

На правах рукописи

**КОЛОСОВА МАРИНА ВЛАДИМИРОВНА**

**ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МИКРОРЕЛЬЕФА  
МНОГОСЛОЙНОГО КАРТОНА НА ПЕЧАТНЫЕ СВОЙСТВА**

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства  
и переработки древесины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург – 2026**

Работа выполнена на кафедре процессов и аппаратов химической технологии в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна».

Научный руководитель – **Мидуков Николай Петрович** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химической технологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Официальные оппоненты – **Шкуро Алексей Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

**Гурьев Александр Владиславович** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова».

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

Защита состоится «24» сентября 2026 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.02 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, зал заседаний Ученого совета, А-233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4, <https://sutd.ru/nauka/dissertacii/>

В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п.28 Положения о присуждении ученых степеней).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Махотина Людмила Герцевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время к упаковочному картону, в частности, гофрокартону предъявляются высокие требования не только по прочностным свойствам, но и по печатным. Информация о товарах народного потребления наносится на упаковку из гофрокартона в основном с использованием флексографической печати на верхний плоский слой – лайнер. Картон изготавливают, как правило, в два слоя, в редких случаях – в один (из первичного волокна (крафт-лайнер)). Также производится трехслойный тест-лайнер, преимуществами которого являются достаточная прочность и низкая стоимость благодаря использованию вторичного сырья. Широко распространена комбинация белого верхнего слоя из первичного волокна и нижнего слоя, произведенного из макулатуры марки МС-5Б, содержащей отходы производства гофрокартона и использованную упаковку. Верхний лайнер с белым покровным слоем у производителей получил название вайт-лайнер.

Печать наносится на вайт- или тест-лайнер, а ее качество зависит от поверхности, которая характеризуется шероховатостью, равномерностью распределения толщины, пористостью, однородностью формования, которые формируют микроструктуру и микрорельеф. Для оценки шероховатости применяются косвенные методы, основанные на проходимости воздуха через зазоры между рабочим элементом измерительного прибора и поверхностью бумаги или картона. Из-за большого разброса данных производитель не указывает точное значение шероховатости, а приводит предельное. Для гофрокартона, шероховатость которого увеличивается за счет волнистости, обусловленной наличием флутинга, метод не применим, так как значения выходят за пределы измерения прибора. Таким образом, разработка метода оценки шероховатости является актуальной задачей для лайнеров и гофрокартона.

Помимо шероховатости на качество отиска влияет пористость, которая также оценивается производителями картона косвенным путем по расходу воздуха (мл/мин), проходящего через исследуемый материал. Поскольку данные получены косвенным путем, их необходимо уточнить.

Еще одним важным свойством, которое определяет печатные свойства, является неоднородность формования, которая контролируется производителями бумаги с помощью методов, основанных на измерении интенсивности прохождения света через бумагу или картон. У каждого прибора свой алгоритм расчета неоднородности формования. В отличие от бумаги, сложно определить неоднородность формования на просвет многослойных лайнеров с более высокой массой квадратного метра и тем более гофрокартона. Показатели неоднородности в каждом слое не фиксируют, однако полученная информация помогла бы выявить проблемные участки и дать производителю актуальные данные по эффективности работы линий массоподготовки.

Комплексные исследования перечисленных свойств путем разработки методов, в совокупности с оценкой равномерности распределения толщины, позволят получить новые знания о микроструктуре и микрорельефе лайнера, на который наносится печать. Эти показатели в конечном итоге определяют печатные

свойства, которые необходимо контролировать в режиме онлайн, что позволит снизить долю брака, а следовательно, сократить затраты сырья, воды, энергии, тем самым рационально использовать ресурсы. Данная работа соответствует критическим и сквозным технологиям (технологические направления), предусмотренным Концепцией технологического развития на период до 2030 года, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 20.05.2023 № 1315-р, в том числе: «Новые производственные технологии». Работа выполнялась в рамках совместного российско-белорусского Гранта, финансируемого Комитетом по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга и Государственным комитетом науки и технологии Республики Беларусь<sup>1</sup>.

**Степень разработанности.** Изучению свойств бумаги и картона посвящены труды многих российских и зарубежных ученых. Ведущими российскими учеными в этой области являются Фляте Д.М., Смолин А.С., Аким Э.Л., Куров В.С., Дубовый В.К., Комаров В.И., Казаков Я.В., Гурьев А.В. и др. Результаты их исследований в области изучения свойств бумаги и картона, в том числе печатных, позволили более глубоко оценить влияние структуры на свойства картона. Среди зарубежных ученых можно выделить работы Кларка Дж., Хирна У., Хайнеман С. Сонг С. и др. Важно отметить работы Бендстена Р., Герлея У. и Бекка У., чьи исследования легли в основу международных стандартов определения шероховатости и воздухопроницаемости, а также Тойвакка М. и Больстрем Р., одними из первых представивших изображения микроструктуры поперечного среза в высоком качестве. Зильберглейт М.А. с коллегами в течение длительного времени занимались изучением влияния рельефа бумаги и картона на печатные свойства и достигли значительных результатов.

**Целью работы** является разработка методов оценки влияния микроструктуры и микрорельефа на печатные свойства.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать способ исследования микроструктуры для оценки параметров картона и устройство для его реализации;
- разработать метод оценки неоднородности формирования многослойного картона с помощью графической обработки изображений микроструктуры поперечного среза;
- исследовать влияние микроструктуры поперечного среза, путем графической обработки его изображения на микрорельеф многослойного картона (шероховатость, пористость и толщина);
- экспериментально подтвердить возможность использования методов оценки физических свойств (толщины и неравномерности ее распределения, шероховатости, пористости, неравномерности формирования) по графической

---

<sup>1</sup> Совместный научный и научно-технический проект, выполняемый образовательными и научными организациями, расположенными на территориях Санкт-Петербурга и Республики Беларусь на тему: «Модель машинно-аналитического комплекса и ее реализация на базе цифровых технологий при решении задач управления и прогнозирования качества в производстве целлюлозных композиционных материалов»

обработке микроструктуры поперечного среза, а также разработать алгоритм прогнозирования качества печати на многослойном картоне;

- разработать практические рекомендации для предприятий ЦБП, производящих картон, с целью онлайн-контроля качества печати с учетом неравномерности структуры и микрорельефа многослойного картона.

**Научная новизна.** На основании графической обработки изображений микроструктуры поперечного среза разработан алгоритм оценки неоднородности формования многослойного картона. Получены новые данные оценки микрорельефа поверхности и структуры многослойного картона, что позволило разработать методы определения шероховатости, пористости, толщины и неоднородности ее распределения. Новизна способа, основанного на графической обработке микроструктуры поперечного среза, устройство и алгоритмы для определения неоднородности формования, шероховатости, пористости и толщины многослойного картона подтверждены патентами РФ (№ 2835897, № 239168) и Республики Беларусь («Патэнт № 13964»).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработан метод оценки неоднородности формования многослойного картона. Практическая значимость метода подтверждена результатами сопоставления экспериментальных данных неоднородности формования многослойного картона предлагаемым и существующими методами.

Разработан метод, позволяющий определить шероховатость картона-лайнера и гофрокартона в диапазоне, который расширяет возможности стандартных способов, основанных на проходимости воздуха через зазор между рабочим элементом измерительного устройства и поверхностью образца.

Установлена зависимость между данными воздухопроницаемости, полученными стандартным методом, и пористости, определенной по графической обработке изображения микроструктуры многослойного картона.

Предлагаемый метод, защищенный патентом, позволил установить среднее значение толщины многослойного картона, определенной с помощью графической обработки верхнего и нижнего профилей, ограничиваемых область поперечного среза. Средние значения толщины позволяют повысить точность расчета физических и механических свойств многослойного картона.

Разработаны практические рекомендации для онлайн-контроля качества оттиска с учетом неравномерности структуры и микрорельефа многослойного картона, изготавливаемого на ОАО «Каравеево».

**Методология и методы исследования.** При получении поперечных срезов многослойного картона был использован запатентованный автором метод, включающий подготовку микроструктуры образцов, их визуализацию с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии. Неоднородность формования определялась путем графической обработки изображений микроструктуры поперечного среза с помощью векторных и растровых программ, на установке Formation2D, предоставленной НΠΑО «Светогорский ЦБК» и по алгоритмам, разработанным учеными Северного арктического федерального университета.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) была выполнена в центре коллективного пользования (ЦКП) при НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей». Подготовка волокнистой суспензии, изготовление опытных образцов, контроль качества картона проводились в лаборатории центра коллективного пользования (ЦКП) «Биорефайнинг древесины и нанотехнологии» СПбГУПТД в соответствии с российскими и международными стандартами. Промышленные образцы многослойного картона были произведены на автоматической линии ОАО «Караваево» 9РА-109.9FGT 17; способ нанесения печати – флексография.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) Способ исследования микроструктуры по изображению поперечного среза для оценки параметров картона и устройство для его реализации.
- 2) Метод оценки неоднородности формования многослойного картона с помощью графической обработки изображений микроструктуры поперечного среза.
- 3) Способы оценки шероховатости, пористости, толщины и неравномерности ее распределения, определяющих микрорельеф и микроструктуру многослойного картона.
- 4) Практические рекомендации по снижению доли брака на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) путем внедрения системы онлайн-контроля качества печати с учетом неравномерности структуры и микрорельефа многослойного картона.

**Степень достоверности и апробация работы.** Результаты работы были представлены на международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов», Архангельск, 2023 и 2025 гг.; Renewable resources: forest biomass processing technologies, chemistry, medicine: Conference proceedings of the International Conference, Санкт-Петербург, 2025 г.; «Леса России: политика, промышленность, наука, образование», Санкт-Петербург, 2023 и 2026 гг.; 89 и 90-ая научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов с международным участием, г. Минск, 2025 и 2026 гг.; Всероссийская научно-техническая конференция «Макулатура и целлюлоза: ресурсы, наука, техника, производство, продукты, экология, перспективы», Караваево, Московская область, 2024 и 2025 гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе статьи в зарубежных изданиях на английском языке, входящих в базы Web of Science, Scopus и ВАК РФ по специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины. Получены два патента РФ и один международный патент Республики Беларусь.

**Личный вклад автора** заключается в определении цели, постановке задач, проведении экспериментальных исследований, обработке полученных результатов, их обобщении, формулировке выводов и в подготовке к публикации полученных результатов. Автором разработаны методы оценки печатных свойств многослойного картона на основе графической обработки микроструктуры

поперечного среза, которые являются основой для онлайн-контроля и прогнозирования свойств многослойного картона.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 156 страницах машинописного текста и содержит 75 рисунков, 9 таблиц, 175 наименований использованных источников литературы, 5 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость.

**В первой главе** представлены наиболее значимые результаты в исследовании неоднородности формования картона российских и зарубежных ученых (Смолин А.С., Зильберглейт М.А. и др.). Приведены результаты патентного поиска методов и приборов оценки неоднородности формования, а также критический анализ литературы, посвященной оценке шероховатости и пористости бумаги (Бендстен Р., Герлей У. и др.). Проанализированы результаты исследований эффективной и стандартизированной толщин бумаги и картона в контексте оценки механических свойств (ученые научной школы В.И. Комарова: Казаков Я.В., Гурьев А.В. и др.). Представлен аналитический обзор, в котором оценивается современное состояние исследований в области печатных свойств бумаги и картона.

**Вторая глава** посвящена методической части работы. Представлена информация об объектах и предметах исследования, а также об объектах сравнения. На рисунке 1, *а, б* представлены объекты исследования – двух и трехслойные образцы тест-лайнера, полученные из макулатуры МС-7 (покровный слой) и МС-5Б (нижний слой). Качество оттиска исследовано применительно к гофрокартону различных марок, произведенных на ОАО «Караваяево» и литой таре (рис. 1, *в, г*).

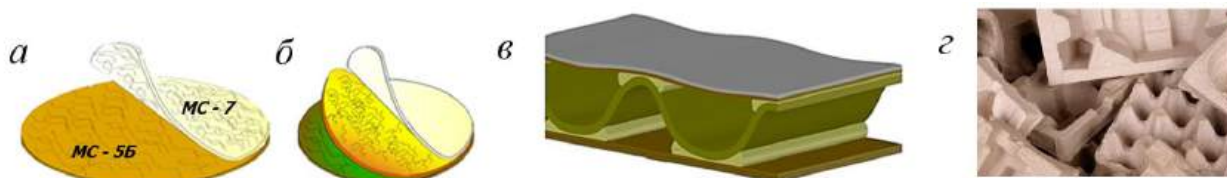


Рисунок 1 – Предметы исследования: *а* – лабораторный образец тест-лайнера; *б* – лабораторный образец трехслойного тест-лайнера; предметы сравнения: *в* – образец гофрокартона; *г* – литая тара

Для проверки адекватности предлагаемых методов оценки печатных свойств были изготовлены лабораторные образцы, состоящие из одного и нескольких слоев на основе различных видов макулатуры (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристики испытываемых образцов многослойного картона массой 120 г/м<sup>2</sup>

Наименование	Описание	Цвет
7А_120_I - IV	Одно-, двух-, трех- и четырехслойный картон лайнер, состоящий из МС-7	белый
5Б_120_I - IV	Одно-, двух-, трех- и четырехслойный картон лайнер, состоящий из МС-5Б	бурый
7А+5Б_II	Двухслойный картон лайнер, состоящий из МС-7 и МС-5Б	белый/бурый
7А+5Б_III	Трехслойный картон лайнер, состоящий из МС-7 для двух покровных слоев (80 г) и МС-5Б – для нижнего слоя (40 г)	2 белых/ бурый
7А+5Б_IV	Четырехслойный картон лайнер, состоящей из МС-7 для двух покровных слоев (60г) и МС-5Б (60г)	2 белых /2 бурых
КВ_образец 1	Двухслойный наружный слой, произведенный на ОАО «Каравеево» из макулатуры МС-5Б	бурый/бурый

В третьей главе представлены описание способа для исследования микроструктуры поперечного среза и устройства для его реализации (патенты РФ № 2835897, № 239168 и Республики Беларусь №13964). На рисунке 2 показана конструкция фиксатора для четырёх образцов, которая применялась для заливки полимером и последующей полировки.

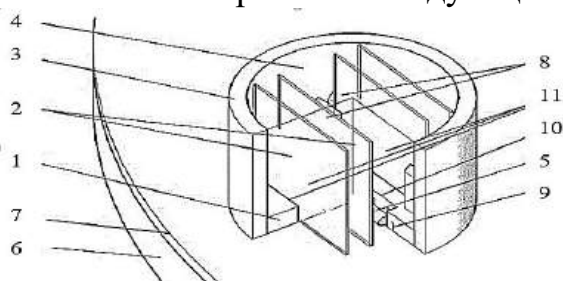


Рисунок 2 – Фиксатор образцов картона: 1 – основание, 2 – образцы, 3 – заливочная форма, 4 – синтетический полимер, 5 – калибровочный элемент, 6 – основание шлифовально-полировального станка (Struers Tegamin-25), 7 – абразивное покрытие, 8 – направляющие, 9 – размерная шкала, 10 – прямоугольное отверстие для калибровочного элемента, 11 – фиксаторы-зазоры

Устройство для фиксации малоразмерного твердого образца перед получением среза для микроскопического исследования состоит из основания 1 для размещения твердого образца 2, заливочной формы 3, вещества для заливки (прозрачный синтетический полимер) 4, калибровочного элемента 5, который позволяет установить глубину среза, установленного в отверстие 10. Для получения поперечных срезов использовался полировщик состоящий из вращающегося диска 6, на котором закреплено абразивное покрытие 7, при этом направляющие позволяют шлифовать твердый образец под собственным весом.

Твердый образец, залитый в синтетический прозрачный полимер, устанавливается в зазор 11 и жестко фиксируется в устройстве. В результате полировки и последующей СЭМ были получены изображения микроструктуры поперечного среза, после чего выделены флоккулы (рис. 3, б).

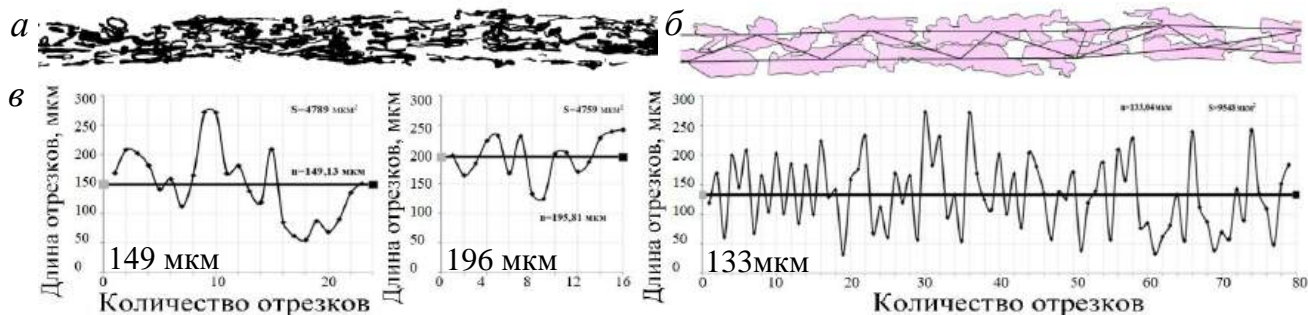


Рисунок 3 – Пример графической обработки поперечного среза картона лайнера: а – области среза волокон картона, б – группировка во флоккулы; в – результаты статистической обработки расстояний между центрами флоккул

В материалах патента подробно описан алгоритм графической обработки микроструктуры поперечного среза картона. Неоднородность формирования оценивалась по равномерности распределения отрезков, соединяющих центры флокул. На рисунке 3, в показан пример, в котором неравномерность распределения длин отрезков в верхнем и нижнем слое снизилась с 196 и 149 мкм до 133 мкм при совмещении двух слоев. Снижение неоднородности на 23 % (в данном примере) при разделении картона на два слоя соответствует показаниям существующих приборов.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований по оценке неоднородности формирования с помощью существующих приборов (рис. 4).

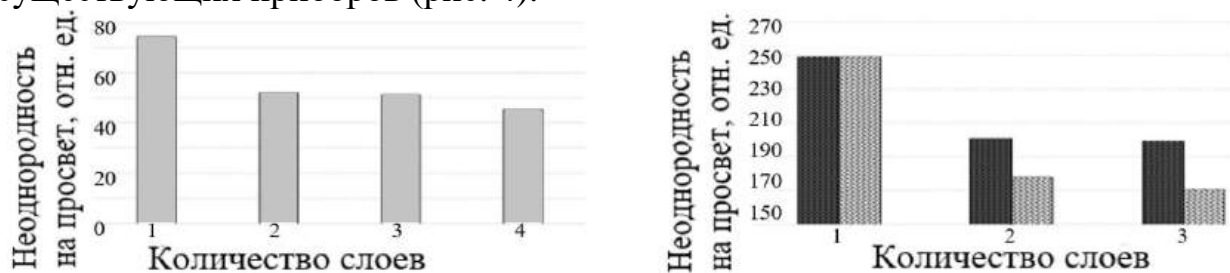


Рисунок 4 – Влияние количества слоев на неоднородность на просвет образцов, изготовленных из вторичных волокон: ■ – вторичные волокна из MC-5Б; ▨ – композиция вторичных волокон из MC-7 и MC-5Б; □ - вторичные волокна из MC-7

Несмотря на различия в методах оценки неоднородности формирования, тенденция к её снижению при увеличении числа слоёв неизменна (табл. 2). Появление второго слоя уменьшает этот показатель на 23–25%, тогда как добавление третьего слоя снижает неоднородность не более чем на 5%.

Таблица 2 – Снижение неоднородности многослойного картона лайнера, определенное разными приборами и методами

Снижение неоднородности	Способы оценки неоднородности		
	Метод, разработанный в САФУ, %	Formation2D, НПАО «Светогорский ЦБК», %	Предлагаемый метод графической обработки среза, %
с появлением второго слоя	25	24	23
с появлением третьего слоя	Не более 5		

Для оценки шероховатости, толщины и пористости картона, необходима графическая обработка изображения микроструктуры поперечного среза. На первом этапе были сформированы панорамные изображения протяженностью в 2500 мкм, которая регламентирована стандартом для графического метода профилирования при  $Ra = 12,5$  мкм (среднее арифметическое отклонение профиля). Требуемая протяженность достигалась совмещением и позиционированием ряда снимков СЭМ в векторном редакторе. Затем были выделены профили верхнего и нижнего слоев (рис. 5, а). На следующем этапе графической обработки изображение области среза были разделены на 25 равных секторов (рис. 5, б), в каждом из которых определены максимальные и минимальные значения выступов и впадин профилей верхнего и нижнего слоев. На рисунке 5, в представлена схема фрагмента исследуемой области. Для каждого профиля построены три горизонтальные линии, соответствующие

максимальным выступам и минимальным впадинам ( $H_{i\_max1}$ ,  $H_{i\_max2}$  – максимальное значение высоты профиля 1 и профиля 2,  $h_{i\_min1}$ ,  $h_{i\_min2}$  – минимальное значение профиля 1 и профиля 2), а также средним значениям (средние линии  $n_1$ ,  $n_2$ ).

Максимальная толщина картона была определена по разнице между максимальным значением профиля 1 и минимальным значением профиля 2 ( $H_{max1} - h_{min2}$ ) (рис. 5, в). В данном примере она составила 243 мкм (рис. 5, б).

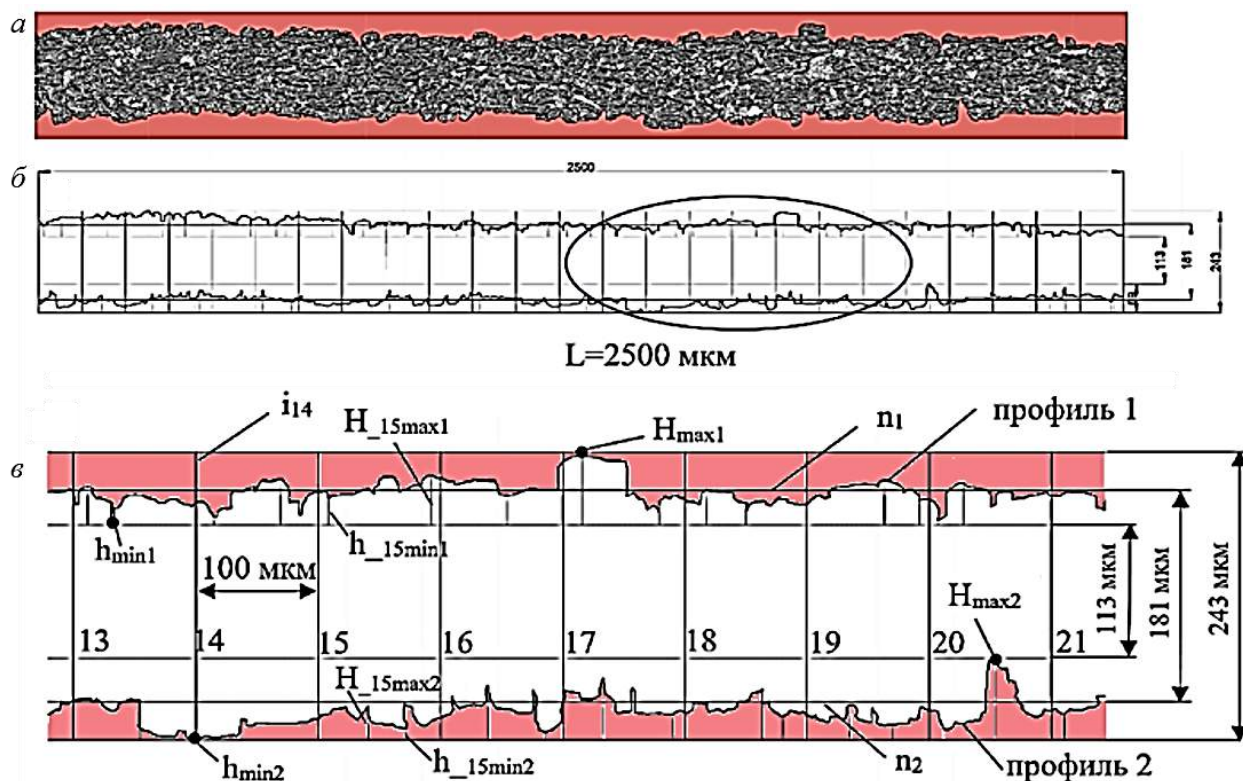


Рисунок 5 – Схема графической обработки изображения области среза, верхнего и нижнего профилей двухслойного картона: а – выделение области среза волокон с удалением области заливки картона полимером; б – выделение профилей и оценка толщин в пределах базовой длины; в – увеличение области исследования для визуализации схемы оценки толщин и равномерности их распределения: 1 – профиль покровного слоя; 2 – профиль нижнего слоя;  $L=2500$  мкм – базовая длина, по протяженности которой велись измерения

По анализу профилей были рассчитаны показатели шероховатости  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$  для покровного и нижнего слоёв (рис. 6).

Из рисунка 6 видно, что при шероховатости лицевой стороны картона  $Ra = 12,5$  мкм, показания прибора Р. Бендтсена хоть и входят в норматив шероховатости (до 400 мл/мин), но диапазон данных имеет большой разброс от 100 до 300 мл/мин. То же самое наблюдается и для тыльной стороны, у которой шероховатость в большинстве случаев находилась на уровне 16 мкм по  $Ra$ . Среднее арифметическое отклонение профиля ( $Ra$ ) исключает косвенность измерений и метод профилирования поверхности точнее описывает процесс получения графического изображения микрорельефа. Поэтому, несмотря на отсутствие корреляции между параметром шероховатости по методу Р. Бендтсена и  $Ra$ , проведённые исследования подтвердили возможность применения графического метода профилирования для оценки качества поверхности картона.

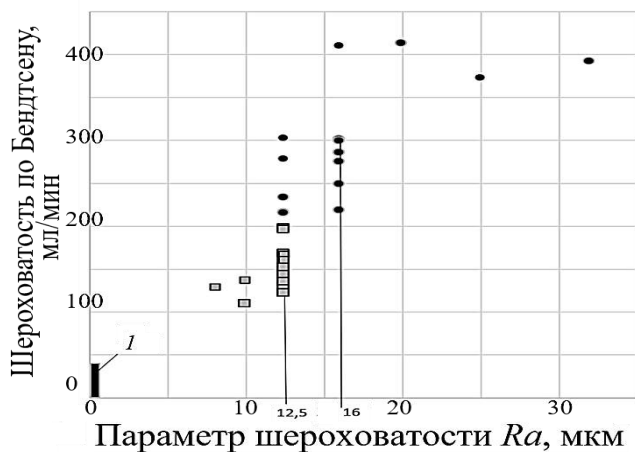
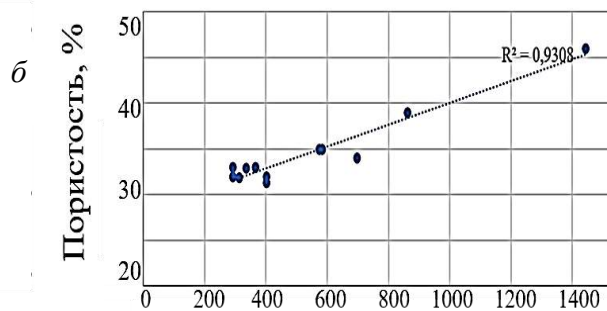
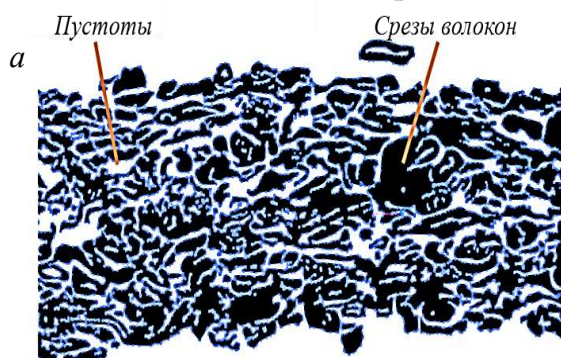


Рисунок 6 – Результаты сопоставления данных шероховатости по методу Р.Бендтсена и параметр  $Ra$ , установленный с путём графической и аналитической обработки профиля картона: 1 – диапазон шероховатости по Р.Бендтсену для мелованного картона;  $\square$  – результаты оценки шероховатости лицевой стороны картона;  $\bullet$  – результаты оценки шероховатости тыльной стороны картона

Также установлено, что при многослойном формовании структура внутреннего слоя существенно не влияет на итоговый профиль поверхности; его характеристики определяются микрорельефом сетки (на производстве) либо листами, между которыми образцы сушат в листоотливном аппарате. Предложенный метод позволяет расширить диапазон измерений шероховатости поверхности по профилю в пределах базовой длины 2500 мкм. При построении профилей моделировалось движение механического щупа, ориентированного перпендикулярно средним линиям профилей ( $n_1$ ,  $n_2$ ). Локальные углубления (впадины), выходящие за пределы основного контура поверхности, классифицировались как поры.

Была установлена корреляция между пористостью (в диапазоне 30–50 %) и воздухопроницаемостью образцов многослойного картона. Увеличение воздухопроницаемости коррелирует с повышением пористости, определённой методом графической обработки изображений поперечных срезов (рис. 7 а, б).



Воздухопроницаемость по Бендтсену, мл/мин

Рисунок 7 – Векторное представление волокон и пустот (пор) (а); взаимосвязь между воздухопроницаемостью, определённой по методу Р.Бендтсена и пористостью, установленной графическим методом (б)

Хотя ручная векторизация графических данных – наиболее точный метод количественного анализа пористости, он требует значительных временных затрат. Для удобства была использована программа для растровой обработки изображений с возможностью автоматической векторизации. Это позволило ускорить оценку площади пор за счёт вычислений в пикселях, сохранив при этом высокую точность, свойственную векторному представлению данных. Удобство векторного формата заключается в быстром и точном определении геометрических размеров выделенных срезов, в том числе толщины.

Основными причинами недостаточно точного определения толщины картона служат структурные дефекты: узлы волокон, крупные включения наполнителя, а также каверны или промоины в толще материала. Они приводят к увеличению стандартизованной толщины (определяемой толщиномером) при этом неровный профиль поверхности картона охватывает большое количество пустот. На рисунке 5 в пустоты на поверхности выделены красным цветом. Графическая обработка изображений микроструктуры поперечного среза картона позволяет количественно установить несоответствие эффективной толщины и стандартизованной, чтобы скорректировать некоторые механические характеристики.

Стандартизованная толщина картона сравнивалась с максимальной ( $H_{\max 1} - h_{\min 2}$ ) и с расстоянием между средними линиями профилей ( $n_1, n_2$ ) (рис. 5). На рисунке 8 показаны результаты сравнения 10 вариантов картона (по три образца каждого) из различных видов сырья. Из графика (рис. 8 а) видно, что данные, полученные с помощью толщиномера (стандартизованная толщина) для испытуемых образцов в условиях постоянной влажности воздуха и температуры больше соответствуют максимальной толщине ( $H_{\max 1} - h_{\min 2}$ ), определенной графическим путем ( $R^2 = 0,99$ ).

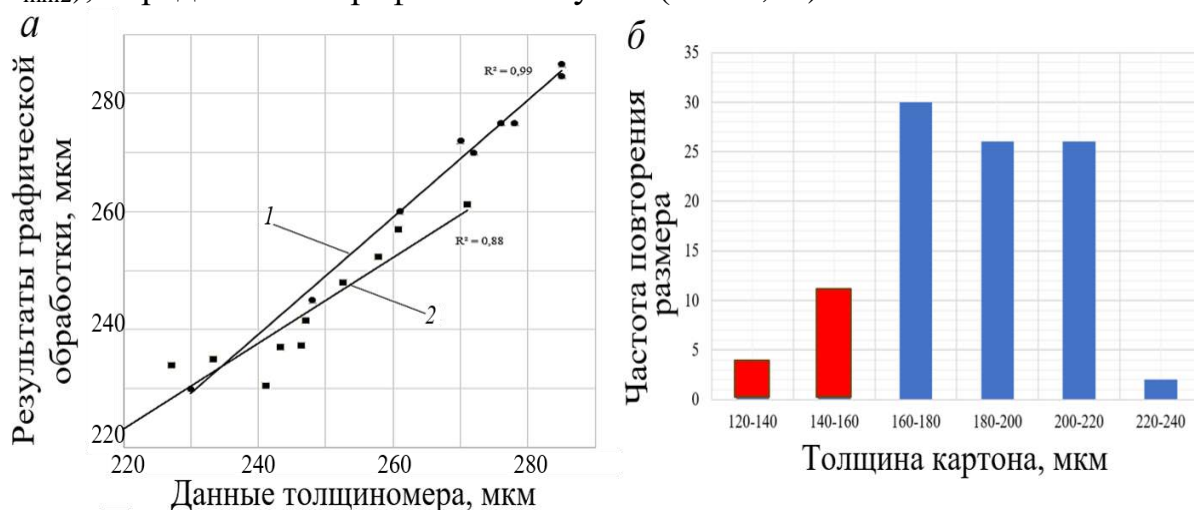


Рисунок 8 – Сопоставление стандартизованной с толщинами, определенными путём графической обработки: а – корреляция толщины (1 – с максимальным значением толщины ( $H_{\max 1} - h_{\min 2}$ ); 2 – со средним значением толщины (расстояние между линиями  $n_1, n_2$ )); б – равномерность распределения толщины по размерам

Среднее значение толщины (расстояние между линиями  $n_1, n_2$ ), которое следовало бы взять за эффективную и использовать при расчете физико-механических свойств соответствует в меньшей степени толщине ( $R^2 = 0,88$ ), определённой с помощью толщиномера. При расчете физико-механических свойств по эффективной толщине учитывается меньше пустот, следовательно, данные будут точнее. Распределение толщины по размерам, представленное на рисунке 8, б, подтверждает необходимость ее корректировки при расчете физических и механических свойств.

В таблице 3 представлены физические свойства, которые определены с использованием стандартизованной и эффективной толщин, а в таблице 4 – механические свойства, которые определены с использованием стандартизованной и эффективной толщин.

Таблица 3 – Результаты корректировки физических свойств

Наименование	Масса г/м <sup>2</sup>	Толщина, мкм		Объемная плотность, кг/м <sup>3</sup>		Пухлость, см <sup>3</sup> /г		Отклонение, % Δ
		С	Э	С	Э	С	Э	
7А_120_I	122	235	233,3	519,15	523	1,93	1,91	0,7
7А_120_II	115	223,8	219,5	513,85	524	1,95	1,91	1,9
7А_120_III	124	241,1	230,5	514,31	538	1,94	1,86	4,4
5Б_120_I	118	271	261,2	435,42	452	2,3	2,21	3,6
5Б_120_II	118	252,6	248	467,14	476	2,14	2,10	1,8
5Б_120_III	122	257,8	252,3	473,24	484	2,11	2,07	2,1
5Б_120_IV	115	260,8	257	440,95	447	2,27	2,24	1,5
7А+5Б_II	118	243,3	237	485,00	498	2,06	2,01	2,6
7А+5Б_III	118	247	241,5	477,73	489	2,09	2,05	2,2
КВ образец с производства	118	234	181	504,27	652	1,98	1,53	<b>22,6</b>

С – значение физического параметра, определенного по стандартизованной толщине; Э – значение физического свойства, определенное по эффективной толщине

Таблица 4 – Результаты корректировки механических свойств

Наименование	Толщина, мкм		Модуль упругости при растяжении, Н/мм <sup>2</sup> (МС/МД)			Жесткость при изгибе, кН·м (МС/МД)		
	С	Э	С	Э	Δ, %	С	Э	Δ, %
7А_120_I	235	233,3	2443	2425	0,7	1,4	1,39	2,2
7А_120_II	223,8	219,5	2810	2756	1,9	1,3	1,35	6
7А_120_III	241,1	230,5	3009	2877	4,4	1,3	1,60	<b>14,4</b>
5Б_120_I	271	261,2	1995	1923	3,6	1,4	1,61	11
5Б_120_II	252,6	248	2012	1975	1,8	1,4	1,48	5,7
5Б_120_III	257,8	252,3	2097	2052	2,1	1,4	1,49	6,7
5Б_120_IV	260,8	257	2151	2120	1,5	1,3	1,47	4,5
7А+5Б_II	243,3	237	2483	2419	2,6	1,4	1,43	8,1
7А+5Б_III	247	241,5	2552	2495	2,2	1,3	1,41	7
КВ образец с производства	234	181	1187/1498	918/1158	22,6	0,9/2,2	1,94/4,80	<b>53/116</b>

Из таблицы 4 видно, что разница в измерении жесткости при изгибе в продольном и поперечном направлениях, у промышленных образцов значительно отличается. Максимальная ошибка в измерении жесткости при изгибе составила 116 %. Для лабораторных образцов этот показатель не превысил 15 %. Таким образом, результаты корректировки толщины имеют важное практическое значение для достоверной оценки физико-механических свойств.

**Пятая глава** посвящена разработке практических рекомендаций по снижению доли брака на предприятиях ЦБП. Исследования проводились на автоматической линии для производства картонных коробок модели 9РА-109/9FGT17 (Тайвань, 2011 г. года выпуска) (рис. 9). Данное оборудование предназначено для выполнения следующих стадий в автоматическом режиме: подачи 3, последовательное нанесение двухцветной флексографической печати 4, просечки, нанесение поперечной рилевки на заготовках из гофрокартона 5, а также их последующая фальцовка и склейка 6, укладка в пачки 7 и упаковка 8. Согласно предлагаемой системы онлайн-контроля, основанной на графической обработке символов, используются камеры высокого разрешения 1, 2. Они устанавливаются в двух точках автоматической линии: после стадии просечки и под фальцевально-склеивающей секцией. Полученные цифровые изображения оттисков поступают на вход системы контроля (согласно схеме на рис. 9, позиции 1 и 2), где с помощью



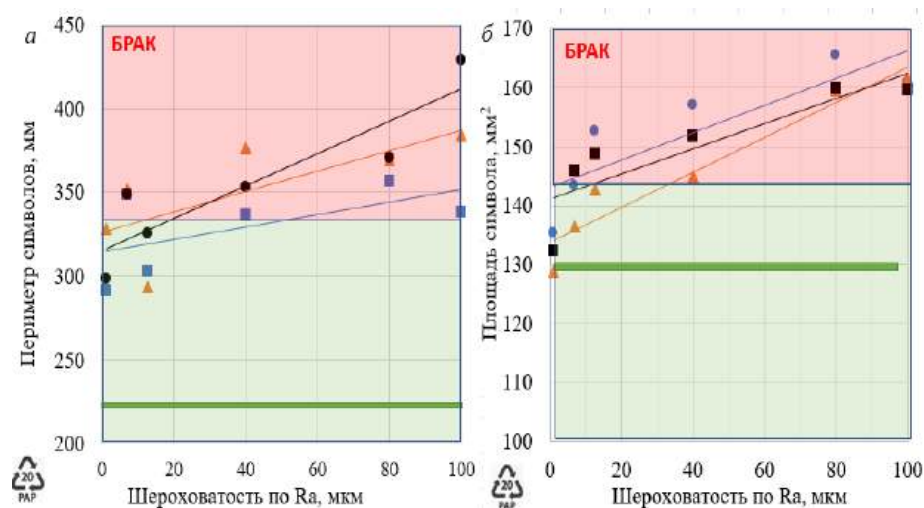


Рисунок 11 –  
Графики зависимости  
между  
шероховатостью,  
периметром (а) и  
площадью символа (б)  
с учетом требований  
заказчика

В таблице 5 представлены данные цветового охвата символов из разных видов бумаги и картона при различном расходе краски.

Таблица 5 – Цветовой охват символов, напечатанных на различных видах бумаги и картона при максимальном, минимальном и среднем расходе краски

Наименование образца	Шероховатость, мкм	Цветовой охват, ед. цветов		
		максимальный расход	минимальный расход	средний расход
Глянцевая бумага	<1	2364	6637	4445
Офисная бумага	<7	1955	4209	1999
Тест-лайнер	<12,5	1540	1870	1730
Гофрокартон марки В (шаг – 4,5 мм)	<40	3096	5307	3237
Гофрокартон марки С (шаг 7,5 мм)	<80	1734	2485	1748
Литая тара	>80	1914	3353	3305
Эталон	-	3		

По требованию заказчика предельные значения площади, периметра и цветового охвата символов могут корректироваться. Исследуемые символы использованы в качестве примера (наносятся практически на все коробки), так как удобны для захвата камерами системы онлайн-контроля. Для одной автоматической линии ОАО «Каравоево» внедрение системы онлайн-контроля качества печати с капитальными затратами 460 000,00 руб. позволит снизить брак с 3% до 2%.

### Выводы

1. Разработан метод оценки параметров многослойного картона на основе алгоритмов графической обработки изображений микроструктуры поперечного среза.

2. По графической оценке, распределения флокул в поперечном срезе картона предложен метод определения неоднородности формирования многослойного картона.

3. Алгоритмы графической обработки микрорельефа поверхностей картона позволили установить параметры шероховатости ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$ ) и среднюю толщину. Результаты обработки изображений микроструктуры, в частности, срезов волокон позволили определить пористость картона.

4. Экспериментально подтверждено применение методов оценки физических свойств (толщины и неравномерности ее распределения, шероховатости, пористости, неравномерности формирования) по графической обработке микроструктуры поперечного среза. Установлено влияние перечисленных параметров многослойного картона на качество печати.

5. Разработаны практические рекомендации для онлайн-контроля качества печати с учетом неравномерности структуры и микрорельефа

многослойного картона. Внедрение системы онлайн-контроля на ОАО «Караваяево» сокращает брак на 192 000 м<sup>2</sup> картона. Экономия с одной линии печати составляет около 1,9 млн. руб./год. Срок окупаемости предлагаемого технического решения не превышает четырех месяцев.

#### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Колосова М.В., Мидуков Н.П. Новое в исследовании микрорельефа поверхности целлюлозного композиционного материала при оценке качества нанесения печати // Деревообрабатывающая промышленность. 2025. № 4. С. 92-101.
2. Midukov N.P., Kurov V.S., Kolosova M.V., Litvinov M.A. Methods for visualization and analysis of the microstructure of a fibrous composite material // Fibre Chemistry. 2024. Т. 56. № 2. Pp. 135-139.
3. Midukov N.P., Kurov V.S., Litvinov M.A., Kolosova M.V. Interlayer strength of fibrous cellulose-containing composite materials // Fibre Chemistry. 2024. Т. 56. № 3. Pp. 195-199.
4. Патент № RU 239168 Устройство для фиксации малоразмерного твердого образца перед изготовлением среза для микроскопического исследования. Мидуков Н.П., Колосова М.В., Зильберглейт М.А., Куров В.С. 25.11.2025. Заявка от 02.06.2025. Бюл. № 33.
5. Патент № RU 2835897 Способ подготовки микроструктуры для контроля параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала и устройство для его реализации / Мидуков Н.П., Куров В.С., Колосова М.В., Зильберглейт М.А., Литвинов М.А. 05.03.2025. Заявка от 09.04.2024. Бюл. № 7, 5 с.
6. Патент № BY 13964 Устройство для фиксации малоразмерного твердого образца перед изготовлением среза для микроскопического исследования. Мидуков Н.П., Колосова М.В., Зильберглейт М.А., Куров В.С. 05.05.2026. Заявка, дата подачи 28.07.2025. 5 с.

#### ***Прочие публикации***

7. Колосова М.В., Мидуков Н.П., Куров В.С. Современное состояние зарубежных исследований структуры и свойств гофрокартона // Вестник СПбГУПТД. Серия 4: Промышленные технологии. 2023. № 1. С. 85-92.
8. Одинцова С.Е., Светлолов А.Ю., Колосова М.В. Исследование микроструктуры поперечного среза бумаги и картона методом обработки изображений в графических редакторах // Вестник СПбГУПТД. Серия 4: Промышленные технологии. 2024. № 2. С. 128-133.
9. Мидуков Н.П., Куров В.С., Колосова М.В., Зильберглейт М.А. Исследование пористости многослойного картона с помощью графической обработки микроструктуры поперечного среза // Принттехнологии и медиакоммуникации. Матер. 90-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и аспирантов (с междунар. участием). Минск, 2026. С. 43-44.
10. Мидуков Н.П., Колосова М.В., Куров В.С., Ушанова Э.А., Зильберглейт М.А., Бабаханова Х.А. Особенности в определении толщины по микроструктуре поперечного среза бумаги и картона // Вестник СПбГУПТД. Серия 4: Промышленные технологии. 2025. № 2. С. 84-89.
11. Литвинов М.А., Колосова М.В., Мидуков Н.П., Куров В.С. Визуализация микроструктуры поперечного среза бумаги и картона // Материалы VII междунар. науч.-техн. конф. им. проф. В.И. Комарова. САФУ им. М.В. Ломоносова». 2023. С. 54-58.
12. Midukov N.P., Kolosova M.V., Kurov V.S. Evaluation of the printing properties of cardboard based on graphic processing of the microstructure // Renewable resources: forest biomass processing technologies, chemistry, medicine. Conference proceedings of the International Conference. St. Petersburg, 2025. P. 51.