

Оценка соотношения волокон осины и березы в целлюлозных полуфабрикатах методом ИК-Фурье-спектроскопии

Е.О. Окулова^a, А.В. Гурьев^b, М.А. Холмова^c

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, Архангельск, Россия

^a e.okulova@narfu.ru, ^b a.guriev@narfu.ru, ^c M.Holmova@narfu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-1798-1872>; ^b <https://orcid.org/0000-0002-3372-3286>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-0375-1884>

Статья поступила 14.04.2021, принята 03.09.2021

В Северо-Западном регионе РФ для получения лиственной целлюлозы в качестве сырья используют древесину осины и березы. Данные породы отличаются по физическим свойствам, химическому составу и структурно-морфологическим характеристикам. Эти особенности, в свою очередь, влияют на свойства получаемых целлюлозных полуфабрикатов. Однако при производстве волокнистых полуфабрикатов допускаются колебания породного состава, который влияет на физико-механические характеристики технической целлюлозы. Определение этих характеристик занимает продолжительное время. Данная работа посвящена исследованию возможности определения породного состава лиственных волокнистых полуфабрикатов из осины и березы методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) ИК-Фурье-спектроскопии. Сущность анализа заключается в получении экспресс-методом данных о доле осины и березы в исследуемом образце непосредственно с поверхности целлюлозных отливок без дополнительной пробоподготовки. В результате исследований построена линейная зависимость для прогнозирования количественной характеристики доли осины и березы, а также для прогнозирования физико-механических характеристик: сопротивления продавливанию, раздиранию и значениям разрывной длины. Сделан вывод о том, что данный способ подходит для оперативного контроля свойств лиственных волокнистых полуфабрикатов.

Ключевые слова: осина; береза; породный состав; метод НПВО-спектроскопии.

Estimation of the ratio of aspen and birch fibers in cellulose semi-finished products by FT-IR spectroscopy

E.O. Okulova^a, A.V. Guriev^b, M.A. Holmova^c

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia

^a e.okulova@narfu.ru, ^b a.guriev@narfu.ru, ^c M.Holmova@narfu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-1798-1872>; ^b <https://orcid.org/0000-0002-3372-3286>,

^c <https://orcid.org/0000-0002-0375-1884>

Received 14.04.2021, accepted 03.09.2021

In the North-West region of the Russian Federation, aspen and birch wood is used as raw material for the production of hardwood pulp. These trees differ in physical properties, chemical composition and structural and morphological characteristics. These features, in turn, affect the properties of the resulting cellulose semi-finished products. However, in the production of fibrous semi-finished products, fluctuations in the trees composition are allowed, which affects the physical and mechanical characteristics of technical cellulose. Determining these characteristics usually takes a long time. This work is devoted to the study of the possibility of determining the species composition of deciduous fibrous semi-finished products from aspen and birch by the method of attenuated total reflection (ATR) FT-IR spectroscopy. The main goal of the analysis is to obtain, by an express method, the data on the proportion of aspen and birch in the test sample directly from the surface of cellulose castings without additional sample preparation. As a result of the research, a linear dependence is built to predict the quantitative characteristics of the proportion of aspen and birch, as well as to predict the physical and mechanical characteristics: punching shear resistance, tearing and breaking length values. It is concluded that this method is suitable for operational control of the properties of deciduous fibrous semi-finished products.

Keywords: aspen; birch; species composition; ATR spectroscopy method.

Введение. Влияние различных свойств древесины осины и березы на свойства бумаги, полученной из этих пород, изучено достаточно подробно [1–5]. Известно, что эти породы отличаются, прежде всего, по плотности, которая, в свою очередь, зависит от соотношения структурно-анатомических элементов их дре-

весины. Различия в химическом составе древесины, плотности и структурно-морфологических особенностях волокон имеют существенное влияние на технологический процесс на всех этапах производства целлюлозы, а в конечном итоге и на физико-механические и

другие характеристики готовой продукции — технической целлюлозы, бумаги и картона.

Методы определения прочностных характеристик готовой продукции весьма продолжительны по времени. В качестве экспресс-метода Т.Е. Кармановой [6] был предложено использовать определение вязкости целлюлозы. Однако данный метод напрямую зависит только от числа Каппа и не зависит от породного состава исследуемых образцов. К недостаткам данного метода также можно отнести достаточно длительное время приготовления медно-аммиачного раствора.

В настоящее время спектроскопические методы являются одним из ведущих направлений для анализа химического состава большинства веществ и материалов, широко применяются для определения строения и структуры полимеров синтетического, искусственного и природного происхождения [7; 8]. Данные методы также широко используются для исследований различных компонентов древесины и их количественной оценки [8–12]. К преимуществам спектроскопических методов, кроме того, относят быстроту проведения исследования и неразрушающий способ определения искомым характеристикам.

Практический интерес представляет спектроскопия в инфракрасной области, так как в сочетании с использованием различных математических методов анализа она нашла применение в качестве инструмента контроля в различных точках производственного процесса [13–16].

Известно, что методы инфракрасной спектроскопии (ИК) основаны на свойствах молекул поглощать свет в инфракрасной области, преобразуя его в вибрацию этих молекул. При этом характер поглощения связан с атомами и связями в молекулах. Измеряя способность образца поглощать волну определенной длины, получаем совокупность длин волн поглощения, которые уникальны для каждого вещества и могут быть использованы для его идентификации или количественной оценки.

В методе нарушенного внутреннего полного отражения (НВПО) измерительный луч проходит через специальный кристалл, прижатый к исследуемому образцу на глубину 10–20 мкм. При этом ИК-излучение имеет строгую поляризацию и после многократных отражений выходит из кристалла и возвращается в прибор. Исследуя целлюлозные образцы с различным породным составом, метод НВПО позволяет оценить долевое соотношение связей, а результатом является изменение интенсивности полос поглощения и их положение.

Цель работы: оценить возможность использования метода НВПО ИК-Фурье-спектроскопии для экспресс-определения соотношения осины и березы в составе небеленой целлюлозы.

Методика исследования. Объектами исследования в данной работе являются образцы небеленой целлюлозы различного породного состава в виде лабораторных отливок. Для получения образцов целлюлозы провели серию лабораторных варок в варочной установке с вращающимися автоклавами CAS420. Предварительно готовили смесь щепы в весовом соотношении береза/осина: 0/100; 20/80; 40/60; 60/40; 80/20; 100/0. Пара-

метры режима: гидромодуль варки — 4; расход активной щелочи варьировался в зависимости от содержания в смеси березовой щепы и составлял от 42,7 до 48,3 г/л в ед. Na₂O; подъем температуры до 160 °С — 90 мин; стоянка — в течение 120 мин. В качестве варочного раствора использовали производственный белый щелок. Щепа для проведения эксперимента была получена в производственных условиях древесно-подготовительного цеха ОАО «Архангельский ЦБК» на рубительной машине ННQ из древесины осины и березы. Химический состав образцов осинового и березового щепы проводили согласно методике [17].

Число Каппа полученных волокнистых полуфабрикатов определяли согласно ГОСТ 10070–74.

Структурно-морфологические характеристики и фракционный состав определяли с помощью автоматического анализатора волокна L&W Fiber Tester.

Размол волокнистых полуфабрикатов проводили в мельнице Йокро до 20 °ШР. Лабораторные отливки получали массой 1 м² 60 г на листоотливном аппарате Рапид – Кетен.

Породный состав в образцах лабораторных отливок определяли методом компьютерной визуализации [18], основанном на определении породы древесины осины и березы по диагностическим признакам — наличию перфорационной пластинки на концах сосудов. Микроскопические исследования проводили при помощи оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Imager M2.m.

Инфракрасные (ИК) спектры записывали с поверхности отливок в пяти различных точках на ИК Фурье-спектрофотометре Vertex-70 фирмы Bruker с приставкой НВПО GladiATR производства фирмы Pike Tech. Кристалл — искусственный алмаз, разрешение 4 см⁻¹, количество параллельных сканирований образца 128, диапазон измерений 4000—400 см⁻¹.

Анализ спектров проводили с использованием программы для корреляционного анализа серий ИК-спектров [19].

Результаты и их обсуждение. Химический состав древесины осины и березы в целом различается незначительно. Как видно из табл. 1, древесина осины отличается повышенным содержанием целлюлозы, золы, смоляных и жирных веществ, а древесина березы — большим содержанием лигнина и легкогидролизуемых полисахаридов (ЛГП).

Таблица 1. Химический состав древесины осины и березы

Массовая доля, % от абс. сух. др.ев.	Береза	Осина
Целлюлоза по Кюшнеру	48,8	51,7
Лигнин по Комарову	20,5	19,5
ЛГП	23,7	19,5
Зольность	0,29	0,38
Смоли и жиры	1,65	1,92

Для получения целлюлозных полуфабрикатов использовали смесь щепы в весовом соотношении береза/осина: 0/100; 20/80; 40/60; 60/40; 80/20; 100/0. Полученные в результате сульфатной варки образцы целлюлозы имели практически идентичные значения числа

Каппа в диапазоне от 14,8 до 15,3. Как и ожидалось, с увеличением в образцах доли березы значения числа Каппа были выше.

Кроме того, породный состав сырья также влияет на выход целлюлозы. Наибольший выход (52,2 %) получен из осиновой щепы, выход из березовой щепы составил 49,7 %. Непровар во всех образцах отсутствовал.

Анализируя структурно-размерные характеристики полученных волокнистых полуфабрикатов (табл. 2), можно отметить, что средняя длина волокон либриформа увеличивается на 18 % с увеличением в смеси доли березы, а средняя ширина уменьшается на 8 %. В то же время, доля элементов сосудов с увеличением доли осины возрастает на 44 %. Значения средней дли-

ны и ширины сосудов с увеличением доли березы в образце увеличиваются на 36 и 7 % соответственно. При этом изменение длины и ширины волокон практически не влияет на фактор формы, т. е. на искривление проекции отдельных волокон.

Следует отметить, что доля мелочи (волокон размером до 0,2 мм) в волокнистых полуфабрикатах с увеличением содержания осины увеличивается на 68 % (рис. 1). В образце, содержащем только осинные волокна, эта доля составляет 57,9 %, а в образце, состоящем только из березовых волокон, — 30,2 %. При этом доля волокон размером больше 1,5 мм у всех проанализированных образцов составляет от 5,7 до 8,0 %.

Таблица 2. Структурно-морфологические характеристики волокон целлюлозы с различным породным составом

Доля осины, %	Средняя длина либриформа, мм	Средняя ширина либриформа, мкм	Фактор формы, %	Доля мелочи, %	Доля сосудов, %	Средняя длина сосуда, мм	Средняя ширина сосуда, мкм
100	0,963	26,1	90,8	2,23	1,33	0,528	0,141
80	0,994	25,8	90,7	1,93	1,27	0,550	0,141
60	1,007	24,5	90,7	2,17	1,21	0,540	0,137
40	1,055	24,7	90,2	1,73	1,02	0,599	0,142
20	1,122	24,7	91,2	1,63	1,05	0,641	0,145
0	1,136	24,1	91,0	1,33	0,93	0,716	0,151

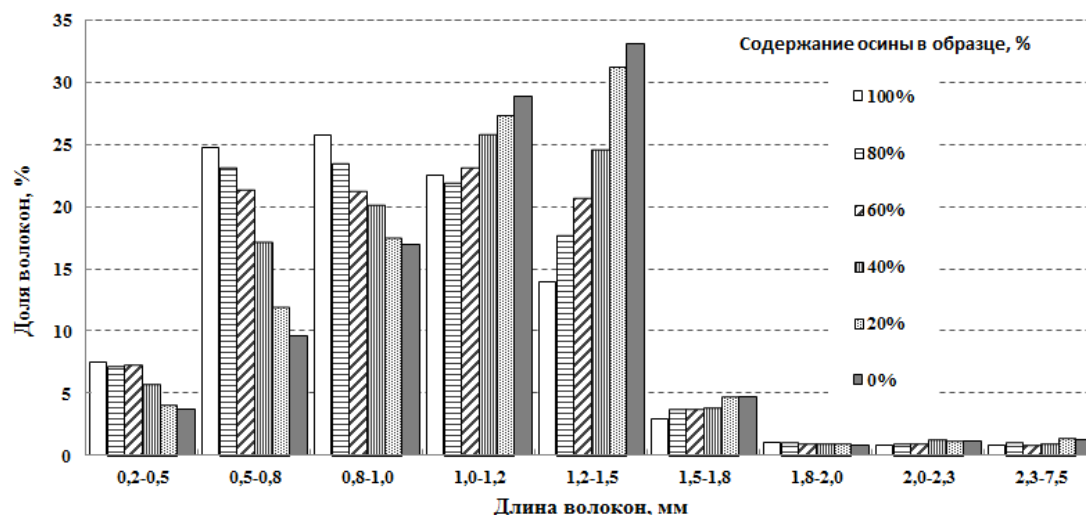


Рис. 1. Фракционный состав волокон целлюлозы с различным породным составом

Из целлюлозных полуфабрикатов изготовили лабораторные отливки, с поверхности которых записали инфракрасные спектры в пяти различных точках. У каждой отливки, используемой для записи спектров, предварительно определялся породный состав [18]. Следует отметить, что породный состав, определенный методом компьютерной визуализации, показал несовпадение доли весовых значений в щепе с долей сосудов осины и березы в волокнистых образцах.

Как видно на рис. 2, в спектрах образцов целлюлозы с различным породным составом наблюдается ряд отчетливых полос поглощения, которые характеризуют связи между компонентами [20].

Широкая интенсивная полоса поглощения в области 3200–3450 см⁻¹ вызвана валентными колебаниями групп ОН, включенных в водородную связь, полоса 2880–2920 — валентными колебаниями групп СН и СН₂.

В области 1420–1460 см⁻¹ расположены частоты деформационных колебаний групп СН, а также углов С—О—Н, а в областях 1365–1375 и 1250–1260 деформационные плоскостные и внешние соответственно.

Спектральные пики при 1160, 1105, 1067, 1059 обусловлены валентными колебаниями групп С—О—Н и С—О—С. Полосы поглощения с максимумами в областях 895 и 609 см⁻¹ наблюдаются для деформационных колебаний групп СН₂ и С—О—Н соответственно.

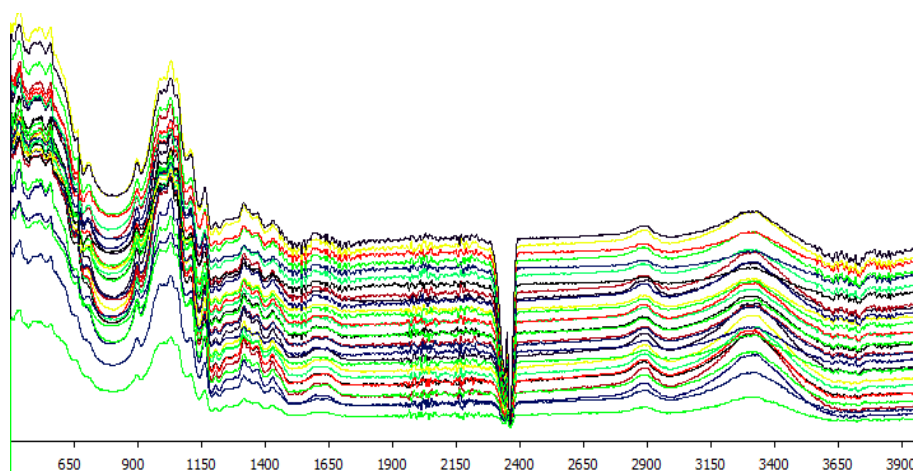


Рис. 2. Спектры образцов лиственной целлюлозы с различным породным составом

Сравнение спектров показало, что у всех образцов, несмотря на различный породный состав, некоторые спектральные полосы незначительно смещены относительно друг друга. Однако в остальных положения максимумов характеристических пиков различаются только интенсивностью (табл. 4), что может быть пропорционально связано с количественной оценкой соотношения волокон осины и березы в исследуемых образцах.

Далее анализ спектров проводили с использованием программы для корреляционного анализа серий ИК-спектров. Данная программа предназначена для обнаружения области спектров, в которых возможно применение ИК-спектроскопии для количественных изме-

рений. Программа автоматически обнаруживает взаимосвязи между соотношением оптических плотностей в сериях ИК-спектров и любым задаваемым параметром, графически представляет зависимости коэффициента корреляции и первой производной аппроксимационной прямой от волнового числа.

Для решения задачи нахождения соотношения породного состава волокон в образцах выбрали базовую полосу при 2889 см^{-1} , которая при соотношении с полосой 1161 см^{-1} показала хорошую линейную зависимость с коэффициентом корреляции $R = 0,93$. Статистические характеристики показаны в табл. 5.

Таблица 4. Характеристические пики образцов с разным породным составом

Вид колебаний	Основные полосы поглощения	Соотношение березы/осины в щепе, %					
		100/0	80/20	60/40	40/60	20/80	0/100
Валентные гидроксильных групп, включенных в водородную связь, и групп CH_2 , CH	3200–3450	3 327	3 323	3 314	3 325	3 296	3 296
	2 900	2 889	2 889	2 889	2 889	2 889	2 889
Внутренние деформационные групп C—OH , CH (ножничные)	1420–1460	1 427	1 427	1 427	1 427	1 427	1 427
Деформационные плоскостные	1300–1400	1 367	1 364	1 367	1 364	1 367	1 367
Внешние деформационные (всерные)	1200–1300	1 259	1 248	1 248	1 246	1 248	1 248
Валентные групп C—O—H и C—O—C	1100–1200	1 161	1 161	1 161	1 161	1 161	1 161
		1 105	1 105	1 105	1 105	1 105	1 105
		1 067	1 067	1 067	1 067	1 067	1 067
		1 059	1 059	1 059	1 059	1 059	1 059
Внешние деформационные (маятниковые) групп CH_2	800–950	895	895	895	895	895	895
Внеплоскостные деформационные групп C—O—H	400–700	609	609	609	609	609	609

Таблица 5. Статистические характеристики пиков

Доля осины в щепе, %	Доля сосудов осины в волокне, %	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$X_{\text{ср}}$	СКО, %
0	0	0,55985	0,51238	0,54782	0,61086	0,63189	0,57256	0,04
20	40,0	0,58265	0,58750	0,59812	0,64860	0,67053	0,61748	0,04
40	68,8	0,74737	0,77492	0,73897	0,73337	0,77959	0,75484	0,02
60	82,3	0,73646	0,73622	0,75082	0,81275	0,80957	0,76916	0,03
80	90,1	0,79470	0,78997	0,79066	0,86361	0,83319	0,81443	0,03
100	100	0,87208	0,83198	0,85718	0,82968	0,84772	0,84773	0,02

По полученным данным построили калибровочный график, показанный на рис. 3. Кроме того, построили калибровочные графики для стандартных физико-механических характеристик — сопротивления про-

давлению, сопротивления раздиранию и значениям разрывной длины. Коэффициенты корреляции для этих параметров составили 0,87; 0,83 и 0,78 соответственно.

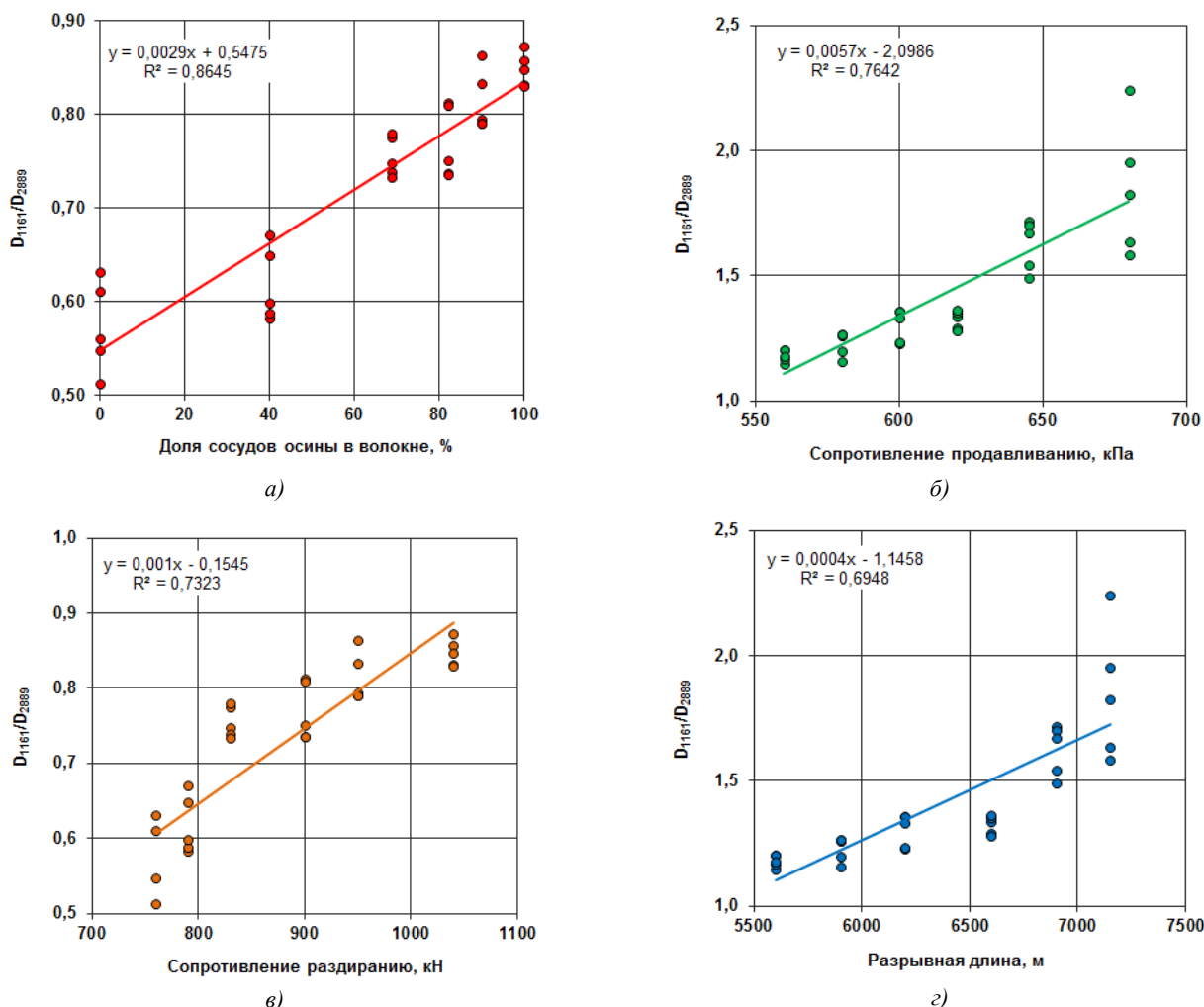


Рис. 3. Калибровочные графики для оценки свойств небеленой сульфатной целлюлозы с различным породным составом: а — определения количественного соотношения доли осины и березы; прогнозирования: б — сопротивления продавливанию; в — сопротивления раздиранию; з — разрывной длины

Выводы

1. Метод НВПО ИК-Фурье-спектроскопии поверхности лабораторных целлюлозных образцов с различным породным составом в перспективе может быть применен для экспресс-прогнозирования различных физико-механических свойств и может использоваться в качестве метода оперативного контроля.

2. Наилучшие значения коэффициента корреляции были получены для определения породного состава лиственных полуфабрикатов (0,93); для прогнозирования физико-механических характеристик, таких как

сопротивление продавливанию, раздиранию и разрывной длины и находятся в диапазоне от 0,87 до 0,78.

3. Недостатком метода является необходимость разработки эталонной модели для построения калибровочной кривой. Причем точность метода напрямую зависит от качества образцов для калибровочного графика.

Работа выполнена в Инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» и ЦКПНО «Арктика» (Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова) при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература

1. Бобров А.И., Мутовина М.Г., Бондарева Т.А., Малышкина В.К. Производство волокнистых полуфабрикатов из лиственной древесины. М.: Лесная пром-сть, 1984. 248 с.
2. Fiserova M., Gigac J. Comparison of hardwood kraft pulp fibre characteristics and tensile strength // Cellulose Chem. Technol. 2011. № 45 (9-10). P. 627-631.
3. Тимофеева Е.К., Письменский П.И., Шкирандо Т.П. Соловьева Т.В. Исследование влияния породного состава лиственной древесины на свойства термомеханической массы и полученной из неё бумаги // Труды БГТУ. 2015. № 4 (177). С. 171-174.
4. Севастьянова Ю.В., Комаров В.И., Миловидова Л.А. Влияние параметров варки и породного состава на характеристики деформативности и прочности лиственной суль-

- фатной целлюлозы // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы I Междунар. науч.-технической конф. (13-17 сент. 2011 г. САФУ им. М.В. Ломоносова). Архангельск, 2011. С. 110-115.
5. Плахин В.А., Севастьянова Ю.В. Влияние породного состава на свойства лиственной полуцеллюлозы для производства флютинга // Химия и химическая технология переработки растительного сырья: материалы докладов Междунар. науч.-технической конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В.М. Резникова (10-12 окт. 2018 г.). Минск, 2018. С. 167-172.
 6. Карманова Т.Е. Взаимосвязь вязкости сульфатных небеленых целлюлоз с фундаментальными, деформационными и прочностными свойствами: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2012. 143 с.
 7. Huang A., Zhou Q., Liu J., Fei B., Sun S. Distinction of three wood species by Fourier transform infrared spectroscopy and two-dimensional correlation IR spectroscopy // Journal of Molecular Structure. 2008. V. 883-884. P. 160-166.
 8. Kelley S., Rials T., Snell R., Groom L., Sluiter A. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood // Wood Sci Technol. 2004. № 38. P. 257-276.
 9. Russ A., Fišerová M. Estimation of hardwood species in mixture by near infrared spectroscopy Wood research. 2011. V. 56 (1). P. 93-103.
 10. Fiona S., Poke F., Raymond C. Predicting Extractives, Lignin, and Cellulose Contents Using Near Infrared Spectroscopy on Solid Wood in Eucalyptus globulus // Journal of Wood Chemistry and Technology. 2006. V. 26. № 2. P. 187-199.
 11. Yang Z., Lu B., Huang A.M., Liu Y.N., Xie X.Q. Rapid identification of softwood and hardwood by near infrared spectroscopy of cross-sectional surfaces // Spectroscopy and spectral analysis. 2012. V. 32. № 7. P. 1785-1789.
 12. Хвиюзов С.С., Боголицын К.Г., Гусакова М.А., Зубов И.Н. Оценка содержания лигнина в древесине методом ИК Фурье-спектроскопии // Фундаментальные исследования. 2015. № 9-1. С. 87-90.
 13. Tsuchikawa S., Kobori H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. J Wood Sci. 2015. V. 61. P. 213-220.
 14. Cadet F., Guardia de la M. Quantitative Analysis, Infrared // Encyclopedia of Analytical Chemistry, published by John Wiley & Sons, Ltd. 38 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/258836935_Quantitative_Analysis_Infrared_2012.
 15. Brink M., Mandenius C-F., Skoglund A. On-line predictions of the aspen fibre and birch bark content in unbleached hardwood pulp, using NIR spectroscopy and multivariate data analysis // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2010. V. 103. P. 53-58.
 16. Shen W., Chen X. Measuring and Controlling Model of Pulp Kappa Number with Spectroscopy during Batch Sulfite Pulping Process // Ind. Eng. Chem. Res. 2009. № 48. P. 8980-8984.
 17. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
 18. Гурьев А.В., Майоров И.С., Чухчин Д.Г., Окулова Е.О. Программа для идентификации и определения соотношения волокон берёзы и осины в технической целлюлозе: свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015618595. Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО САФУ № 2015615268; заявл. 17.06.2015; опубл. 12.08.2015. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.
 19. Чухчин Д.Г. Программа для корреляционного анализа серий ИК-спектров: свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018661852. Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО САФУ № 2018616255; заявл. 19.06.2018; опубл. 20.08.2018. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.
 20. Жбанков Р.Г. Инфракрасные спектры целлюлозы и её производных. Минск: Изд-во «Наука и техника», 1964. 338 с.

References

1. Bobrov A.I., Mutovina M.G., Bondareva T.A., Malyshkina V.K. Production of hardwood fibrous semi-finished. M.: Lesnaya prom-st', 1984. 248 p.
2. Fiserova M., Gigac J. Comparison of hardwood kraft pulp fibre characteristics and tensile strength // Cellulose Chem. Technol. 2011. № 45 (9-10). P. 627-631.
3. Timofeeva E.K., Pis'menskij P.I., SHkirando T.P. Solov'eva T.V. Research of influence of hardwood species composition on properties of thermomechanical pulp (TMP) and paper made from it // Trudy BG TU. 2015. № 4 (177). P. 171-174.
4. Sevast'yanova YU.V., Komarov V.I., Milovidova L.A. Influence of cooking parameters and rock composition on the characteristics of deformability and strength of hardwood sulfate cellulose // Problemy mekhaniki cellyulozno-bumazhnyh materialov: materialy I Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. (13-17 sent. 2011 g. SAFU im. M.V. Lomonosova). Arhangel'sk, 2011. P. 110-115.
5. Plahin V.A., Sevast'yanova YU.V. The influence of the species composition on the properties of hardwood semi-cellulose for the production of fluting // Himiya i himicheskaya tekhnologiya pererabotki rastitel'nogo syr'ya: materialy докладов Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.M. Reznikova (10-12 okt. 2018 g.). Minsk, 2018. P. 167-172.
6. Karmanova T.E. Relationship between the viscosity of unbleached sulfate pulps with fundamental, deformation and strength properties: dis. ... kand. tekhn. nauk. Arhangel'sk, 2012. 143 p.
7. Huang A., Zhou Q., Liu J., Fei B., Sun S. Distinction of three wood species by Fourier transform infrared spectroscopy and two-dimensional correlation IR spectroscopy // Journal of Molecular Structure. 2008. V. 883-884. P. 160-166.
8. Kelley S., Rials T., Snell R., Groom L., Sluiter A. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood // Wood Sci Technol. 2004. № 38. P. 257-276.
9. Russ A., Fišerová M. Estimation of hardwood species in mixture by near infrared spectroscopy Wood research. 2011. V. 56 (1). P. 93-103.
10. Fiona S., Poke F., Raymond C. Predicting Extractives, Lignin, and Cellulose Contents Using Near Infrared Spectroscopy on Solid Wood in Eucalyptus globulus // Journal of Wood Chemistry and Technology. 2006. V. 26. № 2. P. 187-199.
11. Yang Z., Lu B., Huang A.M., Liu Y.N., Xie X.Q. Rapid identification of softwood and hardwood by near infrared spectroscopy of cross-sectional surfaces // Spectroscopy and spectral analysis. 2012. V. 32. № 7. P. 1785-1789.
12. Hviyuzov S.S., Bogolicyn K.G., Gusakova M.A., Zubov I.N. Estimation of lignin content in wood by FTIR spectroscopy // Fundamental research. 2015. № 9-1. P. 87-90.
13. Tsuchikawa S., Kobori H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. J Wood Sci. 2015. V. 61. P. 213-220.
14. Cadet F., Guardia de la M. Quantitative Analysis, Infrared // Encyclopedia of Analytical Chemistry, published by John Wiley & Sons, Ltd. 38 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/258836935_Quantitative_Analysis_Infrared_2012.
15. Brink M., Mandenius C-F., Skoglund A. On-line predictions of the aspen fibre and birch bark content in unbleached hardwood pulp, using NIR spectroscopy and multivariate data analysis // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2010. V. 103. P. 53-58.

16. Shen W., Chen X. Measuring and Controlling Model of Pulp Kappa Number with Spectroscopy during Batch Sulfite Pulping Process // Ind. Eng. Chem. Res. 2009. № 48. P. 8980-8984.
17. Obolenskaya A.V., El'nickaya Z.P., Leonovich A.A. Laboratory work on wood and cellulose chemistry. M.: Ekologiya, 1991. 320 p.
18. Gur'ev A.V., Majorov I.S., CHuhchin D.G., Okulova E.O. Program for identification and determination of the ratio of birch and aspen fibers in technical cellulose: svid. o gos. registracii programmy dlya EVM № 2015618595. Ros. Federaciya / zayavitel' i pravoobladatel' FGAOU VO SAFU № 2015615268; zayavl. 17.06.2015; opubl. 12.08.2015. Reestr programm dlya EVM. 1 p.
19. CHuhchin D.G. Program for the correlation analysis of IR spectra series: svid. o gos. registracii programmy dlya EVM № 2018661852. Ros. Federaciya / zayavitel' i pravoobladatel' FGAOU VO SAFU № 2018616255; zayavl. 19.06.2018; opubl. 20.08.2018. Reestr programm dlya EVM. 1 p.
20. ZHbankov R.G. Infrared spectra of cellulose and its derivatives. Minsk: Izd-vo «Nauka i tekhnika», 1964. 338 p.