

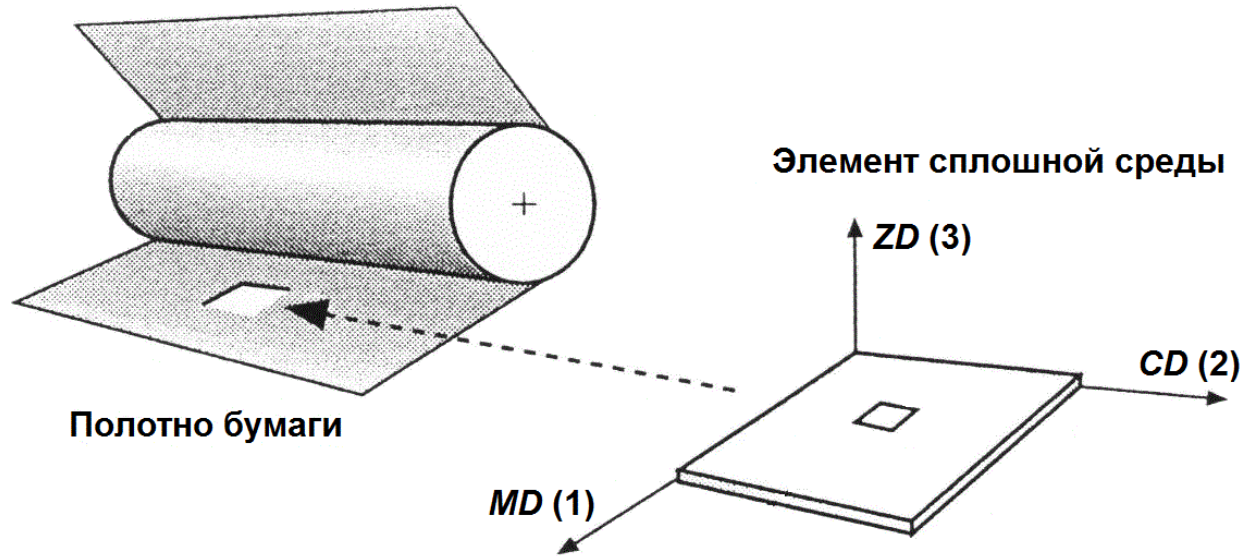


СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ)
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

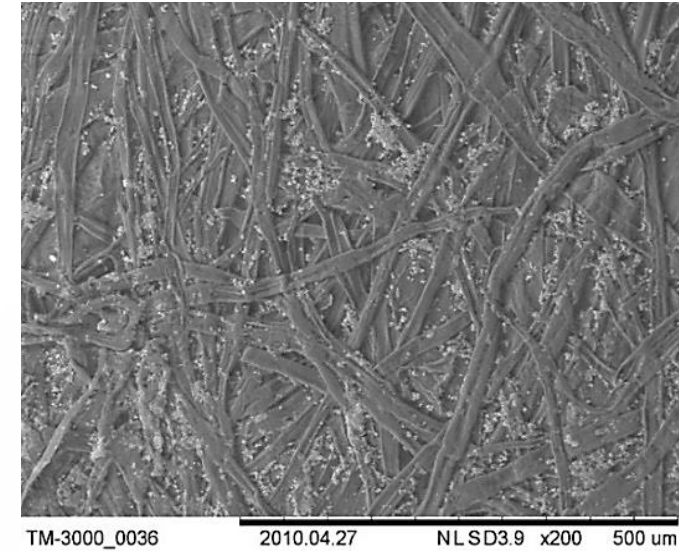
Влияние степени анизотропии на распределение локальных деформаций в образце бумаги при растяжении

Романова Анастасия Николаевна
Казаков Яков Владимирович
Малков Алексей Валерьевич

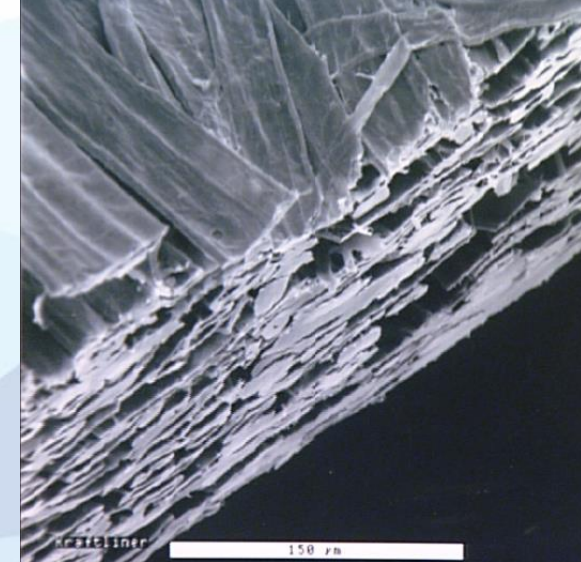
Анизотропия бумаги



Анизотропия max



Анизотропия min



Цель работы и объект исследования

Цель работы: установить зависимость между **степенью анизотропии** структуры бумаги и характером **распределения полей** локальных продольных, поперечных и сдвиговых деформаций в условиях одноосного растяжения

Объект исследования:

анизотропные лабораторные отливки бумаги из смеси товарной сульфатной беленой хвойной – 30% и лиственной – 70% целлюлозы

Изготовление анизотропных лабораторных образцов бумаги

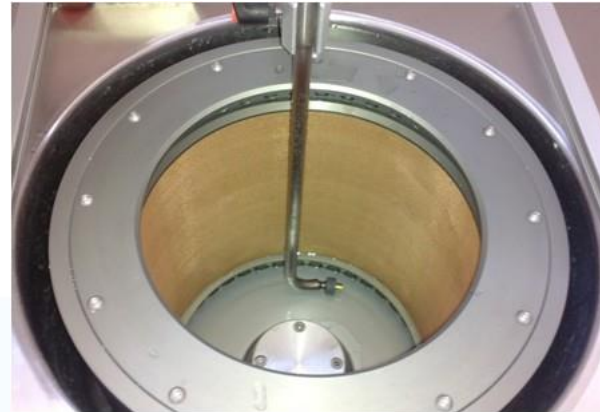
Формующее устройство динамического листоотливного аппарата (ДЛОА)



с установленной сеткой

готовая мокрая отливка на сетке

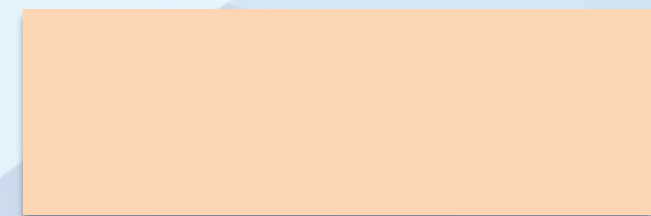
Формующая камера ДЛОА



Экран управляющей программы ДЛОА



Форма и размеры отливки:



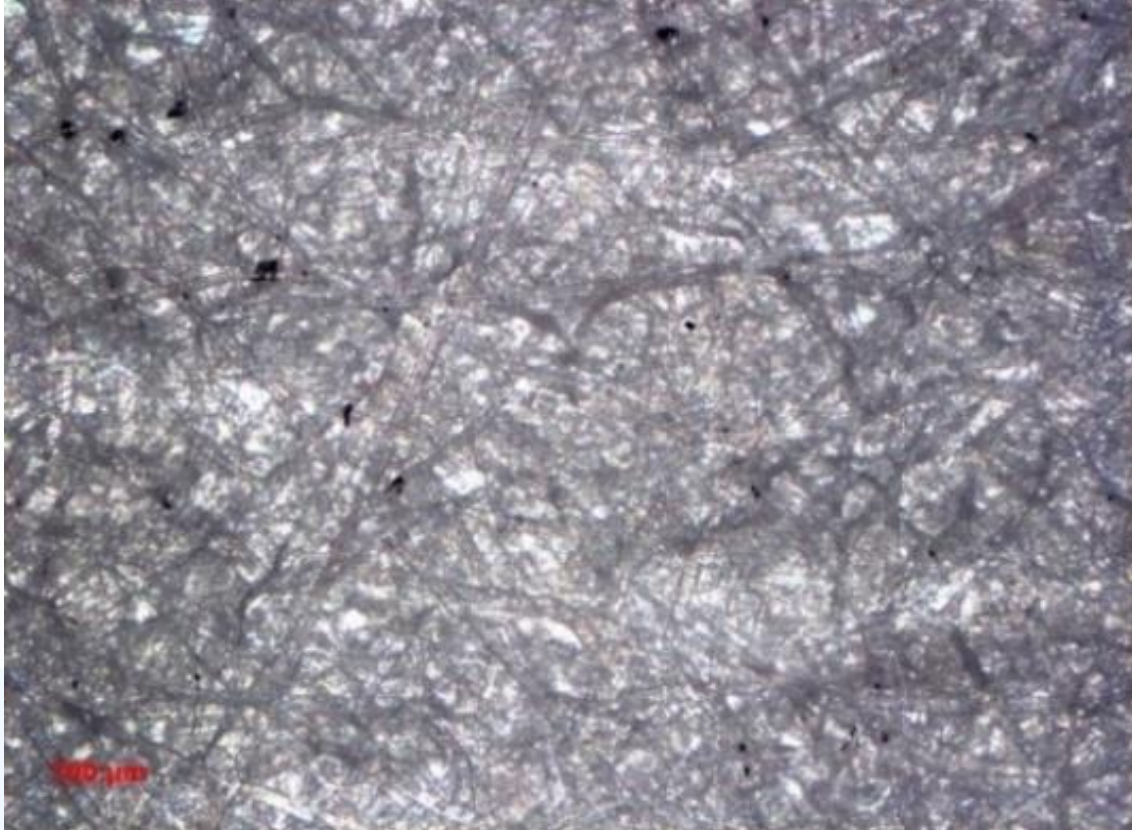
245×900 мм



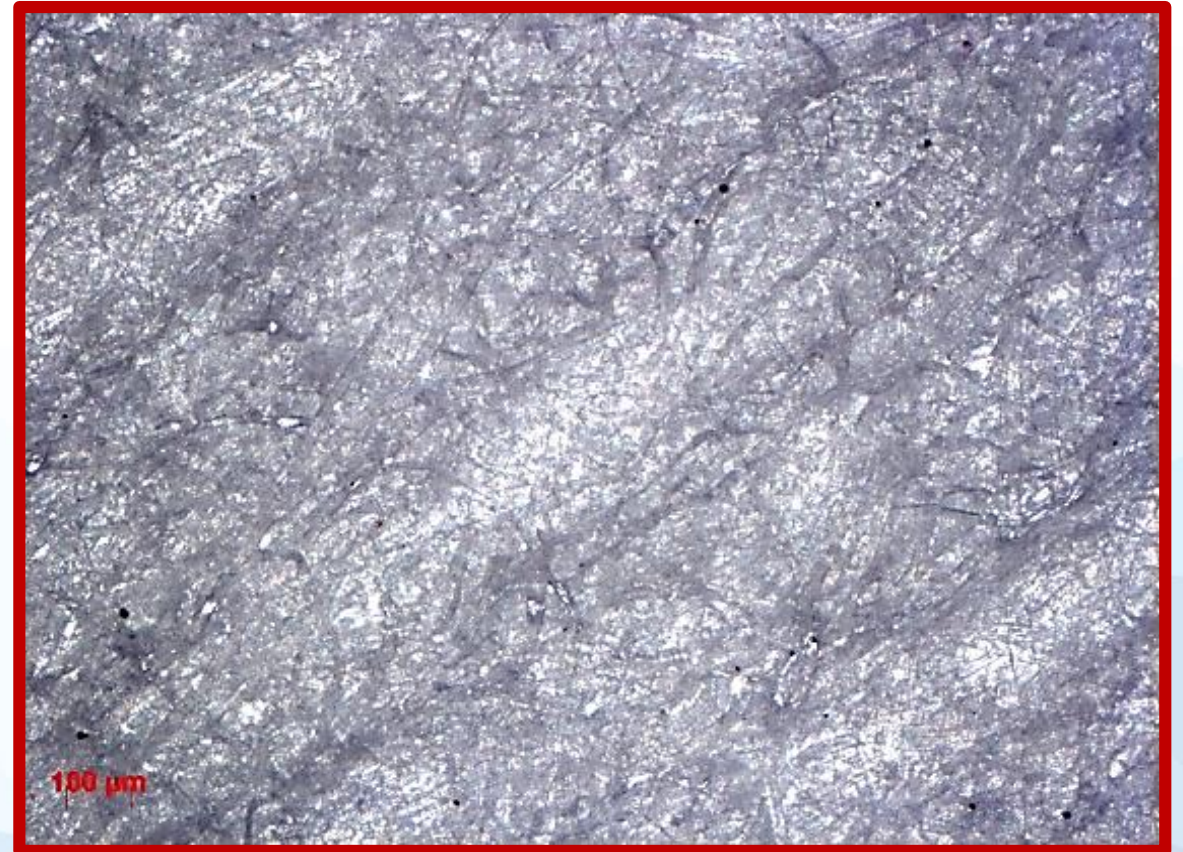
Моделирование анизотропной структуры образцов бумаги

Фактор	Регулируемый параметр	Величина параметра для режима	
		R1	R6
Скорость сетки	Окружная скорость формирующей сетки ДЛОА, v , м/мин	800	1350
Скорость струи (давление струи)	Обороты насоса, подающего массу на сетку, p , об/мин	1400	300
Диаметр форсунки	Типоразмер форсунки, d	2504	2504
Продолжительность отлива, мин	—	3	5
Анизотропия	Анизотропия	min	max

Изображения образцов лабораторной анизотропной бумаги



R1*



R6*

Методика измерения локальных деформаций в образцах бумаги при растяжении

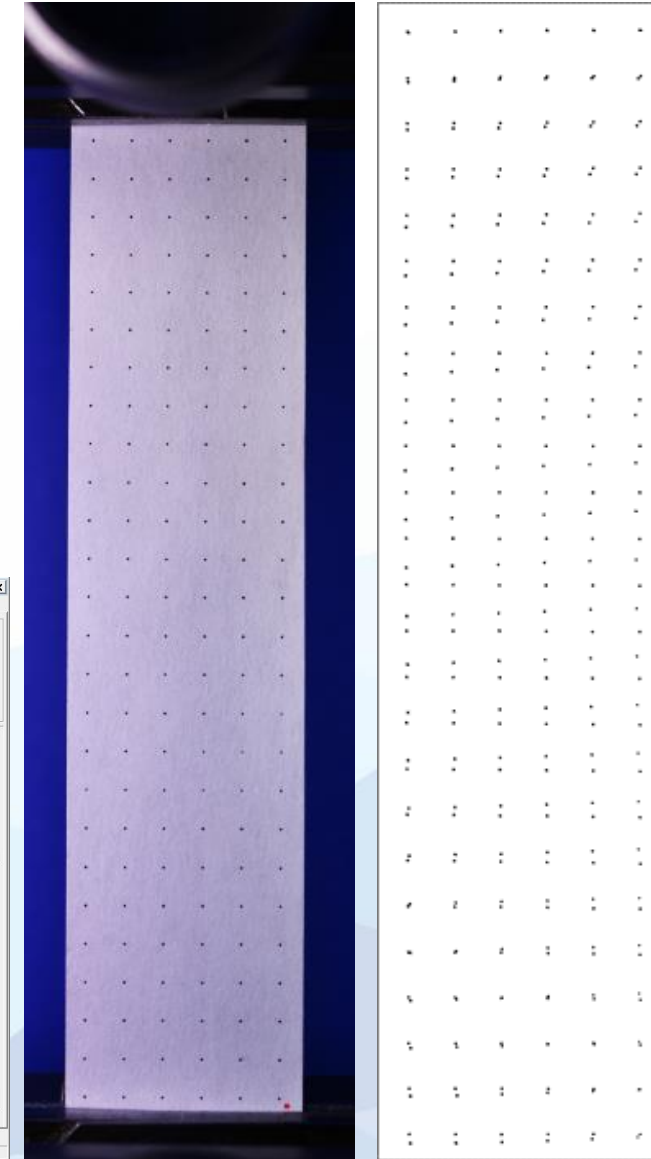
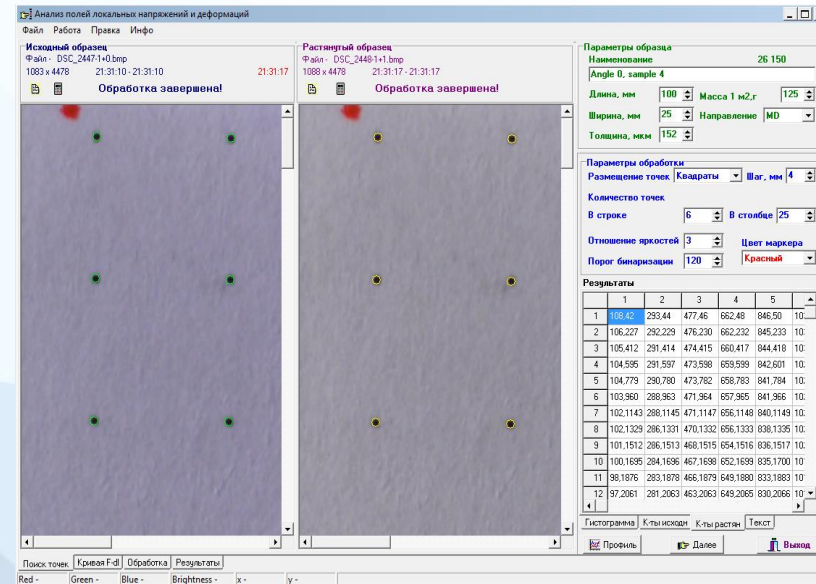
Основные этапы:

1. Отбор образцов для исследования: угол TSO $\rightarrow 0$;
2. Подготовка к испытанию: нанесение матрицы точек (узлов), нарезка на полоски размерами 200×25 мм (25×6 узлов) под углом 0,30,60,90° к MD;
3. Испытание на одноосное растяжение с постоянной скоростью на вертикальной разрывной машине с одновременной **фотофиксацией** процесса испытания;

4. Математическая обработка координат и смещений узлов сетки **до и после растяжения** с помощью специально разработанной программы*;

5. Статистическая интерпретация результатов измерений;

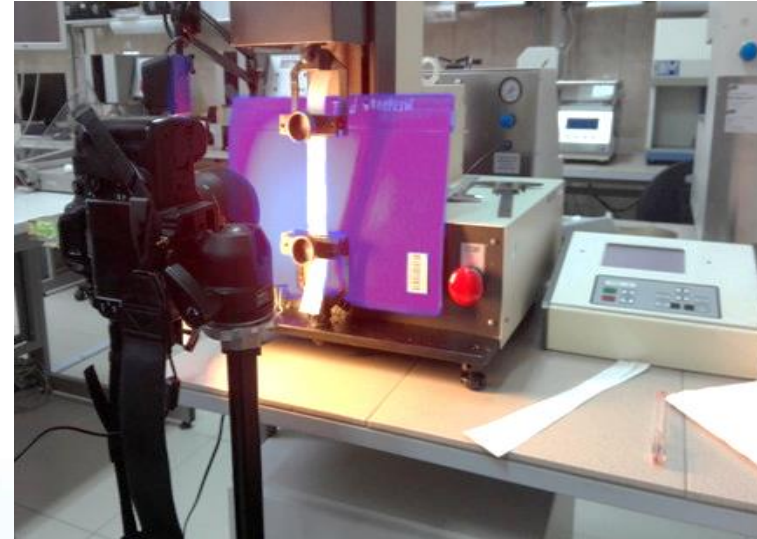
6. Оценка точности методики



Условия проведения эксперимента

- **Оборудование:**

вертикальная разрывная машина ИТС-101, ПО*, камера NIKON D600, объектив AF-S Micro-Nikkor 60/2.8, фокусное расстояние 60 мм, диафрагма f/8, выдержка 1/100 с, светочувствительность ISO 1600;



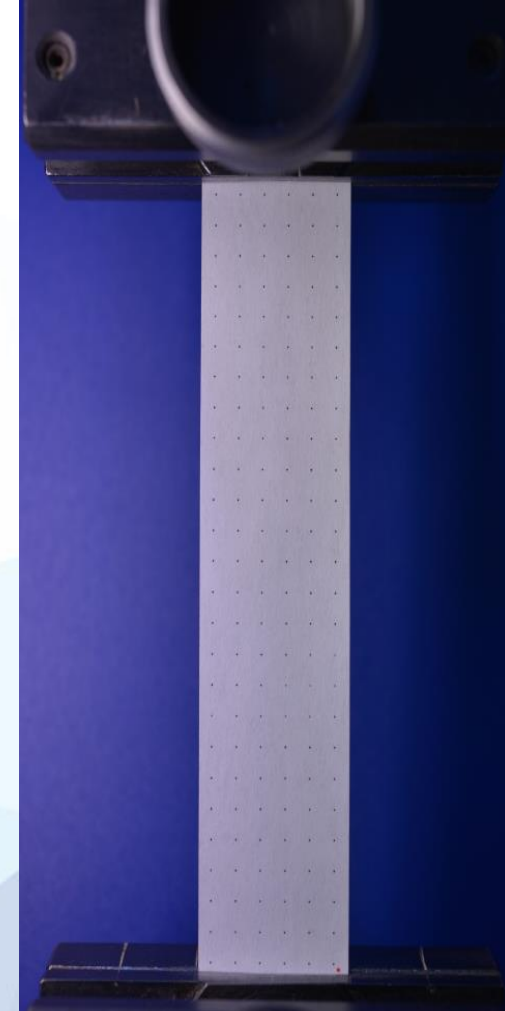
- **Условия:**

скорость растяжения 10 мм/мин, разрешение 24 Мп (6016×4016), режим sRGB, 24 бит со скоростью 1 кадр/сек.

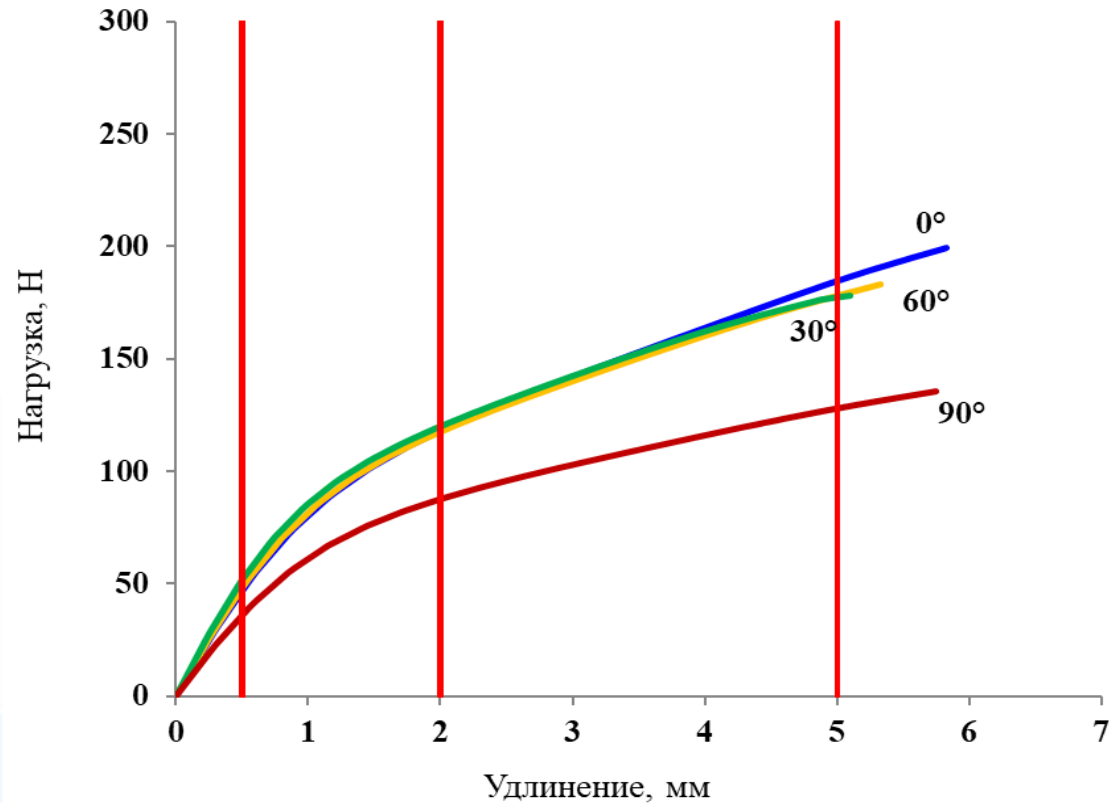
- **Продолжительность:**

непосредственно от момента начала приложения нагрузки и до момента физического разрушения образцов;

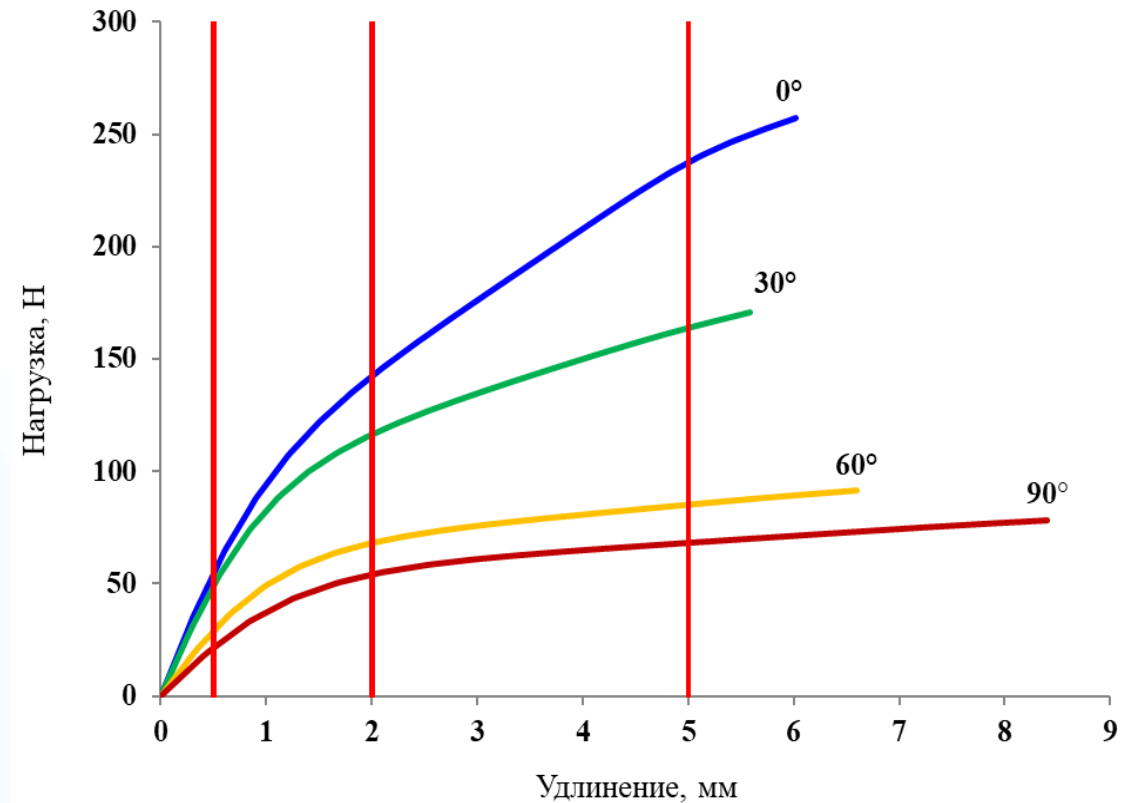
Процесс испытания сопровождается одновременной регистрацией кривых зависимостей «нагрузка-удлинение».



Влияние анизотропии структуры на механические свойства бумаги



R1*



R6*

Точка «**0,5 мм**» соответствовала упругой, «**2,0 мм**» – замедленно-упругой области деформирования всех образцов, точка «**5,0 мм**» – зоне предразрушения.

* R1 и R6 – лабораторные образцы бумаги, изготовленные в соответствии с параметрами отлива режимов R1 и R6

Деформационные характеристики лабораторных анизотропных образцов бумаги

Характеристика	Направление	Режим отлива	
		R1	R6
Индекс формования		35,9	33,1 ↓
Жесткость при растяжении, TSI, кН×м/г	MD (0 °)	9,52	11,54
	CD (90 °)	6,62	3,93
	MD/CD	1,43	2,93 ↑
Разрывная длина L, м	MD	5514	6440
	CD	3509	1849
	MD/CD	1,57	3,48 ↑
Предел упругости σ_1 , МПа	MD	8,0	6,1
	CD	6,1	4,1
	MD/CD	1,31	1,49 ↑
Деформация в точке разрушения ε_p , %	MD	5,83	6,02
	CD	5,75	8,40
	MD/CD	1,01	0,72 ↓
Модуль упругости в области предразрушения, E_2 , МПа	MD	399	345
	CD	231	54
	MD/CD	1,73	6,39 ↑

Измерение локальных деформаций в структуре образца при растяжении*

• Основная концепция МКЭ:

Согласно МКЭ, исследуемый объект **аппроксимируется дискретной моделью**, которая строится из отдельных частей – конечных элементов, соединяющихся между собой в узлах. Совокупность соединенных между собой и прикрепленных к основанию конечных элементов образует расчетную схему, называемую конечноэлементной схемой или конечноэлементной моделью.

• Алгоритм расчета локальных напряжений и деформаций

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \times \mathbf{U} \quad (1)$$

\mathbf{B} – матрица градиентов;
 \mathbf{U} – вектор смещения узлов сетки

Деформация Δ конечного элемента

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \times \begin{bmatrix} u_{x1} \\ u_{y1} \\ u_{x2} \\ u_{y2} \\ u_{x3} \\ u_{y3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Матрица градиентов

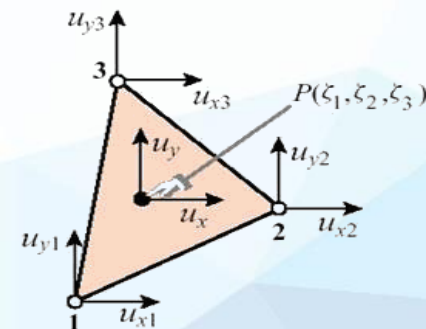
$$\mathbf{B} = \frac{1}{2A} = \begin{bmatrix} y_2 - y_3 & 0 & y_3 - y_1 & 0 & y_1 - y_2 & 0 \\ 0 & x_3 - x_2 & 0 & x_1 - x_3 & 0 & x_2 - x_1 \\ x_3 - x_2 & y_2 - y_3 & x_1 - x_3 & y_3 - y_1 & x_2 - x_1 & y_1 - y_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

A – площадь линейного треугольного конечного элемента

Перемещение точек элемента

$$\begin{bmatrix} u_{x1} \\ u_{y1} \\ u_{x2} \\ u_{y2} \\ u_{x3} \\ u_{y3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^u - x_1^p \\ y_1^u - y_1^p \\ x_2^u - x_2^p \\ y_2^u - y_2^p \\ x_3^u - x_3^p \\ y_3^u - y_3^p \end{bmatrix} \quad (3)$$

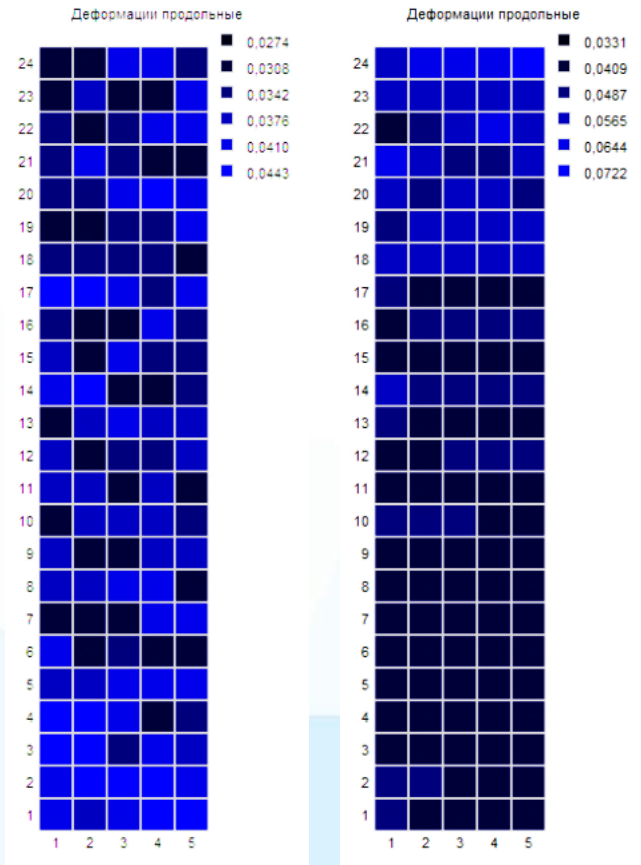
$x_i, y_i, i = 1, 2, 3$ – координаты 1, 2 и 3 узлов треугольного элемента, измеряемые до (x_i^a, y_i^a) и после растяжения (x_i^u, y_i^u)



Интерполяция перемещений в пределах треугольного конечного элемента

Распределение локальных деформаций в структуре образцов бумаги*

продольные



$\sigma_x = 0,0050$

$\sigma_x = 0,0095$

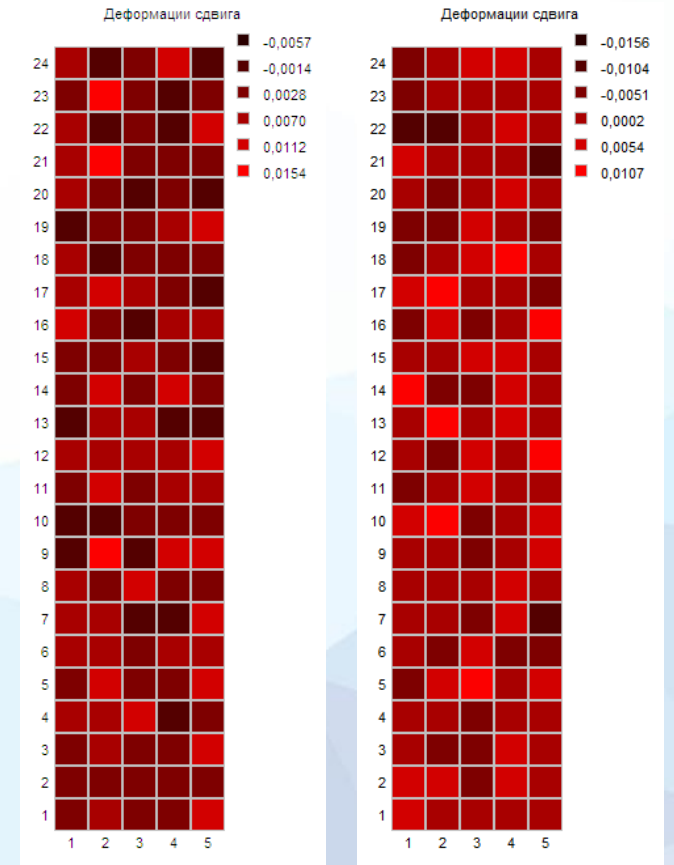
поперечные



$\sigma_x = 0,0044$

$\sigma_x = 0,0042$

сдвиговые



$\sigma_x = 0,0057$

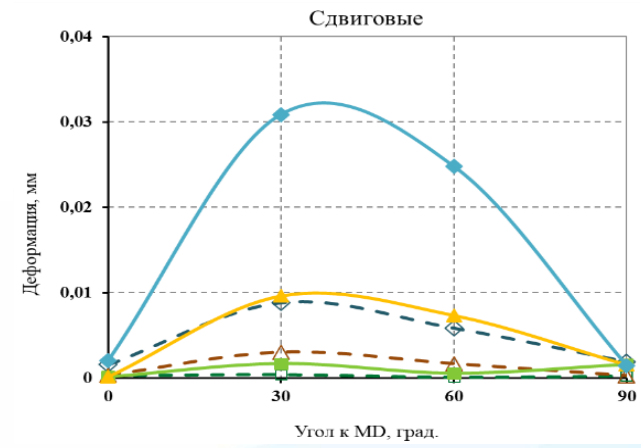
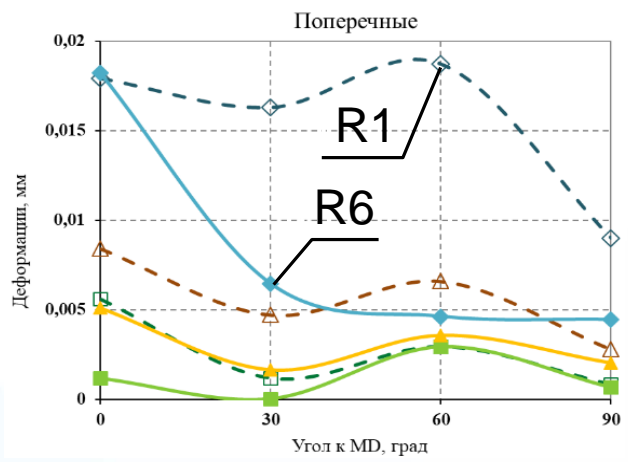
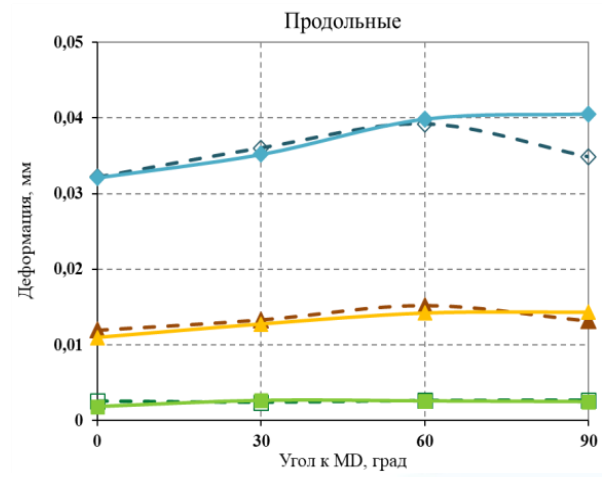
$\sigma_x = 0,0057$

* при одноосном растяжении до общей деформации 5 мм, угол вырезки образцов к MD 90°

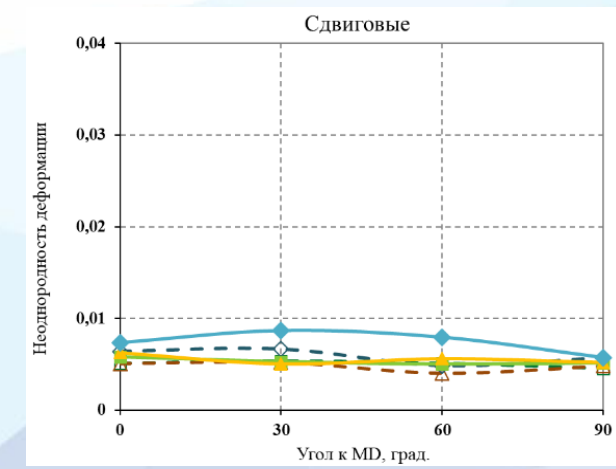
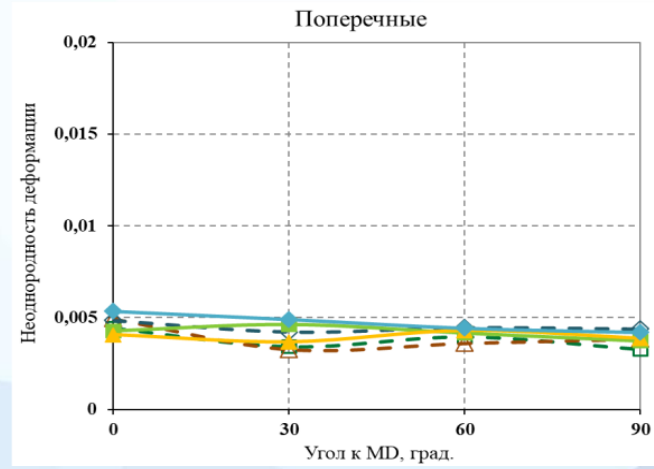
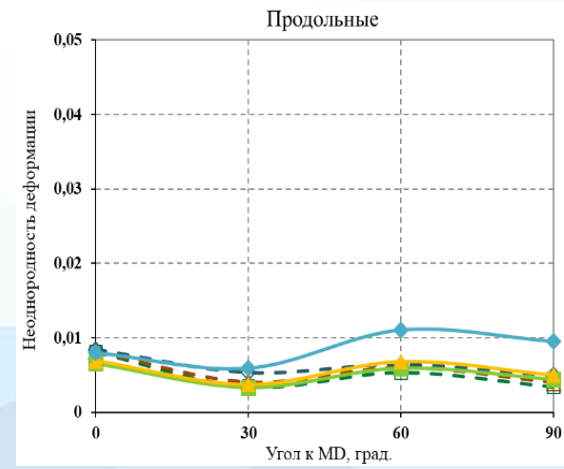


Количественная оценка распределения локальных деформаций в структуре анизотропных образцов бумаги

средние значения локальных деформаций



средние квадратические отклонения локальных деформаций



растяжение до общей деформации R1 ■ 0,5 мм ▲ 2 мм ◆ до 5 мм R6 ■ 0,5 мм' ▲ 2 мм' ◆ 5 мм'

R1 и R6 – лабораторные образцы бумаги, изготовленные в соответствии с параметрами отлива режимов R1 и R6.

ВЫВОДЫ

1. Установлены количественные закономерности, связывающие **параметры отлива** и степень анизотропии **структуры** лабораторных образцов бумаги.
2. Установлены зависимости между **параметрами структуры** бумаги (степенью анизотропии и углом преимущественной ориентации волокон) и **характеристиками полей локальных** продольных, поперечных и сдвиговых **деформаций**, развивающихся в условиях одноосного растяжения.
3. Впервые установлены **величины, степень неоднородности и закономерности развития** локальных растягивающих (продольных), сжимающих (поперечных) и сдвиговых деформаций в анизотропных образцах бумаги с различным преимущественным направлением ориентации волокон в их структуре.

Спасибо за внимание!



Романова А.Н.
a.romanova@narfu.ru



Казakov Я.В.
j.kazakov@narfu.ru



Малков А.В.
a.malkov@narfu.ru

*Работа выполнена с использованием оборудования
ЦКП НО «Арктика» и ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (САФУ)*