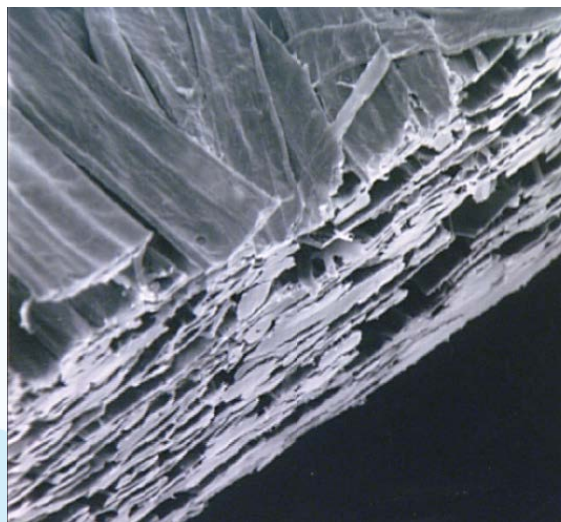




СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ)
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА



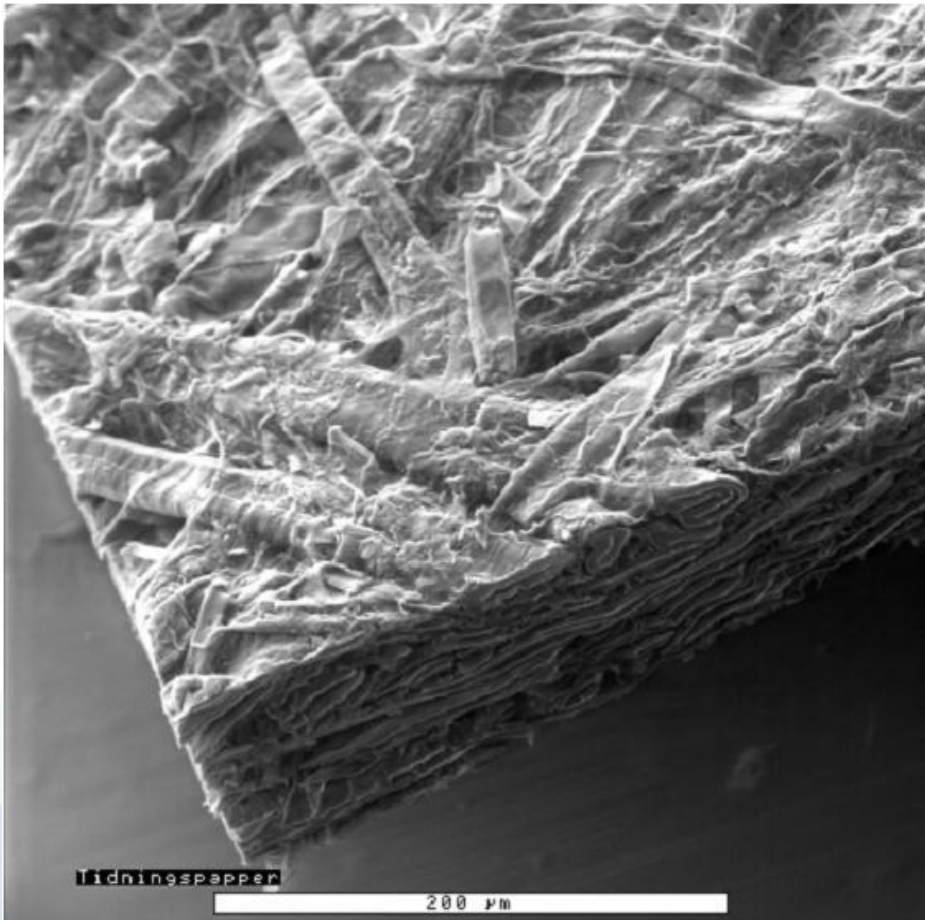
КОРРЕЛЯЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕПЕНИ АНИЗОТРОПИИ БУМАГИ, ИЗМЕРЕННЫХ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ И РАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ



Лысаченкова Мария Михайловна
Казаков Яков Владимирович
Чухчин Дмитрий Германович

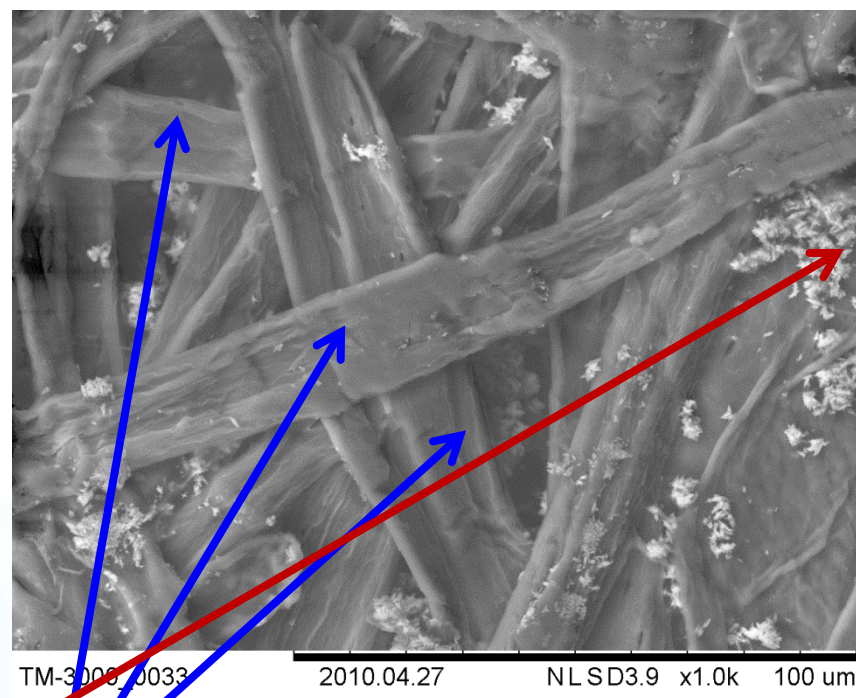
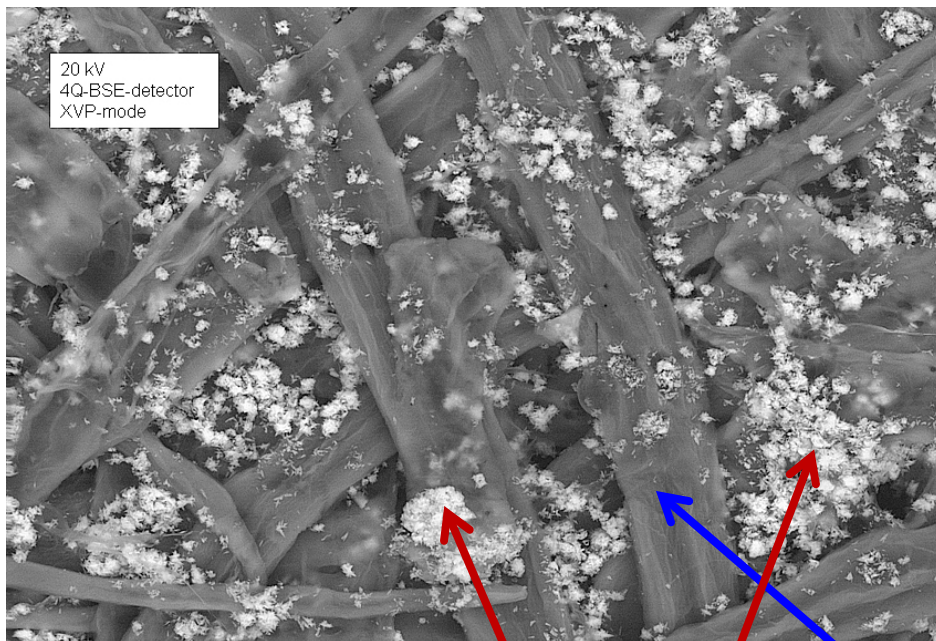
VII Международная научно-техническая конференция
«Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов», памяти профессора В.И. Комарова
14 - 16 сентября 2023 г, Архангельск

Бумага и картон как материал



В соответствии с ГОСТ 17586–80 бумагой и картоном принято называть **листовой материал**, который состоит преимущественно из растительных волокон, связанных между собой силами поверхностного сцепления, и может содержать проклеивающие вещества, минеральные наполнители, химические и натуральные волокна, пигменты и красители

Композиция бумаги



Растительные волокна

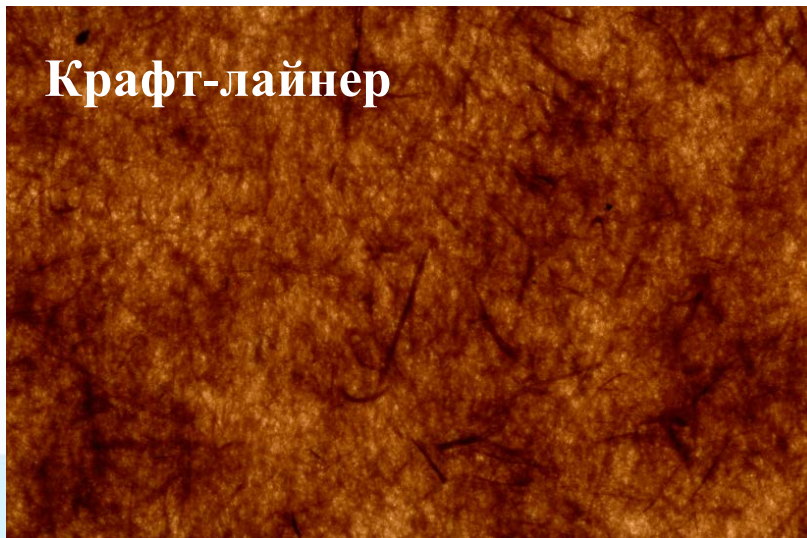
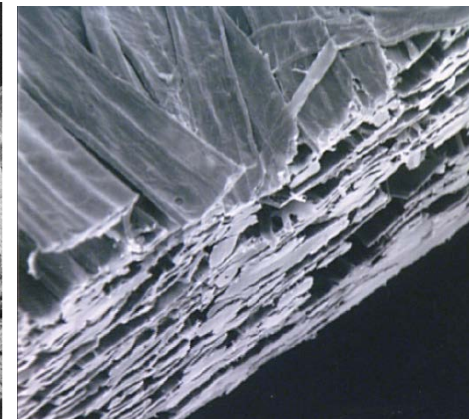
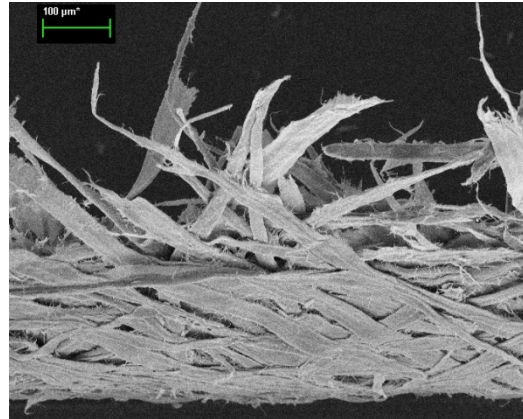
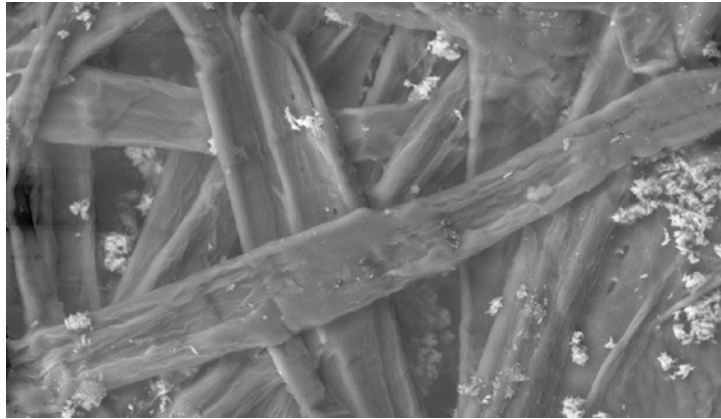
Наполнители

Размеры волокон:

Хвойные – длина 0,3...5 мм, в среднем 3 мм, ширина 20...40 мкм

Лиственные – длина 0,1...3 мм, в среднем 1 мм, ширина 10...30 мкм

Благодаря волокнистой природе бумаге присуща анизотропия и неоднородность структуры



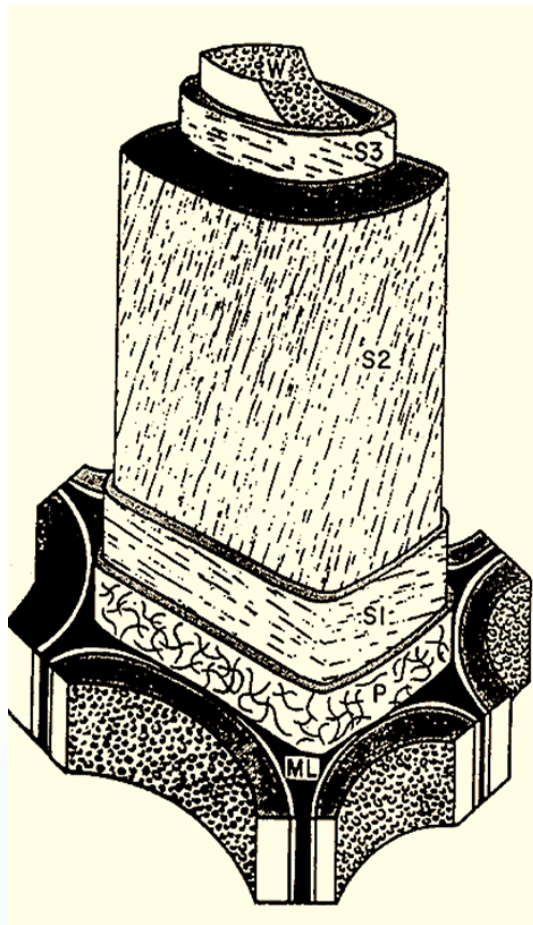
Крафт-лайнер



Топ-лайнер

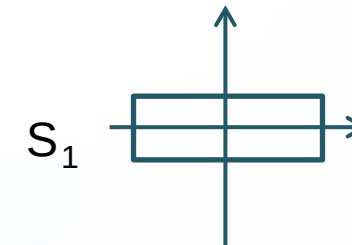
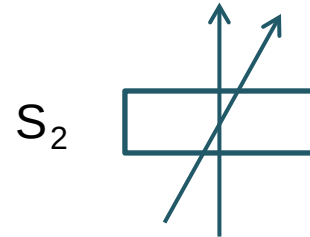
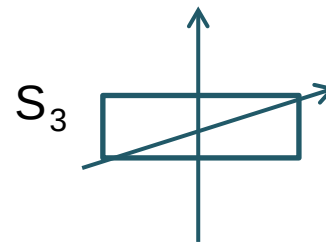
Все виды бумаги отличаются большей или меньшей неоднородностью строения и анизотропии структуры, являющейся следствием специфики процесса бумажного производства и, прежде всего, результатом формирования бумажного полотна.

Строение клеточной стенки волокна



Соотношение масс слоев
клеточной стенки:

$$(M+P):S1:S2:S3=2:10:78:10$$



направление
ориентации
микрофибрилл

Срединная пластина - ML

Первичная стенка - P

Вторичная стенка - S:

S₁ - наружный слой;

S₂ - средний;

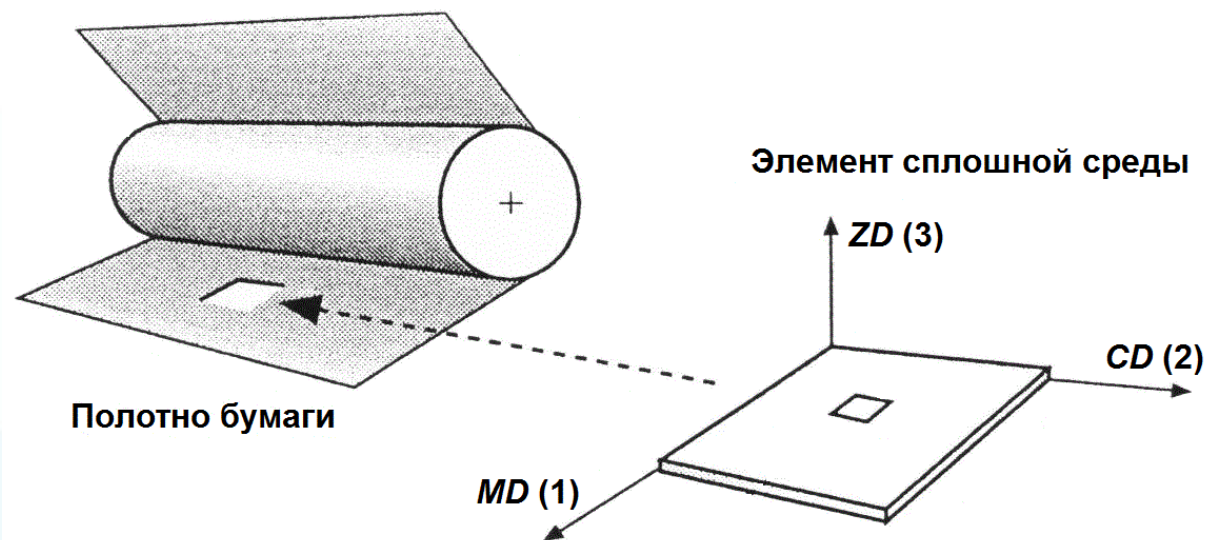
S₃ - внутренний;

W - внутренний бородавчатый слой;

L - люмен

Анизотропия бумаги

Наиболее простой показатель анизотропии механических свойств бумаги и картона, определяется отношением измеряемых показателей механических свойств по главным направлениям полотна (машинное, поперечное)

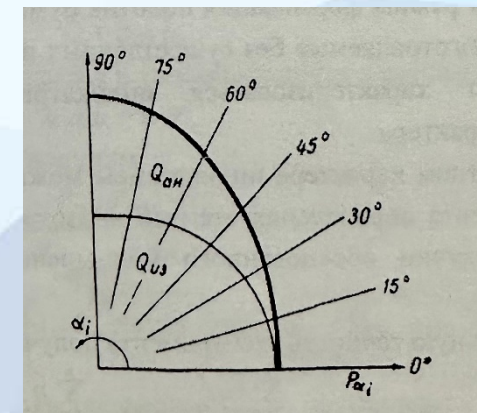
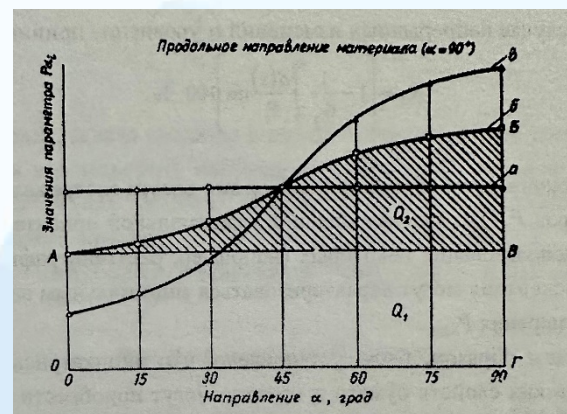


Результаты исследования анизотропии свойств твердых материалов принято представлять в полярных или прямоугольных координатах. Полярные индикатрисы анизотропии прочности являются более наглядными

$$\Delta P_{ai} = P_{aj} - P_{ai}$$

$$K_i = \frac{P_{aj}}{P_{ai}}$$

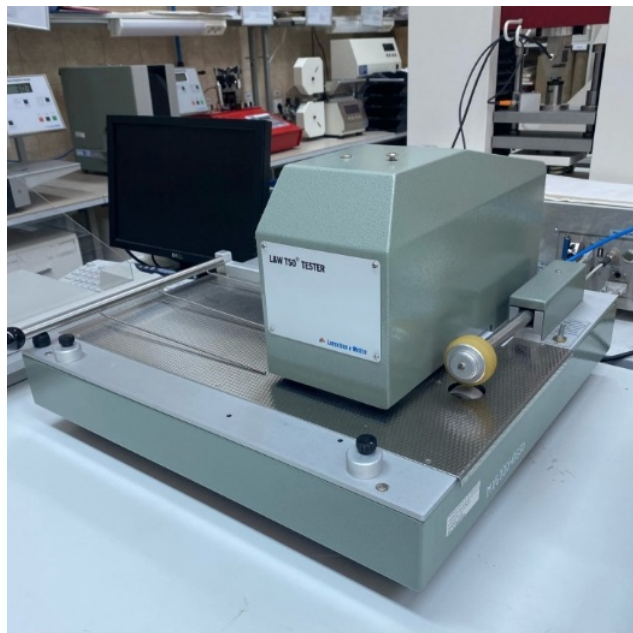
Графическая интерпретация уравнения оценки степени анизотропии бумаги



Цель работы:

- сравнение результатов измерений параметров степени анизотропии структуры бумаги методом НПВО ИК спектроскопии и прочностных и деформационных свойств, измеренных неразрушающими и традиционными методами

Сопоставление данных спектроскопии с традиционными неразрушающими методами (ультразвуковым) и установление количественных закономерностей между новыми и традиционными параметрами структуры открывает путь к технологии экспресс-анализа структуры и прогнозирования физико-механических свойств целлюлозно-бумажных материалов



L&W TSO Tester

TSO_{angle} (угол TSO) – угол между максимальным индексом жесткости при растяжении и жесткостью при растяжении в направлении MD (угол ориентации жёсткости при растяжении, или полярный угол), ...°;

TSI_{MD} – индекс жесткости при растяжении в машинном направлении, кНм/г;

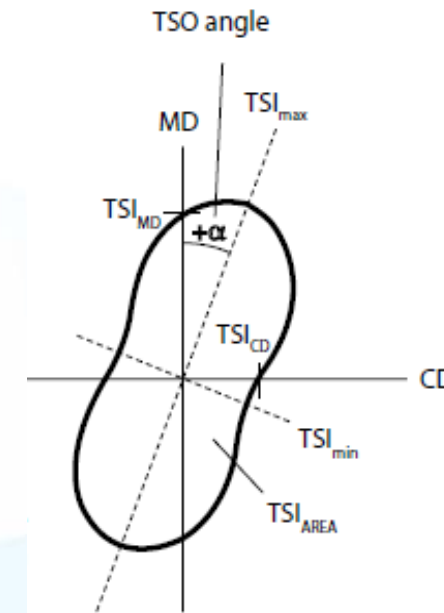
TSI_{CD} – индекс жесткости при растяжении в поперечном направлении, кНм/г ;

$TSI_{MD/CD}$ – отношение индекса жесткости при растяжении в направлении MD к индексу жесткости при растяжении в направлении CD (степень анизотропии индекса жесткости при растяжении);

TSI_{min} – минимальное измеренное значение индекса жесткости, кНм/г;

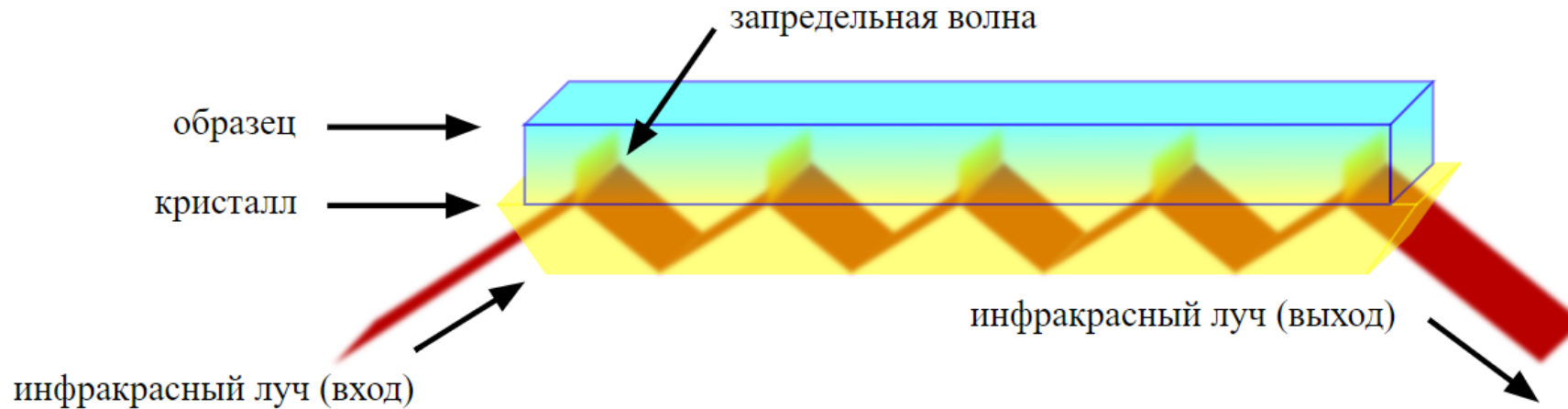
TSI_{max} – максимальное измеренное значение индекса жесткости, кНм/г;

TSI_{area} – площадь «арахисоподобного» эллипса, м².



Полярная диаграмма, представляющая все упругие свойства бумаги: α – угол TCO (угол направления максимальной упругости бумаги)

ИК-спектроскопия НПВО



ИК-спектроскопия НПВО позволяет оценивать энергию связей и доленое соотношение связей различных энергий, имеющихсх в целлюлозосодержащем образце, и формируемых в процессе биосинтеза целлюлозы и различных технологических обработок волокна при получении технической целлюлозы и изготовления бумаги

Получение НПВО ИК-спектра целлюлозных материалов

- **Опытный образец:**

Полоска бумаги, шириной 15 мм.

- **Оборудование:**

ИК-Фурье-спектрометре Vertex 70 (Bruker, Германия), приставка НПВО GladiATR (Pike Tech., США), материал кристалла НПВО – искусственный алмаз.

- **Условия:**

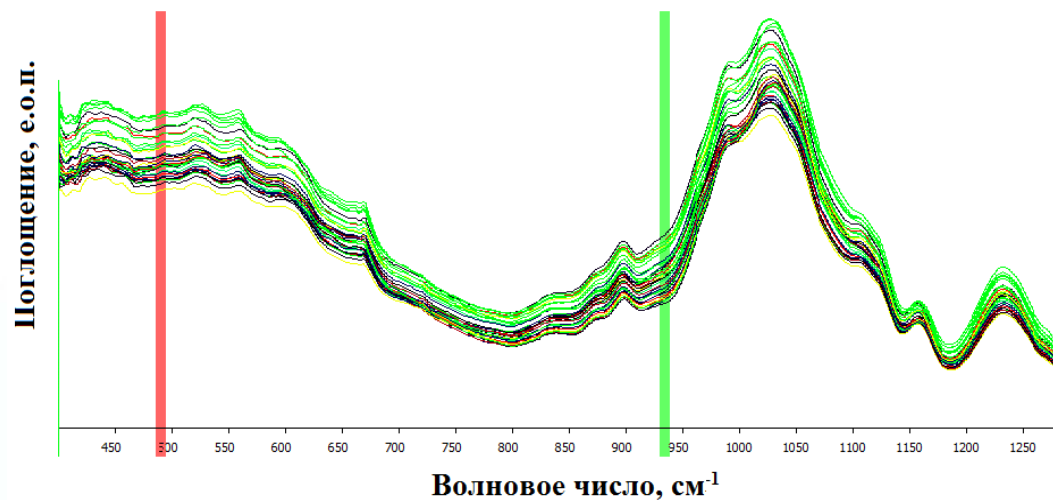
ИК-излучение, попадающее на исследуемый образец имело строгую поляризацию. Глубина проникновения составляла 10-20 мкм, диапазон записи спектров – $4000-400\text{ см}^{-1}$, разрешение – 4 см^{-1} , количество параллельных сканированиях образца – 128, шаг снятия спектров – через каждые 20°



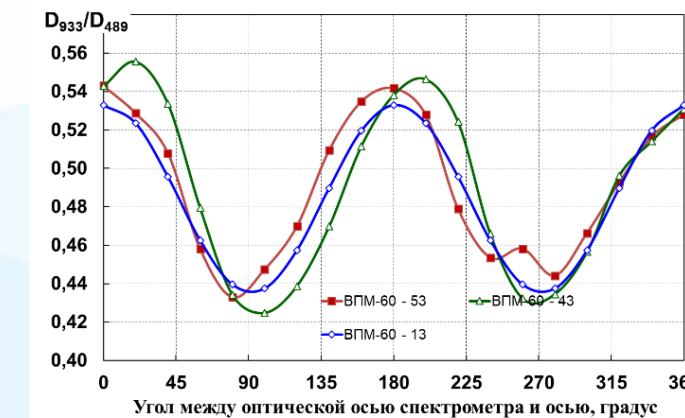
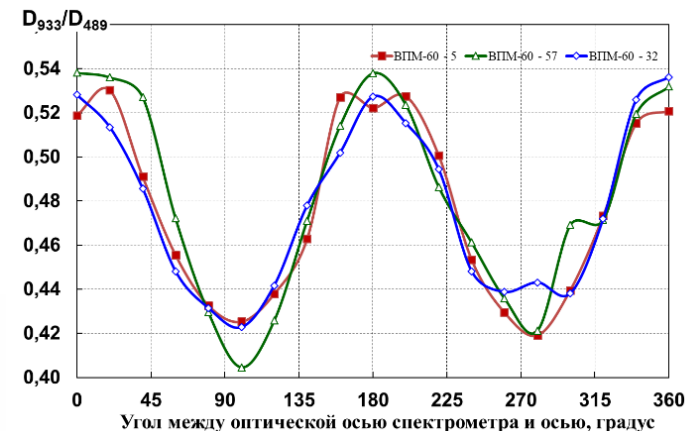
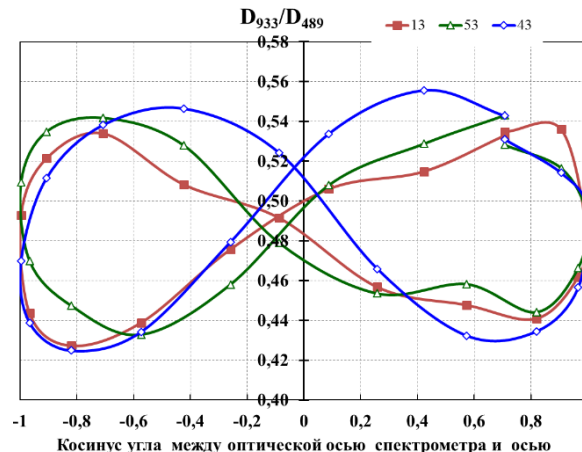
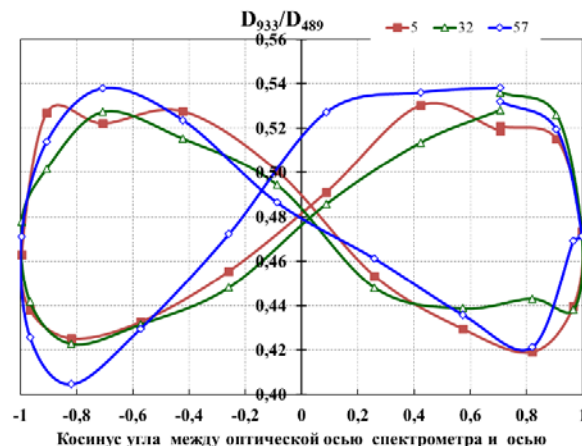
Анализ ИК-спектров целлюлозных материалов

• Обработка спектров:

производилась с помощью специализированного программного обеспечения



использовано соотношение оптических плотностей (D_{933}/D_{489}) при волновых числах:
 933 см^{-1} – деформационные колебания С–О-связи пиранозного кольца (**зеленая полоса**) и
 489 см^{-1} – внеплоскостные деформационные колебания гидроксильных групп (**красная полоса**)



Присутствуют изменения **периодического** характера в соотношениях интенсивностей D_{933}/D_{489} !

Влияние направления ориентации волокна на изменение ИК-спектра бумаги, в виде соотношения D_{933}/D_{489}

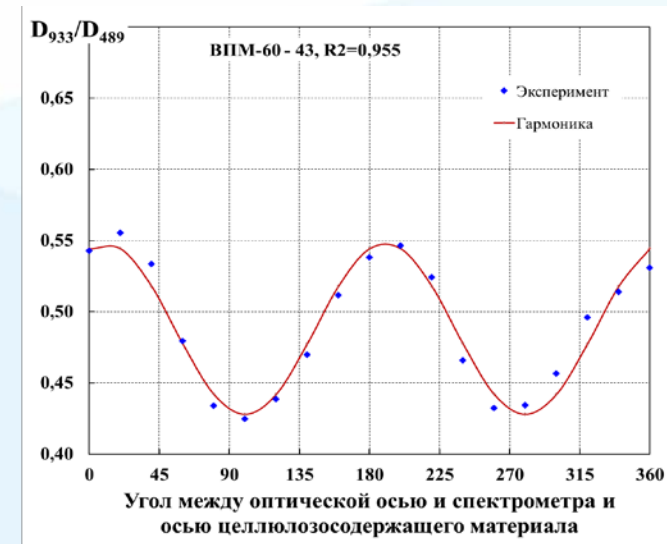
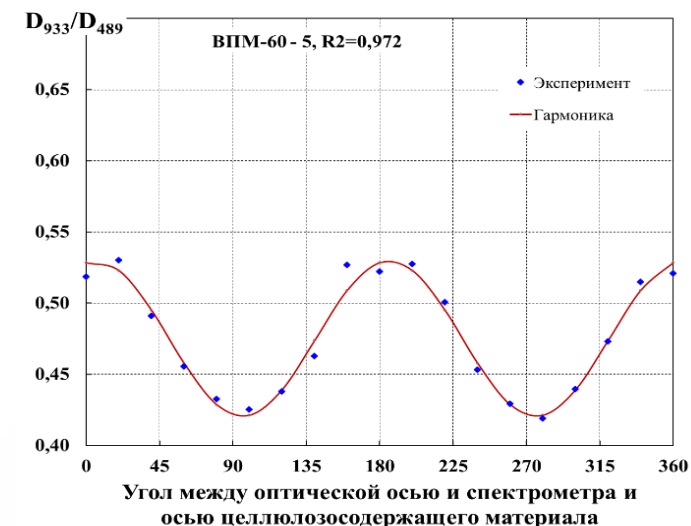
- Математическая обработка полученных зависимостей:

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

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

Номер точки	Параметр			
	A	φ	C	R^2
1	0,0215	-12,0	0,4899	0,699
8	0,0204	37,8	0,4822	0,645
25	0,0347	-13,9	0,4845	0,906
28	0,0178	-8,4	0,4901	0,642
29	0,0394	-21,1	0,4747	0,730
32	0,0509	-5,8	0,4758	0,960
36	0,0225	-7,5	0,4868	0,642
37	0,0170	23,1	0,4793	0,657
57	0,0587	-14,7	0,4800	0,932
64	0,0225	33,9	0,4725	0,721
5	0,0544	-11,6	0,4752	0,972
60	0,0440	9,4	0,4756	0,857

Аппроксимация полученных зависимостей была выполнена в MS Excel. Определение коэффициентов A , C , φ производилось по критерию минимума квадратов отклонений с использование пакета оптимизации «Поиск решения»



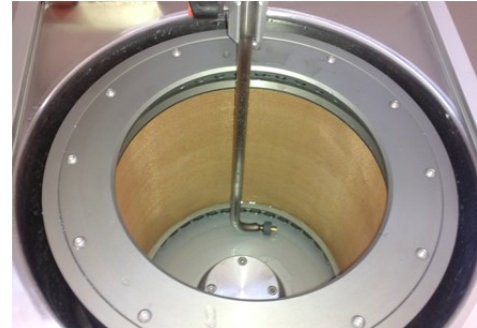
Получение анизотропных отливок ЦБ материала

Лабораторный комплекс TechPap, Франция

Формующее устройство



Формующая камера



с установленной
сеткой



готовая мокрая
отливка на сетке

Форма и размеры отливки:

245×900 мм

Пневматический пресс



Сушилка
с регулируемой
температурой
сушки



Получение анизотропных лабораторных образцов бумаги

- **Изготовление анизотропных образцов бумаги**

лабораторный комплекс TechPar (Франция) – динамический листоотливной аппарат (ДЛОА), пресс с регулируемой нагрузкой, устройство контактной сушки с регулируемой температурой, синтетические сетки для прессования и сушки образцов. Размол волокнистых п/ф производился до 40° ШР в лабораторной мельнице ЦРА.

- **Моделирование структуры анизотропных образцов бумаги**

Регулирование степени анизотропии производилось за счет изменения соотношения **скорости струи и сетки**

Фактор	Регулируемый параметр	Величина параметра для режима					
		R1	R2	R3	R4	R5	R6*
Скорость сетки	Окружная скорость формирующей сетки ДЛОА, v, м/мин	1350	1350	900	900	1 400	1350
Скорость струи (давление струи)	Обороты насоса, подающего массу на сетку, p, об/мин	300	500	1 400	900	800	900
Диаметр форсунки	Типоразмер форсунки, d	2 510	2 510	2 510	2 510	2 510	2 510
Анизотропия	Степень анизотропии $TSI_{MD/CD}$	3,86	3,89	3,33	2,39	2,67	4,96

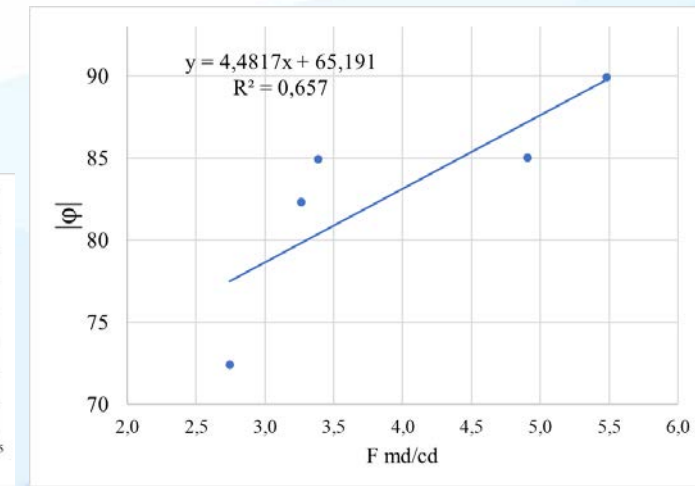
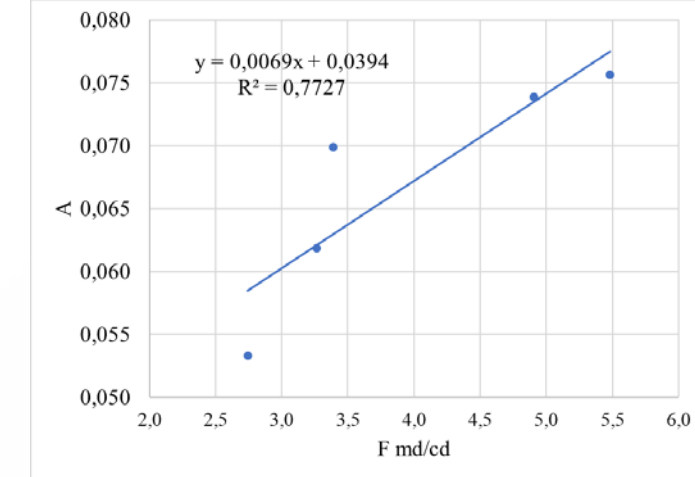
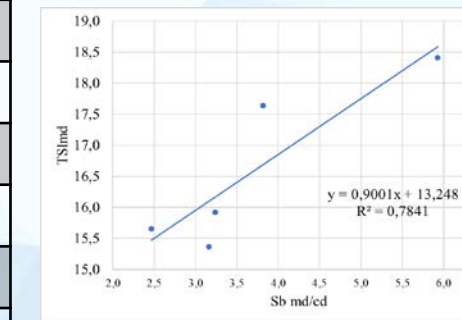
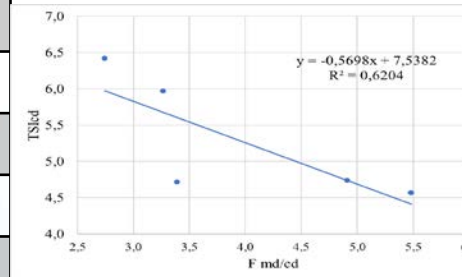
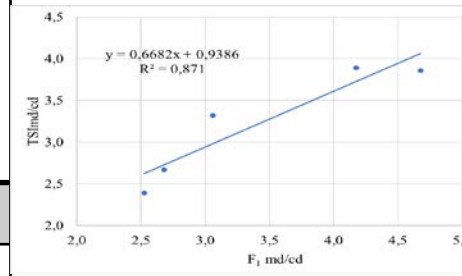


Физико-механические и деформационные характеристики лабораторных образцов бумаги

Характеристика	Направление	Режим отлива					
		R1	R2	R3	R4	R5	R6
Жесткость при растяжении, TSI, кН×м/г	MD (0 °)	17,64	18,41	15,65	15,37	15,95	10,27
	CD (90 °)	4,57	4,74	4,72	6,42	5,97	2,05
	MD/CD	3,86	3,89	3,32	2,39	2,67	5,03
Жесткость при растяжении St, Н/м	MD	710	760	640	730	690	300
	CD	160	210	150	220	240	80
	MD/CD	4,4	3,62	4,27	3,32	2,88	3,75
Работа разрушения, A _p , мДж	MD	240	246	135	104	242	15
	CD	92	98	92	78	94	5
	MD/CD	2,6	2,51	1,47	1,32	2,57	3,4
Разрывная длина L, м	MD	15200	15300	10200	13200	16500	3100
	CD	2800	3100	3000	4800	5100	800
	MD/CD	5,4	4,9	3,4	2,8	3,2	3,9
Разрушающее напряжение σ _p , МПа	MD	99,5	100,6	57,6	62,1	78,6	15,8
	CD	17,8	18,8	17,8	23,5	25,5	2,9
	MD/CD	5,6	5,34	3,23	2,64	3,08	5,52
Начальный модуль упругости, E ₁ , МПа	MD	7000	7640	5640	6620	6220	2460
	CD	1510	1920	1420	2090	2310	400
	MD/CD	4,6	3,98	3,97	3,17	2,69	6,15
Модуль упругости в области предразрушения, E ₂ , МПа	MD	1550	1740	1280	2250	1310	860
	CD	60	100	90	220	230	160
	MD/CD	25,8	17,40	14,22	10,23	5,70	5,38
Деформация в точке разрушения ε _p , %	MD	2,50	2,60	2,18	1,67	2,89	0,93
	CD	4,40	4,18	4,33	3,00	3,36	0,98
	CD/MD	0,6	0,62	0,50	0,56	0,86	0,95

Корреляция характеристик степени анизотропии бумаги, измеренных неразрушающим и разрушающими методами

Отношение характеристик md/cd	A	$ \phi $	TSI _{md}	TSI _{cd}	TSI _{md/cd}
F _{MD/CD}	0,879	0,811	0,921	-0,788	0,920
L _{MD/CD}	0,883	0,807	0,928	-0,794	0,927
J _{P MD/CD}	0,879	0,811	0,921	-0,788	0,920
S _{b MD/CD}	0,458	0,260	0,886	-0,340	0,594
E _{ИЗ MD/CD}	0,539	0,354	0,943	-0,417	0,677
SCT _{MD/CD}	0,704	0,521	0,939	-0,636	0,835
R _{a MD/CD}	-0,448	-0,500	-0,259	0,459	-0,447
σ _{p MD/CD}	0,861	0,812	0,958	-0,769	0,923
ε _{p MD/CD}	-0,221	-0,021	-0,033	0,410	-0,323
A _{p MD/CD}	0,569	0,658	0,726	-0,360	0,526
σ _{1 MD/CD}	0,860	0,741	0,937	-0,789	0,932
E _{1 MD/CD}	0,823	0,702	0,624	-0,876	0,870
S _{t MD/CD}	0,701	0,630	0,317	-0,814	0,701
E _{2 MD/CD}	0,782	0,682	0,696	-0,788	0,844



Заключение

С применением неразрушающих ультразвуковых, оптических и спектроскопических, а также разрушающих механических методов, получены новые сравнительные данные о степени анизотропии структуры бумаги, вычисленной через отношение характеристик в машинном и поперечном направлении (MD/CD).

Доказана тесная взаимосвязь коэффициента амплитуды A гармоник, полученных по методу НПВО ИК-спектроскопии, с характеристиками степени анизотропии, измеренными традиционными методами.

Установлено, что все методы показывают однонаправленное изменение степени анизотропии, но ее относительная величина зависит от метода и вида характеристики.



Спасибо за внимание!