №2. С. 12–20.
27. Chaowei W., Chong L., Fan X., Xiangfan W., Yangbing W. Evaluation of the potential of tobacco stalk pulp to substitute hardwood pulp for tobacco sheet preparation // *Cellulose Chemistry and Technology*. 2019. Vol. 53. Pp. 1009–1015. DOI: 10.35812/cellulosechemtechnol.2019.53.99.
28. Rodríguez A., Moral A., Serrano L., Labidi J., Jiménez L. Rice straw pulp obtained by using various methods // *Bioresource technology*. 2008. Vol. 99. Pp. 2881–2886. DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2007.06.003.
29. Tripathi K.A., Mishra O.P., Bhardwaj N.K., Varadhan R. Pulp and papermaking properties of bamboo species // *Cellulose Chem. Technol.* 2018. Vol. 52 (1-2). Pp. 81–88.
30. Кхоа Х.М., Масленникова А.А., Окулова Е.О., Казаков Я.В. Получение и свойства целлюлозы из бамбука // *Химия и химическая технология переработки растительного сырья: материалы докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.М. Резникова, Минск, 10–12 октября 2018 года. Минск, 2018. С. 151–155.*
31. Reddy K.O., Maheswari C.U., Shukla M., Muzenda E. Preparation, Chemical Composition, Characterization, and Properties of Napier Grass Paper Sheets // *Separation Science and Technology*. 2014. Vol. 49. Pp. 1527–1534. DOI: 10.1080/01496395.2014.893358.
32. Reddy K.O., Maheswari C.U., Shukla M., Rajulu A.V. Chemical composition and structural characterization of Napier grass fibers // *Materials Letters*. 2012. Vol. 67. Pp. 35–38. DOI: 10.1016/J.MATLET.2011.09.027.
33. Gomes F.J., Colodette J.L., Burnet A., Batalha L.A., Barbosa B.M. Potential of Elephant Grass for Pulp Production // *Bioresources*. 2013. Vol. 8. Pp. 4359–4379. DOI: 10.15376/BIORES.8.3.4359-4379.
34. Daud Z., Gomesh N., Santiagoo R., Tajarudin H.A., Awang H.B., Hatta M.Z.M., Ridzuan M.B., Detho A.B. Evaluation of Pulp from Napier Grass by Biochemical Pulping For Paper Industry // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 616. 012064. DOI: 10.1088/1755-1315/616/1/012064.

35. Jiménez L., Ramos E.E., Rodríguez A.G., de la Torre M.J., Ferrer J.L. Optimization of pulping conditions of abaca. An alternative raw material for producing cellulose pulp // *Bioresource technology*. 2005. Vol. 96, no. 9. Pp. 977–983. DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2004.09.016.
36. Будаева В.В., Митрофанов Р.Ю., Золотухин В.Н., Сакович Г.В. Переработка мискантуса китайского // *Ползуновский вестник*. 2009. №3. С. 328–335.
37. Будаева В.В., Митрофанов Р.Ю., Золотухин В.Н., Архипова О.С. Свойства целлюлозы из мискантуса // *Ползуновский вестник*. 2010. №3. С. 240–245.
38. Капустянчик С.Ю., Якименко В.Н. Мискантус – перспективная сырьевая, энергетическая и фитомелиоративная культура (литературный обзор) // *Почвы и окружающая среда*. 2020. Т. 3, №3. е126. DOI: 10.31251/pos.v3i3.126.
39. Marinho N.P., Cademartori P.H., Nisgoski S., Tanobe V.O., Klock U., Muñoz G.I. Feasibility of ramie fibers as raw material for the isolation of nanofibrillated cellulose // *Carbohydrate polymers*. 2020. Vol. 230. 115579. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115579.
40. Баймухаметова Э.А. Хлопчатник: особенности культуры, перспективы создания трансгенных отечественных сортов и их выращивания в России // *Биомика*. 2016. Т. 8, №3. С. 275–288.
41. Подольная Л.П., Григорьев С.В., Илларионова К.В. и др. Хлопчатник в России. Актуальность и перспективы // *Достижения науки и техники АПК*. 2015. Т. 29, №7. С. 56–58.
42. Новиков А.О., Темрук В.И., Соловьева Т.В. и др. Исследование размалывающей способности и бумагообразующих свойств хлопковой целлюлозы // *Труды БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнология*. 2012. №4(151). С. 157–161.
43. Барбаш В.А., Трембус И.В., Оксентюк Н.Н. Бумага и картон из стеблей кенафа и сорго сахарного // *Химия растительного сырья*. 2014. №4. С. 271–278.
44. Ramirez-Cando L.J., Spugnoli P., Matteo R., Bagatta M., Tavarini S., Foschi L., Lazzeri L. Environmental Assessment of Flax Straw Production for Non-wood Pulp Mills // *Chemical engineering transactions*. 2017. Vol. 58. Pp. 787–792. DOI: 10.3303/CET1758132.
45. Богданова О.Ф., Березовский Ю.В. Современные технологии переработки составляющих льна для производства продукции различного назначения // *Материалы и технологии*. 2018. №2(2). С. 9–13. DOI: 10.24411/2617-149X-2018-12001.
46. Богданова О.Ф., Путинцева С.В. Целесообразность получения льняной целлюлозы для изготовления композиционной бумаги и ее стандартизация // *Материалы докладов 46 республиканской научно-технической конференции преподавателей и студентов, Витебск, 24–25 апреля 2013 года*. Витебск, 2013. С. 261–264.
47. Małachowska E., Przybysz P.J., Dubowik M., Kucner M., Buzala K.P. Comparison of papermaking potential of wood and hemp cellulose pulps // *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology*. 2015. Vol. 91. Pp. 134–137.
48. Werf H.V., Veen J.H., Bouma A.T., Cate M.T. Quality of hemp (*Cannabis sativa* L.) stems as a raw material for paper // *Industrial Crops and Products*. 1994. Vol. 2. Pp. 219–227. DOI: 10.1016/0926-6690(94)90039-6.
49. Валишина З.Т., Александров А.А., Матухин Е.Л. и др. Целлюлоза на основе альтернативных источников отечественного сырья: целлюлоза из пенькового волокна // *Вестник Технологического университета*. 2015. Т. 18, №2. С. 259–262.
50. Manaia J.P., Manaia A., Rodrigues L. Industrial Hemp Fibers: An Overview // *Fibers*. 2019. Vol. 7. 106. DOI: 10.3390/fib7120106.
51. Horne M.R. Bast fibres: hemp cultivation and production // *Handbook of Natural Fibres. Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation*. 2012. Vol. 1. Pp. 114–145. DOI: 10.1533/9780857095503.1.114.
52. Fike J.H. Industrial Hemp: Renewed Opportunities for an Ancient Crop // *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2016. Vol. 35. Pp. 406–424. DOI: 10.1080/07352689.2016.1257842.
53. Angelini L.G., Tavarini S., Di Candilo M. Performance of New and Traditional Fiber Hemp (*Cannabis sativa* L.) Cultivars for Novel Applications: Stem, Bark, and Core Yield and Chemical Composition // *Journal of Natural Fibers*. 2016. Vol. 13. Pp. 238–252. DOI: 10.1080/15440478.2015.1029193.
54. Lühr C., Pecenk R., Gusovius H., Wallot G., Rinberg R., Tech S. Development of an Axial Fractionator for Hemp Shive Cleaning and Industrial Applications of Shives // *The Journal of Agricultural Science*. 2012. Vol. 5. Pp. 9–16. DOI: 10.5539/JAS.V5N1P9.
55. Münder F., Füll C., Hempel H. Advanced Decortication Technology for Unretted Bast Fibres // *Journal of Natural Fibers*. 2004. Vol. 1. Pp. 49–65. DOI: 10.1300/J395v01n01_04.
56. Xu J. Analysis and design of hemp fibre decorticators. Winnipeg, 2010. 100 p.
57. Amode N.S., Jeetah P. Paper Production from Mauritian Hemp Fibres // *Waste and Biomass Valorization*. 2021. Vol. 12. Pp. 1781–1802. DOI: 10.1007/s12649-020-01125-y.
58. Перевозчикова А.К. Современное состояние отрасли целлюлозно-бумажной промышленности, ее угрозы и возможности на примере предприятия ЗАО «Ламбумиз» // *Устойчивое развитие: наука и практика*. 2022. №1(33). С. 49–78.
59. Кочева Л.С. Использование недревесного растительного сырья целлюлозно-бумажной промышленностью // *Февральские чтения: сборник материалов научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2007 году, Сыктывкар, 27–28 февраля 2008 года*. Сыктывкар, 2008. С. 598–602.

60. Пантюшина О.В. О потребительских свойствах новых лубяных волокон // Вестник Торгово-технологического института. 2010. №3. С. 36–41.
61. Abd El-Sayed E.S., El-Sakhawy M.A., El-Sakhawy M.A. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry // Nordic Pulp & Paper Research Journal. 2020. Vol. 35. Pp. 215–230. DOI: 10.1515/npprj-2019-0064.
62. Karche T., Singh M.R. The application of hemp (*Cannabissativa* L.) for a green economy: a review // Turkish Journal of Botany. 2019. Vol. 43. Pp. 710–723. DOI: 10.3906/bot-1907-15.
63. Смирнова Т.В., Барабанщикова И.С. Лубяные волокна (на примере конопли) в мире и России: история и перспективы развития // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы. 2020. №1. С. 10–14. DOI: 10.47367/2413-6514_2020_1_10.
64. Figueiredo J.A., Ismael M.I., Anjo C., Duarte A.P. Cellulose and derivatives from wood and fibers as renewable sources of raw-materials // Topics in current chemistry. 2010. Vol. 294. Pp. 117–128. DOI: 10.1007/128_2010_88.
65. Biermann C.J. 3 – Pulping Fundamentals // Handbook of Pulping and Papermaking (Second Edition). San Diego: Academic Press, 1996. Pp. 55–100. DOI: 10.1016/B978-012097362-0/50007-8.
66. Worku L.A., Bachheti A., Bachheti R.K., Rodrigues Reis C.E., Chandel A.K. Agricultural Residues as Raw Materials for Pulp and Paper Production: Overview and Applications on Membrane Fabrication // Membranes. 2023. Vol. 13. 228. DOI: 10.3390/membranes13020228.
67. Eugenio M.E., Ibarra D., Martín-Sampedro R., Espinosa E., Bascón I., Rodríguez A. Alternative Raw Materials for Pulp and Paper Production in the Concept of a Lignocellulosic Biorefinery // Cellulose. IntechOpen, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.90041.
68. Keijsers E., Yilmaz G., van Dam J.E. The cellulose resource matrix // Carbohydrate polymers. 2013. Vol. 93. Pp. 9–21. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.08.110.
69. Mboowa D. A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes // Biomass Conversion and Biorefinery. 2024. Vol. 14. Pp. 1–12. DOI: 10.1007/s13399-020-01243-6.
70. Вураско А.В., Симонова Е.И., Минакова А.Р., Сиваков В.П. Совершенствование технологии получения целлюлозы окислительно-органо-сольвентным способом из недревесного растительного сырья // Химия растительного сырья. 2019. №3. С. 269–276. DOI: 10.14258/jcrpm.2019035203.
71. Вураско А.В., Антоненкова С.Г., Агеев А.Я. и др. Натронно-каталитическая варка соломы хлебных злаков // Лесной вестник. 2000. №1. С. 100–104.
72. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. I. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 2. Производство полуфабрикатов. СПб., 2003. 633 с.
73. Пен Р.З., Шапиро И.Л., Каретникова Н.В. Пероксидная целлюлоза из пшеничной соломы // Химия растительного сырья. 2022. №2. С. 299–305. DOI: 10.14258/jcrpm.20220210688.
74. Гисматулина Ю.А., Будаева В.В. Азотнокислый способ получения целлюлозы (обзор) // Ползуновский вестник. 2016. №4-1. С. 174–178.
75. Chen C., Duan C., Li J., Liu Y., Ma X., Zheng L., Stavik J., Ni Y. Cellulose (Dissolving Pulp) Manufacturing Processes and Properties: A Mini-Review // BioRes. 2016. Vol. 11(2). Pp. 5553–5564.
76. Примаков С.Ф. Производство бумаги. М., 1987. 222 с.
77. Гораздова В.В., Дернова Е.В., Дулькин Д.А., Окулова Е.О. Влияние фибриллирования и укорочения волокон при размоле на характеристики прочности, реформативности и трещиностойкости целлюлозных материалов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. №2(362). С. 109–121. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.109.
78. Карпунин И.И., Кузьмич В.В., Балабанова Т.Ф. Использование отходов растительного сырья для производства энергии // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2011. №6. С. 72–75.
79. Сусоева И.В., Вахнина Т.Н., Свиридов А.В. Химический состав и способ утилизации отходов производства хлопковых и льняных волокон // Химия растительного сырья. 2017. №3. С. 211–220. DOI: 10.14258/jcrpm.2017031492.
80. Girouard P., Samson R. The potential role of perennial grasses in the pulp and paper industry: making a case for agri-fibres // Pulp and Paper. 2000. Vol. 101(10). Pp. 53–55.
81. Sadrmanesh V., Chen Y. Bast fibres: structure, processing, properties, and applications // International Materials Reviews. 2018. Vol. 64. Pp. 381–406. DOI: 10.1080/09506608.2018.1501171.

Поступила в редакцию 29 июля 2023 г.

После переработки 28 декабря 2023 г.

Принята к публикации 5 апреля 2024 г.

Karelina A.A.*, Alashkevich Y.D., Kozhukhov V.A. NON-WOODEN RAW AS A SOURCE OF CELLULOSE FIBERS. USE PROSPECTS, PROBLEMS AND SOLUTIONS (REVIEW)

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsky Rabochiy ave., 31, Krasnoyarsk, 660037, Russia, karelina.alexandra@mail.ru

The article discusses various non-wood plants as sources of fibrous raw materials for the pulp and paper industry. The authors cite the main categories of non-wood fibrous raw materials: agricultural waste, naturally growing plants and industrial crops. Information is provided on the position of fibers in the plant: fibers of the inner part of the stem, bast (outer part of the stem) fibers, leaf fibers and fruit fibers, as well as methods for their isolation. Of the variety of non-wood plants, the authors highlight industrial hemp as the most promising raw material, having strong fibers and a high cellulose content. The use of non-timber raw materials has been found to help reduce pressure on forest resources and improve the environmental sustainability of pulp and paper production. Technological aspects of the production of paper products from non-wood raw materials are also considered. The advantages and disadvantages of using alternative raw materials, as well as its prospects, are given. The need for further research and development of new methods and technologies to optimize the efficiency of using non-wood raw materials in the pulp and paper industry is pointed out. In conclusion, a conclusion is drawn about the importance of using non-wood raw materials to reduce the negative impact of paper production on the environment and ensure the sustainable development of this industry.

Keywords: non-wood raw materials, pulp and paper industry, industrial hemp, agricultural waste, industrial crops.

For citing: Karelina A.A., Alashkevich Y.D., Kozhukhov V.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 2, pp. 55–75. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcpm.20240213401.

References

1. Ashori A. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2006, vol. 45, pp. 1133–1136. DOI: 10.1080/03602550600728976.
2. Azeez M.A. *Pulp and Paper Processing*. InTech, 2018. DOI: 10.5772/INTECHOPEN.79749.
3. Sridach W. *Suranaree J. Sci. Technol.*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 105–123.
4. Chandra M. *Use of Nonwood Plant Fibers for Pulp and Paper Industry in Asia: Potential in China*. Blacksburg, 1998, 91 p.
5. Petroudy S.R. *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*, 2017, pp. 59–83. DOI: 10.1016/B978-0-08-100411-1.00003-0.
6. Liu Z., Wang H., Hui L. *Pulp and Paper Processing*. InTech, 2018. DOI: 10.5772/INTECHOPEN.79017.
7. Saijonkari-Pahkala K. *Agricultural and Food Science*, 2001, vol. 10, 101 p. DOI: 10.23986/AFSCI.5707.
8. Polyutov A.A., Pen R.Z., Byvshev A.V. *Tekhnologiya tsellyulozy. Ekologicheski chistoye proizvodstvo*. [Cellulose technology. Environmentally friendly production]. Krasnoyarsk, 2012, 294 p. (in Russ.).
9. Novo L.P., Bras J., Belgacem M.N., Curvelo A.A. *Journal of Renewable Materials*, 2017, vol. 6, pp. 160–168. DOI: 10.7569/JRM.2017.634165.
10. Rainey T.J., Covey G. *Sugarcane Based Biofuels and Bioproducts*. John Wiley & Sons, 2016, pp. 259–280. DOI: 10.1002/9781118719862.CH10.
11. Rudi H., Resalati H., Eshkiki R.B., Kermanian H. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 127, pp. 562–566. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.04.049.
12. Mehdikhani H., Jalali Torshizi H., Dahmardeh Ghalehno M. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2019, vol. 34, pp. 250–263. DOI: 10.1515/npprj-2019-0032.
13. Normatov G.A., Primkulov M.T. *Universum: tekhnicheskiye nauki*, 2018, no. 11(56), pp. 8–10. (in Russ.).
14. Normatov G.A., Primkulov M.T. *Universum: tekhnicheskiye nauki*, 2018, no. 12(57), pp. 107–110. (in Russ.).
15. Shakhvorostov A.V., Ibrayeva Zh.Ye., Kudaybergenov S.Ye. *Novosti nauki Kazakhstana*, 2017, no. 3(133), pp. 132–140. (in Russ.).
16. Vargas F., Gonzalez Z., Sánchez R.M., Jiménez L., Rodríguez A. *BioResources*, 2012, vol. 7(3), pp. 4161–4170. DOI: 10.15376/BIORES.7.3.4161-4170.
17. Fišerová M., Gigac J., Majtnerová A., Szeiffova G. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2006, vol. 40, pp. 405–412.
18. Yeliseyeva T., Tarantul A. *Zhurnal zdorovogo pitaniya i diyetologii*, 2018, no. 5, pp. 31–42. (in Russ.).
19. Ramdhonee A., Jeetah P. *Journal of environmental chemical engineering*, 2017, vol. 5, pp. 4298–4306. DOI: 10.1016/J.JECE.2017.08.011.
20. Yeliseyeva T., Tarantul A. *Zhurnal zdorovogo pitaniya i diyetologii*, 2018, no. 6, pp. 55–65. (in Russ.).
21. Sibaly S., Jeetah P. *Journal of environmental chemical engineering*, 2017, vol. 5, pp. 5978–5986. DOI: 10.1016/J.JECE.2017.11.026.
22. Chesca A.M., Nicu R., Tofanica B.M., Puişel A.C., Vlase R., Gavrilescu D. *Cellulose Chem. Technol.*, 2018, vol. 52 (7-8), pp. 645–653.
23. Ferdous T., Quaiyyum M.A., Salam A., Jahan M.S. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2020, vol. 3, 100017. DOI: 10.1016/j.crgsc.2020.100017.
24. Mousavi S.M., Hosseini S.Z., Resalati H., Mahdavi S., Garmaroody E.R. *Journal of Cleaner Production*, 2013, vol. 52, pp. 420–424. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2013.02.016.

* Corresponding author.

25. Deykun I., Halysh V., Barbash V. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2018, vol. 52, pp. 833–839.
26. Torgashov V.I., Gert Ye.V., Zubets O.V., Kaputskiy F.N. *Vestnik BGU. Seriya 2: Khimiya. Biologiya. Geografiya*, 2008, no. 2, pp. 12–20. (in Russ.).
27. Chaowei W., Chong L., Fan X., Xiangfan W., Yangbing W. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2019, vol. 53, pp. 1009–1015. DOI: 10.35812/cellulosechemtechnol.2019.53.99.
28. Rodríguez A., Moral A., Serrano L., Labidi J., Jiménez L. *Bioresource technology*, 2008, vol. 99, pp. 2881–2886. DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2007.06.003.
29. Tripathi K.A., Mishra O.P., Bhardwaj N.K., Varadhan R. *Cellulose Chem. Technol.*, 2018, vol. 52 (1-2), pp. 81–88.
30. Kkhoa Kh.M., Maslennikova A.A., Okulova Ye.O., Kazakov Ya.V. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya pererabotki rastitel'nogo syr'ya: materialy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.M. Reznikova, Minsk, 10–12 oktyabrya 2018 goda*. [Chemistry and chemical technology for processing plant raw materials: materials of reports of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of V.M. Reznikova, Minsk, October 10–12, 2018]. Minsk, 2018, pp. 151–155. (in Russ.).
31. Reddy K.O., Maheswari C.U., Shukla M., Muzenda E. *Separation Science and Technology*, 2014, vol. 49, pp. 1527–1534. DOI: 10.1080/01496395.2014.893358.
32. Reddy K.O., Maheswari C.U., Shukla M., Rajulu A.V. *Materials Letters*, 2012, vol. 67, pp. 35–38. DOI: 10.1016/J.MATLET.2011.09.027.
33. Gomes F.J., Colodette J.L., Burnet A., Batalha L.A., Barbosa B.M. *Bioresources*, 2013, vol. 8, pp. 4359–4379. DOI: 10.15376/BIORES.8.3.4359-4379.
34. Daud Z., Gomesh N., Santiago R., Tajarudin H.A., Awang H.B., Hatta M.Z.M., Ridzuan M.B., Detho A.B. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 616, 012064. DOI: 10.1088/1755-1315/616/1/012064.
35. Jiménez L., Ramos E.E., Rodríguez A.G., de la Torre M.J., Ferrer J.L. *Bioresource technology*, 2005, vol. 96, no. 9, pp. 977–983. DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2004.09.016.
36. Budayeva V.V., Mitrofanov R.Yu., Zolotukhin V.N., Sakovich G.V. *Polzunovskiy vestnik*, 2009, no. 3, pp. 328–335. (in Russ.).
37. Budayeva V.V., Mitrofanov R.Yu., Zolotukhin V.N., Arkhipova O.S. *Polzunovskiy vestnik*, 2010, no. 3, pp. 240–245. (in Russ.).
38. Kapustyanchik S.Yu., Yakimenko V.N. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*, 2020, vol. 3, no. 3, e126. DOI: 10.31251/pos.v3i3.126. (in Russ.).
39. Marinho N.P., Cademartori P.H., Nisgoski S., Tanobe V.O., Klock U., Muñiz G.I. *Carbohydrate polymers*, 2020, vol. 230, 115579. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115579.
40. Baymukhametova E.A. *Biomika*, 2016, vol. 8, no. 3, pp. 275–288. (in Russ.).
41. Podol'naya L.P., Grigor'yev S.V., Illarionova K.V. i dr. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2015, vol. 29, no. 7, pp. 56–58. (in Russ.).
42. Novikov A.O., Temruk V.I., Solov'yeva T.V. i dr. *Trudy BGTU. Khimiya, tekhnologiya organicheskikh veshchestv i biotekhnologiya*, 2012, no. 4(151), pp. 157–161. (in Russ.).
43. Barbash V.A., Trembus I.V., Oksentyuk N.N. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2014, no. 4, pp. 271–278. (in Russ.).
44. Ramirez-Cando L.J., Spugnoli P., Matteo R., Bagatta M., Tavarini S., Foschi L., Lazzeri L. *Chemical engineering transactions*, 2017, vol. 58, pp. 787–792. DOI: 10.3303/CET1758132.
45. Bogdanova O.F., Berezovskiy Yu.V. *Materialy i tekhnologii*, 2018, no. 2(2), pp. 9–13. DOI: 10.24411/2617-149X-2018-12001. (in Russ.).
46. Bogdanova O.F., Putintseva S.V. *Materialy dokladov 46 respublikanskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley i studentov, Vitebsk, 24–25 aprelya 2013 goda*. [Materials of reports of the 46th Republican Scientific and Technical Conference of Teachers and Students, Vitebsk, April 24–25, 2013]. Vitebsk, 2013, pp. 261–264. (in Russ.).
47. Małachowska E., Przybysz P.J., Dubowik M., Kucner M., Buzala K.P. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology*, 2015, vol. 91, pp. 134–137.
48. Werf H.V., Veen J.H., Bouma A.T., Cate M.T. *Industrial Crops and Products*, 1994, vol. 2, pp. 219–227. DOI: 10.1016/0926-6690(94)90039-6.
49. Valishina Z.T., Aleksandrov A.A., Matukhin Ye.L. i dr. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 259–262. (in Russ.).
50. Manaia J.P., Manaia A., Rodrigues L. *Fibers*, 2019, vol. 7, 106. DOI: 10.3390/fib7120106.
51. Horne M.R. *Handbook of Natural Fibres. Types, Properties and Factors Affecting Breeding and Cultivation*, 2012, vol. 1, pp. 114–145. DOI: 10.1533/9780857095503.1.114.
52. Fike J.H. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2016, vol. 35, pp. 406–424. DOI: 10.1080/07352689.2016.1257842.
53. Angelini L.G., Tavarini S., Di Candilo M. *Journal of Natural Fibers*, 2016, vol. 13, pp. 238–252. DOI: 10.1080/15440478.2015.1029193.
54. Lühr C., Pecenkova R., Gusovius H., Wallot G., Rinberg R., Tech S. *The Journal of Agricultural Science*, 2012, vol. 5, pp. 9–16. DOI: 10.5539/JAS.V5N1P9.
55. Münder F., Füll C., Hempel H. *Journal of Natural Fibers*, 2004, vol. 1, pp. 49–65. DOI: 10.1300/J395v01n01_04.
56. Xu J. *Analysis and design of hemp fibre decorticators*. Winnipeg, 2010, 100 p.

57. Amode N.S., Jeetah P. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, vol. 12, pp. 1781–1802. DOI: 10.1007/s12649-020-01125-y.
58. Perevozchikova A.K. *Ustoychivoye razvitiye: nauka i praktika*, 2022, no. 1(33), pp. 49–78. (in Russ.).
59. Kocheva L.S. *Fevral'skiye chteniya: sbornik materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava Syktyvkarskogo lesnogo instituta po itogam nauchno-issledovatel'skoy raboty v 2007 godu, Syktyvkar, 27–28 fevralya 2008 goda*. [February readings: collection of materials of the scientific and practical conference of the teaching staff of the Syktyvkar Forestry Institute based on the results of research work in 2007, Syktyvkar, February 27–28, 2008]. Syktyvkar, 2008, pp. 598–602. (in Russ.).
60. Pantyushina O.V. *Vestnik torgovo-tekhnologicheskogo institute*, 2010, no. 3, pp. 36–41. (in Russ.).
61. Abd El-Sayed E.S., El-Sakhawy M.A., El-Sakhawy M.A. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2020, vol. 35, pp. 215–230. DOI: 10.1515/npprj-2019-0064.
62. Karche T., Singh M.R. *Turkish Journal of Botany*, 2019, vol. 43, pp. 710–723. DOI: 10.3906/bot-1907-15.
63. Smirnova T.V., Barabanshchikova I.S. *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemykiye tekhnologii i materially*, 2020, no. 1, pp. 10–14. DOI: 10.47367/2413-6514_2020_1_10. (in Russ.).
64. Figueiredo J.A., Ismael M.I., Anjo C., Duarte A.P. *Topics in current chemistry*, 2010, vol. 294, pp. 117–128. DOI: 10.1007/128_2010_88.
65. Biermann C.J. *Handbook of Pulping and Papermaking (Second Edition)*. San Diego: Academic Press, 1996, pp. 55–100. DOI: 10.1016/B978-012097362-0/50007-8.
66. Worku L.A., Bachheti A., Bachheti R.K., Rodrigues Reis C.E., Chandel A.K. *Membranes*, 2023, vol. 13, 228. DOI: 10.3390/membranes13020228.
67. Eugenio M.E., Ibarra D., Martín-Sampedro R., Espinosa E., Bascón I., Rodríguez A. *Cellulose*. IntechOpen, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.90041.
68. Keijsers E., Yilmaz G., van Dam J.E. *Carbohydrate polymers*, 2013, vol. 93, pp. 9–21. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.08.110.
69. Mboowa D. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, vol. 14, pp. 1–12. DOI: 10.1007/s13399-020-01243-6.
70. Vurasko A.V., Simonova Ye.I., Minakova A.R., Sivakov V.P. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no. 3, pp. 269–276. DOI: 10.14258/jcprm.2019035203. (in Russ.).
71. Vurasko A.V., Antonenkova S.G., Ageyev A.Ya. i dr. *Lesnoy vestnik*, 2000, no. 1, pp. 100–104. (in Russ.).
72. *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. V 3 t. T. I. Syr'ye i proizvodstvo polufabrikatov. Ch. 2. Proizvodstvo polufabrikatov*. [Pulp and paper production technology. In 3 volumes. Vol. I. Raw materials and production of semi-finished products. Part 2. Production of semi-finished products]. St. Petersburg, 2003, 633 p. (in Russ.).
73. Pen R.Z., Shapiro I.L., Karetnikova N.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2022, no. 2, pp. 299–305. DOI: 10.14258/jcprm.20220210688. (in Russ.).
74. Gismatulina YU.A., Budayeva V.V. *Polzunovskiy vestnik*, 2016, no. 4-1, pp. 174–178. (in Russ.).
75. Chen C., Duan C., Li J., Liu Y., Ma X., Zheng L., Stavik J., Ni Y. *BioRes.*, 2016, vol. 11(2), pp. 5553–5564.
76. Primakov S.F. *Proizvodstvo bumagi*. [Paper production]. Moscow, 1987, 222 p. (in Russ.).
77. Gorazdova V.V., Dernova Ye.V., Dul'kin D.A., Okulova Ye.O. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2018, no. 2(362), pp. 109–121. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.2.109. (in Russ.).
78. Karpunin I.I., Kuz'mich V.V., Balabanova T.F. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG*, 2011, no. 6, pp. 72–75. (in Russ.).
79. Susoyeva I.V., Vakhnina T.N., Sviridov A.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2017, no. 3, pp. 211–220. DOI: 10.14258/jcprm.2017031492. (in Russ.).
80. Girouard P., Samson R. *Pulp and Paper*, 2000, vol. 101(10), pp. 53–55.
81. Sadrmanesh V., Chen Y. *International Materials Reviews*, 2018, vol. 64, pp. 381–406. DOI: 10.1080/09506608.2018.1501171.

Received July 29, 2023

Revised December 28, 2023

Accepted April 5, 2024

Сведения об авторах

Карелина Александра Александровна – аспирант,
karelina.alexandra@mail.ru

Алашкевич Юрий Давыдович – академик РАО, доктор
технических наук, профессор, alashkevichud@sibsau.ru

Кожухов Виктор Анатольевич – кандидат технических
наук, доцент, vkozuhkhov@mail.ru

Information about authors

Karelina Alexandra Aleksandrovna – graduate student,
karelina.alexandra@mail.ru

Alashkevich Yuri Davydovich – academician of the Russian
academy of education, doctor of technical sciences,
professor, alashkevichud@sibsau.ru

Kozhukhov Viktor Anatolyevich – candidate of technical
sciences, associate professor, vkozuhkhov@mail.ru