УДК 676.16.022.6.031

Ф. Албаррам, К.И. Балыбердин, Я.В. Казаков

СВОЙСТВА СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ВЫСОКОГО ВЫХОДА ИЗ ВЕТВЕЙ ОСИНЫ КАК ВОЛОКНИСТОГО ПОЛУФАБРИКАТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОНЕНТОВ ГОФРОКАРТОНА

Введение. Бумага является одним из основных изобретений, которое изменило течение истории человека. Она играла жизненно важную роль в сохранении и передаче знаний на протяжении веков [Иванов, 2006]. С момента ее изобретения в древнем Китае и до наших дней бумага оставалась наиболее часто используемым средством для записи и документирования [Salman, 2006], что сделало ее основой образования, культуры и торговли [Latha et al., 2018]. В дополнение к своей исторической роли бумага сегодня является неотъемлемой частью нашей повседневной жизни; она используется во многих отраслях промышленности, а также для письма, печати, в качестве упаковки, в искусстве и даже является частью современных технологий, в том числе и цифровых [Rullifank et al., 2020]

Проблема сырьевого обеспечения целлюлозно-бумажной промышленности рассматривается сегодня как один из актуальных вопросов, который требует углубленного изучения [Кононов и др., 2022]. Основным источником растительных волокон является древесина, волокна которой обладают необходимым комплексом морфологических и химических свойств [Riki et al., 2019]. Но, кроме этого, необходим поиск и использование нетрадиционного сырья, например, лесосечных отходов в виде веток и вершинок. Одним из решений, увязанных с задачей ресурсосбережения, является использование целлюлозного волокна, полученного из лесосечных отходов в виде ветвей и вершинок, которые составляют по массе около 20…25% от всей древесины. Это позволяет сократить объем отходов лесозаготовок, снизить нагрузку на леса и сократить величину углеродного следа. Лесосечные отходы обладают подходящими для целлюлозно-бумажной промышленности свойствами, и их использование экономически выгодно [Хакимова и др., 2018, 2020].

Переработка отходов и использование вторичных материалов для создания новых продуктов стали важной частью стратегии устойчивого развития в современном мире. В последние десятилетия вопросы минимизации отрицательного воздействия на окружающую среду становятся всё более актуальными, особенно в отраслях, связанных с производством бу-

маги. Замена традиционного сырья в виде стволовой древесины лесосечными древесными отходами имеет и экономическое, и экологическое значение за счет предотвращения ущерба, наносимого окружающей среде древесными отходами, остающимися на лесосеке. На необходимость полного и комплексного использования всей биомассы дерева многократно указывают специалисты [Васильева, 2002; Полянин, Макаров, 2016]. Исследования в этой области уже имеют достаточно большую историю, однако во многих случаях они ограничены лабораторными опытами, без выхода на промышленный уровень, поэтому проблема рационального использования древесных отходов не теряет актуальности [Коробов, Рушнов, 1991; Сафин и др., 2015; Хакимова, Носкова, 2017].

До недавнего времени основным направлением использования отходов лесозаготовок являлось их применение в энергетических целях как топлива. До 2022 г. активно создавались производства древесных брикетов и пеллет, с базовой экспортной ориентацией [Пекарец и др., 2020]. Изменение политической ситуации в мире привело к закрытию европейских рынков и резкому сокращению производства древесного топлива. В этих условиях химическая переработка отходов лесозаготовок и лесопиления получает новый импульс.

Наиболее распространенным способом варки является сульфатный, поскольку он не только соответствует современным экологическим и экономическим требованиям, но и не предъявляет повышенных требований к качеству и породному составу сырья, и, таким образом, является оптимальным для варки низкокачественного растительного сырья [Миловидова и др., 2019]. В современной ЦБП древесина осины активно используется при получении лиственных полуфабрикатов нормального выхода, используемых для отбелки [Wong, 1987], и высокого выхода – целлюлозы высокого выхода (ЦВВ), полуцеллюлозы и химико-термомеханической массы (ХТММ), используемых, как правило, в небеленом виде для производства картона [Xu, Sabourin, 2002]. В этом контексте осина (*Populus tremula* L.) считается одним из перспективных источников волокна для получения бумаги и картона. Осина является одной из основных лесообразующих древесных пород в России, образует высокополнотные чистые и смешанные древостои. Эта порода характеризуется быстрым ростом и способностью адаптироваться к различным условиям окружающей среды, что делает ее возобновляемым и экологически чистым ресурсом [Кузнецова, 2003].

Сведения о результатах сульфатной варки тонкомерной древесины сосны, березы, лиственницы и о свойствах волокнистых полуфабрикатов из них [Хакимова и др., 2020; Hunt et al., 2002] однозначно свидетельству-

ют, что из-за особенностей морфологического строения, химического состава и физических свойств древесины из ветвей и вершин технология их варки отличается от технологии варки балансовой древесины, а качество получаемой целлюлозы уступает целлюлозе из стволовой части древесины.

Целью данной работы является исследование свойств сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей осины с точки зрения ее пригодности в качестве волокнистого полуфабриката для производства компонентов гофрокартона.

Материалы и методика исследования. В эксперименте в качестве сырья использованы ветви (средний диаметр 20 мм) и ствол (средний диаметр 170 мм) осины (*Populus tremula*) от одного дерева, место произрастания – Приморский район Архангельской области. После ручной окорки образцы были распилены на шайбы высотой 2,5 см, из которых вручную получена щепа со средними размерами $15 \pm 3 \times 25 \pm 2 \times 5 \pm 1$ мм. Небеленую сульфатную целлюлозу из воздушно-сухой щепы получали на автоклавной системе CAS 420 в лаборатории волокнистых полуфабрикатов Инновационно-технологического центра «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» САФУ [Балыбердин и др., 2024]. Одновременно в соседних автоклавах проводили варки щепы из ветвей и, для сравнения, из стволовой части. Варки проводили по следующему режиму: гидромодуль – 4; расход активной щелочи на варку, в ед. Na_2O, к а.с. древесине – 14,5%; максимальная температура варки – 170 °С; подъем до конечной температуры – 80 мин; стоянка при температуре 170 °С – 55 мин.

Деформационные и прочностные свойства образцов изучали на лабораторных отливках массой 75 г/м^2, изготовленных на листоотливном аппарате Estanit BBS-2, после размола на мельнице Йокро при концентрации 6% до степени помола 30 °ШР.

Перед проведением испытаний образцы кондиционировали по ГОСТ 13523−78. Физико-механические и прочностные свойства волокнистых материалов (толщина, плотность, сопротивление продавливанию, сопротивление раздиранию, SCT) определяли по стандартным методикам. Определение средневзвешенной по длине длины волокна проводилось на автоматическом анализаторе волокна L&W Fiber Tester [Кхоа и др., 2023]. Нулевая разрывная длина определена на приборе PulMac Z-1000 [Манахова, 2014], межволоконные силы связи – по методике С.Н. Иванова [Иванов, 1948].

Деформационные характеристики образцов целлюлозы при растяжении определяли на лабораторном испытательном комплексе, включающем разрывную машину ТС 101–0,5Б и ПК с получением и математической об-

работкой индикаторных диаграмм нагрузка–удлинение по методике [Комаров, Казаков, 2000]. Испытания на растяжение проводили на образцах шириной 15 мм, рабочая длина образцов – 100 мм, скорость растяжения – 50 мм/мин. За результат принимали среднее из не менее 5 определений.

Результаты и их обсуждение. Полученная из ветвей и ствола осины небеленая сульфатная целлюлоза с общим выходом 60,2 из ветвей и 61,8% из ствола имеет число каппа 52 и 54 ед. соответственно (содержание лигнина около 8%), и данные волокнистые полуфабрикаты можно отнести к целлюлозе высокого выхода (ЦВВ), используемой для производства картона.

Несмотря на имеющиеся различия в величине базисной плотности (608 у ветвей и 501 кг/м^3 у ствола) и компонентном составе (у ветвей меньше содержание целлюлозы (45 против 53%) и чуть выше содержание лигнина (16,8 против 14,8%) [Балыбердин и др., 2024], результаты варок щепы из ветвей и ствола получились близкими. У целлюлозы из ветвей меньше выход сортированной целлюлозы на 2,6% (56,7 против 59,3%), непровара больше на 1% (3,5 против 2,5%), различия в величине числа каппа не превышают 2 ед. Для целлюлозы высокого выхода такие различия нельзя считать значимыми. Таким образом, при раздельной варке целлюлозы из сучьев и ствола результаты получились близкими.

Из полученных полуфабрикатов были изготовлены и испытаны лабораторные отливки массой 75 г/м^2. Результаты представлены в табл. 1.

Известно, что уровень физико-механических и деформационных свойств обеспечивается фундаментальными (по Кларку) свойствами волокнистых полуфабрикатов [Кларк, 1983; Комаров, Казаков, 1993; Казаков, Манахова, 2013]. К ним относят среднюю длину волокон, грубость волокон, собственную прочность волокон, способность к уплотнению во влажном состоянии, когезионную способность.

Приведенные в табл. 1 данные о фундаментальных свойствах волокна небеленой сульфатной целлюлозы показывают, что у волокон целлюлозы, полученной из ветвей, по сравнению с целлюлозой из ствола ниже на 32% средняя длина волокна (0,59 против 0,86 мм), на 24,3% ниже грубость (14,3 против 18,9 мг/м) и на 22,3% ниже собственная прочность волокна (нулевая разрывная длина 11,3 против 14,5 км). При этом целлюлоза из ветвей обладает несколько большей на 2,3% (2,43 против 2,37 МПа) величиной сил связи, которые, в свою очередь, отвечают за упругие свойства бумаги и картона. Также обращает на себя внимание достаточно высокая плотность отливок (0,86 г/см^3), практически равная плотности отливок целлюлозы из ствола (0,87 г/см^3), которая играет важную роль в обеспечении уровня прочности и жесткости бумаги и картона.

Отмеченные особенности фундаментальных свойств целлюлозы из ветвей обеспечивают различия в деформационных свойствах, жесткости и прочности бумаги из их.

На рис. 1 представлен график зависимости «напряжение-деформация», полученный при испытании на растяжение с постоянной скоростью образцов сульфатной небеленой целлюлозы из ветвей и ствола осины при степени помола 30 °ШР.

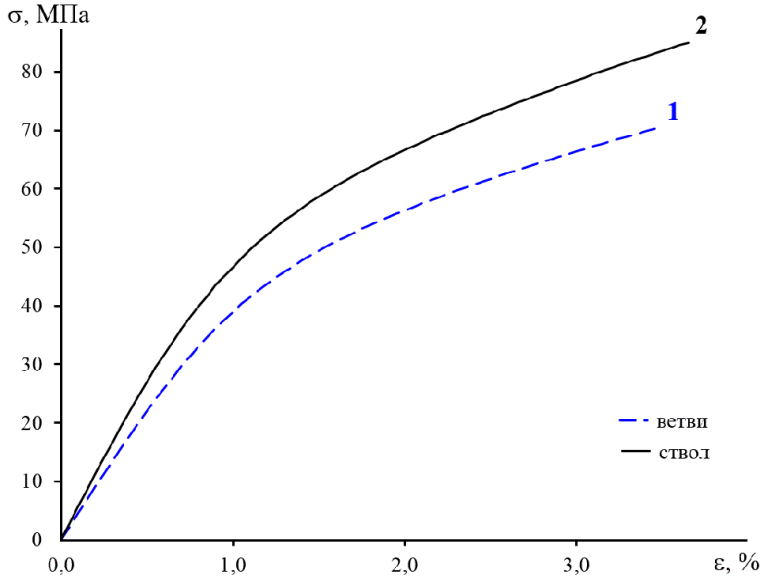


Рис. 1. Кривые зависимости «напряжение-деформация», полученные при испытании на растяжение образцов сульфатной небеленой целлюлозы из ветвей (1) и ствола (2) осины при степени помола 30 °ШР

Fig. 1. Tensile stress-strain relationship for samples of high-yield kraft pulp from aspen brunches (1) and trunk (2) at 30 °SR

Кривая нагружения целлюлозы из ветвей идет ниже, чем у целлюлозы из ствола, что свидетельствует о меньшей жесткости, прочности и растяжимости материала. При этом следует учесть, что при расчете напряжения σ учитывается толщина отливок, которая у целлюлозы из ветвей несколько больше. Отличия обусловлены разницей в размерах, грубости и собственной прочности волокон при компенсирующем воздействии состояния поверхности и структуры клеточной стенки, которые претерпевают измене-

ния в результате гидромеханического воздействия при размоле, что сопровождается развитием межволоконных сил связи и способности к уплотнению во влажном состоянии. Соответственно, отмеченные закономерности изменения хода кривых нагружения отражаются на величинах деформационных и прочностных характеристик (табл. 1).

Таблица 1

Фундаментальные, деформационные и прочностные свойства сульфатной ЦВВ из ветвей и ствола осины

Fundamental, deformation and strength properties kraft high-yield pulp obtained from aspen brunches and trunk

Характеристика	Образец из ветвей	Образец из ствола	Ветви, % от ствола
Средняя длина волокна $l_{срв.}$, мм	0,586	0,862	68
Плотность отливок ρ, г/см^3	0,861	0,870	99
Межволоконные силы связи $F_{СВ}$, МПа	2,43	2,37	102
Грубость волокон Г, мг/м	14,3	18,9	76
Нулевая разрывная длина L_0, км	11,3	14,5	78
Средняя толщина образца δ, мкм	88	82	108
Индекс продавливания $J_П$, , кПа·м^2/г	5,0	5,1	97
Разрывная длина L, м	8300	9800	85
Индекс раздирания J_R, мН·м^2/г	3,0	3,9	76
Жесткость при изгибе S_b, Н·м	19,2	22,7	85
Индекс SCT, кН·м/кг	36,1	37,2	97
Жесткость при растяжении S_t, кН/м	410	460	89
Предел упругости σ_1, МПа	18,6	20,3	92
Предел упругой деформации ε_1, %	0,42	0,37	113
Разрушающее усилие $F_р$, Н	95,1	104,5	91
Разрушающее напряжение $\sigma_р$, МПа	70,5	85	83
Деформация разрушения $\varepsilon_р$, %	3,48	3,65	95
Работа разрушения $А_р$, мДж	220	256	86
Мгновенный модуль упругости E_1, МПа	4530	5660	80
Модуль упругости в области предразрушения E_2, МПа	830	960	86

По результатам измерения основных физико-механических характеристик лабораторных образцов отчетливо видно, что образец целлюлозы из ветвей осины по сравнению с образцом из целлюлозы ствола имеет более низкие значения большинства исследуемых свойств.

Обладая на 32% меньшей длиной волокна и на 22% меньшей собственной прочностью волокна, целлюлоза из ветвей осины имеет сопротивление раздиранию ниже на 24%, на 20% – модуль упругости, на 15% – разрывную длину, на 15% – жесткость при изгибе, на 11% – жесткость при растяжении, на 5% – деформацию разрушения.

В то же время различия в величине сопротивления продавливанию и сопротивления сжатию не превышают 3%, что может быть связано с повышенной величиной межволоконных сил связи целлюлозы из ветвей при сопоставимой плотности, что компенсирует отрицательное влияние меньшей длины и прочности волокна.

Стоит отметить, что у образца целлюлозы из ветвей осины по сравнению с образцом из целлюлозы ствола значительно более высокий предел упругой деформации (0,42 против 0,37%). Это объясняется повышенными межволоконными связями.

В целом результаты исследования свидетельствует о том, что целлюлоза из ветвей имеет перспективу для использования в композиции картона. Так как полученную целлюлозу предполагается использовать в композиции тарного картона, то минимальные различия в величине сопротивления продавливанию и сжатию позволяют говорить об определенном потенциале целлюлозы из ветвей для использования в композиции картона. В данном случае использование композиции 100% ЦВВ из ветвей не будет наилучшим решением. В то же время перспективным является использование данного волокнистого полуфабриката совместно с другими видами волокна, когда свойства волокон ЦВВ из ветвей – хорошая гибкость и когезионная способность – будут использованы наилучшим образом.

Заключение. Установлено, что сульфатная целлюлоза высокого выхода, полученная из древесных отходов в виде ветвей и вершин, образующихся на лесосеках, имеет высокий потенциал для использования в композиции картона, не требуя внесения существенных изменений в технологию, при этом давая экологический и экономический эффект.

Полученный при раздельной варке сульфатным способом по разработанному режиму волокнистый полуфабрикат из ветвей осины (*Populus tremula*) по сравнению с целлюлозой из ствола имеет схожие характери-

стики по выходу (60,2 и 61,8%) и числу каппа (52 и 54 ед.) и обладает более низкими значениями большинства исследуемых свойств.

Обладая на 32% меньшей длиной волокна и на 22% меньшей собственной прочностью волокна, целлюлоза из ветвей обладает большей на 2,3% величиной сил связи, которые отвечают за упругие свойства бумаги и картона.

Целлюлоза из ветвей осины имеет сопротивление раздиранию ниже на 24%, на 20% – модуль упругости, на 15% – разрывную длину, на 15% – жесткость при изгибе, на 11% – жесткость при растяжении, на 5% – деформацию разрушения. Однако различия в величине сопротивления продавливанию и сопротивления сжатию не превышают 3%. Отличия обусловлены разницей в размерах, грубости и собственной прочности волокон при компенсирующем воздействии состояния поверхности и структуры клеточной стенки, которые претерпевают изменения в результате гидромеханического воздействия при размоле, что сопровождается развитием межволоконных сил связи и способности к уплотнению во влажном состоянии.

Вклад авторов. Персональный вклад каждого автора – в равных долях.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена на оборудовании ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова) при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Балыбердин К.И., Казаков Я.В., Албаррам Ф. Получение и свойства сульфатной целлюлозы из лесосечных отходов осины // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном деревообрабатывающем производствах. 2024. №5 (17). С. 30–38. DOI: 10.33920/pro-05-2405-04.

Васильева Т.В. Обзор сложившихся тенденций использования древесных отходов за рубежом // Лесной вестник. 2002. № 4. С. 71–73.

Иванов С.Н. Силы сцепления волокон в бумаге // Бумажная промышленность. 1948. №3. С. 8–17.

Иванов С.Н. Технология бумаги. М.: Школа бумаги, 2006. 696 с.

Казаков Я.В., Манахова Т.Н. Бумагообразующий потенциал хвойной небеленой целлюлозы: современный взгляд через автоматический анализатор волокна // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2013. №5. С. 34–39.

Кларк Дж. Технология целлюлозы (Наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка её в бумагу, методы испытаний) / пер. с англ. А.В. Оболенской, Г.А. Пазухиной. М.: Лесная промышленность, 1983. 456 с.

Комаров В.И., Казаков Я.В. Связь фундаментальных свойств (по Кларку) неразмолотой сульфатной небеленой целлюлозы с характеристиками деформативности и прочности // ИВУЗ. Лесной журнал. 1993. № 2-3. С. 112–116.

Комаров В.И., Казаков Я.В. Анализ механического поведения целлюлозно-бумажных материалов при приложении растягивающей нагрузки // Лесной вестник МГУЛ. 2000. № 3 (12). С. 52–62.

Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Жукова В.А. Древесина как химическое сырье. История и современность. IV. Делигнификация древесины как путь получения целлюлозы. Часть II // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26, № 2. С. 69–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84

Коробов В.В., Рушнов Н.П. Переработка низкокачественного сырья (проблемы безотходной технологии). М.: Экология, 1991. 288 с.

Кузнецова А.А. Осина в Карелии // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2003. Вып. 4. 53 с.

Кхоа Х.М., Казаков Я.В., Окулова Е.О. Особенности изменения структурно-морфологических свойств целлюлозы из бамбука при размоле // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 2. С. 146–159. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-146-159.

Манахова Т.Н. Влияние структурно-морфологических свойств волокна на деформативность и прочность хвойной сульфатной небеленой целлюлозы: дис. … канд. техн. наук. Архангельск, 2014. 170 с.

Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Королева Т.А., Севастьянова Ю.В. Сульфатная варка целлюлозы: учеб. пособ. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, 2019. 175 с.

Пекарец А.А., Ерохина О.А., Новожилов В.В., Мандре Ю.Г., Аким Э.Л. Упруго-релаксационные свойства древесины лиственницы и их роль при получении древесных и древесно-угольных брикетов // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. № 1. С. 200–208. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208.

Полянин И.А., Макаров В.Е. Изготовление технологической щепы из некондиционной и пневой древесины с последующей ее переработкой // Современные наукоемкие технологии. 2016. Вып. 10, ч. 2. С. 292–297.

Сафин Р.Г., Саттарова З.Г. Хабибуллин И.Г., Зиатдинов Р.Р., Степанова Т.О. Современные направления переработки лесных ресурсов //Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 21. С. 90–93.

Хакимова Ф.Х., Носкова О.А. Отходы лесозаготовок – сырье для волокнистых полуфабрикатов производства картона // Вестник Пермского национального политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2017. № 2. С. 128–142. DOI: 10.15593/2224-9400/2017.3.11.

Хакимова Ф.Х., Хакимов Р.Р., Носкова О.А. Молодая древесина ели и березы – полноценное сырье для целлюлозно-бумажной промышленности // Химия растительного сырья. 2018. №3. С. 261–270. DOI:10.14258/jcprm.2018033782.

Хакимова Ф.Х., Синяев К.А., Хакимов Р.Р., Носкова О.А. Молодая тонкомерная древесина от рубок ухода за лесом – резерв сырья для производства целлюлозы и бумаги // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 2. С. 88–97. DOI: 10.118698/2542-1468-2020-2-88-97.

Hunt K., Gee W., Hussein A., Reath S., Watson P. Kraft pulping opportunities from Canadian aspen // PACWEST Conference. Jasper (Alberta), 2002.

Latha A., Arivukarasi M.C., Keerthana C.M., Subashri R., Vishnu Priya V. Paper and Pulp Industry Manufacturing and Treatment Processes–A Review// Paper and Pulp Industry Manufacturing and Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2018. Vol. 6, iss. 2. DOI: 10.17577/IJERTCON011.

Riki J.T.B., Standa O.A., Oluwadara A.O. Anatomical and chemical properties of wood and their practical implications in pulp and paper production // Journal of Research in forests, Wild life and the Environment. 2019. Vol.11, iss. 3. P. 358–368.

Rullifank K.F., Roefinal M.E., Kostanti M., Sartika L., Evelyn. Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 845. Art. no. 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/845/1/012005.

Salman A.L. Paper (its origins, functions, and development of its industry throughout history) // Damascus University Journal for Engineering Sciences. 2006. Vol. 22, no. 2. P. 155–191. (In Arab.)

Wong A. Review of Pulping and Papermaking Properties of Aspen. Edmonton: Canada-Alberta Forest Resource Development Agreement Canadian Forestry Service, 1987. 82 p.

Xu E.C., Sabourin M.J. Process selection for chemimechanical pulping of aspen // Journal of Pulp and Paper Technical Association of Canada. 2002. No. 3 (103). P. 36–39.

References

Balyberdin K.I., Kazakov Ya.V., *Albarram F.* Production and Properties of Kraft Pulp from Aspen Logging Waste. *Safety and Labor Protection in Logging and Woodworking Industries*, 2024, no. 5 (17), pp. 30–38. DOI: 10.33920/pro-05-2405-04. (In Russ.)

Clark J. Pulp Technology (Science of Pulp and Paper, Pulp Preparation, Processing into Paper, Testing Methods) / transl. from English by A.V. Obolenskaya, G.A. Pazukhina. Moscow: Forest Industry, 1983. 456 p. (In Russ.)

Hunt K., Gee W., Hussein A., Reath S., Watson P. Kraft pulping opportunities from Canadian aspen. *PACWEST Conference*, Jasper (Alberta), 2002.

Ivanov S.N. Fiber Bonding Forces in Paper. *Paper Industry*, 1948, no. 3, pp. 8–17. (In Russ.)

Ivanov S.N. Paper Technology. Moscow: Paper School, 2006. 696 p. (In Russ.)

Kazakov Ya.V., Manakhova T.N. Papermaking Potential of Unbleached Softwood Pulp: A Modern View through an Automatic Fiber Analyzer. *Cellulose. Paper. Cardboard*, 2013, no. 5, pp. 34–39. (In Russ.)

Khakimova F.Kh., Noskova O.A. Logging Waste as Raw Material for Fiber Semi-Finished Products in Board Production. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology*, 2017, no. 2, pp. 128–142. DOI: 10.15593/2224-9400/2017.3.11. (In Russ.)

Khakimova F.Kh., Khakimov R.R., Noskova O.A. Young Spruce and Birch Wood – A Full-Fledged Raw Material for the Pulp and Paper Industry. *Chemistry of Plant Raw Materials*, 2018, no. 3, pp. 261–270. DOI:10.14258/jcprm.2018033782. (In Russ.)

Khakimova F.Kh., Sinyaev K.A., Khakimov R.R., Noskova O.A. Young Undergrowth Wood from Forest Thinning – A Reserve Raw Material for Pulp and Paper Production. *Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 88–97. DOI: 10.118698/2542-1468-2020-2-88-97. (In Russ.)

Khoa H.M., Kazakov Ya.V., Okulova E.O. Features of Changes in the Structural and Morphological Properties of Bamboo Pulp During Refining. *IVUZ. Forestry Journal*, 2023, no. 2, pp. 146–159. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-146-159. (In Russ.)

Komarov V.I., Kazakov Ya.V. Correlation of Fundamental Properties (according to Clark) of Unrefined Unbleached Sulfate Pulp with Deformation and Strength Characteristics. *IVUZ. Forestry Journal*, 1993, no. 2–3, pp. 112–116. (In Russ.)

Komarov V.I., Kazakov Ya.V. Analysis of Mechanical Behavior of Pulp and Paper Materials under Tensile Load. *Forestry Bulletin MGUL*, 2000, no. 3 (12), pp. 52–62. (In Russ.)

Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Zhukova V.A. Wood as a Chemical Raw Material. History and Modernity. IV. Delignification of Wood as a Method of Pulp Production. Part II. *Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 69–84. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-69-84. (In Russ.)

Korobov V.V., Rushnov N.P. Processing of Low-Quality Raw Materials (Problems of Waste-Free Technology). Moscow: Ecology, 1991. 288 p. (In Russ.)

Kuznetsova A.A. Aspen in Karelia. *Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU*, 2003, iss. 4, 53 p. (In Russ.)

Latha A., Arivukarasi M.C., Keerthana C.M., Subashri R., Vishnu Priya V. Paper and Pulp Industry Manufacturing and Treatment Processes–A Review. *Paper and Pulp Industry Manufacturing and Journal of Engineering Research & Technology* (*IJERT*), 2018, vol. 6, iss. 2. DOI: 10.17577/IJERTCON011.

Manakhova T.N. Influence of Structural and Morphological Fiber Properties on the Deformability and Strength of Unbleached Kraft Softwood Pulp: Diss. ... Cand. Tech. Sci. Arkhangelsk, 2014. 170 p. (In Russ.)

Milovidova L.A., Komarova G.V., Koroleva T.A., Sevastyanova Yu.V. Kraft Pulp Cooking: textbook. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2019. 175 p. (In Russ.)

Pekarets A.A., Erokhina O.A., Novozhilov V.V., Mandre Yu.G., Akim E.L. Elastic-Relaxation Properties of Larch Wood and Their Role in the Production of Wood and Charcoal Briquettes. *IVUZ. Forestry Journal*, 2020, no. 1, pp. 200–208. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208. (In Russ.)

Polyanin I.A., Makarov V.E. Production of Technological Chips from Non-Standard and Stump Wood with Subsequent Processing. *Modern High Technologies*, 2016, iss. 10, part 2, pp. 292–297. (In Russ.)

Riki J.T.B., Standa O.A., Oluwadara A.O. Anatomical and chemical properties of wood and their practical implications in pulp and paper production. *Journal of Research in forests, Wild life and the Environment*, 2019, vol.11, iss. 3, pp. 358–368.

Rullifank K.F., Roefinal M.E., Kostanti M., Sartika L., Evelyn. Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 845, art. no. 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/845/1/012005.

Safin R.G., Sattarova Z.G., Khabibullin I.G., Ziyatdinov R.R., Stepanova T.O. Modern Trends in Forest Resource Processing. *Bulletin of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 21, pp. 90–93. (In Russ.)

Salman A.L. Paper (its origins, functions, and development of its industry throughout history). *Damascus University Journal for Engineering Sciences*, 2006, vol. 22, no. 2, pp. 155–191. (In Arab.)

Vasilieva T.V. Overview of Current Trends in the Use of Wood Waste Abroad. *Forestry Bulletin*, 2002, no. 4, pp. 71–73. (In Russ.)

Wong A. Review of Pulping and Papermaking Properties of Aspen. Edmonton: Canada-Alberta Forest Resource Development Agreement Canadian Forestry Service, 1987. 82 p.

Xu E.C., Sabourin M.J. Process selection for chemimechanical pulping of aspen. *Journal of Pulp and Paper Technical Association of Canada*, 2002, no. 3 (103), pp. 36–39.

Материал поступил в редакцию 06.02.2025

Албаррам Ф., Балыбердин К.И., Казаков Я.В. Свойства сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей осины как волокнистого полуфабриката для производства компонентов гофрокартона // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 255. С. 443–457. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.443-457

Выполнено сравнение свойств сульфатной целлюлозы высокого выхода из ветвей осины (*Populus tremula* L.) с точки зрения ее пригодности в качестве волокнистого полуфабриката для производства компонентов гофрокартона. Полученный при раздельной варке сульфатным способом в лабораторных условиях по разработанному режиму волокнистый полуфабрикат из ветвей осины по сравнению с целлюлозой из ствола имеет схожие характеристики по выходу (60,2 и 61,8%) и числу каппа (52 и 54 ед.). У полученной ЦВВ определен комплекс фундаментальных, деформационных и прочностных свойств. Установлено, что, обладая на 32% меньшей длиной волокна (0,59 против 0,86 мм) и на 22% меньшей собственной прочностью волокна (нулевая разрывная длина 11,3 против 14,5 км), на 24,3% меньшей грубостью (14,3 против 18,9 мг/м), при этом она обладает большей на 2,3% (2,43 против 2,37 МПа) величиной сил связи, которые отвечают за упругие свойства бумаги. Целлюлоза из ветвей осины имеет разрывную длину ниже на 15%, сопротивление раздиранию – на 24%, модуль упругости – на 20%, жесткость при изгибе – на 15%, жесткость при растяжении – на 11%. Однако различия в величине сопротивления продавливанию и сопротивления сжатию не превышают 3%. Отличия обусловлены разницей в размерах, грубости и собственной прочности волокон при компенсирующем воздействии состояния поверхности и структуры клеточной стенки, которые претерпевают изменения в результате гидромеханического воздействия при размоле, что сопровождается развитием межволоконных сил связи и способности к уплотнению во влажном состоянии. Сделан вывод, что сульфатная целлюлоза высокого выхода, полученная из древесных отходов в виде ветвей осины, имеет высокий потенциал для использования в композиции картона, не требуя внесения существенных изменений в технологи, при этом давая экологический и экономический эффект.

Ключевые слова: лесосечные отходы, осина, ветви, сульфатная целлюлоза, прочность, жесткость, деформативность.

Albarram Fatima, Balyberdin K.I., Kazakov Ya.V. Properties of high yield kraft pulp from aspen branches as a fibrous raw material for the production of corrugated cardboard components. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii*, 2025, iss. 255, pp. 443–457 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.255.443-457

The properties of high-yield kraft pulp from aspen (*Populus tremula* L.) branches were compared in terms of its suitability as a raw material for the production of corrugated cardboard components. The high-yield pulp obtained from aspen branches by separate cooking using the kraft method in laboratory conditions according to the developed regime, compared to pulp from the trunk, has similar characteristics in terms of yield (60.2 and 61.8%) and kappa number (52 and 54 units). The obtained high-yield kraft pulp was characterized by a set of fundamental, deformation and strength

properties. It was established that, having a 32% shorter fiber length (0.59 versus 0.86 mm) and 22% lower intrinsic fiber strength (zero breaking length 11.3 versus 14.5 km), 24.3% lower coarseness (14.3 versus 18.9 mg/m), it has a 2.3% higher (2.43 versus 2.37 MPa) magnitude of interfiber bonding forces, which are responsible for the elastic properties of paper. Pulp from aspen branches has a 15% lower breaking length, 24% lower tear resistance, 20% lower modulus of elasticity, 15% lower bending stiffness, and 11% lower tensile stiffness. However, the differences in the values of burst strength and compression strength do not exceed 3%. The differences are due to the difference in size (length and width), coarseness and own strength of the fibers, with the compensating effect of the surface condition and structure of the cell wall, which undergo changes as a result of hydromechanical action during refining, which is accompanied by the development of interfiber bonding forces and the ability to compact in a wet state. It is concluded that high-yield kraft pulp from wood waste in the form of aspen branches has high potential for use in cardboard composition, without requiring significant changes in technology, while having an environmental and economic effect.

K e y w o r d s : logging waste, aspen, branches, kraft pulp, strength, stiffness, deformation properties.

АЛБАРРАМ Фатыма – аспирант Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. ORCID: 0009-0003-6419-5580.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: alibarram20181992@gmail.com

ALBARRAM Fatima – PhD student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID: 0009-0003-6419-5580.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: alibarram20181992@gmail.com

БАЛЫБЕРДИН Константин Ильич – магистрант кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. SPIN-код: 7163-5256. AuthorID: 1252682. ORCID: 0009-0000-8643-0543.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: konstantinbalyberdin54@gmail.com

BALYBERDIN Konstantine I. – master student of the Department of Pulp and Paper and Wood Chemical Production, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. SPIN-code: 7163-5256. AuthorID: 1252682. ORCID: 0009-0000-8643-0543.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: konstantinbalyberdin54@gmail.com

КАЗАКОВ Яков Владимирович – профессор кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор технических наук, профессор. ORCID: 0000-0001-8505-5841. Researcher ID: J-4634-2012. Scopus AuthorID: 57188686765. SPIN-код: 6354-3702.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: j.kazakov@narfu.ru

KAZAKOV Yakov V. – DSc (Technical), Professor of the Department of Pulp and Paper and Wood Chemical Production, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID: 0000-0001-8505-5841. Researcher ID: J-4634-2012. Scopus AuthorID: 57188686765. SPIN-code: 6354-3702.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: j.kazakov@narfu.ru