

Научная статья

УДК 676.163.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-3-188-202

Комплексная утилизация лигносодержащих древесных отходов

Ф.Х. Хакимова, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [IUO-5370-2023](https://orcid.org/0000-0002-0409-4548),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0409-4548>

О.А. Носкова[✉], канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [IUO-5323-2023](https://orcid.org/0000-0001-9216-099X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9216-099X>

Р.Р. Хакимов, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [IUO-7064-2023](https://orcid.org/0009-0007-1782-2552),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1782-2552>

И.И. Фонарёв, аспирант; *ResearcherID*: [IUO-6822-2023](https://orcid.org/0009-0002-9470-8052),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9470-8052>

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, просп. Комсомольский, д. 29, г. Пермь, Россия, 614990; tcbp@pstu.ru, oa-noskova@mail.ru[✉], roman_etf@mail.ru, fonarev22@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.09.23 / Одобрена после рецензирования 06.12.23 / Принята к печати 08.12.23

Аннотация. Исследована утилизация отходов переработки древесины, образующихся на целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих предприятиях, путем повторного использования при получении полуфабриката высокого выхода для производства бумаги и картона. Экономическая и экологическая целесообразность рекуперации древесных отходов не вызывает сомнений. Цель – разработка технологии и режимов утилизации древесных отходов производства целлюлозы высокого выхода (березовых опилок) и деревообработки (хвойных и смеси хвойных и лиственных стружек). В ходе исследования целлюлозу высокого выхода из березовых опилок получали по непрерывной технологии, как на предприятии «Пермская целлюлозно-бумажная компания», и по периодической, как на большинстве предприятий целлюлозно-бумажной промышленности. Из стружек деревообработки варки проводили только по периодической технологии. Показано, что утилизация березовых опилок с получением волокнистого полуфабриката для применения при производстве бумаги и картона решает важную экономическую проблему целлюлозно-бумажной отрасли, заключающуюся в необходимости снижения расхода балансовой древесины и сохранения лесных ресурсов. Процесс утилизации древесных отходов не требует изменений действующей технологии. При этом получается целлюлоза высокого выхода, которая по показателям качества не уступает аналогичному полуфабрикату из березовой технологической щепы и соответствует нормам предприятия. Выявлено, что стружку древесных отходов из хвойной и лиственной древесины деревообрабатывающих предприятий также можно использовать как сырье для получения целлюлозы высокого выхода, но только совместно с опилками из березовой древесины. Целлюлоза высокого выхода из стружки хвойной и смеси хвойной и лиственной древесины получается повышенного выхода, но с низкой механической прочностью, т. к. нейтрально-сульфитный способ предназначен для изготовления волокнистого полуфабриката только из лиственной древесины; хвойная древесина этим способом не проваривается. Целлюлозу высокого выхода с показателями качества, соответствующими нормам предприятия для этого

© Хакимова Ф.Х., Носкова О.А., Хакимов Р.Р., Фонарёв И.И., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

продукта из технологической щепы, дают соотношения стружек и опилок 50:50 и 70:30. Выход полуфабриката из сырья всех использованных композиций высокий – 75...82 %. Испытания целлюлозы высокого выхода из березовых опилок показали, что волокнистый полуфабрикат может заменить на производстве в композиции бумаги и картона по 20 % макулатурной массы марки МС-5Б.

Ключевые слова: древесные отходы, опилки, стружка, переработка, целлюлоза высокого выхода, бумага для гофрирования, картон, бумажная композиция, качество бумажного волокна, испытания образцов

Для цитирования: Хакимова Ф.Х., Носкова О.А., Хакимов Р.Р., Фонарёв И.И. Комплексная утилизация лигносодержащих древесных отходов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 3. С. 188–202. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-188-202>

Original article

Integrated Recycling of Lignin-Containing Wood Waste

Firdaves Kh. Khakimova, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [IUO-5370-2023](https://orcid.org/0000-0002-0409-4548),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0409-4548>

Ol'ga A. Noskova✉, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [IUO-5323-2023](https://orcid.org/0000-0001-9216-099X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9216-099X>

Roman R. Khakimov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [IUO-7064-2023](https://orcid.org/0009-0007-1782-2552),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1782-2552>

Ilya I. Fonarev, Postgraduate Student; ResearcherID: [IUO-6822-2023](https://orcid.org/0009-0002-9470-8052),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9470-8052>

Perm National Research Polytechnic University, prosp. Komsomolskiy, 29, Perm, 614990, Russian Federation; tcbp@pstu.ru, oa-noskova@mail.ru✉, roman_etf@mail.ru, fonarev22@yandex.ru

Received on September 10, 2023 / Approved after reviewing on December 6, 2023 / Accepted on December 8, 2023

Abstract. The recycling of wood processing waste generated at pulp and paper and woodworking enterprises by reusing it in obtaining a high-yield semi-finished product for the production of paper and cardboard has been studied. The economic and environmental feasibility of wood waste recovery is beyond doubt. The aim has been to develop technology and modes for recycling wood waste from the production of high-yield pulp (birch sawdust) and woodworking (coniferous and the mix of coniferous and deciduous chips). In the course of the study, high-yield pulp has been obtained from birch sawdust using continuous technology (at Perm Pulp and Paper Company) and batch technology (at most pulp and paper industry enterprises). Cooking of wood chips has been carried out only using batch technology. It is shown that the recycling of birch sawdust to produce a fibrous semi-finished product for use in the production of paper and cardboard solves an important economic problem of the pulp and paper industry, which is the need to reduce the consumption of pulpwood and preserve forest resources. The process of recycling wood waste does not require changes to current technology. This produces high-yield pulp, which in terms of quality is not inferior to a similar semi-finished product made from birch technological chips and meets the enterprise standards. It has been revealed that wood chips from coniferous and deciduous wood from woodworking enterprises can also be used as a raw material for the

production of high-yield pulp, but only together with sawdust from birch wood. High-yield pulp from the chips of coniferous and the mix of coniferous and deciduous wood is obtained with increased yield, but with low mechanical strength, since the neutral-sulfite method is intended for the production of a fibrous semi-finished product only from deciduous wood; coniferous wood is not boiled using this method. High-yield pulp with quality indicators corresponding to the enterprise standards from technological chips is produced by the ratios of chips and sawdust of 50:50 and 70:30. The yield of the semi-finished product from the raw materials of all used compositions is high – 75...82 %. Tests of high-yield pulp obtained from birch sawdust have shown that the fibrous semi-finished product can replace 20 % of the MS-5B waste paper mass in production in the production of paper and cardboard compositions.

Keywords: wood waste, sawdust, chips, recycling, high-yield pulp, fluting paper, cardboard, paper composition, paper grain quality, sample testing

For citation: Khakimova F.Kh., Noskova O.A., Khakimov R.R., Fonarev I.I. Integrated Recycling of Lignin-Containing Wood Waste. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 3, pp. 188–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-3-188-202>

Введение

Вопросы эффективного использования древесного сырья путем переработки древесных отходов на целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих предприятиях являются актуальными и требуют решения.

К сожалению, в России не уделяется серьезного внимания переработке всей биомассы дерева в целях снижения потерь древесины и сохранения лесных ресурсов [2, 23].

Промышленные древесные отходы (стружка, опилки) могут служить сырьем для изготовления целлюлозно-бумажной продукции [1, 10, 24]. Использование древесных отходов в целлюлозно-бумажной промышленности экономически целесообразно, т. к. уменьшает расход балансовой древесины при получении целлюлозы и бумаги, а также повышает экологическую безопасность предприятия за счет снижения пожароопасности и вредных газовых выбросов в окружающую среду от гниения отходов и развития в них микроорганизмов.

Один из путей соблюдения современных требований рационального природопользования в сфере применения растительного сырья – организация на предприятиях химической переработки древесины получения полезного продукта из отходов по технологиям, аналогичным технологии получения целевого продукта предприятия, например производство древесно-волоконистых плит, различной картонно-бумажной продукции и др. Особого внимания заслуживает применение древесных отходов в виде опилок и стружек [1, 25, 26].

Работы в области использования древесных отходов в мировой практике проводятся широко и имеют эффективные результаты, но заявленная проблема остается и вопросы экономики и экологии рециклинга древесных отходов актуальны [8, 15, 17, 27]. Повышение эффективности комплексного использования древесного сырья способствует ресурсосбережению, улучшению экологической обстановки лесной отрасли [5, 7].

Необходимость утилизации древесных отходов и более рационального применения ресурсов биомассы древесины в зарубежной практике связаны с ростом потребности в лесопродукции, а также дефицитом и высокой стоимостью стволовой древесины [3, 4, 6, 9].

Все направления работ по ресурсосбережению перспективны, в мировой практике распространена переработка древесных отходов в целлюлозу, древесностружечные и древесноволокнистые материалы, а также использование таких отходов при очистке сточных вод лесохимических, гидролизных и других предприятий химической переработки древесины [18, 19]. Важной является переработка различных видов бумажной и картонной макулатуры по современным экономичным и экологичным технологиям [20].

Представляют большой интерес технологии получения волокнистых полуфабрикатов из опилок и стружек. Положительные результаты дали исследования по пероксидной варке древесных опилок разных пород [14], по получению целлюлозы из стружек еловой древесины методом катализируемой пероксидной варки в кислой среде с последующей щелочной экстракцией [13], а также из опилок древесины лиственницы, хвойных древесных отходов деревообработки (опилок, стружек) с использованием органо-растворной варки смесью уксусной кислоты и пероксида водорода [11, 16]. В России на одном из сибирских предприятий работает установка по непрерывной варке из древесных опилок сульфатной целлюлозы для производства картона [18].

Авторы в течение ряда лет проводят исследования в области утилизации древесных отходов лесозаготовок, химической и механической переработки древесины (березы, осины, ели и пихты) с получением волокнистых полуфабрикатов. Показана возможность и целесообразность производства из этих отходов бисульфитной и нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы для использования в композиции тарного картона [12, 21, 22]. Однако древесные отходы (в виде стружек) деревообрабатывающих предприятий не находят широкого применения.

Таким образом, актуальность, экономическая и экологическая целесообразность и эффективность утилизации древесных отходов лесозаготовок, деревообработки и целлюлозных производств не вызывают сомнений.

Цель работы – предложить технологию утилизации древесных отходов (березовых опилок, хвойных и смеси хвойных и лиственных стружек) целлюлозно-бумажного производства и деревообрабатывающих предприятий.

Задача – разработка условий для всех этапов производства с использованием древесных отходов для получения целлюлозы высокого выхода (ЦВВ).

Объекты и методы исследования

Для получения ЦВВ использованы березовые опилки (сортирование через сито с диаметром отверстий 2...5 мм) – отходы от подготовки древесины для получения ЦВВ целлюлозно-бумажного предприятия (образец сырья 1).

Кроме того, взяты древесные отходы в виде стружки 2 деревообрабатывающих комбинатов. Из древесных отходов хвойных пород для варок выделена стружка, пригодная для получения ЦВВ, в количестве 64 % (образец 2), а из стружек хвойных и лиственных пород (ель и осина) – 52 % (образец 3).

Исследования процесса получения ЦВВ из березовых опилок выполняли применительно к условиям предприятия «Пермская целлюлозно-бумажная компания» (ПЦБК) по непрерывной технологии, а также – для использования разработки в других условиях – по периодической технологии, из стружек деревообработки – только по периодической технологии.

По непрерывной технологии в лаборатории Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) воспроизведены все стадии и условия обработки древесины из технологической березовой щепы на производстве при помощи установки «Дефибратор».

Использован нейтрально-сульфитный варочный раствор предприятия ($\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{NaOH}$), содержащий SO_2 : всего – 6,5–7,5 %; связанного – 2,7–3,5 %.

Варки ЦВВ проводили в лабораторном варочном аппарате (автоклаве) вместимостью 2 л. Процесс варки по непрерывной технологии включал следующие стадии:

пропитка опилок нейтрально-сульфитным варочным раствором (рН раствора – 10,2–10,8) при температуре 100 °С, гидромодуль варки – 5,5;

варка целлюлозы при температуре 165–175 °С;

горячий размол сваренной ЦВВ в центробежном размалывающем аппарате (ЦРА);

промывка и сортирование целлюлозы;

холодный размол в ЦРА.

Периодическую варку целлюлозы проводили аналогично сульфитной варке, особенность заключалась в отсутствии промежуточной стоянки для пропитки щепы. Промывку и сортирование ЦВВ, ее холодный размол осуществляли после горячего размола (как по непрерывной технологии варки).

Стандартные методики, использованные для анализа технологических процессов и показателей целлюлозы, следующие: для установления влажности – ГОСТ 50316–92; для подготовки проб к физико-механическим испытаниям – ГОСТ 14363.4–89; для определения сопротивления разрыву с перерасчетом на разрывную длину – ГОСТ 1924-1–96, сопротивления продавливанию – ГОСТ 13525.8–86, прочности на излом – ГОСТ 13525.2–80, плоскостного сжатия гофрированного образца бумаги – ГОСТ 20682–75, торцового сжатия гофрированного образца бумаги – ГОСТ 28686–90, разрушающего усилия при сжатии кольца – ГОСТ 10711–97.

Отливки бумаги из ЦВВ для определения физико-механических показателей получали на листоотливном аппарате ЛА-2.

Результаты исследования и их обсуждение

Сведения о результатах варок березовых опилок по периодической и непрерывной технологиям приведены в табл. 1. Выход ЦВВ в данном случае соответствует требованиям предприятия.

Таблица 1

**Характеристика ЦВВ при варке березовых опилок
по периодической и непрерывной технологиям**
**The characteristics of high-yield pulp when cooking birch sawdust using
batch and continuous technologies**

Показатель ЦВВ (100 г/м ²)	Периодическая варка	Непрерывная варка	Нормы предприятия для ЦВВ из технологической щепы
Выход, %	72,5...75,5	64,6...67,9	Не менее 70
Продолжительность размола, мин	5,0...5,5	5,0...5,5	–
Степень помола, °ШР	24...29	23...29	24...33
Разрывная длина, м	6630...7300	6810...7400	2500...3000
Сопротивление продавливанию, кПа	288	323	Не менее 280
Сопротивление плоскостному сжатию, Н	290	330	Не менее 310
Сопротивление торцовому сжатию, кН/м	2,2	2,3	Не менее 1,9

Примечание: Приведены данные по результатам 4 параллельных варок каждого образца.

Из табл. 1 видно, что почти все показатели качества образцов ЦВВ из березовых опилок близки к нормам предприятия для такой же продукции из технологической щепы. Отмечается легкая размалываемость полуфабриката, что важно для процессов его производства.

Сравнение результатов варок березовых опилок с нормами предприятия для ЦВВ из технологической березовой щепы указывает на следующие различия:

выход ЦВВ из опилок по непрерывной технологии составляет 65...68 %, т. е. ниже, чем у волокнистого полуфабриката из кондиционной технологической щепы, полученного в производственных условиях, что объясняется использованием при исследовании мелкого древесного сырья (опилок) вместо щепы; выход ЦВВ по периодической технологии выше, чем у целлюлозы из производственной щепы (75 против 70 %), что является положительным фактором;

образцы ЦВВ, изготовленные по непрерывной и периодической технологиям варки, легко размалываются в течение 5,0...5,5 мин, что значительно меньше, чем для сульфитной целлюлозы;

по механической прочности образцы существенно не отличаются, показатель зависит от степени помола.

В табл. 2 даны результаты периодических варок исследованных видов сырья.

Таблица 2

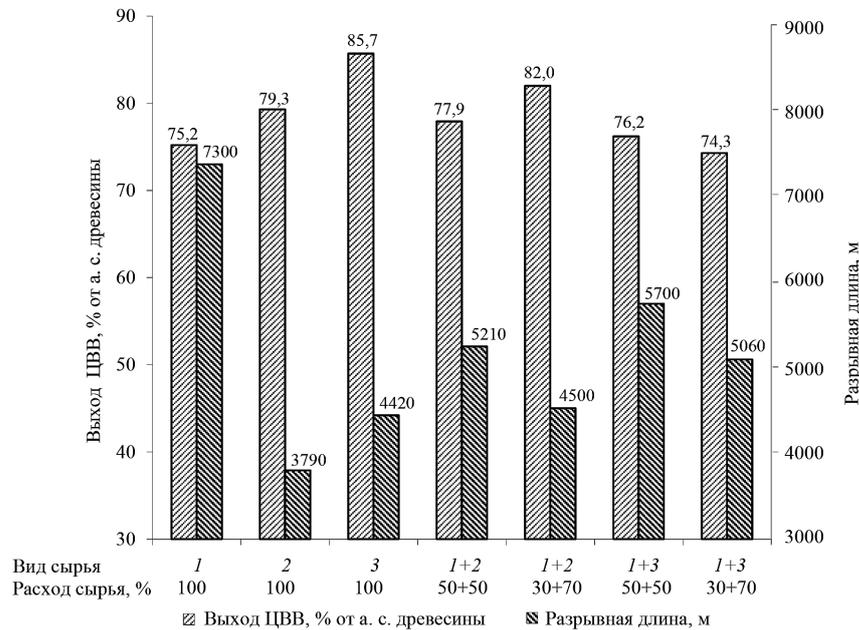
**Влияние состава сырья на выход и качество ЦВВ
при варке по периодической технологии**
**The influence of raw material composition on the yield and quality of high-yield pulp
when cooking using batch technology**

Образец ЦВВ	Состав сырья, %			Выход ЦВВ, % от а. с. древесины	Продолжительность размола, мин	Степень помола, °ШР	Разрывная длина, м
	1	2	3				
1	100	–	–	75,5	5	24	6630
2				75,2	5,5	27	7300
3	–	100	–	79,3	10	24	2450
4					15	31	3790
5	–	–	100	85,7	13	26	3000
6					15	30	4420
7	50	50	–	77,9	10		32
8					13	5280	
9	30	70	–	82,0	8,5	20	3220
10					10	29	4500
11	50	–	50	76,2	7	28	5700
12					8,5	34	5790
13	30	–	70	74,3	7,5	24	4860
14					10	28	5060
15		30	40	81,6		27	4770
15-1				9	24	3240	
16		40	30	81,6	10	22	2970
16-1				82,0	12	27	4700
Нормы предприятия для ЦВВ из технологической щепы				Не менее 70	–	24...30	2500...3000

Примечание: а. с. – абсолютно сухое состояние.

Для наглядности и более удобного анализа результатов варок данные по двум наиболее важным показателям – выходу и разрывной длине ЦВВ – приведены на рисунке.

Из стружки хвойных пород древесины получена целлюлоза повышенного выхода (~79 %), но низкой прочности (см. рисунок). Это объясняется тем, что нейтрально-сульфитный способ предназначен для варки только лиственной целлюлозы – хвойная древесина не проваривается и из нее получается целлюлоза с выходом, заметно превышающим нормы предприятия, и, соответственно, низкой прочности – разрывная длина (образцов 3 и 4) составила 2450...3790 м в зависимости от степени помола (24...31 °ШР).



Изменение выхода и разрывной длины ЦВВ в зависимости от состава сырья.

Разрывная длина определена при степени помола 27...30 °ШР

The changes in the yield and breaking length of high-yield pulp depending on raw material composition. The breaking length has been determined at a degree of grinding of 27...30 °SR

Использование стружки хвойно-лиственной смеси дает выход полуцеллюлозы 86 %, но качество продукта низкое: разрывная длина – 3000...4400 м (образцы 5, 6).

При варке стружки из хвойной древесины с добавлением березовых опилок (соотношение 70:30, образцы 9, 10) разрывная длина получаемой ЦВВ заметно повышается (при выходе 82 %).

Для получения ЦВВ удовлетворительного качества может быть рекомендовано сырье из стружки хвойной древесины и березовых опилок в соотношении 1:1 (образцы 7, 8) – даже при высоком выходе (78 %) из этого сырья получается ЦВВ с хорошей механической прочностью (разрывная длина – 5200...5300 м) и по качеству соответствующая нормам для ЦВВ из технологической щепы.

Смесь стружек из хвойной и лиственной древесины с добавлением березовых опилок в исследованных нами соотношениях (1:1 и 2,5:1; соответственно образцы 11, 12 и 13, 14) позволяет получить ЦВВ требуемого качества: при выходе 74...76 % она имеет достаточную разрывную длину – 4860...5700 м, однако уступающую ЦВВ из березовых опилок на 1000...2000 м.

Таким образом, композиция древесного сырья из стружек смеси хвойной и лиственной древесины с березовыми опилками может быть рекомендована при получении ЦВВ – полуфабриката с использованием его в производстве картона. Процесс получения ЦВВ трудностей не вызывает.

Результаты изготовления ЦВВ из сырья, представляющего смеси всех 3 видов древесных отходов в различных соотношениях (образцы 15 и 16), положительные. Разрывная длина образцов ЦВВ соответствует нормам предприятия для обычной ЦВВ из щепы.

Некоторые трудности переработки древесной стружки вызывает ее низкая насыпная плотность, следствием чего является неэффективное использование емкости автоклава (котла), поэтому необходимо дополнительное уплотнение стружки.

Наиболее плотно укладываются в автоклаве березовые опилки равномерного фракционного состава.

Выход ЦВВ линейно увеличивается с возрастанием в исходном сырье содержания хвойной древесины. Это связано с тем, что хвойная древесина в нейтральной среде не проваривается, т. к. в этих условиях реакции сульфирования может подвергаться только около 30 % лигнина (группа А). Поэтому на практике нейтрально-сульфитным способом хвойную древесину не перерабатывают. В этом случае нейтрально-сульфитная варка из хвойной древесины дает, вероятно, полуфабрикат, аналогичный химико-термомеханической массе. В связи с этим механическая прочность ЦВВ с увеличением количества хвойной древесины в исходном сырье снижается.

Размол всех образцов ЦВВ проводился в одинаковых условиях в ЦРА. Продолжительность процесса для различных образцов позволяет дать сравнительную оценку размалываемости образцов ЦВВ. Из данных табл. 2 следует, что легче всего размалывается листовенная (березовая) ЦВВ, т. е. расход электроэнергии на размол этого полуфабриката примерно в 2 раза меньше, чем ЦВВ, полученной с включением в композицию стружек из хвойной и смеси хвойной и листовенной древесины. Расход электроэнергии при размоле зависит главным образом от содержания хвойной древесины в исходном сырье. Как видно из данных табл. 2, наибольшее количество электроэнергии требуется для размола ЦВВ из древесных отходов (стружки) из-за наличия в их составе отходов хвойной древесины. Расход электроэнергии на размол ЦВВ из смеси всех 3 образцов исходного сырья занимает промежуточное положение.

ЦВВ из смеси всех видов использованных древесных отходов (образцы 15 и 16) по разрывной длине несколько уступают этому полуфабрикату из березовых опилок, но все они соответствуют нормам для ЦВВ из березовой технологической щепы.

Образцы ЦВВ из березовых опилок, полученный авторами в лабораторных условиях на кафедре ПНИПУ, был передан в исследовательскую лабораторию ПЦБК для проведения испытаний с определением возможности и целесообразности использования полуфабриката в композиции картонно-бумажной продукции. В табл. 3 представлены показатели качества опытного образца ЦВВ по данным лаборатории предприятия.

Полученные характеристики опытного образца ЦВВ из березовых опилок сопоставимы с нормами для ЦВВ из технологической щепы (по регламенту предприятия) и даже несколько превышают их.

Таблица 3

Характеристика опытных образцов ЦВВ из березовых опилок
The characteristics of test samples of high-yield pulp from birch sawdust

Показатель ЦВВ (100 г/м ²)	ЦВВ из опилок	ЦВВ из технологической щепы по регламенту предприятия
Степень помола, °ШР	32	24...33
Разрывная длина, м	6320	Не менее 5000
Соппротивление продавливанию, кПа	458	Не менее 280
Удельное сопротивление разрыву, кН/м	8,47	Не менее 8,0
Соппротивление плоскостному сжатию, Н	370	Не менее 310
Соппротивление торцовому сжатию, кН/м	2,8	Не менее 1,9
Разрушающее усилие при сжатии кольца, Н	387	Не менее 353

Примечание: Приведены средние значения показателей 7 испытанных образцов целлюлозы.

На предприятии в исследовательской лаборатории проведены опытные испытания с использованием в композиции бумаги и картона целлюлозы из березовых опилок и полуфабрикатов из производственного потока: ЦВВ со степенью помола 29 °ШР; макулатурной массы марки МС-5Б (ММ) со степенью помола 27 °ШР. Получили 2 образца бумаги для гофрирования: 80 % ЦВВ предприятия и 20 % ММ (существующая); 80 % ЦВВ предприятия и 20 % ЦВВ из березовых опилок. Результаты этой серии опытов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Влияние композиционного состава бумажной массы на показатели качества бумаги для гофрирования
The influence of paper pulp composition on the quality indicators of fluting paper

Показатель полученной бумаги (135 г/м ²)	Образец из ЦВВ предприятия и ММ	Образец из ЦВВ предприятия и ЦВВ из опилок	ГОСТ 53206–2008 (125 г/м ²)
Степень помола, °ШР	30	32	–
Обезвоживаемость, с	36,4	38,3	–
Разрывная длина, м	5310	5670	–
Удельное сопротивление разрыву, кН/м	7,2	8,0	Не менее 8,0
Соппротивление продавливанию, кПа	489	487	Не менее 320
Соппротивление плоскостному сжатию, Н	319	386	Не менее 310
Соппротивление торцовому сжатию, кН/м	2,71	2,79	Не менее 1,35

Замена в композиции бумаги ММ опытной ЦВВ не снижает качество готовой продукции. Введение в композицию бумаги для гофрирования опытного образца (ЦВВ из опилок) увеличивает удельное сопротивление разрыву и сопротивление плоскостному сжатию, остальные показатели качества и обезвоживаемость остаются на прежнем уровне. Причем все показатели качества бумаги, в композиции которой использован опытный образец ЦВВ, соответствуют требованиям ГОСТ 53206–2008.

Для использования опытного полуфабриката из опилок березы при изготовлении картона получено 3 образца: 100 % ММ (существующая); 90 % ММ + 10 % опытного полуфабриката из опилок; 80 % ММ + 20 % опытного полуфабриката из опилок.

По данным табл. 5, оптимальным вариантом опытного полуфабриката является образец из 80 % ММ и 20 % ЦВВ из опилок. В сравнении с исходным вариантом (100 % ММ) абсолютное сопротивление продавливанию повысилось на 20 %, остальные показатели сохранились на прежнем уровне. Однако сопротивление продавливанию картонной массы ниже норм, прописанных в технических условиях, что объясняется низким значением этого показателя у ММ (303 кПа).

Таблица 5

Влияние композиционного состава картонной массы на качество картона
The influence of cardboard pulp composition on cardboard quality

Показатель полученного картона (135 г/м ²)	Образец из ММ	Образец из ММ (90 %) и ЦВВ из опилок (10 %)	Образец из ММ (80 %) и ЦВВ из опилок (20 %)	ТУ 5441-073-24086615–2014 (135 г/м ²)
Степень помола, °ШР	27	30	30	Не менее 27
Обезвоживаемость, с	28,3	31,0	32,3	–
Сопротивление продавливанию, кПа	303	356	363	Не менее 460
Прочность на излом (число двойных перегибов)	53	51	44	Не менее 10
Разрушающее усилие при сжатии кольца, Н	259	252	256	Не менее 150

Анализ полученных образцов картона выявил, что по всем показателям качества, кроме прочности на излом, образцы картона, изготовленные с использованием ЦВВ, имеют лучшие характеристики по сравнению с исходным образцом из 100 % ММ. Однако нормам ТУ не соответствует сопротивление продавливанию всех образцов, что связано с очень низким значением показателя ММ, присутствующей во всех образцах.

Из березовых опилок получается ЦВВ с хорошими показателями качества, особенно высокими механической прочностью и бумагообразующими свойствами, пригодная к использованию в композиции картона без ухудшения прочностных свойств готового продукта.

Выводы

1. Утилизация древесных отходов с целью их использования посредством включения в цикл основного производства с получением целлюлозно-бумажной продукции рациональна при изготовлении целлюлозы высокого выхода нейтрально-сульфитным способом по непрерывной и периодической технологиям. Получаемая целлюлоза соответствует нормам предприятия для целлюлозы высокого выхода из технологической щепы.

2. Стружка из хвойной древесины и смесь хвойных и лиственных стружек также могут служить сырьем для получения волокнистого полуфабриката высокого выхода, но только при использовании вместе с опилками из березовой древесины. Исследованные соотношения (стружка:опилки – 50:50 и 70:30) дают полуфабрикат, показатели качества которого соответствуют нормам предприятия для целлюлозы высокого выхода из технологической щепы.

3. Выход полуфабриката из сырья всех использованных композиций высок – 75...82 %.

4. Испытания опытного образца целлюлозы высокого выхода из березовых опилок показали, что полуфабрикат по качеству не уступает производственной целлюлозе высокого выхода и может быть использован в композициях бумаги и картона без ухудшения их характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Альберг Н.И., Санжиева С.Е., Салхофер С. Комплексное устойчивое управление отходами. Деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность. М.: Акад. естествознания, 2016. 308 с.

Al'berg N.I., Sanzhieva S.E., Salkhofer S. *Integrated Sustainable Waste Management. Woodworking and Pulp and Paper Industry*. Moscow, Academy of Natural History Publ., 2016. 308 p. (In Russ.).

2. Беловежец Л.А., Волчатова И.В., Медведева С.А. Перспективные способы переработки вторичного лигноцеллюлозного сырья // Химия растит. сырья. 2010. № 2. С. 5–16.

Belovezhets L.A., Volchatova I.V., Medvedeva S.A. Promising Methods for Processing Secondary Lignocellulosic Raw Materials. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2010, no. 2, pp. 5–16. (In Russ.).

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

Vasil'yeva T.V. The Review of Current Trends in the Use of Wood Waste Abroad // *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2002, no. 4, pp. 71–73. (In Russ.).

4. Гелес И.С. Древесная биомасса и основы экологически приемлемых технологий ее химико-механической переработки. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 382 с.

Geles I.S. *Wood Biomass and the Basics of Environment Friendly Technologies for its Chemical and Mechanical Processing*. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2001. 382 p. (In Russ.).

5. Гелес И.С. Древесное сырье – стратегическая основа и резерв цивилизации. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 500 с.

Geles I.S. *Wood Raw Materials – the Strategic Basis and Reserve of Civilization*. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2007. 500 p. (In Russ.).

6. Гелес И.С., Коржицкая З.А. Биомасса дерева и ее использование. Петрозаводск, 1992. 201 с.
Geles I.S., Korzhitskaya Z.A. *Wood Biomass and its Use*. Petrozavodsk, 1992. 201 p. (In Russ.).
7. Ефремов А.А., Первышина Г.Г. Комплексная схема переработки отходов растительного сырья // Химия растит. сырья. 2001. № 4. С. 123–124.
Efremov A.A., Pervyshina G.G. Comprehensive Scheme for Processing Waste Plant Materials. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2001, no. 4, pp. 123–124. (In Russ.).
8. Журавлёва Л.Н., Девятловская А.Н. Основные направления использования древесных отходов // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2007. № 18. С. 96–99.
Zhuravleva L.N., Devyatlovskaya A.N. The Main Directions of the Use of Wood Waste. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2007, no. 18, pp. 96–99. (In Russ.).
9. Иванов И.С. Развитие инновационных экотехнологий, базирующихся на использовании древесных отходов // Экономика и управление. 2009. № 12(50). С. 64–69.
Ivanov I.S. Development of Innovative Eco-Technologies Based on the Use of Wood Waste. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*, 2009, no. 12, pp. 64–69. (In Russ.).
10. Ковернинский И.Н., Комаров В.И., Третьяков С.И., Богданович Н.И., Соколов О.М., Кутакова Н.А., Селянина Л.И. Комплексная химическая переработка древесины / под ред. проф. И.Н. Ковернинского. Архангельск: АГТУ, 2003. 347 с.
Koverninskiy I.N., Komarov V.I., Tret'yakov S.I., Bogdanovich N.I., Sokolov O.M., Kutakova N.A., Selyanina L.I. *Complex Chemical Processing of Wood*. Ed. by prof. I.N. Koverninskiy. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2003. 347 p. (In Russ.).
11. Кузнецова С.А., Яценкова О.В., Данилов В.Г., Кузнецов Б.Н. Окислительная делигнификация древесины лиственницы в среде уксусная кислота – пероксид водорода – вода в присутствии катализатора H_2MoO_4 // Химия растит. сырья. 2005. № 4. С. 35–39.
Kuznetsova S.A., Yatsenkova O.V., Danilov V.G., Kuznetsov B.N. Oxidative Delignification of Larch Wood in the Acetic Acid – Hydrogen Peroxide – Water Medium in the Presence of H_2MoO_4 Catalyst. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2005, no. 4, pp. 35–39. (In Russ.).
12. Патент № 2721503 РФ, МПК D21C 3/00. Способ получения полуцеллюлозы: № 2018140804: заявл. 19.11.2018: опубл. 19.05.2020 / Ф.Х. Хакимова, О.А. Носкова, Е.А. Глезман, В.А. Житнюк, М.Н. Спасенников; заявитель и патентообладатель Перм. нац. исслед. политехн. ун-т.
Khakimova F.Kh., Noskova O.A., Glezman E.A., Zhitnyuk V.A., Spasennikov M.N. Method for Producing Semi-Cellulose. Patent RF, no. RU 2721503, 2018. (In Russ.).
13. Пен Р.З., Бывшев А.В., Шапиро И.Л., Мирошниченко И.В., Тарабанько В.Е. Низкотемпературная окислительная делигнификация древесины. 8. Пероксидная варка и щелочная экстракция // Химия растит. сырья. 2001. № 3. С. 5–10.
Pen R.Z., Byvshev A.V., Shapiro I.L., Miroshnichenko I.V., Taraban'ko V.E. Low-Temperature Oxidative Delignification of Wood. 8. Peroxide Pulp and Alkaline Extraction. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2001, no. 3, pp. 5–10. (In Russ.).
14. Пен Р.З., Бывшев А.В., Шапиро И.Л., Мирошниченко И.В., Тарабанько В.Е. Низкотемпературная окислительная делигнификация древесины. 9. Пероксидная варка древесины разных пород // Химия растит. сырья. 2001. № 3. С. 11–15.
Pen R.Z., Byvshev A.V., Shapiro I.L., Miroshnichenko I.V., Taraban'ko V.E. Low-Temperature Oxidative Delignification of Wood. 9. Peroxide Pulp of Different Wood Species. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2001, no. 3, pp. 11–15. (In Russ.).
15. Пен Р.З., Рязанова Т.В. Комплексная химическая переработка древесины. Введение в специальность. Красноярск: СибГТУ, 2012. 158 с.
Pen R.Z., Ryazanova T.V. *Complex Chemical Processing of Wood. Introduction to the Specialty*. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2012. 158 p. (In Russ.).

16. Полюттов А.А., Пен Р.З., Бывшев А.В. Технология целлюлозы. Экологически чистое производство: моногр. Красноярск: Краснояр. писатель, 2012. 294 с.

Polyutov A.A., Pen R.Z., Byvshv A.V. *Cellulose Technology. Environmentally Friendly Production*: Monograph. Krasnoyarsk, Krasnoyarski Pisatel Publ., 2012. 294 p. (In Russ.).

17. Сафин Р.Г., Саттарова З.Г., Хабибуллин И.Г., Зиятдинов Р.Р., Степанова Т.О. Современные направления переработки лесных ресурсов // Вестн. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 21. С. 90–93.

Safin R.G., Sattarova Z.G., Khabibullin I.G., Ziatdinov R.R., Stepanova T.O. Modern Trends in Forest Resources Processing. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2015, vol. 18, no. 21, pp. 90–93. (In Russ.).

18. Технология целлюлозно-бумажного производства: справ. материалы: в 3 т. Т. III. Автоматизация, стандартизация, экономика и охрана окружающей среды в ЦБП. Ч. 3. Наилучшие доступные технологии в целлюлозно-бумажной промышленности. СПб.: Политехника, 2012. 294 с.

Technology of Pulp and Paper Production: Reference Materials: in 3 vols. Vol. III. Automation, Standardization, Economics and Environmental Protection in Pulp and Paper Production. Part 3. Best Available Technologies in the Pulp and Paper Industry. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2012. 294 p. (In Russ.).

19. Фирсов А.И. Использование древесных отходов при очистке лесохимических стоков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 2-3. С. 116–123.

Firsov A.I. Use of Wood Wastes for Treatment of Effluents of Forest-Chemical Industry. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2003, no. 2-3, pp. 116–123. (In Russ.).

20. Хахимов Р.Х., Хахимова Ф.Х., Ковтун Т.Н. Применение аэродинамического диспергатора при подготовке макулатуры для использования в композициях бумаги и картона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 3. С. 121–128.

Khakimov R.Kh., Khakimova F.Kh., Kovtun T.N. Preparing of Wastepaper by Aerodynamic Disintegrator for Using in Paper and Board Composition. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2013, no. 3, pp. 121–128. (In Russ.).

21. Хахимова Ф.Х., Носкова О.А. Отходы лесозаготовок – сырье для волокнистых полуфабрикатов производства картона // Вестн. ПНИПУ. Хим. технология и биотехнология. 2017. № 3. С. 128–143.

Khakimova F.Kh., Noskova O.A. Waste from Logging of Trees as a Raw Material for Fibrous Semi-Finished Products for Cardboard Production. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* = Vestnik of Perm National Research Polytechnic University. Chemical Technology and Biotechnology, 2017, no. 3, pp. 128–143. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2017.3.11>

22. Хахимова Ф.Х., Носкова О.А., Шевелева С.А., Хахимов Р.Р. Утилизация отходов лесозаготовок с получением полуфабриката для картона // Вестн. ПНИПУ. Приклад. экология. Урбанистика. 2018. № 2(30). С. 60–73.

Khakimova F.Kh., Noskova O.A., Sheveleva S.A., Khakimov R.R. Recycling of Logging Waste to Produce Semi-Finished Material for Cardboard. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Priklandaya ekologiya. Urbanistika* = Vestnik of Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urbanistics, 2018, no. 2, pp. 60–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2018.02.05>

23. Abu Bakar N.H., Salim N. Challenges and Opportunities in Wood Waste Utilization. *Wood Waste Management and Products. Sustainable Materials and Technology*. Singapore, Springer, 2023, chapt. 1, pp. 1–13. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1905-5_1

24. Ämmälä A., Laitinen O., Sirviö J.A., Liimatainen H. Key Role of Mild Sulfonation of Pine Sawdust in the Production of Lignin Containing Microfibrillated Cellulose by Ultrafine Wet Grinding. *Industrial Crops & Products*, 2019, vol. 140, art. no. 111664. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111664>

25. Olszewski A., Kosmela P., Piszczyk Ł. A Novel Approach in Wood Waste Utilization for Manufacturing of Catalyst-Free Polyurethane-Wood Composites (PU-WC). *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, vol. 36, art. no. e00619. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00619>

26. Olaiya B.C., Lawan M.M., Olonade K.A. Utilization of Sawdust Composites in Construction = a Review. *Discover Applied Sciences*, 2023, vol. 5, art. no. 140. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05361-4>

27. Sirviö J.A., Isokoski E., Kantola A.M., Komulainen S., Ämmälä A. Mechanochemical and Thermal Succinylation of Softwood Sawdust in Presence of Deep Eutectic Solvent to Produce Lignin-Containing Wood Nanofibers. *Cellulose*, 2021, vol. 28, pp. 6681–6898. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03973-w>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article