



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.16.022.6.034

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-3-169-183

Характеристика полей локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги

М.М. Лысаченкова, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1155-0032>

Я.В. Казаков[✉], д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

Д.Г. Чухчин, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [O-9487-2015](https://orcid.org/0000-0003-3250-8469),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3250-8469>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; m.lisachenkova@narfu.ru, j.kazakov@narfu.ru[✉], d.chuhchin@narfu.ru

Поступила в редакцию 16.09.24 / Одобрена после рецензирования 26.12.24 / Принята к печати 27.12.24

Аннотация. Представлены результаты сравнительной оценки физико-механических характеристик упаковочной влагопрочной бумаги из хвойной и лиственной беленой целлюлозы. Неразрушающими и разрушающими методами выполнены измерения образцов бумаги 60 г/м², размерами 120×120 мм, размеченных на квадраты 15×15 мм. Получены поля характеристик на локальных участках. Кроме толщины и неоднородности просвета с применением ИК-спектроскопии неразрушающего полного внутреннего отражения определены параметры локальной степени анизотропии и угла ориентации волокон. Установлены физико-механические показатели при испытании на растяжение образцов малой длины. Выявлено, что флокулы и промоины в листе бумаги, визуально выражающиеся в неоднородности просвета, вносят решающий вклад в наличие локальной неоднородности анизотропии и вариацию деформационных и прочностных характеристик бумаги. Вариация неоднородности просвета, измеренная на отдельных участках, превышает 11 % при вариации толщины не более 3 %. Коэффициент вариации деформационных характеристик в несколько раз больше коэффициента вариации для толщины образца и зависит от области деформирования, в которой измерены показатели. Анализ экспериментальных данных и их статистическая обработка позволили получить визуальное представление о распределении локальных характеристик структуры, а также деформационных и прочностных свойств. По гистограммам распределения и полям локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги установлена очень высокая вариация параметров структуры и преобладание участков с пониженной анизотропией по сравнению с участками с большой анизотропией. Обнаружено соответствие полей локальных прочностных характеристик: максимальное напряжение, удлинение до максимальной нагрузки и работа разрушения. Показано, что вариация механических характеристик увеличивается при переходе от упругой зоны деформирования к зоне разрушения и максимальна для параметров, интегрально описывающих деформационные и прочностные свойства, таких как работа разрушения.



Ключевые слова: бумага, структура, анизотропия, деформационные свойства, ориентация волокна, вариация свойств

Для цитирования: Лысаченкова М.М., Казаков Я.В., Чухчин Д.Г. Характеристика полей локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 3. С. 169–183. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-169-183>

Original article

Characteristics of Local Anisotropy Fields of Paper Structure and Deformation Properties

Mariya M. Lysachenkova, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1155-0032>

Yakov V. Kazakov✉, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-4634-2012](https://orcid.org/0000-0001-8505-5841),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-5841>

Dmitry G. Chukhchin, Candidate of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-9487-2015](https://orcid.org/0000-0003-3250-8469),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3250-8469>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; m.lisachenkova@narfu.ru, j.kazakov@narfu.ru✉, d.chukhchin@narfu.ru

Received on September 16, 2024 / Approved after reviewing on December 26, 2024 / Accepted on December 27, 2024

Abstract. The results of a comparative assessment of the physical and mechanical characteristics of moisture-resistant packaging paper made of bleached softwood and hardwood pulp are presented. Non-destructive and destructive methods have been used to measure 60 g/m² paper samples measuring 120×120 mm, divided into squares of 15×15 mm. The fields of characteristics in local areas have been obtained. In addition to the thickness lookthrough heterogeneity, the parameters of the local degree of anisotropy and the angle of orientation of the fibers have been determined using non-destructive total internal reflection IR-spectroscopy. Physical and mechanical properties have been determined during tensile testing of short-length samples. It has been revealed that floccules and gullies in a sheet of paper, visually expressed in the heterogeneity of the lookthrough, make a decisive contribution to the presence of local heterogeneity of anisotropy and the variation in the deformation and strength characteristics of the paper. The variation in the lookthrough heterogeneity measured in individual sections exceeds 11 % with a thickness variation of no more than 3 %. The coefficient of variation of deformation characteristics is several times greater than the coefficient of variation for the sample thickness and depends on the deformation area in which the parameters are measured. Analysis of experimental data and their statistical processing has made it possible to obtain a visual representation of the distribution of local characteristics of the structure, as well as deformation and strength properties. According to the distribution histograms and fields of local anisotropy of the structure and deformation properties of the paper, a very high variation in the structure parameters and the predominance of areas with reduced anisotropy compared to areas with high anisotropy have been established. A correspondence has been found between the fields of local strength characteristics: maximum strength, elongation to maximum load, and fracture work. It has been shown that the variation of mechanical characteristics increases with the transition from the elastic deformation zone and is maximum for parameters that integrally describe deformation and strength properties, such as fracture work.



Keywords: paper, structure, anisotropy, deformation properties, fiber orientation, properties variation

For citation: Lysachenkova M.M., Kazakov Ya.V., Chukhchin D.G. Characteristics of Local Anisotropy Fields of Paper Structure and Deformation Properties. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 3, pp. 169–183. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-3-169-183>

Введение

Бумага как капиллярно-пористый материал обладает анизотропной и неоднородной структурой, которую образуют стохастически распределенные в плоскости листа обработанные растительные волокна, связанные между собой силами межволоконных связей [19].

Неоднородность макроструктуры бумаги, вызванная процессами флокуляции при отливе, приводит к неоднородности ряда характеристик материала, таких как масса 1 м², толщина, плотность, и, как следствие, вариации прочностных и деформационных свойств на соседних участках.

Волокна в структуре бумаги различны по размерам, форме и неоднородно направлены ориентированы. Неоднородность структуры обеспечивают флокулы и промоины. Анизотропию структуры определяет преимущественная ориентация волокон в машинном направлении. При этом в локальных флокулах и промоинах направленность волокон может отличаться. Наличие вспомогательных веществ (наполнителей, гидрофобизирующих и упрочняющих веществ, флокулянтов и пр.) вносит вклад в неоднородность структуры полотна [12].

Для интегральной оценки неоднородности макроструктуры бумаги наибольшее распространение получили измерения неоднородности полотна на просвет с применением оптических методов для анализа равномерности светового потока, проходящего сквозь лист бумаги [4].

Физико-механические свойства целлюлозных волокнистых листовых материалов в основном зависят от прочности химических внутримолекулярных и водородных связей разных типов: внутри и межмолекулярных в целлюлозных кристаллитах, межфибриллярных в структуре стенки волокна и межволоконных в бумажном листе.

Отмеченные особенности строения структуры обуславливают анизотропию и неоднородность физико-механических свойств бумаги. При приложении к образцу бумаги внешней нагрузки в структуре материала инициируется возникновение концентраций напряжений в меж- и внутриволоконных связях, величина которых зависит от количества контактов, их площади и ориентации волокон на локальном участке [15].

Растительные волокна являются основными элементами макроструктуры бумаги и состоят из природных полимеров – целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Поэтому логичным представляется рассматривать структуру и свойства целлюлозных материалов с позиций физикохимии растительных полимеров и применять соответствующие методы анализа [2, 10].

Для исследования химического состава, свойств и строения полимеров целлюлозно-бумажных материалов в мировой научной практике широко используется ИК-спектроскопия [8, 21, 22, 27, 29]. Применение классических

методов ИК-спектроскопии позволяет установить, например, различия компонентного состава травяных целлюлоз с одной стороны и хлопковой и древесных с другой [6, 20].

ИК-спектроскопия дает возможность оценить количество лигнина, экстрактивных веществ и целлюлозы в древесном сырье [26, 28], а также выход крафт-целлюлозы, содержание в ней целлюлозы [23]. С помощью Фурье ИК-спектроскопии изучают состав исторических образцов бумаги и степени их деградации в течение времени [7, 9].

Поверхность бумаги является оптически неоднородной системой со специфическим расположением дискретных целлюлозных волокон. Для анализа состава подобных структурно-неоднородных материалов применяют ИК-спектроскопию нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Метод основан на физических явлениях, которые возникают при отражении света на границе раздела 2 сред с разной оптической плотностью. Спектр ИК-спектроскопии НПВО имеет характеристики и форму, аналогичные спектру поглощения пропускания, что позволяет легко сравнивать его с последним. Технология ИК-спектроскопии НПВО обладает преимуществами, обуславливающими эффективность использования способа для исследования свойств бумаги: это неразрушающий метод; отсутствуют требования к размеру и форме образца; возможно получение спектров образцов, содержащих влагу [11].

Авторы работы [14] оценили возможности Фурье ИК-спектроскопии для определения относительного содержания волокон осины и березы в лиственной производственной целлюлозе.

Применение метода ИК-спектроскопии НПВО в целях изучения структуры полимеров в основном связано с определением ориентации макромолекул при анализе материалов с дихроизмом, поскольку метод позволяет выявить интенсивность поглощения для всех 3 пространственных координат и дает информацию о направлении расположения молекул в поверхностном слое [11]. Итогом измерений служит количественная оценка степени кристалличности полимерных материалов с анизотропной структурой.

В литературе описаны примеры использования ИК-спектроскопии НПВО для определения степени кристалличности целлюлозы при различных обработках материала [25].

В результате технологических воздействий на волокна в процессах выделения технической целлюлозы из растительного сырья и изготовления из нее бумаги изменяется химический состав и состояние стенки волокна, это проявляется в том, что интенсивность и ширина полос поглощения ИК-спектра, а также их положение становятся отличными от исходных. Анализ ИК-спектров позволяет дать количественную оценку происходящих сдвигов.

Ранее было установлено, что анализ ИК-спектров делает возможным установление степени анизотропии образца и среднего угла ориентации волокон в целлюлозосодержащем образце [24]. Причем для проведения измерений достаточно образца малых размеров, что открывает перспективы для построения карты распределения параметров структуры в материале.

Сопоставление данных спектроскопии с результатами традиционных неразрушающих (оптических, ультразвуковых) методов и определение взаимосвязей между различными параметрами структуры обеспечивает переход к тех-

нологии экспресс-анализа структуры и позволяет найти пути прогнозирования физико-механических свойств целлюлозно-бумажных материалов без проведения разрушающих испытаний.

Целью данной работы является сравнительная статистическая оценка локальной вариации параметров структуры и прочности образцов промышленной бумаги с анизотропией и неоднородностью структуры.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стала упаковочная влагопрочная бумага массой 60 г/м². Композиция по волокну включает хвойную и лиственную товарную сульфатную беленую целлюлозы в соотношении 1:1. В композицию бумаги введены наполнитель и химикаты для обеспечения влагопрочности и гидрофобности.

Сначала были определены неразрушающие характеристики на целом образце бумаги [13]: жесткость при растяжении ультразвуковым методом и анизотропия структуры на приборе L&W TSO Tester [3]; толщина бумаги на приборе L&W Micrometer по ГОСТ 27015–86; неоднородность формования на анализаторе формования РТА-Line Formation Tester [1]; неоднородность структуры по ОСТ 13-299–87. Номенклатура показателей и применяемые алгоритмы описаны в работах [5, 12], использовано программное обеспечение [17].

Для характеристики полей локальной неоднородности структуры и свойств образец бумаги 120×120 мм был размечен на 64 квадрата 15×15 мм (рис. 1).

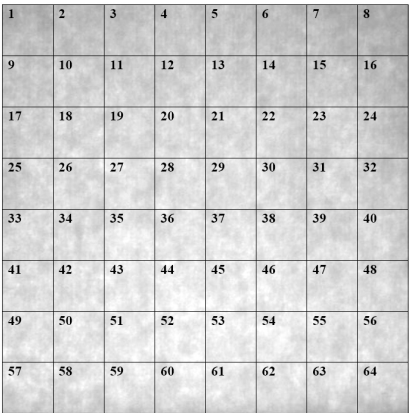


Рис. 1. Исследованный образец бумаги, размеченный на квадраты

Fig. 1. The examined paper sample, marked up into squares

На каждом квадрате выполнены измерения:

а) неоднородности структуры – среднеквадратическое отклонение яркости пикселей проходящего света от среднего значения; толщины (мкм); локальной анизотропии методом ИК-спектроскопии НПВО – степень анизотропии и средний угол ориентации волокон на участке [24].

б) деформативности и прочности при растяжении, измеренных при помощи разрывной машины ИТС-105, для полосок шириной 15 мм, вырезанных в машинном направлении, с расположением зажимов в пределах размеченных квадратов, при расстоянии между зажимами 10 мм, скорость – 10 мм/мин.

Для регистрации диаграмм «нагрузка–удлинение» и расчета деформативности и прочности использовано программное обеспечение [16]. В харак-

терных точках кривой деформирования определены предел упругости, максимальная жесткость (максимальный угол наклона касательной) и нагрузка (H), напряжение (МПа), удлинение (мм), деформация (%), модуль упругости (МПа), работа нагружения (мДж).

Параметры локальной анизотропии установлены методом ИК-спектроскопии НПВО. ИК-спектры образцов снимали на Фурье-спектрометре Vertex 70 (Bruker, Германия), приставка НПВО GladiATR (Pike Tech., США), материал кристалла НПВО – искусственный алмаз. Условия анализа: строгая поляризация ИК-излучения, диапазон записи спектров – $4000 \dots 400 \text{ см}^{-1}$, разрешение – 4 см^{-1} , количество параллельных сканирований образца – 128. Для обработки спектров использовали собственное программное обеспечение [18], позволяющее анализировать разницу в спектрах и строить зависимости отношения интенсивности поглощения полос различных функциональных групп от условий проведения анализа.

Использован ранее установленный факт [15], что при последовательном повороте образца относительно оптической оси спектрометра на угол до 360° в спектрах наблюдаются изменения, имеющие периодический характер. Наибольшая чувствительность к углу поворота образца свойственна полосе при волновом числе 933 см^{-1} – деформационные колебания С–О связи пиранозного кольца, а наименьшая – 489 см^{-1} , это внеплоскостные деформационные колебания гидроксильных групп [2]. Отношение данных оптических плотностей D_{933}/D_{489} принято для количественной характеристики наблюдаемых изменений.

Изменения отношения D_{933}/D_{489} описываются гармониками вида

$$Y = A \sin(Bx + \varphi) + C,$$

где A – амплитуда; B – частота, $B = 2$; C – смещение по Y ; φ – фаза.

Аппроксимация полученных зависимостей гармониками была проведена в MS Excel с использованием пакета оптимизации «Поиск решения». Определение коэффициентов A , C , φ осуществлялось по критерию минимума квадратов отклонений экспериментальных и расчетных значений. Параметр A использован для количественной оценки степени анизотропии образца, а параметр φ – угла преимущественной ориентации волокон в образце [15, 24].

Результаты исследования и их обсуждение

Предварительно по стандартным и общепринятым методикам неразрушающими методами были выявлены интегральные физико-механические свойства исследованного образца бумаги:

Плотность	0,983 г/см ³
Толщина листа	60 мкм
Влагопрочность	10,5 %
Индекс формования	77,3
Вклад в индекс формования флокул, размером	
1 мм	23,1
2 мм	12,1
3 мм	21,6
6 мм	9,2
10 мм	5,7
16 мм	5,6

Средний размер флокул.....	5,1 мм
Неоднородность структуры по ГОСТ 13-299–87	
Неоднородность	19,3
Индекс просвета.....	1,8
Средний размер флокул.....	6,5 мм
Жесткость при растяжении (ультразвуковой метод L&W TSO Tester)	
TSI_{MD}/TSI_{CD}	12,9/5,3 кН·м/г
TSO_{angle}	0,04°
$TSI_{MD/CD}$	2,43 кН·м/г

Из приведенных числовых значений видно, что бумага достаточно тонкая, с относительно высокой плотностью, обусловленной интенсивным размолом полуфабрикатов и введением в композицию наполнителей. Степень анизотропии образца по жесткости при растяжении составила 2,43, что является типичным для бумаги промышленного производства, а угол TSO оказался близок к нулю.

Данная бумага имеет неоднородную структуру, визуально определяемую на просвет, видны крупные и мелкие флокулы и промоины. Количественная оценка качества формования показала, что индекс формования по методике PTA-Line Formation Tester примерно соответствует значениям для офисной бумаги, которое может составлять от 65 до 120 [1]. В структуре выявлены неоднородности разных размеров, от 1 до 16 мм. Эти неоднородности представляют собой микрофлокулы, геометрическая форма которых достаточно разнообразна и часто несимметрична, а средний размер определен как 5,1 мм и различается в направлении MD/CD 4,6/5,5 мм. Неоднородность просвета по ГОСТ 13-299–87 была больше, чем для офисных видов бумаги – 16,5...19,6, а индекс просвета, вычисляемый как отношение высоты гистограммы распределения яркости пикселей к ее ширине, совпал с диапазоном для офисных и типографских видов бумаги – 1,6...2,3 [1].

Соответственно, неравномерность и анизотропия структуры данного образца бумаги должны вызывать вариацию структурных, деформационных и прочностных свойств на локальных участках.

Для получения количественной характеристики полей локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги, проведены измерения на каждом локальном участке образца. Они выполнены в одних и тех же точках, сначала – неразрушающими методами (толщина, неоднородность просвета, параметры локальной анизотропии методом ИК-спектроскопии), а затем образец по линиям разметки был разрезан на полоски и проведены испытания на растяжение.

Примеры получаемых диаграмм «напряжение–деформация» представлены на рис. 2. Из данных следует, что механическое поведение при растяжении у структуры бумаги различается в соседних областях, наблюдаются отличия в ходе кривых на начальном участке, характеризующем жесткость, и в зоне предразрушения, а также в максимальных прочности и растяжимости. Следовательно, для образцов свойственны разные прочность и жесткость на локальных участках, что связано с неоднородностью структуры и различиями в локальной анизотропии бумаги.

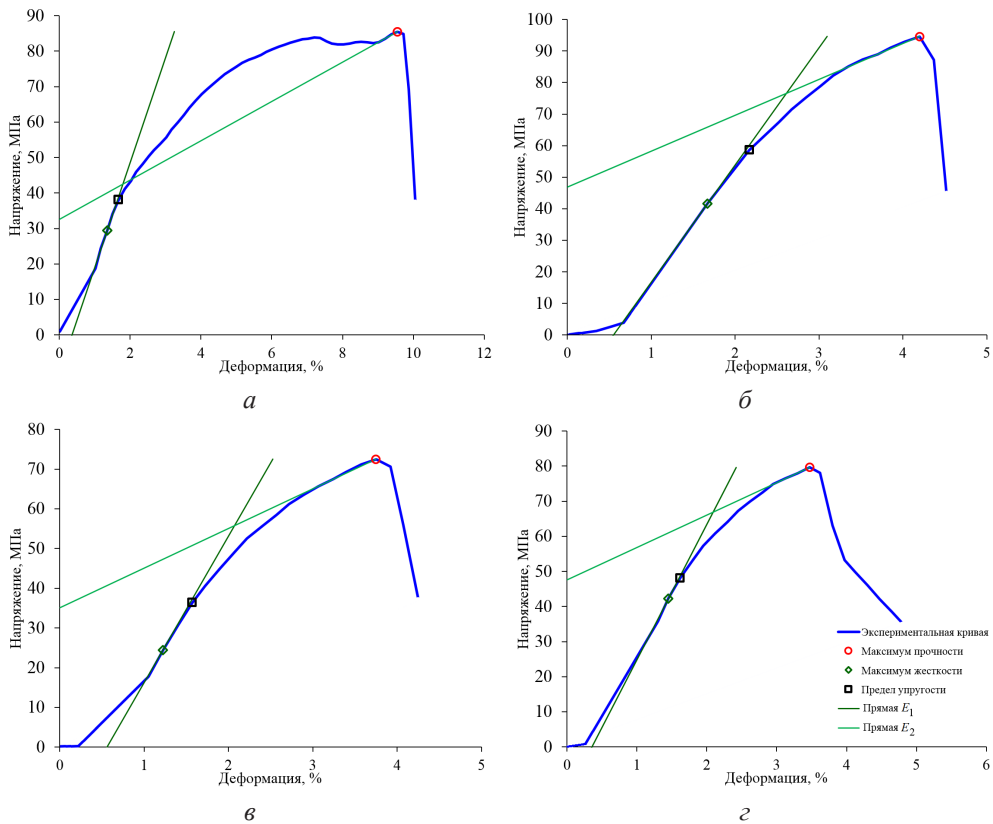


Рис. 2. Диаграммы «напряжение–деформация», полученные при испытании фрагментов образца на растяжение: а – квадрат 4 (см. рис. 1); б – 14; в – 27; г – 39 (E_1 – модуль упругости; E_2 – модуль упругости в области предразрушения)

Fig. 2. The stress-strain diagrams obtained during tensile testing of sample fragments: а – square 4 (see fig. 1); б – 14; в – 27; г – 39 (E_1 – modulus of elasticity; E_2 – modulus of elasticity in the pre-fracture area)

Для оценки вариации всех измеренных параметров проведена статистическая обработка этих данных. Определены характеристики описательной статистики: среднее значение $\bar{X}$, минимальное $X_{\min}$ и максимальное $X_{\max}$, среднеквадратическое отклонение σ_x , коэффициент вариации v , %, размах варьирования R (см. таблицу).

Статистическая характеристика результатов измерений свойств бумаги на локальных участках
The statistical characteristics of the results of measurements of paper properties in local areas

Характеристика	$\bar{X}$	$X_{\min}$	$X_{\max}$	σ_x	R	v , %
Толщина образца, мкм	61	55	66	1,9	11,0	3,1
Неоднородность просвета	8,62	6,80	11,70	1,03	4,9	11,9
Параметр A	0,034	0,016	0,060	0,013	0,044	37,8
Параметр ϕ	0,26	–28,1	41,4	19,0	69,6	–
Максимальная нагрузка, Н	78,4	50,7	119,2	10,46	68,5	13,1
Удлинение до максимальной нагрузки, мм	0,48	0,34	0,96	0,08	0,62	16,0

Окончание таблицы

Характеристика	$\bar{X}$	$X_{\min}$	$X_{\max}$	σ_x	R	v , %
Максимальное напряжение, МПа	85,6	53,7	124,2	11,62	70,5	13,6
Работа разрушения, мДж	22,7	7,7	55,9	6,6	48,2	29,0
Модуль упругости, МПа	3560	2560	4320	334	1760	9,4
Жесткость при растяжении, кН/м	217	153	268	19,0	115	8,8
Нагрузка в точке предела упругости, Н	37,9	25,14	54,2	5,19	29,1	13,7
Предел упругости, МПа	41,5	26,6	61,3	5,97	34,7	14,4
Предел упругой деформации, %	1,64	0,50	2,55	0,23	2,05	13,8
Работа упругости, мДж	2,50	0,70	4,94	0,61	4,24	24,5
Модуль упругости в области предразрушения, МПа	750	170	1730	308	1550	41,3

Данные показывают вариацию измеренных характеристик, обусловленных неоднородностью структуры образца на локальных участках. Максимальные и минимальные значения параметров существенно отклоняются от среднего и обеспечивают большой размах варьирования. Поскольку абсолютные численные показатели параметров резко отличаются друг от друга, сравнение степени их колебаний возможно выполнить с использованием коэффициента вариации. Наименьший коэффициент вариации имеет толщина – 3,1 %. Но при этом надо учитывать, что при ее определении на локальном участке площадь измерительной головки толщиномера соответствует размерам промоин в структуре бумаги или превышает их и измерения происходят по зонам изучаемого пространства, толщина которых максимальна.

Вариация неоднородности просвета на отдельных участках бумаги больше 11 %. При этом вариация для всего образца почти в 2 раза превышает показатель для локальных участков. Это свидетельствует о неоднородности отдельных участков бумаги.

Коэффициент вариации остальных характеристик в несколько раз превосходит коэффициент вариации толщины образца и для механических свойств зависит от области деформирования, в которой они измерены. В упругой области модуль упругости и жесткость при растяжении имеют коэффициент вариации менее 10 %. Нагрузка и напряжение характеризуются показателем 13,1...14,4 %. Удлинение до разрыва, предел упругой деформации – 13,8...16,0 %. В 2 раза бóльшая вариация отмечена для работы разрушения, оценивающей одновременно и прочность, и растяжимость материала. Для модуля упругости в области предразрушения коэффициент вариации составил более 41 %.

Обнаружена очень высокая вариация у параметров структуры, измеренных с применением ИК-спектроскопии НПВО. У параметра A коэффициент вариации равен 37,8 %, а размах варьирования параметра φ составляет почти 70°, что свидетельствует о различных степени упорядоченности и ориентации волокон в флокулах.

Гистограммы распределения и соответствующие им кривые нормального распределения исследованных параметров представлены на рис. 3. Гистограммы позволяют визуально оценить распределение данных и выявить соотношение больших и малых результатов измерений. Для основной части характеристик распределение близко к нормальному, что подтверждается самой частой

встречаемостью результатов, близких к средним. Однако для ряда параметров наблюдается отклонение гистограмм от симметричности. Например, для неоднородности просвета (рис. 3, *а*) гистограмма явно несимметрична и смещена в область малых значений. То есть участков с более сильно выраженной неоднородностью просвета меньше, чем однородных.

Гистограмма распределения толщины (рис. 3, *б*) близка к симметричной, но крайних минимальных значений меньше, чем максимальных, что связано с особенностями проведения измерений.

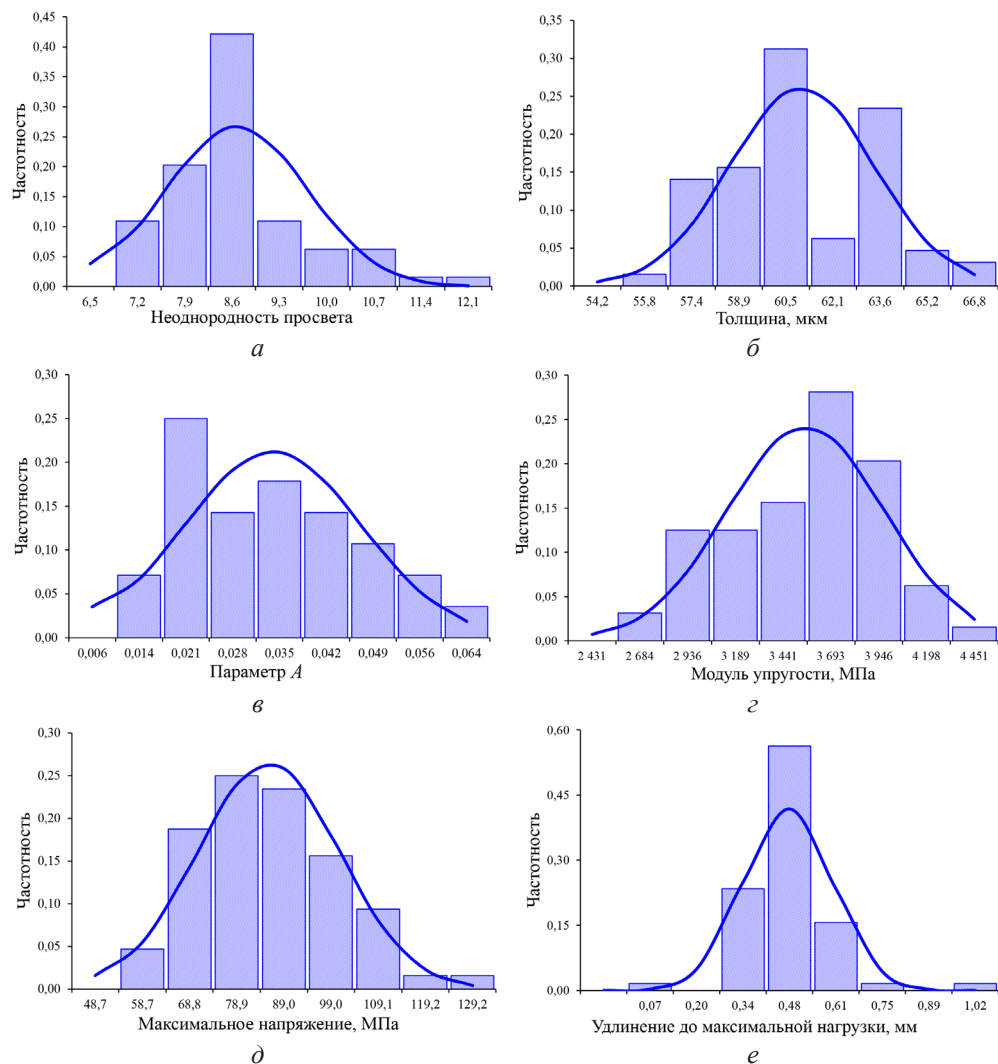


Рис. 3. Гистограммы распределения локально измеренных характеристик бумаги: *а* – неоднородность просвета; *б* – толщина; *в* – параметр *A*; *г* – модуль упругости; *д* – максимальное напряжение; *е* – удлинение до максимальной нагрузки

Fig. 3. The histograms of the distribution of locally measured paper characteristics: *a* – lookthrough heterogeneity; *б* – thickness; *в* – parameter *A*; *г* – modulus of elasticity; *д* – maximum stress; *е* – extension to maximum load

Спектроскопически измеренный параметр *A* имеет на гистограмме максимум в области малых значений (рис. 3, *в*), т. е. участков с пониженной

анизотропией больше, чем с высокой, а поскольку средние размеры флокул превышают площадь измерения методом ИК-спектроскопии НПВО, то можно отметить разницу в степени ориентации волокон в центре флокул и на их границах – выше и ниже соответственно. Из этого следует, что средняя анизотропия, которая измерена ультразвуковым методом на большой площади [3], будет в превосходящей степени определяться локальными участками с малой анизотропией, а фрагменты с высокой анизотропией встречаются реже, и они обусловлены структурой отдельных флокул.

Максимум гистограммы распределения модуля упругости (рис. 3, *з*) смещен в область более высоких значений. На этот показатель сильно влияют силы межволоконных связей, и на начальном участке кривой деформирования прочные связи преобладают.

Прочностные свойства, измеренные в точке разрушения образца – максимальное напряжение (рис. 3, *д*) и удлинение до максимальной нагрузки (рис. 3, *е*), – демонстрируют практически симметричные гистограммы при достаточно широком диапазоне варьирования свойств.

Для визуального представления полей локальной анизотропии структуры и деформационных свойств бумаги были построены поверхности (рис. 4).

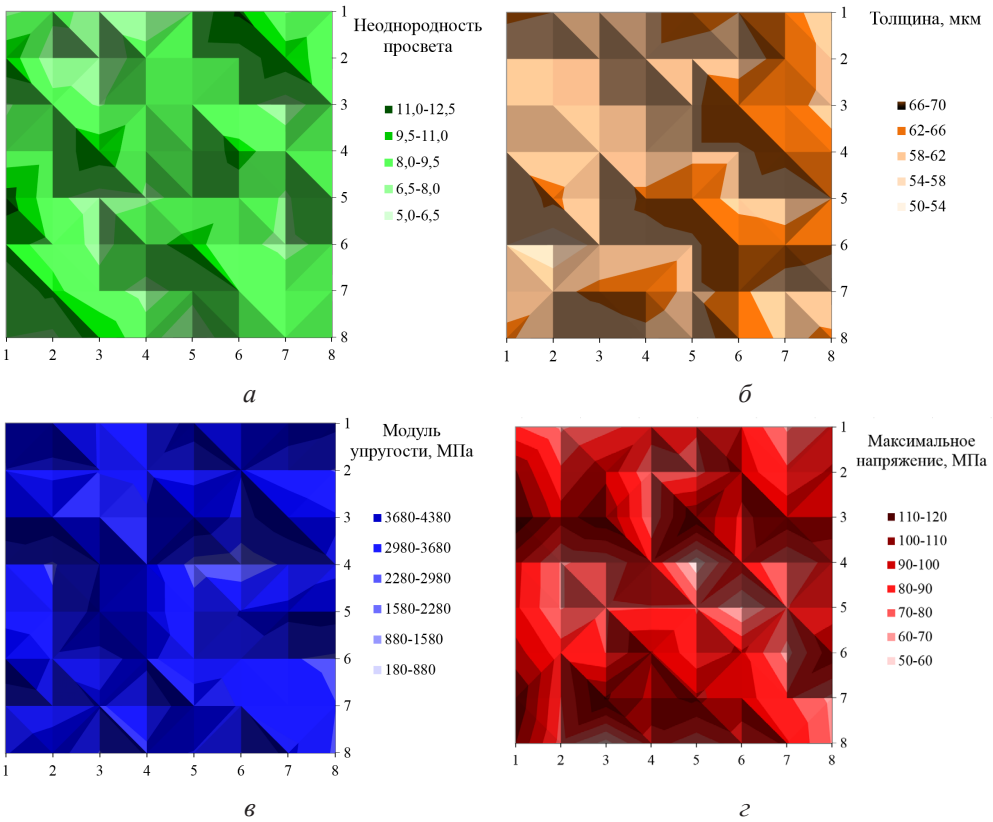


Рис. 4. Поверхности изменения локально учтенных характеристик бумаги:
a – неоднородность просвета; *б* – толщина; *в* – модуль упругости;
з – максимальное напряжение

Fig. 4. The surfaces of change of locally recorded characteristics:
a – lookthrough heterogeneity; *б* – thickness; *в* – modulus of elasticity; *з* – maximum stress

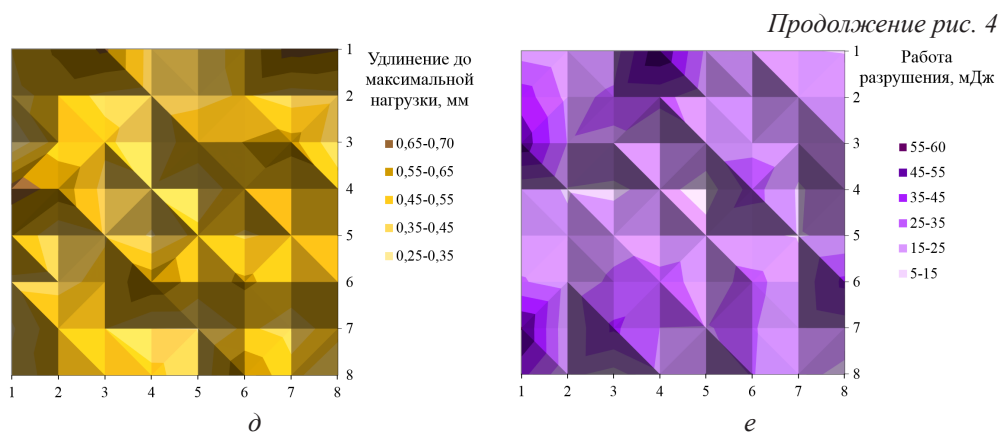


Рис. 4. Поверхности изменения локально учтенных характеристик бумаги:
 δ – удлинение до максимальной нагрузки; e – работа разрушения

Fig.4. The surfaces of change of locally recorded characteristics:
 δ – extension to maximum load; e – fracture work

Более темный цвет соответствует превосходящим значениям. У разных свойств места расположения максимумов и минимумов отличаются, и сложно выделить участок бумаги с наилучшим или наихудшим качеством. Однако наблюдается некоторое соответствие полей для максимального напряжения (рис. 4, e), удлинения до максимальной нагрузки (рис. 4, δ) и работы разрушения (рис. 4, e). Это связано с тем, что, интегральный показатель работы разрушения зависит одновременно и от прочности, и от растяжимости материала.

Заключение

Установлено, что наличие флокул и промоин в образце упаковочной влагопрочной бумаги, визуально выражающееся в неоднородности просвета, вносит решающий вклад в наличие локальной неоднородности анизотропии и вариацию деформационных и прочностных характеристик бумаги.

Анализ экспериментальных данных позволил получить наглядное представление о распределении локальных показателей структуры, а также деформационных и прочностных свойств.

Обнаружена высокая вариация у параметров структуры, измеренных с применением ИК-спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения, и преобладание участков с пониженной анизотропией по сравнению с участками с высокой анизотропией.

Изменчивость механических характеристик увеличивается при переходе от упругой зоны к зоне разрушения и максимальна для параметров, интегрально описывающих деформационные и прочностные свойства, таких как работа разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абрамова В.В., Гурьев А.В. Оценка равномерности формирования макроструктуры офисной бумаги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 172–186.

Abramova V.V., Gur'ev A.V. Evaluation of Macrostructure Forming Uniformity of Copy Paper. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 4, pp. 172–186. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.172>

2. Базарнова Н.Г., Карпова Е.В., Катраков И.Б., Маркин В.И., Микушина И.В., Ольхов Ю.А., Худенко С.В. Методы исследования древесины и ее производных. Барнаул: Алтайск. гос. ун-т, 2002. 160 с.

Bazarnova N.G., Karpova E.V., Katrakov I.B., Markin V.I., Mikushina I.V., Ol'khov Yu.A., Khudenko S.V. *Methods for Studying Wood and its Derivatives*. Barnaul, Altai State University Publ., 2002. 160 p. (In Russ.).

3. Беляев О.С., Казаков Я.В. Использование неразрушающих методов контроля качества крафт-лайнера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2016. № 3. С. 157–170.

Belyayev O.S., Kazakov Ya.V. Using Non-Destructive Methods of Kraft Liner Quality Control. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2016, no. 3, pp. 157–170. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.3.157>

4. Галактионов Б.В., Иванова Е.И., Сырников Ю.П., Ферсман И.А., Царев Н.Н. Объективная оценка просвета бумаги // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 1995. № 3. С. 117–131.

Galaktionov B.V., Ivanova E.I., Syrnikov Yu.P., Fersman I.A., Tsarev N.N. Objective Assessment of Paper Lookthrough. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnicheskoj akademii*, 1995, no. 3, pp. 117–131. (In Russ.).

5. Герасюта С.М., Смолин А.С., Иванова Е.И., Каневская В.С. Исследование коэффициента вариации и среднего размера неоднородности для различных типов бумаги на анализаторе просвета АП-2 // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2016. Вып. 217. С. 238–247.

Gerasuta S.M., Smolin A.S., Ivanova E.I., Kanevskaya V.S. Study of Coefficient of Variation and the Average Size Inhomogeneity for Various Types of Paper with Help of Formation Analyzer the AP-2. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehnicheskoj akademii*, 2016, iss. 217, pp. 238–247 (in Russ. with Eng. sum.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2016.217.238-247>

6. Гисматулина Ю.А., Будаева В.В. Сравнение целлюлоз, выделенных из мискантуса, с хлопковой целлюлозой методом ИК-Фурье спектроскопии // Ползуновский вестн. 2014. № 3. С. 177–181.

Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V. Comparison of Celluloses Isolated from Miscanthus with Cotton Cellulose by FT-IR Spectroscopy. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 3, pp. 177–181. (In Russ.).

7. Деркачева О.Ю. Анализ ИК-спектров отражения исторических бумаг // Фотография. Изображение. Документ. 2013. № 4(4). С. 23–31.

Derkacheva O.Yu. Analysis of IR Reflection Spectra of Historical Papers. *Fotografiya. Izobrazheniye. Dokument*, 2013, no. 4(4), pp. 23–31. (In Russ.).

8. Деркачева О.Ю. Определение структуры волокон целлюлозы по инфра-красным спектрам отражения бумаги // Жур. прикладной спектроскопии. 2014. Т. 81, № 6. С. 947–953.

Derkacheva O.Yu. Determination of Cellulose Fiber Structure Using IR Reflectance Spectroscopy of Paper. *Zhurnal prikladnoj spektroskopii* = Journal of Applied Spectroscopy, 2014, vol. 81, pp. 1037–1043. <https://doi.org/10.1007/s10812-015-0047-6>

9. Деркачева О.Ю., Сухов Д.А., Хейфец Д.М. Молекулярная спектроскопия как основа экспертной системы различных типов бумаги // Фотография. Изображение. Документ. 2011. № 2(2). С. 66–71.

Derkacheva O.Yu., Sukhov D.A., Kheyfets D.M. Molecular Spectroscopy as the Basis of an Expert System of Various Types of Paper. *Fotografiya. Izobrazheniye. Dokument*, 2011, no. 2(2), pp. 66–71. (In Russ.).

10. Дулькин Д.А., Блинова Л.А., Блинushова О.Н. Изменение надмолекулярной структуры волокнистых полуфабрикатов из древесины в процессе размола // Химия растит. сырья. 2007. № 1. С. 75–83.

Dul'kin D.A., Blinova L.A., Blinushova O.N. Changes in the Supramolecular Structure of Fibrous Semi-Finished Wood Products during Milling. *Khimija Rastitel'nogo Syrja*, 2007, no. 1, pp. 75–83. (In Russ.).

11. Инфракрасная спектроскопия полимеров / пер. с нем., под ред. Э.Ф. Олейника. М.: Химия, 1976. 472 с.

Infrared Spectroscopy of Polymers. Trans. from Germ., ed. by E.F. Olejnik. Moscow, Khimiya Publ., 1976. 472 p. (In Russ.).

12. Казаков Я.В., Зеленова С.В., Комаров В.И. Влияние неоднородности структуры на характеристики жесткости картонов-лайнеров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 3. С. 110–121.

Kazakov Ya.V., Zelenova S.V., Komarov V.I. Influence of Structural Nonuniformity on Stiffness Characteristics of Linerboard. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2007, no. 3, pp. 110–121. (In Russ.).

13. Лысаченкова М.М., Казаков Я.В., Чухчин Д.Г. Неразрушающий контроль локальной неоднородности структуры бумаги // Актуальные проблемы развития лесного комплекса»: материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. Вологда: ВоГУ, 2021. С. 330–334.

Lysachenkova M.M., Kazakov Ya.V., Chukhchin D.G. Non-Destructive Testing of Local Heterogeneity of Paper Structure. *Actual Problems of Forest Complex Development: Proceedings of the XIX International Scientific and Technical Conference*. Vologda, Vologda State University Publ., 2021, pp. 330–334. (In Russ.).

14. Окулова Е.О., Гурьев А.В., Холмова М.А. Оценка соотношения волокон осины и березы в целлюлозных полуфабрикатах методом ИК-Фурье-спектроскопии // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3(51). С. 122–128.

Okulova Ye.O., Guriev A.V., Holmova M.A. Estimation of the Ratio of Aspen and Birch Fibers in Cellulose Semi-Finished Products by FT-IR Spectroscopy. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2021, no. 3(51), pp. 122–128. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-3-122-128>

15. Поташева А.Н. Влияние анизотропии структуры на неоднородность деформирования целлюлозно-бумажных материалов: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2020. 220 с.

Potashева A.N. *The Influence of Structural Anisotropy on the Heterogeneity of Deformation of Pulp and Paper Materials*: Cand. of Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2020. 220 p. (In Russ.).

16. Св. № 2001610526 РФ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программное обеспечение лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов (KOMPLEX): № 2001610250: заявл. 11.03.2001: опубл. 10.05.2001 / Я.В. Казаков, В.И. Комаров; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО АГТУ.

Kazakov Ya.V., Komarov V.I. *Certificate no. 2001610526 RF. Certificate of State Registration of the Computer Program. Software for a Laboratory Testing Complex for Assessing the Deformability and Strength of Pulp and Paper Materials (KOMPLEX)*: no. 2001610250, 2001. (In Russ.).

17. Св. № 2012612685 РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для количественной оценки неоднородности структуры бумаги на просвет (Анализатор формования): № 2012610587: заявл. 02.02.2012: опубл. 15.03.2012 / Я.В. Казаков, В.В. Абрамова; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВПО САФУ.

Kazakov Ya.V., Abramova V.V. *Certificate no. 2012612685 RF. Certificate of State Registration of the Computer Program. Program for Quantitative Evaluation of Paper Structure Heterogeneity in Lookthrough (Formation Analyzer)*: no. 2012610587, 2012. (In Russ.).

18. Св. № 2018661852. РФ. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для корреляционного анализа серий ИК-спектров: № 2018616255: заявл. 19.06.2018: опубл. 20.08.2018 / Д.Г. Чухчин; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО САФУ.

Chukhchin D.G. *Certificate no. 2018661852 RF. Certificate of State Registration of the Computer Program. Program for Correlation Analysis of IR Spectra Series*: no. 2018616255, 2018. (In Russ.).

19. Смолин А.С., Аксельрод Г.З. Технология формования бумаги и картона. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 120 с.

Smolin A.S., Aksel'rod G.Z. *Paper and Cardboard Forming Technology*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 120 p. (In Russ.).

20. Шипина О.Т., Гараева М.Р., Александров А.А. ИК-спектроскопические исследования целлюлозы из травянистых растений // Вестн. Казанск. Технол. ун-та. 2009. № 6. С. 148–152.

Shipina O.T., Garaeva M.R., Aleksandrov A.A. IR Spectroscopic Studies of Cellulose from Herbaceous Plants. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2009, no. 6, pp. 148–152. (In Russ.).

21. Acquah G.E., Via B.K., Fasina O.O., Eckhardt L.G. Rapid Quantitative Analysis of Forest Biomass Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Partial Least Squares Regression. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2016, vol. 2016, art. no. 1839598. <https://doi.org/10.1155/2016/1839598>

22. Chen H., Ferrari C., Angiuli M., Yao J., Raspi C., Bramanti E. Qualitative and Quantitative Analysis of Wood Samples by Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Multivariate Analysis. *Carbohydrate Polymers*, 2010, vol. 82, iss. 3, pp. 772–778. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.05.052>

23. Downes G.M., Meder R., Bond H., Ebdon N., Hicks C., Harwood C. Measurement of Cellulose Content, Kraft Pulp Yield and Basic Density in Eucalypt Woodmeal Using Multisite and Multispecies near Infra-Red Spectroscopic Calibrations. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 2011, vol. 73, iss. 3–4, pp. 181–186. <https://doi.org/10.2989/20702620.2011.639489>

24. Kazakov Ya., Romanova A., Chukhchin D. The Use of ATR-IR Spectroscopy to Determine the Anisotropy Parameters of the Structure of Materials Based on Plant Fibers. *Progress in Paper Physics Seminar PPPS 2020*. Finland, Jyväskylä, VTT Technology 378, 2020, pp. 61–66. <https://doi.org/10.32040/2242-122X.2020.T378>

25. Le Moigne N., Jardeby K., Navard P. Structural Changes and Alkaline Solubility of Wood Cellulose Fibers after Enzymatic Peeling Treatment. *Carbohydrate Polymers*, 2010, vol. 79, iss. 2, pp. 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.08.009>

26. Poke F.S., Raymond C.A. Predicting Extractives, Lignin, and Cellulose Contents Using Near Infrared Spectroscopy on Solid Wood in *Eucalyptus globulus*. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2006, vol. 26, iss. 2, pp. 187–199. <https://doi.org/10.1080/02773810600732708>

27. Sandak A., Sandak J., Prądyński W., Zborowska M., Negri M. Near Infrared Spectroscopy as a Tool for Characterization of Wood Surface. *Folia Forestalia Polonica*, 2009, series B, iss. 40, pp. 31–40.

28. Skoglund A., Kessler W., Kessler R.W., Brundin A., Mandenius C.-F. On-line Spectroscopic Measurements of Wood Chips before a Continuous Digester. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2004, vol. 70, iss. 2, pp. 129–135. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2003.11.007>

29. Tsuchikawa S., Kobori H. A Review of Recent Application of Near Infrared Spectroscopy to Wood Science and Technology. *Journal of Wood Science*, 2015, vol. 61, pp. 213–220. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x>

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