

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна»

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Мидуков Николай Петрович

Санкт-Петербург – 2026

Оглавление

Введение.....	4
1 Аналитический обзор литературы.....	11
1.1 Критический анализ существующих способов исследования микро- и макроструктуры для оценки параметров картона и устройств для реализации.....	11
1.2 Современное состояние исследований по оценке неоднородности формования бумаги и картона.....	16
1.3 Обзор существующих методов оценки шероховатости, пористости и толщины картона.....	22
1.3.1 Критический анализ способов определения шероховатости поверхности картона.....	22
1.3.2 Обзор существующих методов оценки пористости картона	28
1.3.3 Обзор существующих методов оценки толщины.....	35
1.4 Способы графической обработки микроструктуры картона	41
1.5 Анализ существующих способов оценки качества печати на предприятиях ЦБП.....	44
1.6 Выводы по литературному обзору и постановка цели и задач исследований.....	50
2 Методическая часть.....	53
2.1 Объект и предмет исследования. Объекты сравнения.....	53
2.1.1 Объект исследования.....	53
2.1.2 Предмет исследования	53
2.1.3 Лабораторные образцы.....	54
2.1.4. Промышленные образцы.....	56
2.1.5 Объекты и предметы сравнения.....	56
2.2 Методы, оборудование и программы	57
2.2.1 Методы и исследования, проводимые в лаборатории университета, стандартные методы.....	57
2.2.2 Исследования, проводимые в центрах коллективного пользования и на производственных площадках, нестандартные методы.....	59
2.3 Способ подготовки микроструктуры для контроля параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала и устройство для его реализации.....	63
3 Разработка алгоритмов цифрового метода контроля микрорельефа по графической обработке изображения микроструктуры поперечного среза многослойного картона.....	68
3.1 Графический метод оценки неравномерности формирования многослойного картона по микроструктуре поперечного среза.....	68
3.2 Исследование микрорельефа поверхности многослойного картона по микроструктуре поперечного среза с оценкой параметров шероховатости.....	80

3.3 Разработка алгоритмов определения пористости многослойного картона с помощью графической обработки микроструктуры поперечного среза.....	84
3.4 Особенности оценки толщины (максимальной, минимальной, средней) многослойного картона по изображениям микроструктуры поперечного среза.....	88
4 Экспериментальная часть	91
4.1 Оценка неоднородности формования многослойного картона.....	91
4.2 Оценка шероховатости многослойного картона.....	97
4.3 Оценка пористости многослойного картона по предлагаемому методу и сопоставление с воздухопроницаемостью по методу Р. Бендтсена.....	101
4.4 Экспериментальное подтверждение адекватности разработанного метода оценки толщины многослойного картона.....	103
4.5 Корректировка физико-механических показателей в соответствии с уточнением толщины картона	108
4.6 Влияние количества слоев на физико-механические свойства картона лайнера.....	110
5 Разработка практических рекомендаций по снижению доли брака для предприятий ЦБП.....	112
5.1 Описание технологии и оборудования на стадии печати информации на гофрокартон.....	112
5.2 Практические рекомендации по онлайн-контролю качества печати на гофрокартон.....	115
5.3 Экономическая целесообразность использования предлагаемой системы онлайн контроля.....	120
Заключение и выводы.....	125
Список литературы.....	129
Приложение 1. Акт внедрения ОАО «Караван».....	151
Приложение 2. Акт внедрения АО «Печатня».....	152
Приложение 3. Акт внедрения РНБ.....	153
Приложение 4. Результаты статистической обработки данных.....	154
Приложение 5. Результаты физико-механических испытаний образцов...	156

Введение

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. Его изготавливают, как правило, в два слоя, в редких случаях – в один (из первичного волокна (крафт-лайнера)). Также производится трехслойный тест-лайнера, преимуществами которого являются приемлемая 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-лайнера.

Печать наносится на вайт- и тест-лайнера, 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 флютинга, 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 оттиска 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. В каждом приборе 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 по каждому слою не фиксируют, однако полученная информация помогла бы выявить проблемные участки и дать производителю ценные 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 верхнего плоского слоя гофрокартона, на который наносится печать. Эти показатели в конечном итоге определяют качество оттиска, которое необходимо контролировать в режиме онлайн, что позволит снизить долю брака, следовательно, сократить количество 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 Беларусь¹.

¹ 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»

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**:

1. Разработать способ исследования микроструктуры для оценки параметров картона и устройство для его реализации.

2. Разработать метод оценки неоднородности формования многослойного картона с помощью графической обработки изображений микроструктуры поперечного среза.

3. Исследовать влияние микроструктуры поперечного среза, путем графической обработки его изображения на микрорельеф многослойного картона (шероховатость, пористость и толщина).

4. Экспериментально подтвердить возможность использования методов оценки физических свойств (толщины и неравномерности ее распределения, шероховатости, пористости, неравномерности формования) по графической

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

5. 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 формирования 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 формирования, 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 формирования многослойного картона. Практическая значимость метода подтверждена результатами сопоставления экспериментальных данных неоднородности формирования 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 производстве.

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 формирования 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 «Каравеево» 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 формирования 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», г. 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, 2025, 2026 гг., г. Минск; Всероссийская научно-техническая конференция «Макулатура и целлюлоза: ресурсы, наука, техника, производство, продукты, экология, перспективы», 2024, 2025.

Публикации

Опубликовано 12 печатных работ по теме диссертации, в том числе статьи в зарубежных изданиях на английском языке, входящих в базы Web of Science и Scopus, а также в журнале, входящем в перечень, утвержденный 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. Автор разработала 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.

Соискатель и научный руководитель выражают благодарность д.т.н., проф. Курову Виктору Сергеевичу за его совместную работу в рамках российско-белорусского гранта, результаты которого стали основой диссертации.

1 Аналитический обзор литературы

1.1 Критический анализ существующих способов исследования микро- и макроструктуры для оценки параметров картона и устройств для реализации

Микроструктура бумаги и картона имеет сложную и неоднородную структуру, а волокна обладают неровной сложной поверхностью, по которой формируются водородные связи, действуют силы механического сцепления. Однако ресурсы компьютерных технологий, до недавнего времени были на несколько порядков ниже, поэтому созданные в графических программах изображения волокон и тем более 3D-модели представлялись в сильно упрощённом варианте. Несмотря на то, что микроскопы уже обладали высоким разрешением, достаточным для того, чтобы увидеть, насколько сложными объектами являются волокна бумаги и картона. Оптическая микроскопия в сочетании с статистической обработкой цифровых изображений волокон в 2D-формате позволили создать приборы для оценки морфологических характеристик, определяющих бумагообразующие свойства целлюлозных волокон. Исследование микроструктуры волокон берёт своё начало с появлением микроскопа в 17 веке [1], а сегодня подходит к тому, чтобы формировать сложные 3D-модели волокон,

Несмотря на то, что цифровые технологии в сочетании с развитием оптической и сканирующей электронной микроскопии позволили совершить резкий скачок в развитии научных исследований в области изучения бумаги, ресурса компьютера было недостаточно. Поэтому в своих работах [2–5] учёные показывали волокна, как ровные, круглые трубки, хотя прекрасно знали о сложной геометрии этих объектов исследования. В качестве примера можно привести работы, посвящённые исследованию процесса обезвоживания бумажного полотна под давлением. В работах [6–9] микроструктура бумаги в поперечном сечении сильно упрощена, но наглядно демонстрирует снижение пористости, по которой авторы оценивали эффективность работы прессовой части. Задачи исследовать микрорельеф поверхности не было.

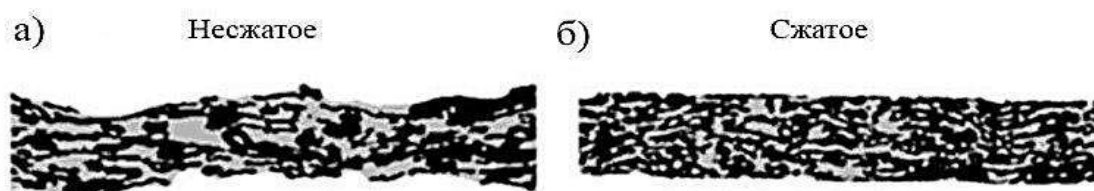


Рисунок 1.1 – Оценка эффективности работы прессовой части производства бумаги по анализу микроструктуры в поперечном срезе: *а* – до прессования; *б* – после прессования [6, 7]

Известны работы по исследованию микрорельефа поверхности ламинированных и мелованных видов бумаг. Ввиду неровности поверхности повышается расход материала для покрытия. Например, известен способ подготовки и оценки поперечного среза ламинированного образца [10], который состоит из следующих этапов:

- подготовка образцов бумаги с покрытием из высокомолекулярного полиакриламида и силиката кальция;
- оценка воздухопроницаемости по Герлею [11];
- определение энергии связи по методу Скотта [12];
- получение поперечного среза бумаги с покрытием с помощью микротомата;
- визуализация поперечного среза с помощью микроскопа.

Авторы не ставили задачу оценить свойства по микроструктуре возможно из-за низкого качества подготовленного поперечного среза микротомом. Изображения микроструктуры поперечного среза были неразборчивы, из-за деформации волокон контуры поперечного среза волокон, границ слоев были нечеткими, что ограничивало использование изображения поперечного среза для контроля свойств. При таких условиях невозможно с высокой точностью оценить показатели картона, имеющего неоднородную микроструктуру.

В работе [13] изображение микроструктуры было использовано в качестве наглядного представления о расположении различных материалов в слоях. В то время как пористость авторы установили методом ртутной порометрии, а шероховатость по стандарту, который базируется на методе Паркера [14]. Авторы работы рассматривали небольшую протяжённость поперечного среза (до 10 мкм), которая позволяла только визуализировать расположение

покрывающих бумагу слоёв. Основным достоинством работы стали изображения микроструктуры, которые имели высокий уровень детализации геометрии срезанных волокон. Такое качество было достигнуто благодаря использованию технологии ионной резки перед визуализацией с помощью сканирующей электронной микроскопией.

Увеличение мощностей процессора, оперативной памяти, видеокарты сделало возможным создание и визуализацию более сложных элементов микроструктуры картона.

Взаимное расположение волокон и фильтрующая способность материала на их основе стали объектами исследования в период пандемии. Одними из инструментов оценки эффективности фильтрования частиц вируса COVID-19 стали 3D-модели волокнистой структуры материала масок [4]. Однако волокна при этом, как и в работе [5] представлены как цилиндры (идеализированная форма).

Несмотря на идеальность формы волокон авторы работы [15] представили графические изображения волокон, внутри которых располагаются фибриллы. Если не учитывать, что волокна бумаги и картона в реальных условиях имеют форму ленты из-за прессования, сушки и наката, можно высоко оценить 3D-модели, которые в какой-то степени соответствуют целлюлозным волокнам, не прошедшим размол. Расположение волокон внутри поверхностной стенки в виде спиральных нитей соответствует волокнам первичной целлюлозы.

Чтобы проводить графическую обработку микроструктуры бумаги и картона [16], необходимо учитывать тот факт, что реальные волокна очень далеки от идеальных форм. К такому же недостатку можно отнести результаты работы [17], в которой авторы использовали программы и алгоритмы математического расчёта для формирования 3D-модели микроструктуры волокнистого целлюлозного композиционного материала.

В перечисленных выше работах графическая обработка не позволяет установить достоверные данные, так как основывается не на реальном материале, а на идеализированной микроструктуре, которая формируется из

волокон правильной формы. Ошибка исследований касается и микроструктуры внутри материала и поверхности бумаги и картона. В большинстве случаев идеальное представление волокон как и микроскопические снимки позволяют визуально представить выдвигаемые авторами гипотезы при этом не давая количественных оценок свойствам бумаги и картона.

Значимым результатом исследования, представленного в работе [18], является возможность по модели оценить равномерность распределения волокон, геометрические параметры и определить поверхности, по которым волокна контактируют между собой, что дает возможность косвенно прогнозировать физико-механические характеристики картона. Однако исследования основаны на идеальных формах волокон [19–26].

Чтобы дать количественную оценку параметрам бумаги и картона путём графической обработки микроструктуры поперечного среза необходимо высокое качество изображений микроструктуры поперечного среза. Необходимо добиться чётких контуров срезанных волокон, которые должны быть расположены с масштабной линейкой. Это позволит с высокой точностью оценивать геометрические размеры волокон неправильной формы.

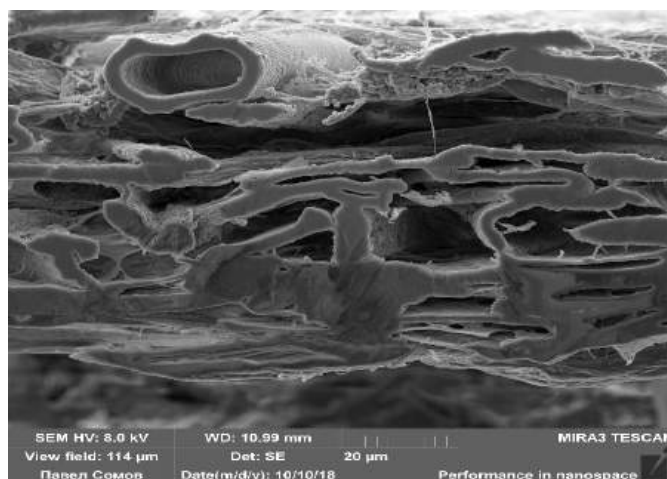


Рисунок 1.2 – Микроструктура поперечного среза бумаги или картона, полученная с помощью технологии ионного травления

Чтобы графические программы растрового или векторного принципа работы с изображениями могли в автоматическом режиме анализировать поры волокна внутри бумаги необходимы изображения, качество которых должно стремиться к тому, которое показано на рисунке 1.2 [25–30].

Важным аспектом для получения качественных и достоверных изображений является правильно подобранный режим подготовки образцов с помощью ионной резки. Основными параметрами режима подготовки среза, которые влияют на качество изображения являются: время ионного травления: 1 – 2 часа; толщина образца бумаги или картона 50 – 250 мкм; ионный поток при 8 – 10 кВ.

Микроснимки должны быть соединены между собой для получения панорамного изображения протяжённостью 1 – 10 мм. Необходимость в большой протяжённости снимков вызвана неоднородностью микроструктуры.

Работа была в первую очередь ориентирована на прогнозирование механических свойств, поэтому большое внимание было уделено протяженности линий контакта волокон и протяженности линий контакта стенок волокон. Оценивалась равномерность распределения контактирующих линий, а по их плотности расположения и протяженности авторы делали выводы о связеобразовании волокон [25–32]. Влияние протяженности линий контакта волокон на механические показатели картона было определено для картона, полученного различными способами. Предложенный способ позволяет контролировать целый ряд показателей картона, однако при оценке свойств не учитывается влияние гофрослоя на шероховатость верхнего плоского слоя гофрокартона. Неоднородность распределения волокон не предполагала их объединение во флокулы, которые, как известно, характерны при производстве многослойного картона. Исследования не объясняли гипотезу снижения неоднородности многослойного картона в количественном выражении.

Кроме того, важной составляющей для достижения качественного и достоверного изображения микроструктуры поперечного среза многослойного картона является устройство, позволяющее фиксировать образцы при их визуализации. Оно применяется при контроле качества равномерности формования плоских слоев картона без покрытия и гофрокартона. Высокая точность должна быть обеспечена по всей протяженности. Разработка способа исследования микроструктуры для оценки параметров картона и устройство для

реализации в контексте оценки свойств поверхности является актуальной задачей.

1.2 Современное состояние исследований по оценке неоднородности формирования бумаги и картона

В процессе формирования плоского слоя гофрокартона осаждение волокон на сетку формирующего устройства происходит по слоям, причем распределение компонентов подчиняется сложным зависимостям, которые совершенно не соответствуют Стоксовому осаждению. Скандинавскими исследователями в работах [33, 34] решалась проблема, заключающаяся в склонности волокон образовывать флоккулы, которые в последующем являются причиной неравномерной структуры, что приводит к снижению качества печати. Представленные в работах [35–37] методы исследования неоднородности картона трудоемки и не могут быть признаны массовыми и оперативными. Достаточно ограниченная литература, которая появилась лишь в начале XXI века, показывает, что работы в этом направлении находятся на начальной стадии.

Классический способ оценки микрорельефа поверхности материала связан с формированием профиля поверхности и его графической обработкой. Результатами графической и статистической обработки профиля являются следующие параметры шероховатости:

- R_a (в мкм) – среднеарифметическое значение выступов и впадин относительно средней линии профиля (предпочтительный параметр для количественной оценки неровной поверхности);

- R_z (в мкм) – рассчитывается как среднее значение 5 выступов и впадин относительно средней линии профиля поверхности;

- R_{max} (в мкм) – максимальное значение отклонения от средней линии

Наиболее распространённый способ формирования профиля поверхности является контактный. Обычно профилографы снабжены алмазным наконечником, который повторяет неровный профиль поверхности [38]. Волокна бумаги и картона деформируются при контакте с алмазной иглой, что

искажает реальную картину измерений. Кроме того, точность и скорость измерений существенно уступают оптическим и лазерным методам исследования микрорельефа поверхности.

Рассмотренный выше контактный способ оценки неоднородности структуры и микрорельефа поверхности бумаги не может быть использован в режиме реального времени. Для этого были разработаны световые методы, в которых источник света проходит через бумагу и картона, а детектор анализирует его интенсивность. Вертикальная подача света через движущееся полотно бумаги была предложена в методе, описание которого представлено в работе [39]. Несмотря на возможность использования такого метода в режиме онлайн, его сложно применить для исследования микрорельефа и точность этого метода будет во многом определяться интенсивностью и количеством источников.

В некоторых вариантах эти недостатки решают подачей дополнительного света с нижней стороны бумажного или картонного полотна (рис.1.3) [40].

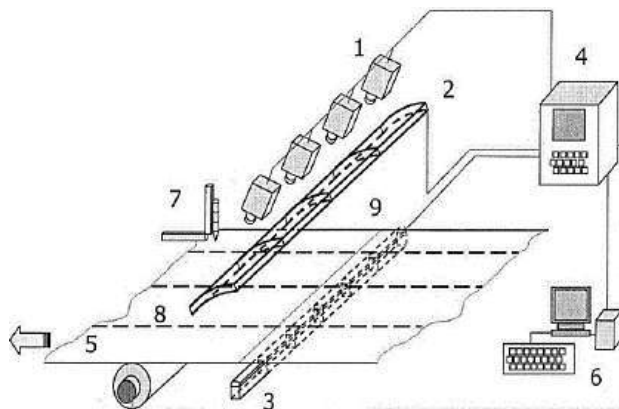


Рисунок 1.3 – Устройство контроля качества бумажного полотна в процессе его производства: 1 – камера; 2 – источник света (подсветка); 3 – дополнительный источник света; 4 – блок управления; 5 – бумажное полотно; 6 – компьютер; 7 – алмазная игла; 8 – направляющий ролик; 9 – область для анализа

В каких-то случаях это повышает оценку эффективности онлайн контроля, особенно если задачей является оперативное обнаружение дефектов формирования

бумаги. Однако, оценить микрорельеф, чтобы количественно определить параметры шероховатости метод тоже не позволяет.

Также как в способах, описанных в работах [39, 40], авторы работы [41] использовали перпендикулярно направленный свет, который формируют 2D-изображение интенсивности проходимого света. Во всех трёх перечисленных способах оценки однородности структуры бумаги используется алгоритм графической обработки изображения, в основе которого лежит построение матрицы, каждая ячейка которой имеет определённую интенсивность проходимого света (рисунок 1.4).

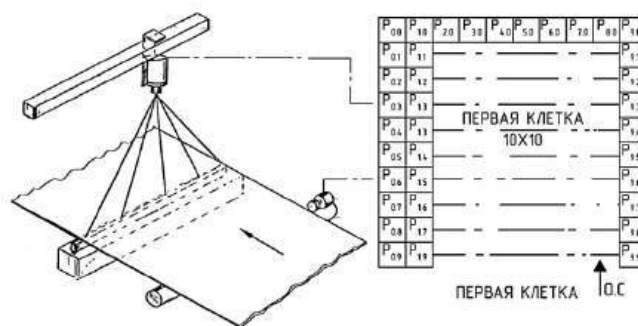


Рисунок 1.4 – Устройство для анализа формирования волокнистого материала с определением индекса формирования

Авторы изобретения использовали малое разрешение камеры, а именно 2 Мрх для 5 метров полотна в ширину, поэтому точность оценки индекса формирования низкая, так как для картона контрастность изображения невысокая.

Известен способ определения и контроля качества волокнистого материала, основанный на анализе существующей базы данных [42]. Согласно способу, свойства бумаги прогнозируют путем предварительного сопоставления данных о свойствах и неравномерности изображения поверхности листа. При таком способе детально исследуют изображение поверхности бумаги и предварительно формируют широкую базу данных о свойствах бумаги, производимой различными фабриками.

Известна система онлайн-определения белизны, яркости, флуоресценции и непрозрачности движущегося бумажного полотна [43], согласно которой

оценивают оптические показатели бумаги и картона на производстве по международному стандарту TAPPI [44]. Для этого вал под полотном бумаги делают эталонным белым и черным цветом (рис. 1.5).

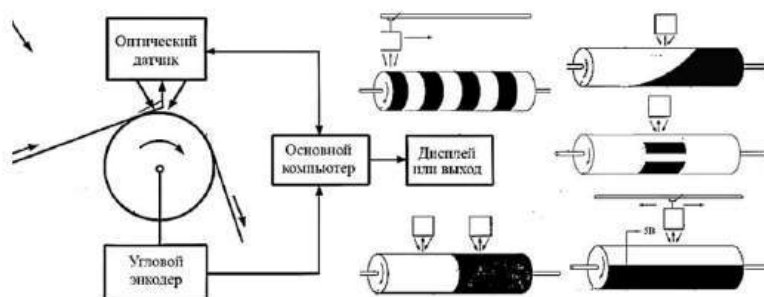


Рисунок 1.5 – Система онлайн-определения белизны, яркости, флуоресценции и непрозрачности движущегося бумажного полотна

В некоторых случаях в качестве подложки под бумагу могут использовать отличные от стандарта элементы. Например, авторы работы [45] предложили добавить зеркальную поверхность под исследуемым образцом бумаги. Такой способ меняет количество отражаемой части света от образца. Метод не нашёл широкого применения в исследовании бумаги и картона, не было в описании способа и алгоритмов расчёта неоднородности материала. Кроме того, подача света под углом 90° с незначительным отклонением не позволяет оценить микрорельеф поверхности бумаги и картона.

Для этого необходим косопadaющий свет, который частично реализован в американском приборе M/K System Model 1200 Formation Tester [46]. Он нашёл широкое применение в исследовании бумаги и картона в лабораторных условиях. Алгоритм расчёта, судя по результатам определения индекса формирования этого прибора похож на алгоритм приборов, описанных в способе [41]. Но в отличие от предыдущих вариантов прибор позволяет оценивать микрорельеф поверхности, так как снабжен возможностью подавать источник света под углом. Недостатком такого способа, несмотря на высокое качество изображения, является небольшой угол, который не дает полностью воспользоваться преимуществом косопadaющего света для оценки

неравномерности поверхности (рис. 1.6).

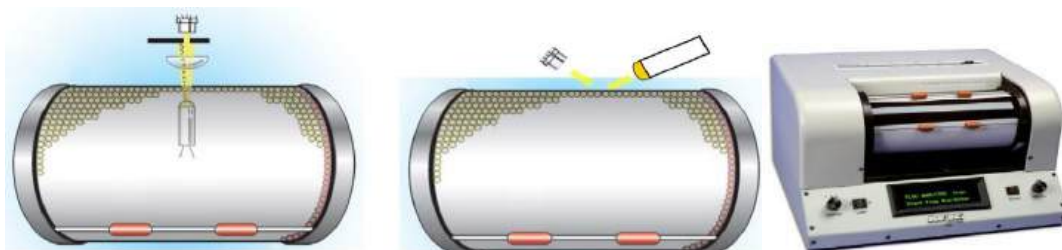


Рисунок 1.6 – Лабораторный прибор по оценке неоднородности бумаги

Рассмотренные способы относятся к световым способам контроля за неравномерностью распределения волокон, к ним также можно отнести приборы, работающие в соответствии с запатентованными разработками [47–50]. Важно отметить, что рассмотренные методы не позволяют оценить равномерность распределения каждого слоя в отдельности.

Известны работы БГТУ (Республика Беларусь) [51–53], в которых в полной мере использованы возможности косопадающего света.

В Российской Федерации известно несколько центров, которые проводят работы в данном направлении. Одним из них является Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна [25]. Однако неоднородность формования определяется на основании данных распределения отдельно выделенных срезов волокон, хотя известно, что учитывать правильно не волокна, а их сгустки (флокулы).

Также к оперативным и неразрушающим методам контроля можно отнести способ, описанный в работе [26], который основан на прохождении ультразвуковых волн через неоднородную структуру бумаги и картона [26]. Индекс формования с помощью этого метода определяется по интенсивности проходящего ультразвука через неравномерную волокнистую структуру материала. При этом все усилия авторов были направлены на связь показателей с прочностными свойствами. Однако не менее важно оценивать влияние неоднородности формования на качество печати. Понятия неоднородности и гетерогенной структуры определяют характер взаимодействия краска – бумага. Как следует из изложенного выше, проблемы с оперативным, достоверным и точным исследованием микрогетерогенности картона до сих пор не решены, так

как, с одной стороны, связаны с отсутствием модели структуры волокна, а с другой – с недостатками или сложностями в применении методов оценки неоднородности бумаги и картона. Кроме того, количество исследований по методу изучения многослойных целлюлозных материалов исчисляются единицами.

Известен способ подготовки поперечного среза для контроля параметров бумаги и картона. Он позволяет контролировать целый ряд показателей волокнистого целлюлозосодержащего материала, в том числе неоднородность распределения волокон [25]. На рисунке 1.7 продемонстрирована схема соединения центров срезов волокон между собой без пересечения отрезков. Представляется возможным изучить не только двухслойный картон в общей сложности, но и каждый его слой индивидуально.

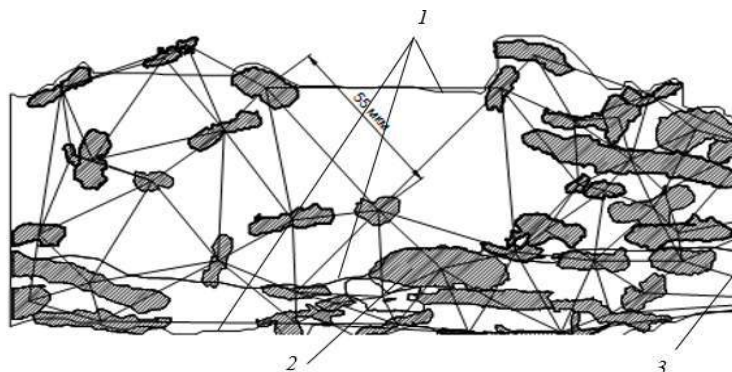


Рисунок 1.7 – Области среза волокон и метод определения равномерности распределения волокон в поперечном срезе картона: 1 – профили границы слоев; 2 – область среза волокон; 3 – отрезки, соединяющие центры областей среза волокон

Представленная схема не позволяет сопоставить полученные результаты оценки неоднородности распределения волокон с данными неоднородности распределения флокул, полученными с помощью светового метода контроля.

Несмотря на то что представленный на рисунке 1.7 метод оценки неоднородности основан на графической обработке изображения с высоким качеством и детализацией, схема не объясняет причины снижения неоднородности картона с появлением второго, третьего слоев. Нет возможности

сравнить полученные данные неравномерного распределения длин отрезков, соединяющих центры волокон, с данными, полученными с помощью приборов, определяющих параметры неоднородности на просвет.

Таким образом, задача разработки метода оценки неоднородности формирования многослойного картона с помощью графической обработки микроструктуры в поперечном срезе является актуальной.

1.3 Обзор существующих методов оценки шероховатости, пористости и толщины картона

1.3.1 Критический анализ способов определения шероховатости поверхности картона

Стандартные методы измерения шероховатости для поверхностей металлов, пластиков и др. материалов не применимы для бумаги и картона, потому что, когда ГОСТ разрабатывали, то предполагали формирование профиля контактным методом, который деформировал бы волокна и искажал результаты расчётов. Поэтому широкое распространение получили косвенные методы, которые основаны на проходимости воздуха через зазор между кольцом прибора и поверхностью бумаги [54 – 56]. Чем выше шероховатость, тем больше воздуха проходит через неровную поверхность бумаги, к которой плотно прижимается кольцевая пластина согласно методу Бендстена. В некоторых вариантах расход воздуха постоянный, при этом измеряют время прохождения. В каких-то случаях разработчики основывались на корреляции этих показателей с данными, полученными с помощью своих методов [57, 58]. Решения, предложенные в перечисленных работах, были основаны на невозможности формирования профиля бумаги. В противном случае бумага должна иметь параметры, которые предусматривает ГОСТ [59].

Авторы работы [60] предложили метод оценки шероховатости, который, с одной стороны, позволяет сформировать профиль поверхности бумаги и картона с помощью рабочего элемента, который с высокой точностью повторяет микрорельеф. Но при этом рабочий элемент, представляющий собой зонд-

консоль-основание, не касается волокна, а повторяет поверхность за счёт особенности работы атомного силового микроскопа (рис.1.8). Такой метод, в отличие, от оптического позволяет с высокой точностью сформировать профиль поверхности



Рисунок 1.8 – Схема работы атомносилового микроскопа [60]

Затем авторы работы по представленным в ГОСТ методам расчёта параметров шероховатости представили данные R_a , R_z , R_{max} [61, 62]. Расчёты показали несводимость полученных данных оценки шероховатости с данными, основанными на по проходимости воздуха. Для одного и того же значения R_a могут быть разные данные в мл/мин. Возможно, это связано с тем, что:

1. Неравномерная структура бумаги и картона, которая состоит из флокул и промоин на поверхности имеет волнистый рельеф. Ввиду того, что кольцо прибора Бендстена намного превышает величину флокул и промоин, то большая часть воздуха проходит через впадины.

2. Авторы исследовали очень маленький участок поверхности в ширину и длиной в 100 мкм, который несопоставим с площадью, которую охватывает рабочий элемент приборов для оценки шероховатости, основанных на проходимости воздуха.

Вероятно, вторая причина является выбором авторов в качестве объекта исследования только мелованного картона, шероховатость которого не превышает одного микрона.

Способ нанесения печати наравне с поверхностью (определяемое параметром шероховатости R_a , связанного с микрорельефом) напрямую влияют на то как будут выглядеть напечатанные символы (рис. 1.9). Чернила и тонер при печати на поверхностях с большой шероховатостью, как, например, картон без покрытия, будут давать неравномерный оттиск из-за большого количества выступов и впадин. В работе [64] автор описал каким образом происходит формирование оттиска и объяснил, что в местах выступов меньшее перекрытие поверхности краской за счет меньшей толщины слоя, когда во впадинах, наоборот, оттиск будет интенсивнее за счет большего количества краски.

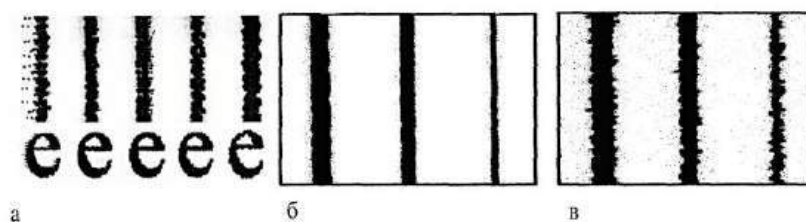


Рисунок 1.9 – Неравномерное нанесение тонера разными чернилами: *а* – символы нанесенные на бумагу; *б* – пример печати на картоне с покрытием ($R_a = 5-7$ мкм); *в* – пример печати на картоне без покрытия ($R_a = 12,5$ мкм) [63]

На рисунке 1.10 показано распределение краски по поверхности и образование неравномерности оттиска.

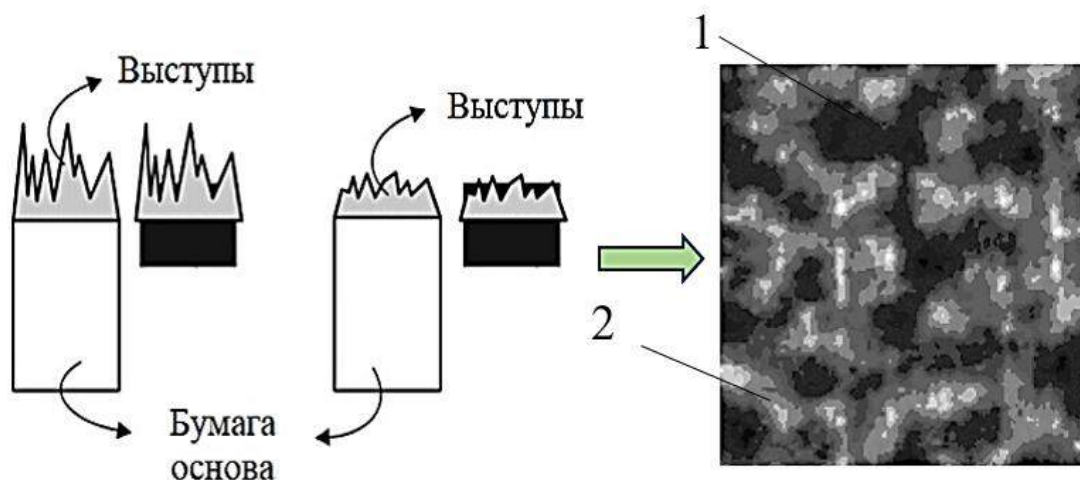


Рисунок 1.10 – Схема образования неравномерности оттиска, которая зависит от шероховатости поверхности: *1* – области впадин; *2* – области выступов [63, 64]

Атомно-силовой микроскоп, о котором упоминалось выше хорошо зарекомендовал себя в оценке шероховатости бумаги с покрытием, потому что

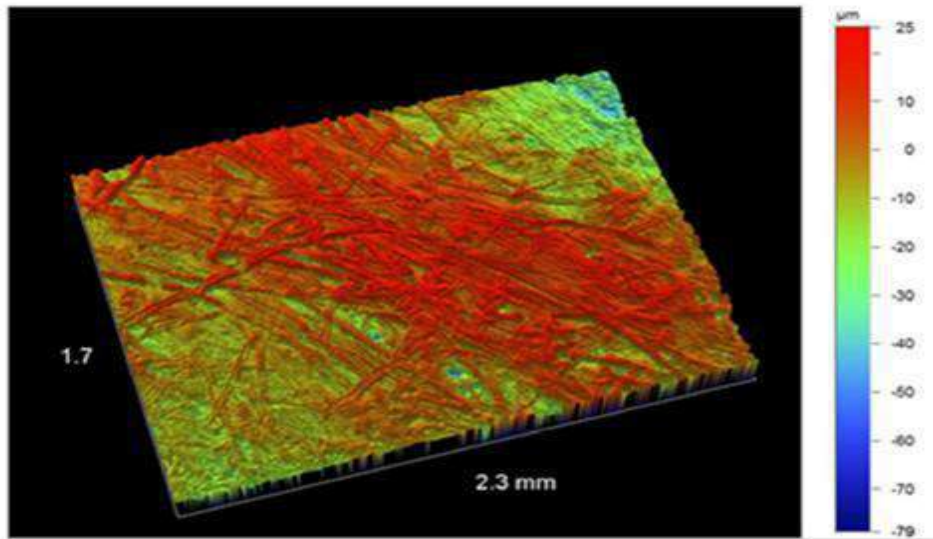


Рисунок 1.12 – Оценка шероховатости бумаги с охватом в 1,7x2,3 мм [67]

Авторы работы рассчитали среднеарифметическое значение шероховатости $Ra=3,88$ мкм. Значение требует проверки, так как с одной стороны соответствует очень высокому уровню шероховатости по Бендстону (1119 мл/мин), с другой стороны даже немелованная офисная бумаги имеет большую шероховатость при показателе Бендстена не превышающем 400 мл/мин (рис.1.13).

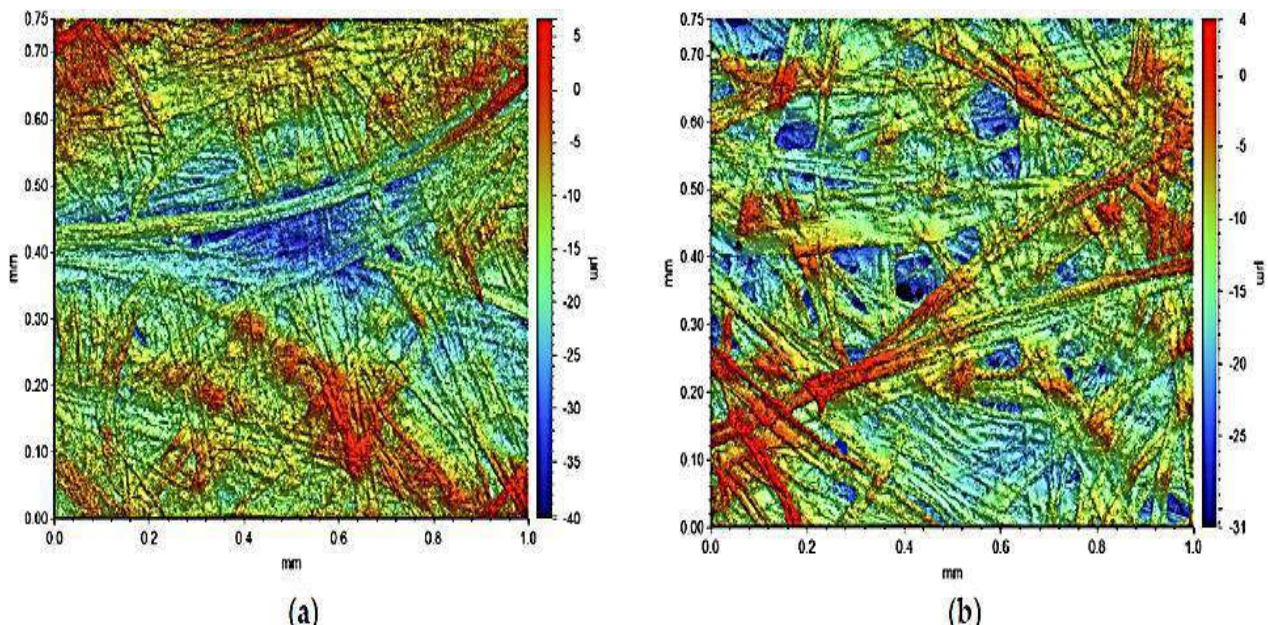


Рисунок 1.13 – Оптическая микроскопия в оценке параметра шероховатости Ra : *a* – бумага с покрытием; *b* – бумага без покрытия

Дискуссии по поводу точности измерения параметров шероховатости бумаги и картона в основном связана с тем, что целлюлозные волокна обладают низкой оптической плотностью из-за чего лазер или оптическая система не может дать точные результаты. Такой проблемы нет, если речь идёт об исследовании мелованного картона или бумаги. Однако в таких материалах шероховатость в большинстве случаев определяется размером частиц мраморного мела, который используется в качестве покровного слоя. Диаметр частиц такого мела не превышает одного мкм, чем и определяется шероховатость мелованной бумаги.

Сформировать профиль поверхности бумаги с высокой точностью возможно только после напыления элементами с высокой оптической плотностью. Либо для получения микрорельефа необходима электронная сканирующая микроскопия, которая сама по себе не может быть использована на бумажных фабриках ввиду очень высокой стоимости (от 12 млн. руб.). Целлюлозно-бумажное предприятие не станет приобретать СЭМ для оценки шероховатости бумаги или картона.

С практической точки зрения больше подходят лазерные профилографы. Например, авторы работ [69, 70] использовали профилометр Rodenstock RM-600. Он был успешно использован для оценки мелованной бумаги.

Таким образом, изучив три основных способа оценки поверхности картона, было выявлено, что для получения детализированного снимка среза исследуемого целлюлозного материала требуется предварительная подготовка исследуемых образцов. Затем с помощью СЭМ получают изображения среза и подвергают графической обработке, что позволит достоверно оценить поверхность картона.

Важно отметить, что при определении шероховатости гофрокартона микрорельеф поверхности усложняется из-за гофрослоя. При значениях шероховатости гофрокартона свыше 12,5 мкм необходимо учитывать базовую длину в 8 мм. Поэтому шаг гофры в 4,5 или 7,5 мм вызывает волнистый микрорельеф, который еще больше усложняет оценку шероховатости. В таком

случае стандартный метод Р. Бендтсена не применим, так как он имеет ограничение в пределе измерений в 5000 мл/мин, а для гофрокартона этот показатель значительно выше.

Таким образом, актуальной задачей контроля качества картона и гофрокартона, имеющих высокую шероховатость, является разработка метода оценки шероховатости (микрорельефа) поверхности.

1.3.2 Обзор существующих методов оценки пористости картона

Пористость является одним из основных печатных свойств, которая в большей степени определяет качество флексографической, струйной и офсетной печати. Для перечисленных способов печати характер проникновения красок и чернил в структуру пористого материала играет решающую роль в формировании качественно напечатанного символа. В отличие от технологии лазерной печати, при которой тонер наносится на поверхность бумаги, жидкие краски и чернила проникают вглубь пористой структуры, во многом определяя устойчивость отпечатка при флексографической и струйной печати. Поэтому измерение пористости является важной задачей при производстве упаковки с нанесенной на ней печатью. Из работ Д. М. Фляте и К. Джеймса известно, что наиболее простым и распространенным способом оценки пористости является расчет [71, 72]. В качестве исходных данных принимается плотность абсолютно сухого волокна (1500 кг/м^3), воздуха ($1,23 \text{ кг/м}^3$ при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$), и по известным значениям площади и толщины бумаги рассчитывается пористость. Этот метод прост, но не позволяет определить размеры пор, равномерность их распределения и геометрические характеристики.

Принято считать, что с помощью ртутной порометрии можно точнее измерить пористость бумаги, установить размеры пор. Поэтому данные пористости, полученные с помощью методов, основанных на проницаемости газов и жидкостей, часто сравнивают с данными ртутной порометрии [73, 74]. Незначительное отклонение данных, вероятно, связано с тем, что ртутная порометрия учитывает и сквозные, и глухие поры, в то время как при

прохождении жидкости или газа глухие поры не берутся в расчет. В отличие от представленных выше способов, пористость, определенная путем графической обработки микроструктуры, позволяет учесть закрытые поры, куда не проникает ртуть, жидкость или газ (рис. 1.14).

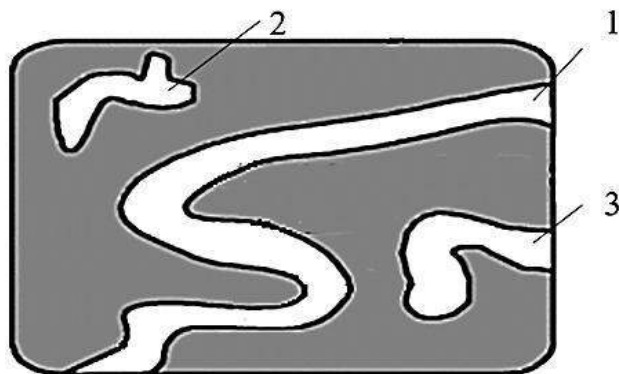


Рисунок 1.14 – Структура картона с различными видами и размерами пор: 1 – открытые; 2 – закрытые; 3 – глухие [73]

Авторы работ [73, 74] указывают на неточности в определении пористости, связанные с невозможностью измерения диаметра и объема закрытых пор с помощью ртутной порометрии и размеров глухих пор с помощью методов, основанных на прохождении влаги и воздуха через исследуемый материал (капиллярная порометрия). По такому принципу воздухопроницаемости работают стандартные приборы, которые не позволяют измерить геометрию пор [75, 76].

Теоретически оптико-акустический метод способен учесть глухие и закрытые поры при изменении пористости бумаги, но определить размеры с помощью этого метода невозможно [77]. В работе [78] пористость бумаги оценивается по впитываемости каменноугольной смолы в структуру бумаги. По диаметру центрального однотонного пятна судят о пористости, затем ее размер сравнивают с диаметром пятна, оставленном на образце с известной пористостью. Вышеуказанный метод не позволяет оценить размеры пор, их равномерность распределения по размерам.

В работе [79] авторы исследовали существующие методы определения пористости, в том числе основанные на фильтрации осадков неорганических нерастворимых солей. Работа интересна тем, что представлены результаты

экспериментальных исследований, по которым сопоставлены практически все встречающиеся сегодня классические методы оценки пористости бумаги и картона.

В ЦБП нашли широкое применение способы определения воздухопроницаемости по методам Бендтсена, Герлея и Шеффилда [80–82]. По аналогии с определением шероховатости, перечисленные методы основаны на проходимости воздуха через пористую структуру материала. Однако стандартные способы не дают информации о размерах пор и об их распределении по размерам, но могут быть использованы в качестве сравнения с другими методами.

С развитием компьютерных технологий появились новые средства оценки пор. Обработка изображений микроструктуры [83–87] позволяет визуализировать морфологию пористой структуры и изучать ее особенности. Несмотря на некоторые недостатки в виде ограничений по качеству снимков, такой метод будет информативен с точки зрения распределения пор в пространстве для получения модели структуры. Компьютерные технологии автоматизируют процесс, снижают его трудоемкость и субъективность в отличие от ручных способов, применяемых при исследовании.

В работах [88, 89] представлена микроструктура бумаги в аксонометрии с учетом сложной формы волокон (рис. 1.15).

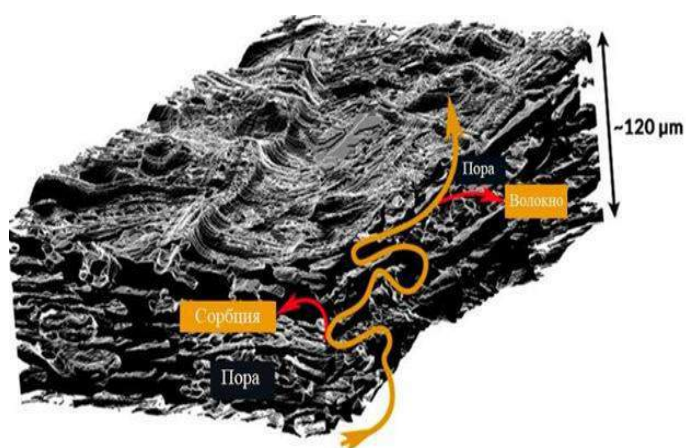


Рисунок 1.15 – Пористая микроструктура бумаги и картона [88, 89]

Тем не менее, представленная модель в виде фрагмента микроструктуры бумаги не подходит для количественной оценки размеров пор и геометрии волокон, так как это картинка, а не стереолитографический файл. Достоверно определить объемы волокон, их поверхность не представляется возможным. Для этого микроструктура должна открываться и редактироваться в САПР (системе автоматизированного проектирования) программах.

Авторы [90] оценили эффективность работы прессовой части и наката бумагоделательной машины по визуализации микроструктуры поперечного среза бумаги (рис. 1.16).

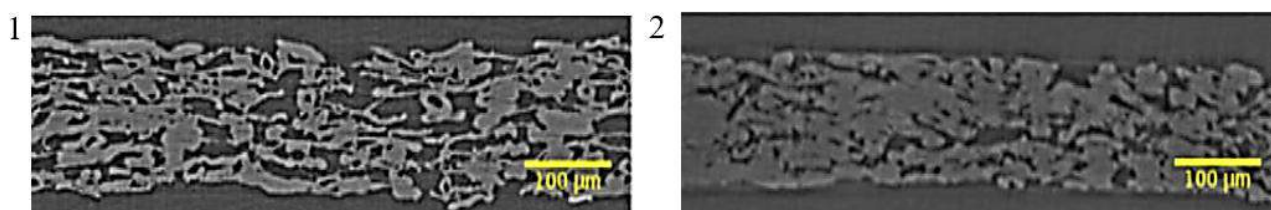


Рисунок 1.16 – Микроструктура поперечного среза бумаги: 1 – до прессования; 2 – после прессования

По рисунку 1.16 можно визуально наблюдать снижение пористости после прессования бумаги. Однако представленные изображения поперечного среза авторы графически не обрабатывали и конкретных данных по пористости не приводили. Для оценки пористости использовался принцип воздухопроницаемости, но в качестве пояснения результатов измерения авторы предыдущей и следующей работы представили изображение микроструктуры в поперечном срезе (рис. 1.17).

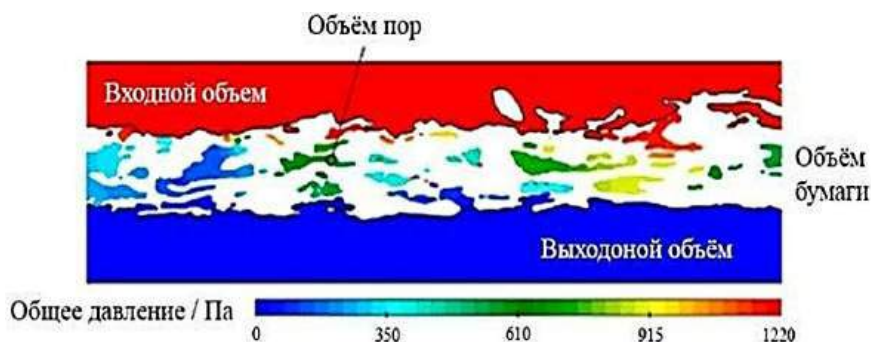


Рисунок 1.17 – Оценка пористости картона по микроструктуре поперечного среза [91]

Графическая обработка микроструктуры поперечного среза позволила авторам работы [92] оценить глубину проникновения крахмала в пористую поверхность картона. Пористость в этом контексте имеет важное значение. Для определения пористости был получен срез, который выполнен с помощью микротомы, а графическая обработка производилась по изображению, полученному с помощью оптического микроскопа. Образцы картона подкрашивались с помощью раствора йода (рис. 1.18).

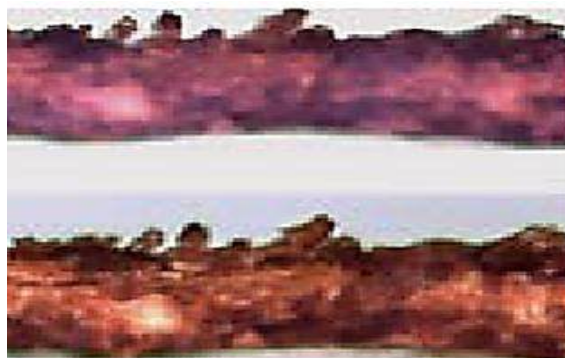


Рисунок 1.18 – Поперечный срез картона, пропитанного крахмалом после обработки раствором калий-йод [92]

Кроме визуального исследования, авторы установили критический для оценки качества проклейки безразмерный коэффициент проникновения крахмала в структуру картона, который позволяет управлять процессом поверхностной проклейки в зависимости от различных факторов, в том числе от пористости.

Пористость покровного слоя бумаги в работе [93] была определена с помощью СЭМ и ионной резки. Затем полученные изображения поперечного среза были проанализированы графическими программами. Одним из результатов стала микроструктура покрытия картона. Авторы исследовали покрытие в 60 мкм^3 – это достаточный объем для достоверной оценки равномерности распределения пор в покровном слое. Однако для волокнистого материала, который имеет сложную систему пор и требует значительно больших областей исследования, ввиду неоднородности распределения волокон, такой метод не применим.

Авторы работы [94] исследовали пористую структуру бумаги с помощью рентгеновской микротомографии, рассматривая участок примерно в 1 мм^2 , толщиной до 50 мкм (рис. 1.19).

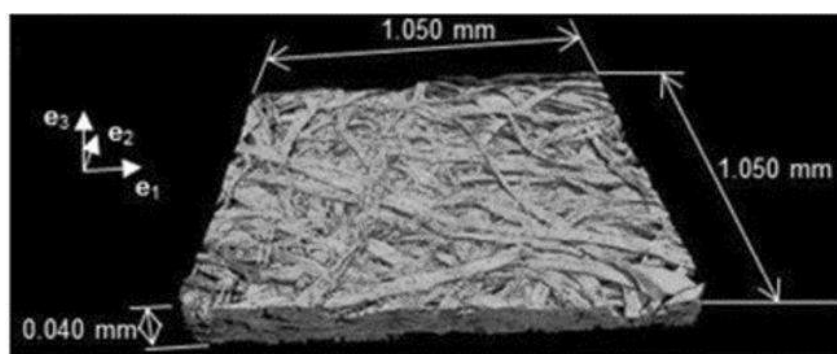


Рисунок 1.19 – Рентгеновская микротомография в исследовании пористой микроструктуры изотропной бумаги

Также в работе были представлены интересные результаты по трехмерному моделированию микроструктуры бумаги с закрытыми и открытыми люменами с исследованием геометрии объектов.

Открытый люмен часто формирует глухие поры, которые не фиксируются стандартными способами, основанными на воздухопроницаемости. В работе были установлены поверхности пересечения волокон между собой, на которых могли бы образоваться прочные водородные связи. Возможно, небольшое значение толщины в 50 мкм связано со сложностью использования метода микротомографии для формирования трехмерной модели пористой структуры картона. В литературе не встречаются твердотельные модели пористой микроструктуры многослойного картона, полученные с помощью рентгеновской микротомографии. Известно, что реальная величина толщины многослойного картона массой 1 м^2 от 120 г составляет примерно 250 мкм. При исследовании гофрокартона протяженность исследуемого участка должна составлять до 8 мм.

В России графической обработкой микроструктуры поперечного среза бумаги и картона занимались ученые СПбГУПТД, в рамках работы научно-педагогической школы «Технология и оборудование целлюлозно-бумажного производства» под руководством профессора Курова В. С. Были запатентованы

методы оценки параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала, в том числе пористость (рис. 1.20) [25–27].



Рисунок 1.20 – Пористость картона, определенная по микроструктуре поперечного среза [25–27]

Оставшаяся область поперечного слоя картона после вычета из общей области срезов волокон, фибрилл и мела по методу исключения, определяет пористость слоев (рис. 1.20), по которой можно определить, насколько плотно укладываются волокна. Несмотря на то, что изображения поперечного среза с выделением пористой структуры позволяют оценить конфигурацию пор, данных по воздухопроницаемости различных видов картона в работах не было. Авторы не сопоставляли данные по пористости, определенные графическим способом, с данными воздухопроницаемости.

Таким образом, критический анализ современных научных исследований в области изучения пористости бумаги и картона позволил оценить положительные и отрицательные моменты визуализации и графической обработки изображений микроструктуры. В целом, с точки зрения достоверного определения пористости картона по микроструктуре, задача остается нерешенной. Разработка алгоритмов для оценки пористости многослойного картона по микроструктуре позволила бы внести новый вклад в оценку печатных свойств с учетом быстрого развития компьютерных технологий и искусственного интеллекта.

1.3.3 Обзор существующих методов оценки толщины

Внешне картон выглядит плоскими и гладкими, однако его поверхность с каждой стороны неровная (шероховатая). Шероховатость бумаги не высокая, поэтому существенного влияния на равномерность распределения толщины материала не оказывает. Однако у многослойного картона тест-лайнера (плоского слоя гофрокартона, произведенного из макулатуры), который состоит из неоднородного сырья с содержанием включений не волокнистого происхождения, сгустков не распустившихся волокон, максимальная шероховатость может достигать 100 мкм при толщине материала 250 мкм. В этом случае необходимо учитывать неравномерное распределение толщины материала при расчете его механических свойств.

Толщина плоского слоя гофрокартона измеряется с помощью стандартных приборов – толщиномеров. В процессе измерения образец бумаги или картона размещается между опорной поверхностью и измерительным диском, перемещение которого относительно опорной поверхности фиксируют. Образцы контактируют с диском толщиномера по площади в $200 \pm 10 \text{ мм}^2$, а прилагаемое давление к ним составляет 0,1 МПа согласно требованиям ГОСТ 27015-86 [95]. Толщину измеряют не менее десяти раз в разных местах, а полученное среднее значение используют для расчета физико-механических характеристик. Под руководством В. И. Комарова ранее были предложены и приняты в научном сообществе термины: стандартизованная толщина (это толщина, которая измеряется с помощью толщиномера (рис. 1.21, А)) и эффективная толщина, которая может быть намного меньше стандартизованной (рис. 1.21, В) [96, 97].

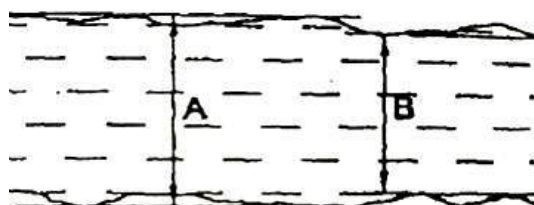


Рисунок 1.21 – Схема поперечного среза картона: А – стандартизованная толщина; В – эффективная толщина [97]

В работе [97] авторы установили, что по мере увеличения массы 1 м^2 разница между толщиной образцов, измеренной стандартным методом и методом плавучести ртути, достигает 38 мкм при 125 г/м^2 . Приблизительное значение толщины образцов при 125 г/м^2 составляет $200\text{--}250 \text{ мкм}$. Следовательно, ошибка в измерении толщины может достигать 19% (рис. 1.22).

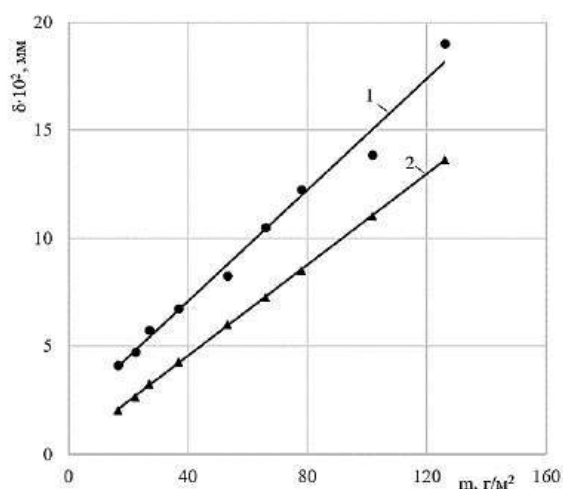


Рисунок 1.22 – Зависимость толщины бумаги от массы метра квадратного: 1 – измеренная стандартным методом; 2 – измеренная методом плавучести ртути [96, 97]

Несмотря на высокую точность в измерении толщины методом плавучести ртути, авторы справедливо отмечают о ее токсичности, поэтому он не нашел широкого распространения и проблема неточности измерения осталась нерешенной. В первую очередь некорректное определение толщины влечет за собой неправильный расчет объемной массы (кг/м^3) картона, которая определяется отношением массы 1 м^2 образца к ее толщине. Неточным является и расчет пухлости ($\text{м}^3/\text{кг}$) образцов, которая является обратной величиной от объемной массы [98, 99].

Следует отметить, что при измерении толщины бумаги и картона, диск толщиномера в определенной степени сжимает волокна. Чем сильнее металлический диск продавит волокнистый материал, тем меньше будет разница между стандартизованной и эффективной толщиной. Причем сжимаемость волокон определяется многими факторами: природой волокна; влажностью; морфологическими свойствами волокон; степенью помола волокнистой

суспензии; наличием наполнителей, упрочнителей, примесей; технологическими особенностями производства бумаги и картона.

Таким образом, существуют две группы факторов, которые определяют неточность измерения толщины картона. С одной стороны, она связана с тем, что поверхность картона с обеих сторон шероховатая и эффективная толщина может быть намного ниже, чем стандартизованная. С другой стороны, при измерении толщиномером выступы из волокон сжимаются по-разному, что приводит к нестабильности измерений.

Неточные измерения толщины картона в разной степени приводят к некорректности определения различных свойств. Например, жесткости при изгибе, которая характеризуется произведением модуля упругости материала E и моментом инерции поперечного сечения I зависит от толщины δ в кубе раз [97, 100]:

$$E \cdot I = E \cdot (b \cdot \delta^3 / 12), \quad (1)$$

При разрыве ряд показателей находится в прямой зависимости от толщины. Поэтому так же, как и при изгибе, в приборах для измерения сопротивляемости разрыву многослойного картона требуется задавать толщину. Алгоритм пересчета свойств измерительным прибором включает в себя расчет предела прочности при растяжении σ , МПа, который вычисляют по формуле:

$$\sigma = F / b \cdot h, \quad (2)$$

где F – разрушающее усилие, Н; b – ширина образца, мм; h – толщина образца, мм [101].

При измерении практически всех механических свойств картона, в которых силовые характеристики переводятся в напряжение, необходимо учитывать толщину, поэтому она является важным показателем. От точности измерения толщины зависит достоверность определения физических и механических характеристик многослойного картона. Интерес к достоверности оценки толщины картона со стороны исследователей по-прежнему высокий.

Развитие компьютерных технологий позволило по-новому подойти к определению толщины мелованного картона. С одной стороны, слой мела

позволяет снизить шероховатость картона до 1 мкм, что, казалось бы, решает проблему разницы между стандартной и эффективной толщиной. С другой стороны, если покрыть поверхность картона мелом, то это выровнит толщину и улучшит печатные свойства. Механические характеристики определяются во многом толщиной основы, а не слоем мела, который прочностью практически не обладает. В связи с этим графическая обработка поперечного среза нашла широкое распространение при определении толщины как покрытия, так и бумаги основы (рис. 1.23).

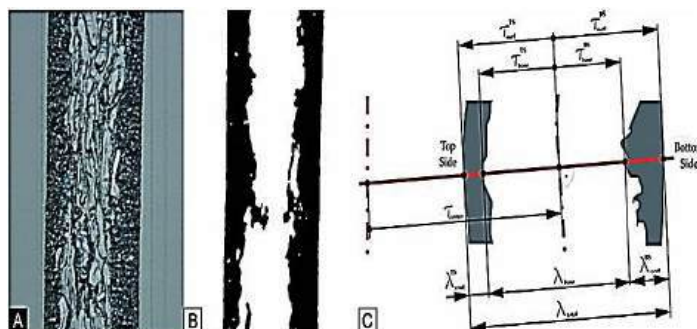


Рисунок 1.23 – Графическая обработка поперечного среза: *A* – поперечный срез картона; *B* – бинарное изображение поперечного среза картона; *C* – схема измерения толщины базового слоя картона и покрытия [102]

На рисунке 1.23, *A* представлен поперечный срез картона с последующей его визуализацией с помощью оптического микроскопа. Затем изображение было переведено в бинарный вид (рис. 1.23, *B*), который позволил оценить толщины покрытия и основы по схеме, показанной на рисунке 1.23, *C*. Более детализированное изображение поперечного среза картона с покрытием позволяет получить сканирующая электронная микроскопия (рис. 1.24).

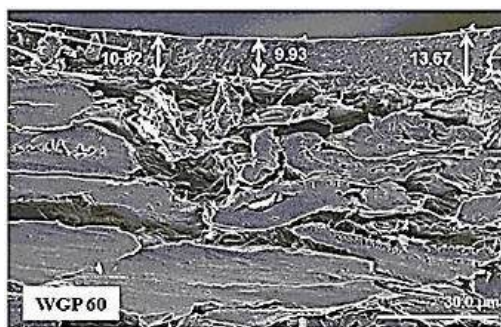


Рисунок 1.24 – Определение толщины покрытия картона по графическому анализу изображения поперечного среза, полученного с помощью сканирующего электронного микроскопа [103]

В отличие от изображений поперечного среза картона, полученных с помощью электронной сканирующей микроскопии (рис. 1.24), оптическая микроскопия не позволяет детально отобразить срезы волокон, зафиксировать неравномерность распределения толщины. Но плюсом оптической микроскопии является возможность показать глубину проникновения краски чернил при нанесении офсетной печати на картон.

В работе [104] представлен поперечный срез двухслойного картона, разделенного на участки по 5 мкм, каждый из которых имел свой размер по вертикали (рис. 1.25).

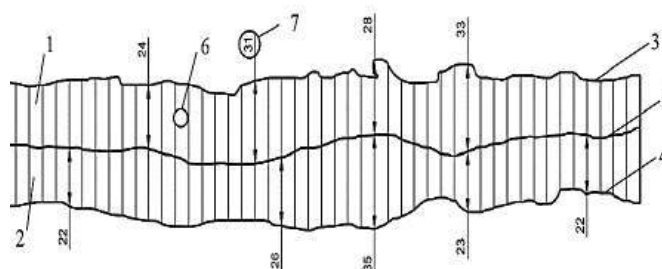


Рисунок 1.25 – Область поперечного среза слоев тест-лайнера с белым покровным слоем: 1 – покровный слой; 2 – нижний слой; 3, 4, 5 – профиль покровного, нижнего и границы слоев соответственно; 6 – 50 равных ячеек; 7 – толщина ячейки [104]

По значениям отрезков, ограниченных профилями нижнего, верхнего и границы слоев были построены гистограммы распределения толщины покровного, нижнего и двухслойного картона (рис. 1.26). Авторы работы [104] не ставили перед собой задачу исследовать, насколько стандартная толщина коррелируется с эффективной толщиной, которая должна использоваться при определении механических характеристик. В дальнейшем результаты оценки механических свойств образцов, которые были исследованы в приведенных выше работах, основаны на толщине, которая была определена с помощью толщиномера.

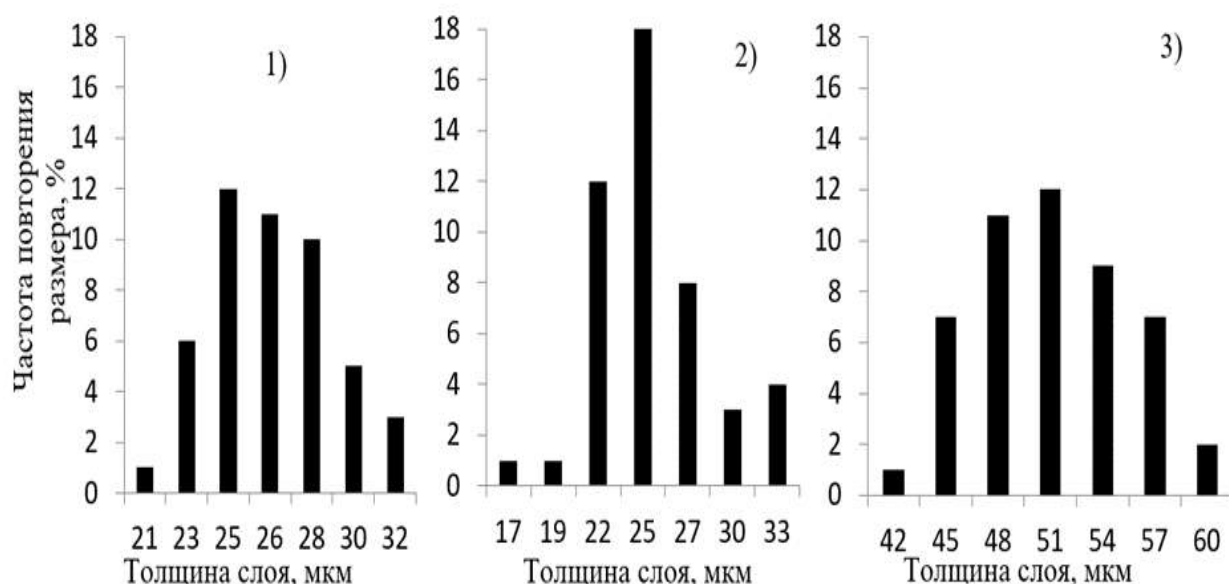


Рисунок 1.26 – Гистограммы распределения толщины слоев по размеру: 1 – покровного; 2 – нижнего; 3 – трехслойного образца бумаги [104]

Результаты графической обработки микроструктуры поперечного среза позволили установить распределение толщины образцов по размерам. Дополнительным преимуществом метода является возможность установить равномерность распределения толщины каждого слоя в отдельности.

Таким образом, критический анализ литературных источников по исследованию толщины показал интерес многих научных центров исследования бумаги и картона. В частности, были установлены преимущества измерения толщины многослойного картона путем графической обработки изображения поперечного среза, которые заключаются в точности измерения, в возможности учесть те ошибки, которые связаны с высокой шероховатостью поверхности. Очевидно, что толщину, которая используется в качестве расчета физико-механических свойств, измеренную с помощью толщиномера, необходимо корректировать, и с учетом этого пересчитать зависимые от нее физические и механические показатели.

Результаты исследований позволят внести корректировки, учитывающие систематическую погрешность измерения толщины плоских слоев гофрированного картона, для конкретного производителя с учетом используемого сырья.

1.4 Способы графической обработки микроструктуры картона

Для графической обработки изображений микроструктуры поперечного среза необходимо высокое качество, детализировка границ срезов, масштабная линейка. Всё это атрибуты изображения, которое получено с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Примеры изображений микроструктуры поперечного среза многослойного картона представлены в работах [83, 25].

Следующим этапом после СЭМ является графическая обработка изображений, которая может быть выполнена двумя принципиально разными методами:

1. Векторный способ обработки изображения. Он обладает высокой точностью, позволяет определить геометрические параметры объектов, но связан с большими затратами времени, так как требует много ручной работы. Автоматический режим векторизации изображений может привести к неточным результатам.

2. Растровый способ обработки изображения. Этот способ существенно быстрее позволяет обработать изображение микроструктуры, но точность результатов ниже, чем в предыдущем способе.

Сочетание преимуществ двух способов позволит оперативно и с высокой точностью провести графическую обработку изображений микроструктуры поперечного среза бумаги и картона. Для этого необходимо сопоставить результаты графической обработки предложенными способами при этом четко зафиксировать режимы предварительного подбора контрастности и яркости объекта для растровой картинки. Такая тарировка позволит приблизить данные графической обработки растровым и векторным способами на нескольких первых образцах. А затем можно выполнить большую серию экспериментов по графической обработке в установленных режимах.

Таким образом решается актуальная задача цифровизации научных исследований с целью замены дорогостоящего импортного оборудования.

В этом контексте поиск программ растрового формата обработки изображения, с открытым исходным кодом является важной частью поставленной задачи.

Авторы работы [83] использовали возможность бесплатного программного обеспечения ImageJ для автоматизации выбора режимов контрастности и яркости, что существенно сокращает затраты времени на графическую обработку. На рисунке 1.27 представлен результат автоматического выбора режима, параметры которого в последующем авторы использовали для сопоставления с результатами обработки в программах векторного формата.

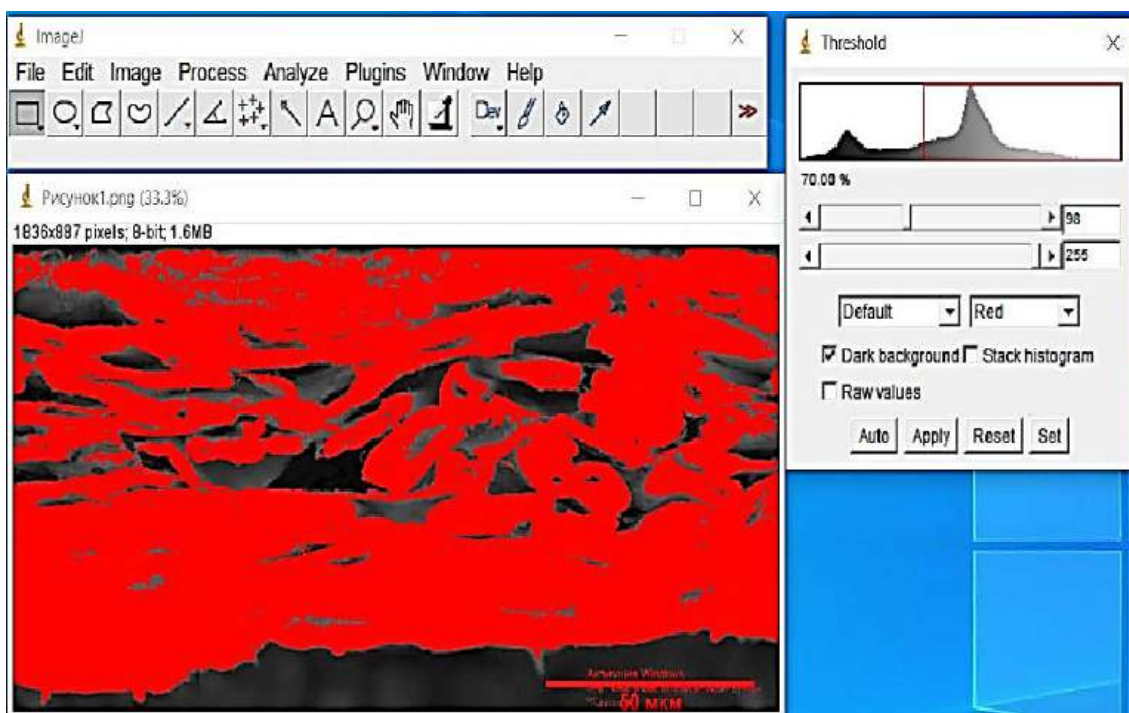


Рисунок 1.27 – Результат выделения областей среза в программе ImageJ в режиме Auto [83]

Предварительно программа упрощает (сжимает) изображение без видимой потери детализовки.

Главной сложностью при работе с растровыми изображениями срезов бумаги и картона – это наличие «проблемных областей», обладающих тем же цветовым оттенком, что и нужные для работы в самом срезе и области, находящиеся за его пределами. Так для среза, представленного на рисунке 1.27 получено значение площади среза 6178 мкм^2 . Поэтому ставится задача по удалению «визуального шума», который на выходе даст большую погрешность

в данных (22,5 %). Для решения подходят ресурсы программы для работы с растровыми изображениями ImageJ (рис. 1.27). Данные, полученные в программах векторного и растрового форматов сравниваются и определяется погрешность расчетов (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Данные расчета поверхности среза волокнистого композиционного материала по этапам с различными параметрами программ, работающих в векторном и растровом форматах файлов [83]

Этапы расчета площадей среза волокнистого композиционного материала в поперечном срезе	Площадь, мкм ²	Погрешность, %
Параметр Treshold в режиме Auto 98, 255 (ImageJ)	17 287	72,3
Параметр Treshold в режиме Auto 98, 255 (удаление областей, соответствующих поверхности волокнистого материала) (ImageJ)	12 657	62,1
Параметр Treshold 120, 240 (после «бинаризации» изображения) (ImageJ)	6178	22,5
Параметр Treshold 120, 240 (после «бинаризации» изображения и удаления проблемных участков в микроструктуре поперечного среза) (ImageJ, IP SQUARE)	4771	0,5
Общая площадь среза волокон, установленная при работе в векторном формате файла (с помощью программы AutoCAD)	4791	0

В таблице 1.1. представлены данные расчета по всем этапам обработки изображений поперечного среза в двух форматах. Каждый этап дополняется возможностями программ ImageJ и AutoCAD в результате комбинирования векторного и растрового программного обеспечения.

Анализ таблицы показывает:

- при прочих равных условиях (угол поворота камеры, освещение области сканирования образцов) необходимо сопоставить данные двух методов графической обработки;

- удаление проблемных участков (например, те зоны, которые имеют одинаковый оттенок, но определяют разные элементы микроструктуры);

- использование программы векторного формата работы с изображениями позволило сократить погрешность измерения в три раза с 62,1 до 22,5 %;

- установлены значения оттенка цветов в пределах 120 и 240 единиц, которые в последующем были использованы для проведения серии экспериментальных исследований с другими образцами.

Автоматическая калибровка позволяет работать с большим массивом данных, связанных с большой протяжённостью исследуемых срезов волокнистого материала (бумаги и картона).

Поэтому при разработке методов оценки параметров картона по микроструктуре поперечного среза необходимо комбинировать программы растрового и векторного формата. Также следует обратить внимание на ускорение процессов графической обработки до уровня создания системы онлайн-контроля для предприятий-производителей гофрокартона.

1.5 Анализ существующих способов оценки качества печати на предприятиях ЦБП

Интерес к контролю качества печати на гофрокартоне связан с ростом объемов биоразлагаемой упаковки и необходимостью нанесения красочной информации. В отличие от печати на бумаге или других рулонных материалах, поставляемых типографиям, дефекты оттиска на гофрокартоне имеют характерные отличия. Известно, что наиболее распространенным видом печати на картон является флексография.

Флексографические машины для печати на гофрокартон состоят из прижимного, формного и анилоксового валов и красящего аппарата. Процесс печати включает несколько стадий: подача чернил; печать с помощью пластин и цилиндра; нанесение оттиска с помощью цилиндра [105, 106]. Конструкция и особенности печати на разных машинах определяют качество нанесения оттиска. Печатные свойства материала, на который наносится печать (пористость, шероховатость, неоднородность распределения волокон, шаг гофрослоя), имеют важное значение и определяют качество оттиска.

При производстве большой партии упаковки печать производят на плоский, лицевой слой гофрокартона (лайнер) (рис. 1.28, *a*) до формирования

гофрокартона. В случае выпуска небольших партий упаковок такой способ не рентабелен [107], вследствие сложности и высокой стоимости разработки нового макета. Ошибка макетирования и нарезки приведет к большому количеству брака.



Рисунок 1.28 – Результат флексографической печати на рулон лайнера и на гофрокартон: *а* – флексографическая печать на лайнер; *б* – дефект печати «эффект стиральной доски» при флексографической печати на гофрокартоне [107, 108]

На рисунке 1.28 видно, что в отличие от флексографической печати на рулон лайнера, печать на гофрокартоне имеет дефект «эффект стиральной доски» (рис. 1.28, *б*) [108], который вызван несколькими причинами. Во-первых, выступы, которые образуются на вершинах гофрослоя, повышают неравномерность оттиска. Во-вторых, клей, который наносится между гофрослоем и плоским слоем, сильно меняет проникающую способность красок, отчего оттиск отличается по цвету. «Эффект стиральной доски» может усилиться при незначительных увеличениях влажности воздуха. Также можно отметить, что при снижении массы метра квадратного плоского слоя «эффект стиральной доски» усиливается от 100 до 300 мкм (рис. 1.29). Факторы, которые вызывают волнистость: шаг гофрослоя; масса метра квадратного плоского слоя, его структура и природа волокон; состав внутримассной проклейки лайнера; состав и дозировка клея, соединяющего слои; влажность, температура и др.

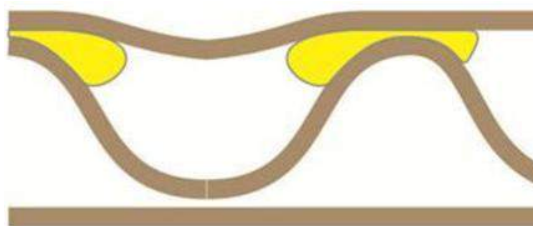


Рисунок 1.29 – «Эффект стиральной доски», дефект гофрослоя [109]

Известен способ снижения «эффекта стиральной доски» путем изготовления специальных гибких флексографических форм, обладающих рельефно-растровой структурой [110].

Исследование печатных форм для флексографической печати относится к области научных интересов полиграфистов, а в данной статье рассматривается материал, на который наносится печать, его неоднородная волокнистая структура. Известно несколько направлений снижения «эффекта стиральной доски». Например, способ подготовки крахмального клея вместе с микрофибриллированной целлюлозой, который был успешно внедрен компанией «Стора Энсо» [111]. Технический результат был достигнут за счет новой структуры клеевой суспензии, обладающей достаточной адгезией и способной пропускать чернила. Это выровняло впитывающую способность гофрокартона по поверхности и снизило градиент распределения чернил на выступах и впадинах гофрослоя.

Для того чтобы определить, насколько снизился «эффект стиральной доски», необходимы визуальная и количественная оценки качества оттиска. Существуют приборы, которые оценивают волнистость гофрокартона. Их разработкой занимались с середины прошлого века. Волнистость листовых материалов определяли с помощью специальных методов, основанных на передаче электрических импульсов различной величины при контакте роликов с поверхностью (контактные методы) (рис. 1.30) [112].

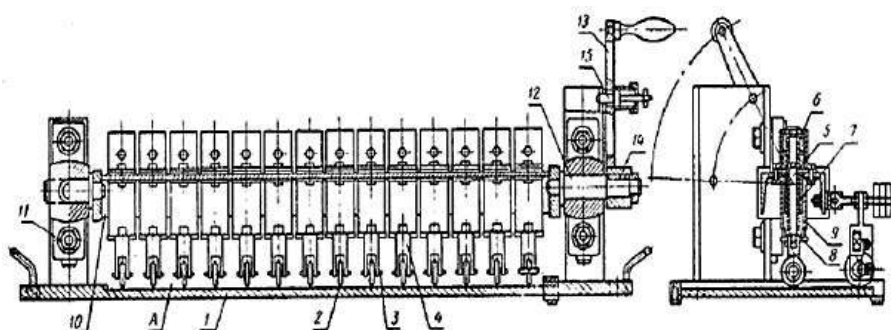


Рисунок 1.30 – Контактный способ оценки волнистости листа

Однако использовать контактные способы оценки волнистости поверхности гофрокартона сложно, ввиду того, что волокна в разной степени деформируются. Методы оценки «эффекта стиральной доски» гофрокартона были реализованы в оптических приборах. На рисунке 1.31 представлен прибор итальянского разработчика Лукаса Песколлера [113].

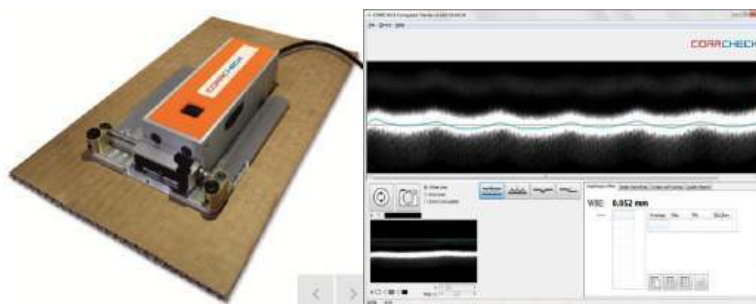


Рисунок 1.31 – Прибор для измерения волнистости гофрокартона Corrugcheck [113]

В России этот прибор поставляется компанией «Юман». Данные, полученные с его помощью, можно сопоставить с данными оценки качества нанесения оттиска.

В работе [113] качество оттиска и «эффект стиральной доски» рассматриваются наряду с другими свойствами гофрокартона, изготовленного по новой технологии с использованием волокон из стеблей томатов (рис. 1.32).

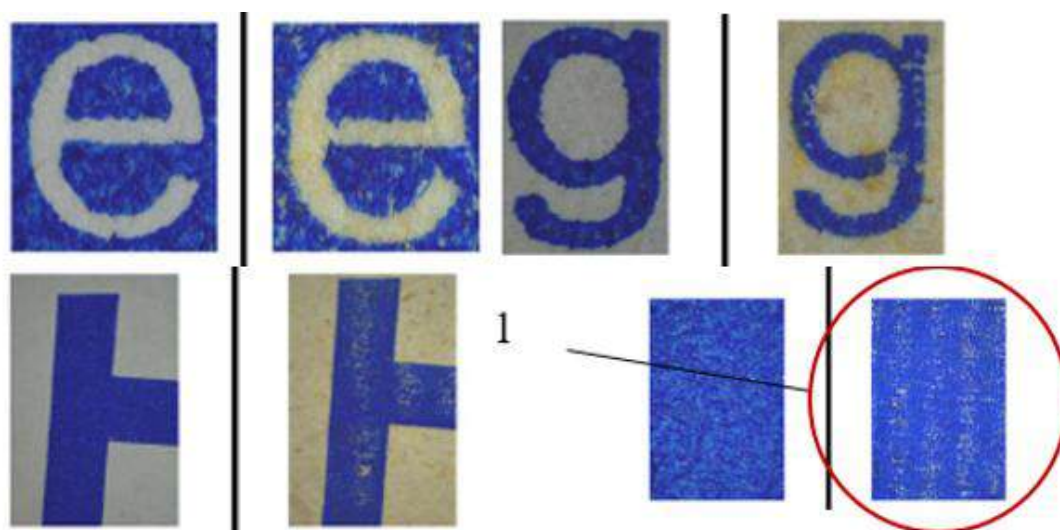


Рисунок 1.32 – Дефекты оттиска при печати: 1 – «эффект стиральной доски» [113]

В работе представлены показатели, по которым оценивают качество печати, а именно: геометрия символов и площадь оттиска. Были изучены различные символы для визуального и количественного сравнения: «e»; «g»; «H». Площадь и геометрия символов была определена с помощью графической обработки изображений. Этот метод является перспективным в условиях развития искусственного интеллекта. Известны приборы контроля качества оттиска, работающие на основе графической обработки изображений, например, «Revision II» [114, 115]. Однако эти приборы предназначены для видеоконтроля за качеством флексографической печати на плоский слой гофрокартона до его соединения с гофрослоем. Существующие приборы оценивают пятнистость оттиска по показателю ΔE , который определяет различие в цветности относительно эталона. Помимо стандартного показателя, существует способ оценки неравномерности оттиска, основанный на определении цветового различия, который позволяет оперативнее получать результаты [116, 117]. Принцип оценки цветового различия основан на наличии темных областей во впадинах и светлых на выступах. Если образцы имеют волнистость или обладают высокой шероховатостью, то пятнистость оттиска будет выше, следовательно, количество оттенков цветов относительно эталона тоже. Авторы не проводили испытания на гофрокартоне, но этот способ в определенных случаях подойдет для исследования гофрокартона в режиме онлайн.

Рассмотрев существующие разработки в области флексографической печати на гофрокартон и системы контроля за печатью, установлено, что современные методы контроля основаны на графической обработке символов. Оценка равномерности нанесения краски определяется равномерностью оттиска. В большинстве случаев системы для онлайн-контроля предназначены для флексографических машин, которые наносят печать на бумагу и на покровный слой гофрокартона до соединения его с гофрослоем. Такой способ печати не целесообразен для небольших партий упаковки. Компании, которые поставляют оборудование для флексографической печати, обладают своими системами контроля за качеством нанесения печати, однако описание таких систем является

коммерческой тайной. Обычно машины, оснащенные такими системами, дорогостоящие и производятся за рубежом. Такое оборудование не рентабельно для небольших картонных фабрик, на которых контроль качества печати чаще осуществляется визуально.

С развитием искусственного интеллекта сокращаются затраты на программирование систем контроля, что позволяет модернизировать существующие флексографические машины и контролировать качество печати в режиме онлайн. Такие системы требуют четкого понимания параметров, которые необходимо контролировать и сопоставлять с эталоном. Предлагается использовать графическую обработку, которая включает в себя определение площади, периметра символов и цветового различия относительно эталона. Эти три параметра можно отследить онлайн с помощью видеонаблюдения при печати на гофрокартон. При разработке алгоритмов для онлайн-контроля важно учитывать факторы, которые определяются не только параметрами краски, флексографической формы. Важную роль определяет структура картона, его пористость, шероховатость, неоднородность распределения волокон (рис. 1.33) [118].

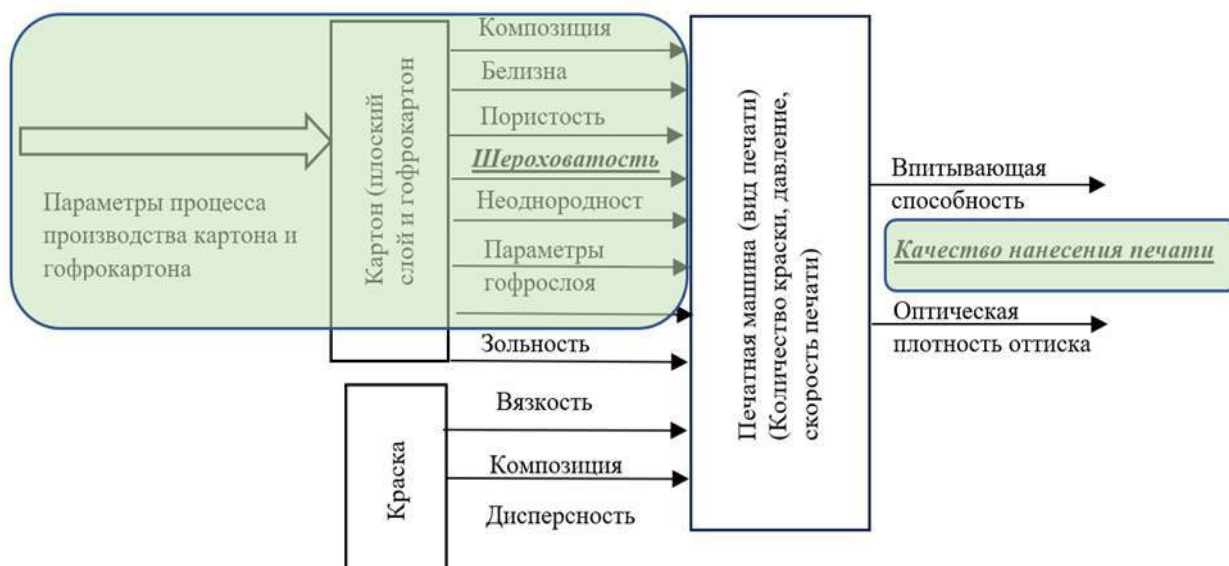


Рисунок 1.33. Факторы, определяющие качество оттиска на картоне

Эти факторы в большей степени определяют качество нанесения печати на гофрокартон и должны быть учтены при разработке систем онлайн-контроля за флексографической печатью.

1.6 Выводы по литературному обзору и постановка цели и задач исследований

Таким образом, критический анализ современных зарубежных и отечественных литературных источников показал, что актуальной на сегодняшний день является задача в оценке печатных свойств картона. Несмотря на то, что публикаций по анализу микроструктуры бумаги и картона довольно много и четко проглядывается тенденция к исследованию свойств картона по графической обработке микроструктуры и микрорельефа, в каждом конкретном исследовании решается определенная задача.

Анализ литературных источников показал, что мало уделяется внимания подготовке образцов для получения качественных изображений микроструктуры картона с большой протяженностью среза. Для оценки параметров картона необходимо специальное устройство для реализации метода оценки свойств по графической обработке микроструктуры.

Патентный поиск зарубежных и отечественных разработок в области оценки неоднородности формования бумаги и картона выявил необходимость в разработке метода оценки неоднородности многослойных композиционных целлюлозосодержащих материалов. Требуются новые алгоритмы графической обработки микроструктуры поперечного среза, которые позволят оценивать неоднородность формования каждого слоя в отдельности и многослойного картона в целом.

Несмотря на обширный материал по исследованию микрорельефа поверхности бумаги и картона, данные по шероховатости известных методов часто противопоставляются друг другу. Одни авторы получают данные по шероховатости, которые могут противоречить другим. Необходим метод оценки шероховатости, который основан на фундаментальных принципах определения микронеровностей по профилю поверхности картона с расчетом

среднеарифметической шероховатости Ra , шероховатости по пяти выступам и пяти впадинам Rz и по максимальному отклонению от выступа и впадины $Rmax$.

Нерешенная задача по определению эффективной толщины, которая освещалась ведущими научными школами по оценке свойств бумаги и картона может быть по-новому рассмотрена с позиции графической обработки микроструктуры поперечного среза. Необходим метод, который позволит скорректировать свойства многослойного картона по эффективной толщине, которая существенно может отличаться от стандартизированной из-за высокой шероховатости.

Разработка новых алгоритмов расчета пористости по графической обработке микроструктуры картона в поперечном срезе позволит учитывать все категории пор, в том числе и закрытые, и глухие, которые не определяются по методам оценки пористости по проходимости воздуха или жидкостей.

Анализ существующих способов оценки качества печати на предприятиях ЦБП показал востребованность в методах оценки печатных свойств, основанных на определении шероховатости, толщины, пористости и неоднородности формования с дальнейшей разработкой системы онлайн-контроля.

Таким образом, целью работы является разработка методов оценки влияния микроструктуры и микрорельефа на качество печати.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать способ исследования микроструктуры для оценки параметров картона и устройство для его реализации.

2. Разработать метод оценки неоднородности формования многослойного картона с помощью графической обработки изображений микроструктуры поперечного среза.

3. Исследовать влияние микроструктуры поперечного среза, путем графической обработки его изображения на микрорельеф многослойного картона (шероховатость, пористость и толщина).

4. Экспериментально подтвердить возможность использования методов оценки физических свойств (толщины и неравномерности ее распределения,

шероховатости, пористости, неравномерности формования) по графической обработке микроструктуры поперечного среза, а также разработать алгоритм прогнозирования качества печати на многослойном картоне.

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

2 Методическая часть

2.1 Объект и предмет исследования. Объекты сравнения

2.1.1 Объект исследования

Объектами исследования являются печатные свойства картона, а именно: неоднородности формования, шероховатость, пористость и равномерность распределения толщины. Исследования проводились с помощью стандартных методов и путем графической обработки изображений микроструктуры поперечного среза картона.

2.1.2 Предметы исследования

Предметами исследования были плоские слои (верхний) гофрокартона, произведенный из различных видов вторичного сырья (тест-лайнер). В работе также были использованы экспериментальные данные, полученные с **объектов сравнения**: мелованной бумаги; офисной бумаги; гофрокартона различных марок и литой тары.

На рисунке 2.1 представлена принципиальная схема гофрокартона, которая показывает структуру гофрокартона по слоям. Гофрокартон состоит из верхнего 1, 2 и нижнего 3, 4 плоских слоев, которые формуются в два слоя. Между ними располагается гофрослой (флютинг) 5, который соединяется с помощью клея 6 с плоскими слоями.

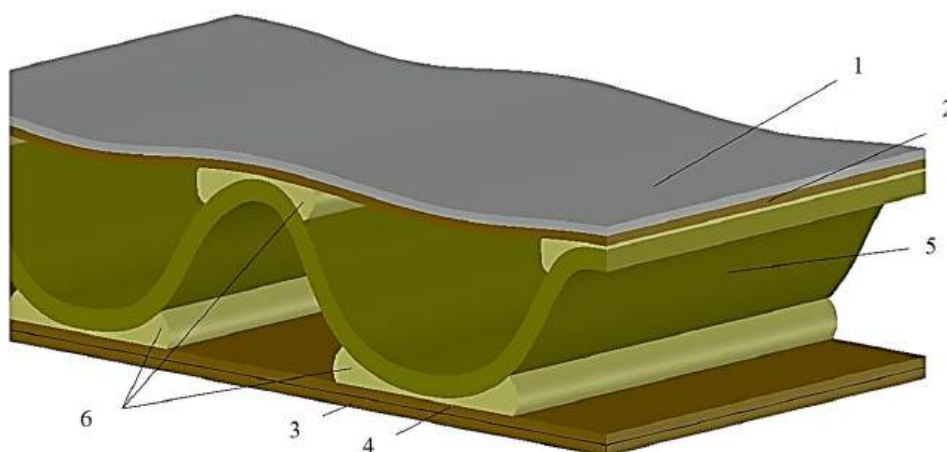


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема гофрокартона: 1 – покровный слой верхнего плоского слоя гофрокартона (МС-7); 2 – часть верхнего слоя, изготовленная из макулатуры МС-5Б; 3, 4 – нижний плоский слой гофрокартона из макулатуры МС-5Б (двухслойный тест-лайнер); 5 – гофрослой (флютинг); 6 – клей

Предметами исследования и сравнения были лабораторные и промышленные образцы картона и различных видов бумаги.

2.1.3 Лабораторные образцы

Для исследования в лаборатории были получены образцы (рис.2.2):

- на основе макулатуры, которая состояла из бумаги российского производителя (г. Светогорск, Svetocopy Classic). В составе такой бумаги следующие компоненты: БХТММ, СФАБЦХП и СФАБЦЛП (белёная химикотермомеханическая масса, сульфатная белёная целлюлоза хвойных и лиственных пород), крахмал, клей гидрофобизирующий и высокое содержание мела [119];

- на основе макулатуры из гофрокартона (производитель не известен). В составе СФАНБЦХП, ЦВВ (сульфатная небелёная целлюлоза хвойных пород древесины, целлюлоза высокого выхода), крахмал, клей, наполнитель

- диаметр образцов – 200 мм;
- роспуск – в лабораторном дезинтеграторе;
- размол – в лабораторном размалывающем комплексе до 55 °ШР;
- площадь – 0,0314 м²;
- вес – 3,7 ±0,2 г;
- масса квадратного метра – 120 ±5 г/м²;
- количество слоёв – от 1 до 4 шт.;
- толщина – 200 –250 мкм [120, 121]

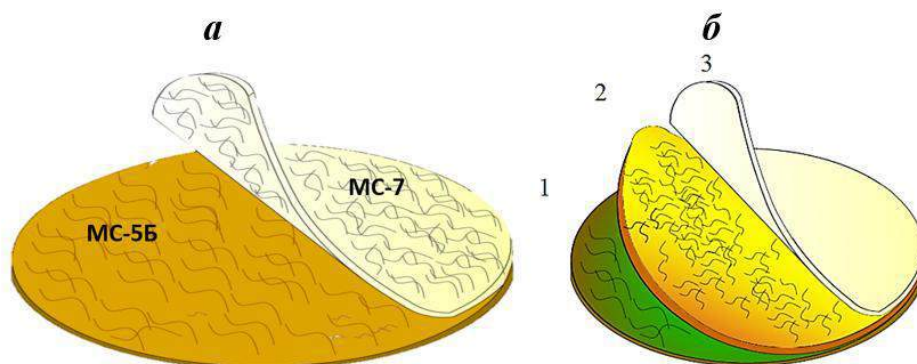


Рисунок 2.2 – Верхний плоский слой гофрокартона (лабораторный образец): *а* – двухслойный; *б* – трехслойный; 1 – слой из макулатуры МС-5Б; 2, 3 – слой из макулатуры МС-5Б или МС-7

В таблице 2.1 представлены характеристики исследуемых образцов.

Таблица 2.1 – Характеристики испытываемых образцов многослойного волокнистого композиционного материала [122]

Наименование	Примечание	Цвет
7А_120_I	Однослойный картон лайнер, массой квадратного метра 120 г из макулатуры, состоящей из офисной бумаги	белый
7А_120_II	Двухслойный картон лайнер, массой квадратного метра 120 г из макулатуры, состоящей из офисной бумаги	белый
7А_120_III	Трехслойный картон лайнер, массой квадратного метра 120 г из макулатуры, состоящей из офисной бумаги	белый
7А_120_IV	Четырехслойный картон лайнер, массой квадратного метра 120 г из макулатуры, состоящей из офисной бумаги	белый
5Б_120_I	Однослойный картон лайнер, массой квадратного метра 120 г из макулатуры, состоящей из гофрокартона	бурый
5Б_120_II	Двухслойный картон лайнер, массой квадратного метра 120 г из макулатуры, состоящей из гофрокартона	бурый
5Б_120_III	Трехслойный картон лайнер, массой квадратного метра 120 г из макулатуры, состоящей из гофрокартона	бурый
5Б_120_IV	Трехслойный картон лайнер, массой квадратного метра 120 г из макулатуры, состоящей из гофрокартона	бурый
7А+5Б_II	Двухслойный картон лайнер, массой квадратного метра 120 г из макулатуры, состоящей из офисной бумаги для покровного слоя (60 г) и гофрокартона – для нижнего слоя (60 г)	белый/ бурый
7А+5Б_III	Трехслойный картон лайнер, массой квадратного метра 120 г из макулатуры, состоящей из офисной бумаги для двух покровных слоев (80 г) и гофрокартона – для нижнего слоя (40 г)	белый/ белый/ бурый
7А+5Б_IV	Четырехслойный картон лайнер, массой квадратного метра 120 г, из макулатуры, состоящей из офисной бумаги для двух покровных слоев (60 г) и гофрокартона – для нижнего слоя (60 г)	белый/ белый/ бурый/ бурый
КВ_ образец 1	Двухслойный наружный слой, произведенный на ОАО «Караваево» из макулатуры гофрокартона	бурый/ бурый

2.1.4 Промышленные образцы

Промышленный образец (таблица 2.1., «КВ_ образец 1») представлял собой двухслойный картон, тест-лайнер (плоский наружный слой гофрокартона) массой квадратного метра 120 г и толщиной 220–250 мкм, изготовленный из макулатуры марки МС-5Б, преимущественно состоящей из небеленой сульфатной целлюлозы хвойных и лиственных пород древесины (рис. 2.3) [123, 124].



Рисунок 2.3 – Промышленный образец

Поверхностная впитываемость по Коббу верхней стороны плоского наружного слоя (Кобб 60), г/м², не более 30 согласно ГОСТ 12605-97 [125]. Тест-лайнер использовался в качестве наружного плоского слоя гофрокартона, произведенного на автоматической линии 9РА-109/9FGT17.

2.1.5 Объекты и предметы сравнения

- бумага с покрытием, глянцевая (белого цвета, массой квадратного метра 250 г, шероховатость – не более 50 мл/мин, произведена в России) [126].

- бумага офисная торговой марки «Svetocopy Classic» (белого цвета, массой квадратного метра 80 г, шероховатость не более 400 мл/мин, произведена в г. Светогорске, Россия). В составе использованы первичные волокнистые полуфабрикаты, а именно: сульфатная беленая целлюлоза хвойных и лиственных пород древесины, беленая химико-термомеханическая масса.

- картон тест-лайнер с белым покровным слоем (покровный слой – изготовлен из вторичных беленых волокон (преимущественно макулатуры МС-7), нижний слой был изготовлен из вторичных небеленых волокон макулатуры МС-5Б). Произведен картон на фабрике ОАО «Каравеево», Московская область, Ногинский район. Шероховатость, измеренная по методу Бендтсена, – до 3000 мл/мин.

- гофрокартон марки «В» (шаг – 4,5 мм) из двух плоских многослойных слоев (двухслойных) и одного флютинга – гофрированного слоя. Произведен на фабрике ОАО «Каравеево», Московская область, Ногинский район. Сырьем являлась макулатура МС-5Б. Шероховатость по Бендстену не определена – превышает 5000 мл/мин.

- гофрокартон марки «С» (шаг – 7,5 мм) из двух плоских многослойных слоев (двухслойных) и одного флютинга – гофрированного слоя. Произведен на фабрике ОАО «Каравеево», Московская область, Ногинский район. Сырьем являлась макулатура МС-5Б. Шероховатость по Бендстену не определена – превышает 5000 мл/мин.

- литая тара, произведенная в Ленинградской области ООО «Эко пэкэджинг интернейшнл компани». Сырьем являлась смешанная макулатура МС-8В, МС-5Б. Шероховатость по Бендстену не определена – превышает 5000 мл/мин [127].

2.2 Методы, оборудование и программы

2.2.1 Методы и исследования, проводимые в лаборатории университета, стандартные методы

Подготовку основного и поверхностного слоя осуществляют в экспериментальной лаборатории подготовки волокнистой суспензии и получения образцов волокнистого целлюлозосодержащего материала, согласно международным и российским стандартам:

- вес абсолютно сухого волокна в образце и в полуфабрикate определяют по ISO 638 (Paper, board and pulps – Determination of dry matter content – Oven-drying method) [128];

- влажность образцов контролируют согласно ISO 287 (Paper and board – Determination of moisture content of a lot – Oven-drying method) [129].

Подготовка макулатурной массы ISO 4119 (Pulps- Determination of stock concentration) включает в себя [130]:

- роспуск макулатуры согласно стандарту ISO 5263-1 (Pulps – Laboratory wet disintegration – Part 1: Disintegration of chemical pulps) [131];

- размол в мельнице Валлей согласно стандарту ISO 5264-2 (Pulps – Laboratory beating – Part 2: PFI mill method) [132];

- степень помола согласно стандарту ISO 5267-1:1999 (Pulps – Determination of drainability – Part 1: Schopper-Riegler method) [133].

Из подготовленной макулатуры выполняют многослойные отливки в листоотливном аппарате согласно ISO 5269-2 (Pulps – Preparation of laboratory sheets for physical testing – Part 2: Rapid-Köthen method) [134].

Физико-механические свойства лабораторных образцов определялись по следующим стандартам:

- оценка толщины в соответствии с ГОСТ Р ИСО 534-2012 [135];

- оценка шероховатости в соответствии с ISO 8791-4 [136];

- оценка воздухопроницаемости в соответствии с ISO 5636-5-2013, ISO 5636-4-2005 [81, 82];

- оценка плотности и удельного объема, пухлости ISO 534 [138];

- разрушающее усилие определяли по ISO 1924-1-96 [139];

- структурно-размерные показатели определяли по ISO 534-2012 [140];

- сопротивление продавливанию выполнялось согласно ISO 2758 [141];

- сопротивление изгибу в соответствии с ISO 2493 [142].

Лабораторные образцы и их контроль качества были вымолены в соответствии с перечисленными методами на оборудовании центра коллективного пользования «Биорефайнинг и нанотехнологии древесины» на территории университета.

2.2.2 Исследования, проводимые в центрах коллективного пользования и на производственных площадках, нестандартные методы

Поперечный срез многослойного картона осуществлялся с помощью полуавтоматической шлифовально-полировальной установки Struers TegraPol-21 [143]. Визуализация поперечных срезов подготовленных образцов проводилась с помощью электронного микроскопа компании TESCAN MIRA3 LMH (Чешская Республика). Характеристики сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA3 LMH: электронная колонна (FEG SEM) с источником электронов на основе катода Шоттки; ускоряющее напряжение 200 В – 30 кВ; ток зонда 2 нА – 200 нА; разрешение 1,0 нм (при 30 кВ), увеличение до 1 000 000; детекторы вторичных электронов (SE, In-Beam SE) [144–147]. При шлифовке изготавливали основание с помощью стереолитографического 3D-принтера Creality3D Halot R6 в СПбГУПТД [148]. Основание изготавливали из фотополимерной смолы HAZ Labs Dental Yellow Clear PRO LCD/DLP [149]. Основание может быть изготовлено из пластика (полилактида, полиэтилена, сополимера акрилонитрила бутадиена и стирола) с помощью 3D-принтера. Размеры основания будут определяться шириной и толщиной твердого образца, а также размером заливочной формы. Основным требованием является перпендикулярность расположения твердого образца при заливке прозрачным синтетическим полимером. В качестве полимера можно использовать реактопласт, например эпоксидную смолу с отвердителем. Помимо эпоксидной смолы могут быть использованы двухкомпонентные полиуретановые пластики. Калибровочный элемент в виде сферы 9 имеет четкую границу раздела фаз с прозрачным синтетическим полимером. После кристаллизации образуется полностью прозрачный образец, без пузырей.

Подготовка проб к испытаниям. Основным этапом подготовки проб к электронной микроскопии является их заливка. Для этого совместно с исследователями университета были подготовлены основания под заливку, на которых держатся образцы бумаги для последующего шлифования и сканирующей электронной микроскопии. На рисунке 2.4 представлена

конструкция основания под заливку четырех образцов. Это основание имеет внешний диаметр и высоту, подходящие под шлифовально-полировальное устройство Struers Tegramin-25.

Основание состоит из цилиндрического корпуса, внутри которого располагаются пазы для вставки образцов размером не более 19 мм и в высоту не более 20 мм. Пазы под образцы сквозные. В центре располагается отверстие под калибровочный элемент в виде цилиндра правильной формы с заданными размерами. В данном случае для цилиндра диаметром в 1,5 мм, 11 мм в длину.

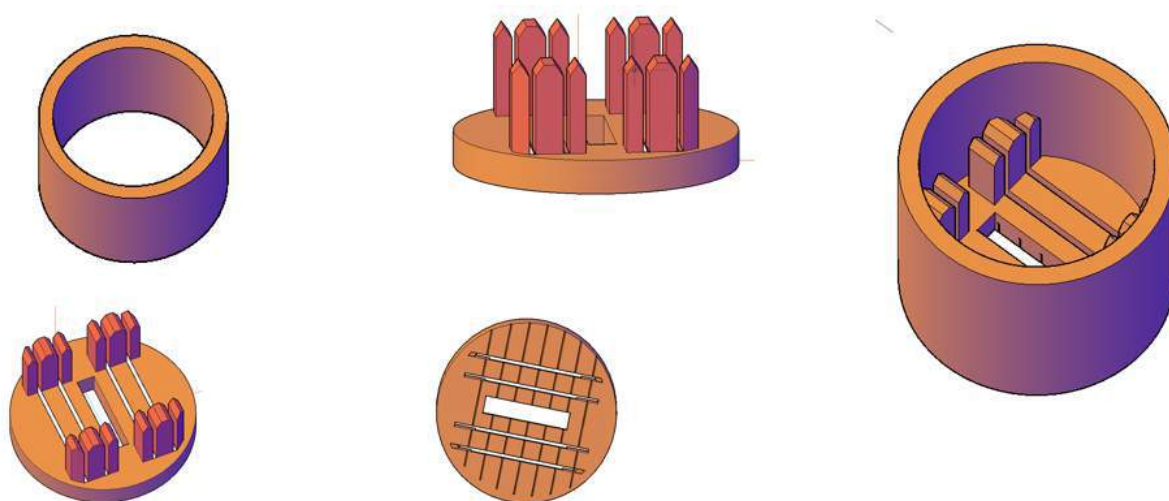


Рисунок 2.4 – Конструкция основания для фиксации и заливки образцов под шлифовально-полировальное устройство Struers Tegramin-25

Дно основания разделено на секции по 2,5 мм для удобства калибровки изображений, в последующем получаемых с помощью сканирующего электронного микроскопа. Для того, чтобы обеспечить достоверность проводимых в дальнейшем экспериментальных исследований, было изготовлено более 80 единиц оснований для четырех серий опытных образцов в лаборатории 3D-печати и сканирования СПбГУПТД (рис. 2.5), которые предназначены для проведения сканирующей электронной микроскопии и оптической.

a



б



Рисунок 2.5 – Изготовление оснований для проведения серии исследований микроструктуры поперечного среза сканирующей электронной микроскопией: *a* – основания на платформе принтера; *б* – основания в УФ-камере

Основания были изготовлены из фотополимерной смолы на стереолитографическом 3D-принтере с точностью в 50 мкм (высота слоя). Прозрачность полимера, из которого изготовлено основание, позволяет визуально наблюдать качество процесса заливки и отверждения эпоксидной смолы. Кроме того, прозрачность позволяет использовать проходящий свет, что повышает качество получаемых с помощью оптического микроскопа изображений.

Подготовка поперечного среза к оптической и сканирующей микроскопии. Процесс отработки режимов производился на шлифовально-полировальном устройстве с использованием шлифовальной ткани с зернистостью 1200. В соответствии с изменением размера калибровочного элемента и по характеристикам шлифовальной ткани за 3 минуты было снято около 14 мкм полимера при давлении на образцы 25 Н. С помощью оптического микроскопа была проведена предварительная проверка качества получаемого поперечного среза в СПбГУПТД перед проведением испытаний с помощью сканирующей электронной микроскопии в ЦНИИ КМ, ЦКП «Прометей».

Графическая обработка изображений микроструктуры поперечного среза многослойного картона проводилась с помощью программ растрового и векторного форматов. В растровом формате графическую обработку изображений микроструктуры поперечного среза производили с помощью программы ImageJ. Функциональные возможности и применение ImageJ при обработке волокнистых материалов представлены подробно в работе [124].

Графическая обработка изображений микроструктуры поперечного среза, а также векторизация изображений символов после флексографической печати проводилась с помощью программы векторного формата AutoCAD.

Автоматическая векторизация изображений с целью определения геометрических характеристик волокон и выделенных символов производилась путем передачи бинарных изображений в программу «Illustrator». Для этого автоматически были трассированы изображения (Image Trace) с параметрами:

- режим – Black and White Logo, порог – 188, упрощение контуров – 94 %, подавление шума – 4 px, постобработка векторных контуров – удаление объектов площадью менее 5 px², оптимизация контуров (Object → Path → Simplify), объединение пересекающихся контуров.

Ранее была получена точность сегментации, которая составила $97,3 \pm 0,8$ % [125]. При этом оптимальные параметры автоматической векторизации по «black point» – 52; по «gamma» – 1,15; по «white point» – 205; «порог бинаризации» – 188.

Промышленные образцы, а именно образцы верхнего плоского слоя гофрокартона, произведены на автоматической линии 9РА-109/9FGT17 ОАО «Каравеево». Флексографическая печать осуществлялась с использованием системы, включающей анилоксовый вал, ракельную камеру, печатный вал, прижимной вал, вакуумно-роликовую систему подачи заготовок и систему пневматической фиксации.

Неоднородность бумаги и картона определялась с помощью прибора TESHAP SAS F-SENSOR (г. Гренобль, Франция) [150]. Характеристики прибора, следующие:

- классификация по флокулам – на группы: 1, 2, 3, 6, 10, 16 мм;
- принцип работы – различие в интенсивности проходящего через бумагу и картон света;
- режимы измерения – бумага, картон;
- диапазон массы квадратного метра образцов – 5-600 г/ м²;

Неоднородность формования опытных и промышленных образцов многослойного тест-лайнера проводилась на территории НΠΑО «Светогорский ЦБК».

2.3 Способ подготовки микроструктуры для контроля параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала и устройство для его реализации

Для графической обработки микроструктуры с целью определения параметров многослойного картона были разработаны способ и устройство (Патент РФ № 2835897) [151].

Согласно изобретению образцы картона с заданными свойствами подготавливают для оптической или электронной сканирующей микроскопии. Стадия подготовки образцов 1 (рис. 2.6) включает в себя фиксацию положения твердого образца в основании 11, залитого в прозрачный синтетический полимер 10, в объеме которого находится калибровочный элемент в виде сферы 9.

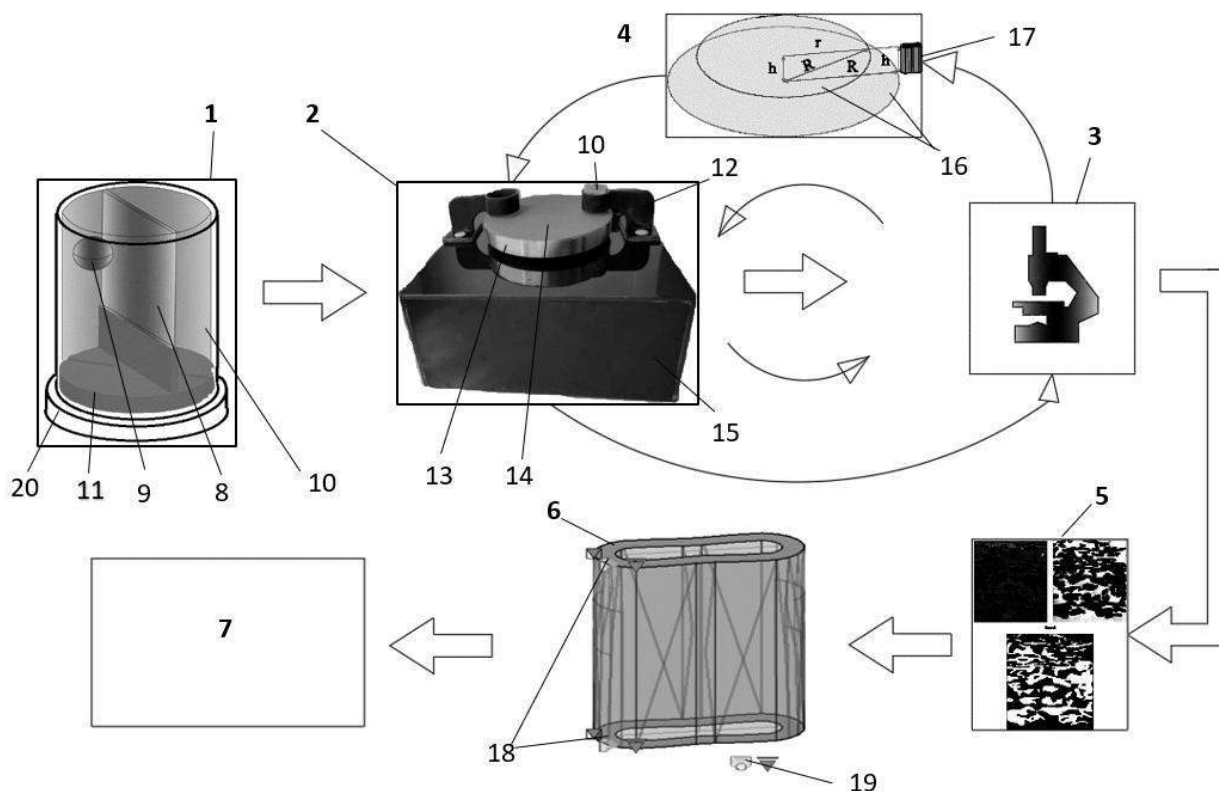


Рисунок 2.6 – Способ подготовки микроструктуры для контроля параметров волокнистого картона и устройство для его реализации: 1 – стадия подготовки образцов; 2 – стадия полировки; 3 – формирование изображений поперечных срезов; 4 – расчет глубины срезов; 5 – графическая обработка изображений поперечных срезов; 6 – твердотельное моделирование волокон по поперечным срезам; 7 – определение геометрических показателей волокон; 8 – твердый образец; 9 – калибровочный элемент в виде сферы; 10 – прозрачный синтетический полимер; 11 – основание; 12 – направляющие; 13 – абразивное покрытие; 14 – вращающийся диск; 15 – корпус шлифовщика; 16 – плоскости среза калибровочного элемента; 17 – 3D-модель волокна; 18 – плоскости выдавливания; 19 – команда выдавить по плоскостям; 20 – заливочная форма

В качестве прозрачного синтетического полимера, залитого в форму 20, может быть использован реактопласт, например, двухкомпонентная модифицированная эпоксидная смола с отвердителем или двухкомпонентный полиуретановый пластик, которые заливаются в форму в вакууме или с использованием вибрационного стола для эффективного удаления пузырьков воздуха. После полной кристаллизации реактопласта, твердый образец вместе с основанием и калибровочным элементом в виде сферы, которые находятся в прозрачном синтетическом полимере, шлифуются с помощью специального устройства на стадии 2. Оно состоит из жестко зафиксированных к корпусу 15 направляющих 12, в которые кладутся образцы, залитые в синтетический

полимер, вращающегося диска 14, с нанесенным на него абразивным покрытием 13. При вращении диска с нанесенным на него абразивным покрытием, твердый образец, залитый в прозрачный синтетический полимер и калибровочный элемент в виде сферы, шлифуются под собственным весом при постоянной скорости вращения 150 об/мин. Глубина среза, находящаяся в пределах от 1 до 5 мкм, зависит от времени шлифовки образца и абразивного покрытия. На стадии 3 формируются изображения срезов путем микроскопического исследования. После каждого цикла шлифовки с помощью микроскопического исследования и графической обработки определяется диаметр окружности, который образуется в результате шлифовки калибровочной сферы 9, а также неправильной формы область среза целлюлозного волокна 17. Каждый цикл шлифовки образует плоскость 16, на которой формируется окружность с диаметром r соответствующая калибровочной сфере и области среза волокна 18. Глубину среза h вычисляют расчетным путем по разнице квадратов гипотенузы (треугольника со сторонами h , R и r), соответствующей радиусу сферы R и квадрата радиуса окружности среза калибровочного элемента в виде сферы на плоскости 16. Расчет глубины срезов h осуществляется на стадии 4. Количество срезов равно количеству циклов шлифования. Графическая обработка изображений поперечных срезов на стадии 5 предназначена для повышения контрастности изображений и выделения областей срезов волокон. На стадии 6 выбираются области срезов волокон 18 на соседних близлежащих плоскостях 16, по которым с помощью команд выдавливания по плоскостям 19 или по траектории формируют 3D-модель волокна целлюлозосодержащего композиционного материала, как твердотельного объекта [152]. В совокупности твердотельные объекты волокон составляют 3D-микроструктуру по ней определяют геометрические показатели на стадии 7, а именно объем волокнистого материала, периметр, центр масс, поверхность соприкосновения волокон затем по ним устанавливают и прогнозируют показатели целлюлозосодержащего волокнистого материала, а именно плотность, пористость, равномерность формования, качество поверхности, механические

свойства по площади поверхности контакта волокон и равномерности их распределения.

Для реализации способа необходимо устройство для фиксации малоразмерного твердого образца перед изготовлением среза для микроскопического исследования. Устройство содержит основание *11* для размещения твердого образца *8*, заливочную форму *3*, вещество для заливки, а именно прозрачный синтетический полимер *10*, при этом твердый образец *8* залит в синтетический прозрачный полимер вместе с калибровочным элементом в виде сферы *9*, который позволяет установить глубину среза *h* по известным радиусам окружности сферы *R* и окружности, образованной в результате шлифования *r*, образованных сферой на срезах, а для получения поперечных срезов используют шлифовщик, состоящий из вращающегося диска, на котором закреплено абразивное покрытие, при этом направляющие позволяют шлифовать твердый образец под собственным весом. Твердый образец, залитый в синтетический прозрачный полимер, установлен в направляющие, жестко зафиксированные в корпусе шлифовщика [151].

Для образцов большой протяженности необходимо устройство с калибровочным элементом в виде цилиндра (рис. 2.7)

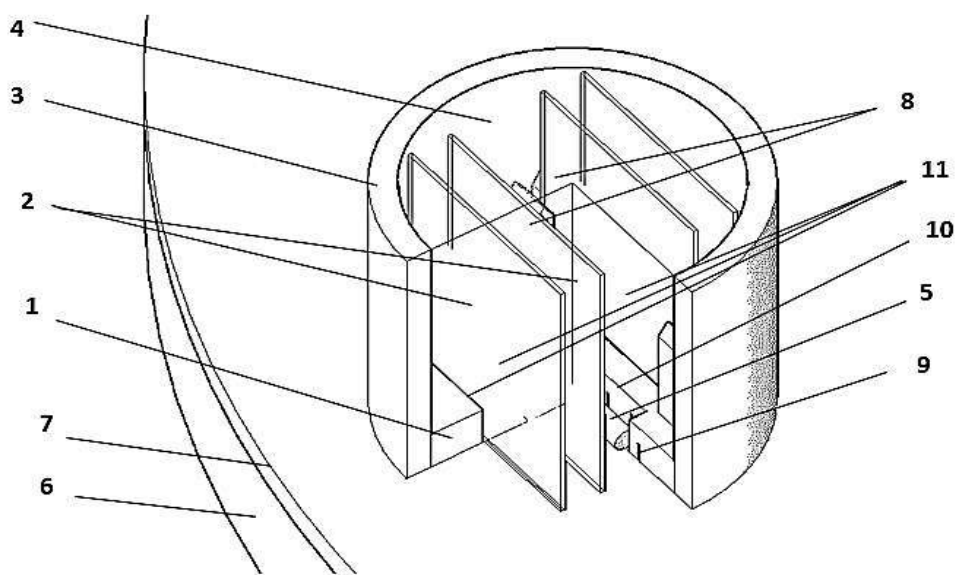


Рисунок 2.7 – Фиксатор образцов картона: *1* – основание; *2* – образцы; *3* – заливочная форма; *4* – синтетический полимер; *5* – калибровочный элемент; *6* – основание шлифовально-полировального станка; *7* – абразивное покрытие; *8* – направляющие; *9* – размерная шкала; *10* – прямоугольное отверстие для калибровочного элемента; *11* – фиксаторы-зазоры [152]

На рисунке 2.8 представлена серия 12 элементов по 4 образца, которые были установлены в фиксатор перед заливкой прозрачным синтетическим полимером. Каждый образец был поделен на 17 секторов из них 4, 6, 12, 14 являлись наиболее равноудаленными друг от друга, поэтому образцы были вырезаны для исследования микроструктуры [153].



Рисунок 2.8 – Подготовка образцов картона к графической обработке микроструктуры: *a* – зафиксированные образцы перед заливкой в прозрачный синтетический полимер; *б* – схема разделения отливки на сектора для проведения измерений

Разработка нестандартных, запатентованных методов исследования микроструктуры для оценки параметров картона и устройство, а именно: метод оценки неоднородности формования многослойного картона с помощью графической обработки изображений микроструктуры поперечного среза; метод исследования шероховатости, пористости, толщины; методы графической обработки напечатанных символов для онлайн-контроля качества печати с учетом неравномерности структуры и микрорельефа многослойного картона являются теоретической частью диссертационной работы [154].

3 Разработка алгоритмов цифрового метода контроля микрорельефа по графической обработке изображения микроструктуры поперечного среза многослойного картона

3.1 Графический метод оценки неравномерности формирования многослойного картона по микроструктуре поперечного среза

Неравномерность структуры бумаги и картона обусловлена склонностью волокон образовывать флоккулы на стадиях массоподготовки. В бумажной массе флоккула – это объёмное тело со сложной геометрией, размеры которой определяются многими факторами: природа волокна; морфологические характеристики волокон; степень помола массы; наличие в массе химикатов (проклеивающих, диспергирующих, флокулирующих составов). Важной стадией является диспергирование бумажной массы в напорном ящике (напускное устройство), после которого волокнистая суспензия обезвоживается на сетке. При резком концентрировании массы на сетке движение флоккул и волокон резко замедляется, и структура сохранится на готовой продукции.

После прессовой части, сушки и наката флоккулы окончательно сжимаются. По толщине листа может находиться несколько флоккул либо промоина. В среднем толщина листа картона с массой квадратного метра в 100-150 г/м² составляет 200 – 250 мкм.

Флоккулы на поверхности листа классифицированы по размерам 1, 2, 3, 6, 10, 16 мм, но по поперечному сечению такого четкого распределения нет. Из предыдущих работ была установлена определённая цикличность от 100 до 175 мкм в формировании сгустков и промоин в поперечном сечении каждого слоя картона. Причём если взять область промоины или флоккулы на поверхности листа, то в них тоже неоднородно распределяются волокна. Исследования поперечного среза протяжённостью в 3,5 мм (рис.3.1) подтверждают цикличность образования сгустков и промоин волокон. Поэтому для исследования неоднородности формирования многослойного картона необходимо исследовать протяжённый участок, а для наглядности представления результатов представить области в 350 мкм (рис.3.2 –3.4) [155, 156].

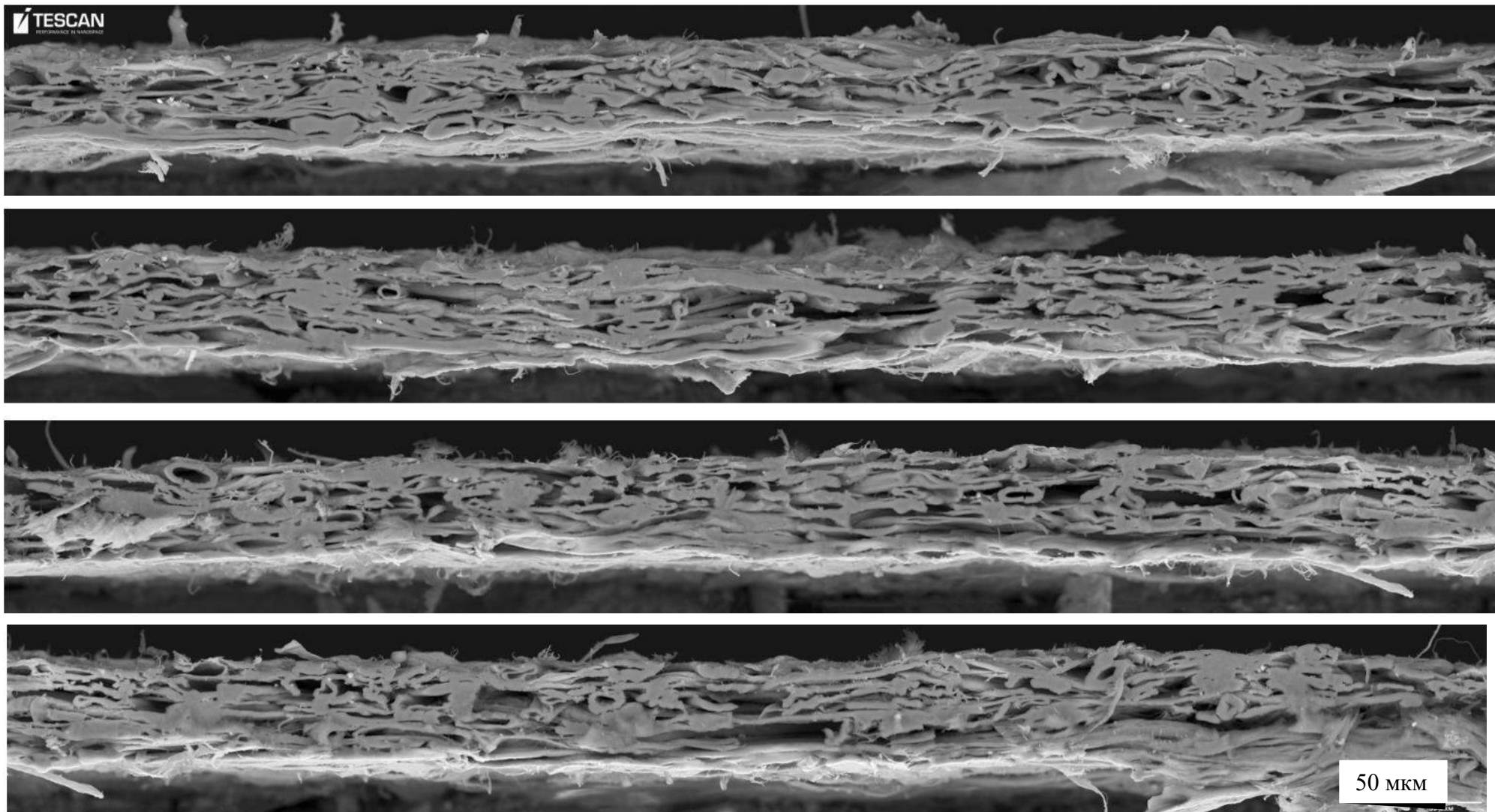


Рисунок 3.1 – Поперечный срез двухслойного картона протяженностью в 3,5 мм

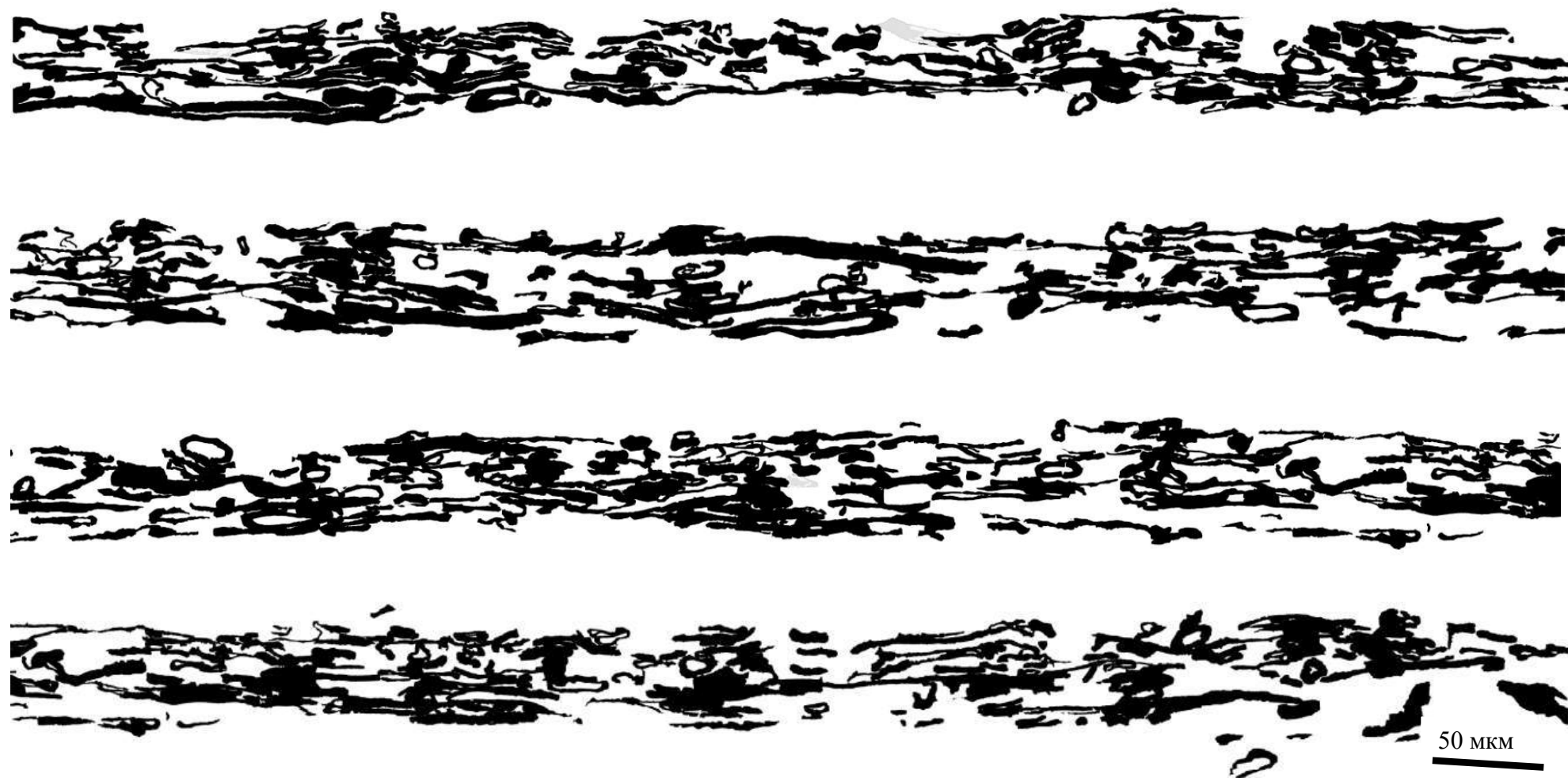


Рисунок 3.2 – Выделенные области волокнистого материала в поперечном срезе двухслойного картона протяженностью 3,5 мм

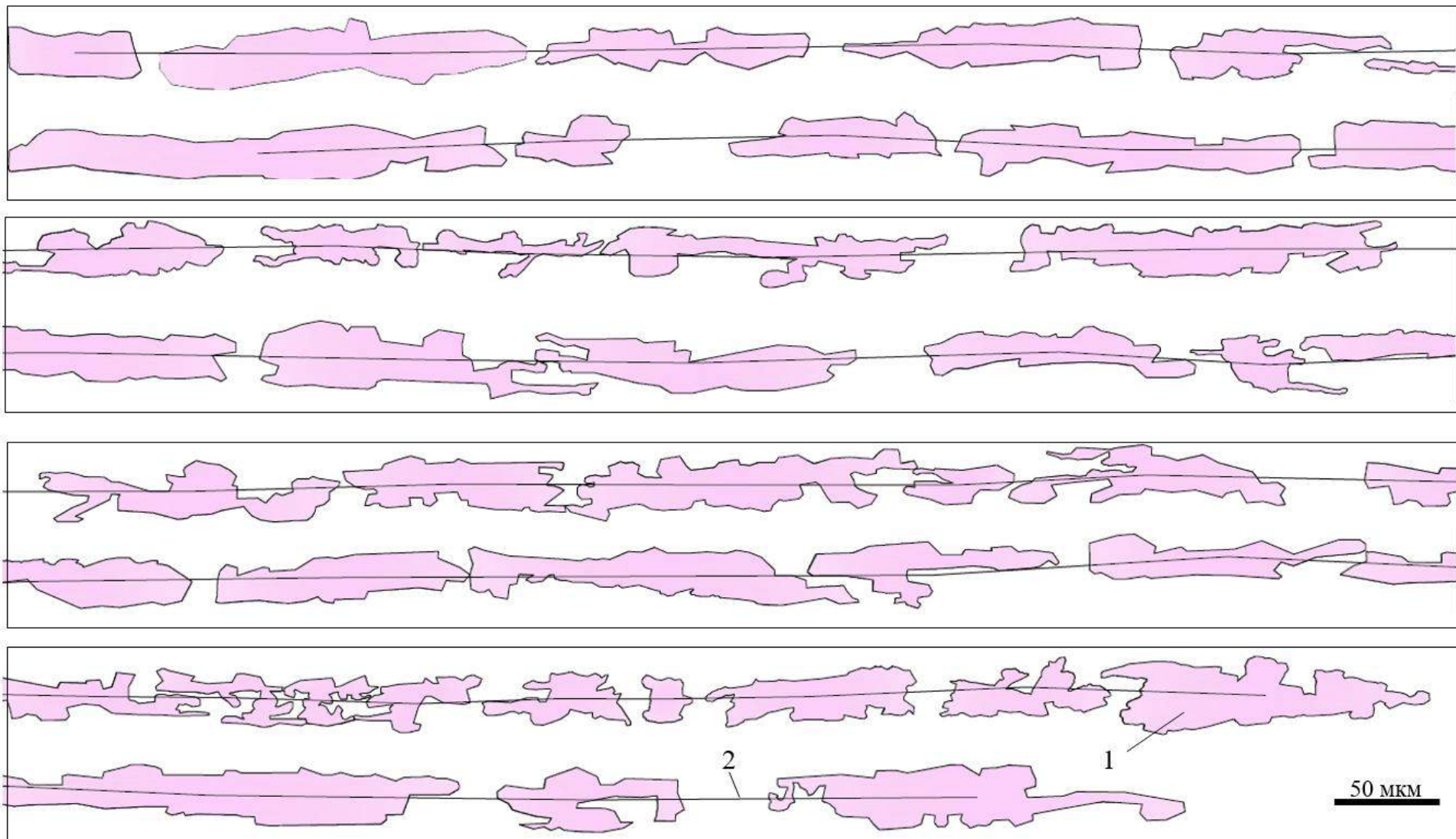


Рисунок 3.3 – Равномерность распределения флокул в каждом слое в отдельности: 1 – флокула; 2 – отрезок, соединяющий центр флокулы

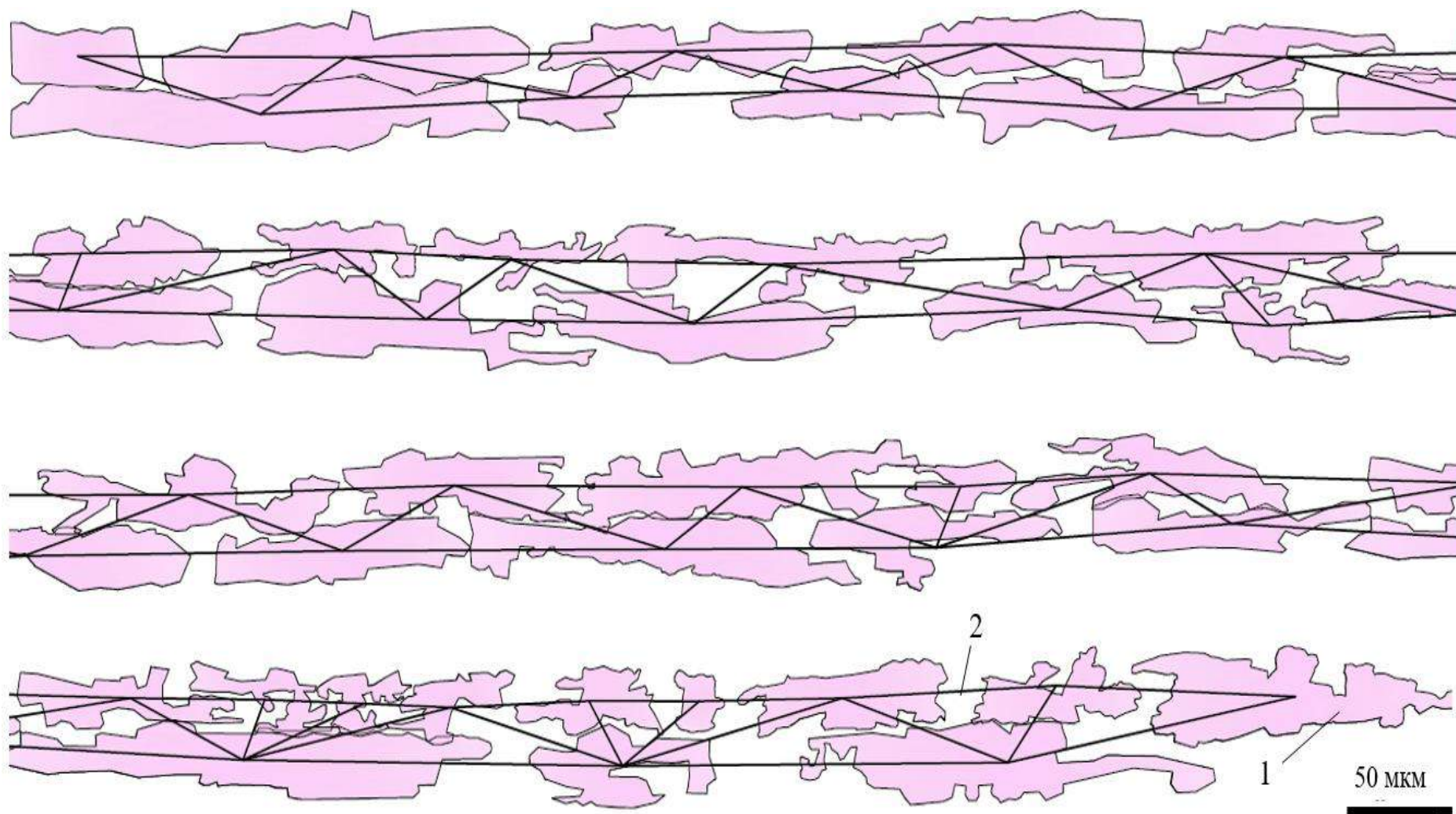


Рисунок 3.4 – Равномерность распределения флокул в двухслойном картоне: 1 – флокула; 2 – отрезок, соединяющий центр флокулы

Протяженность в 350 мкм связана не только с ограничениями по весу файла, но и информативностью, так как размеры флокул и промоин могут составлять до 170 мкм. Поэтому оценка отрезков, соединяющих центры флокул при графической обработке среза будет обладать большей информативностью, а отрезок будет больше там, где будет присутствовать промоина. Влияние окажет и количество слоев при котором формируется картон.

На рисунке 3.5 представлен результат графической обработки поперечного среза двухслойного картона. Центры флокул каждого слоя в отдельности были соединены таким образом, чтобы отрезки не пересекались.

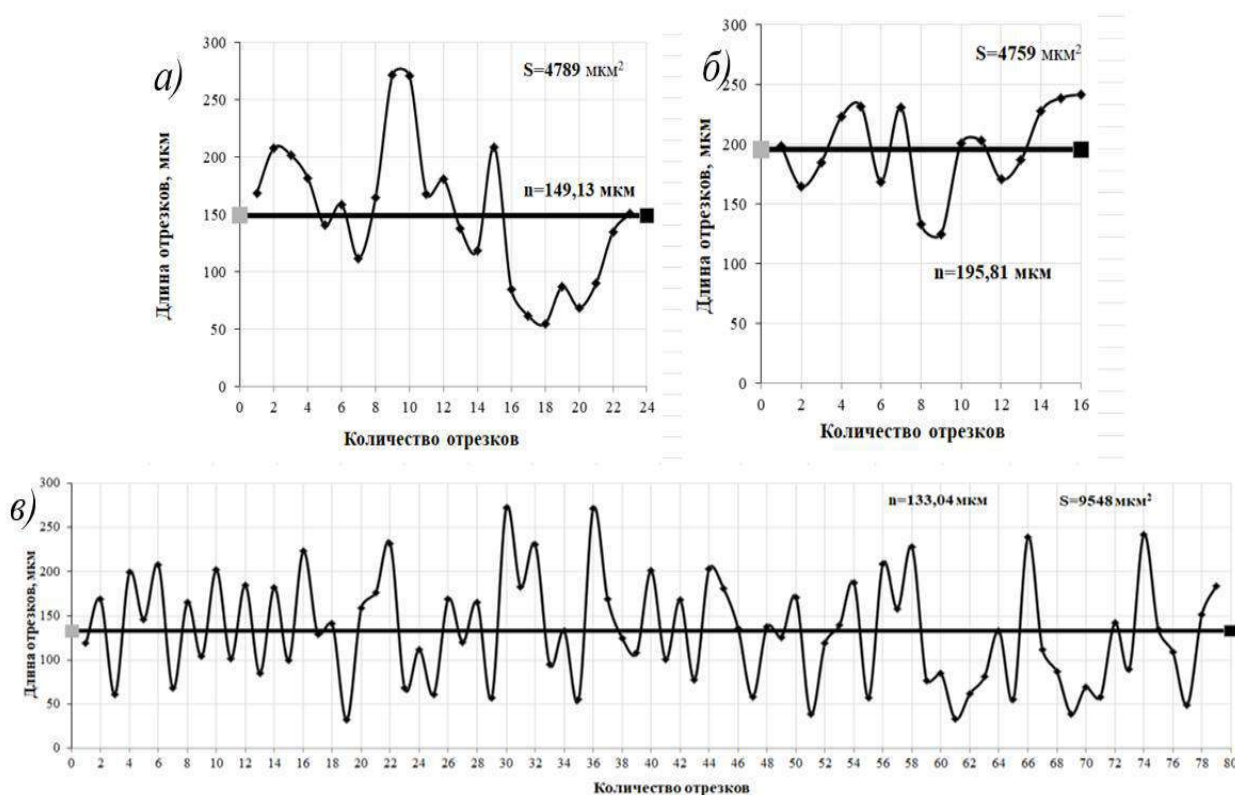


Рисунок 3.5 – Результаты графической обработки поперечного среза двухслойного картона с выделением отрезков, соединяющих центры флокул: *a* – покровного слоя; *б* – нижнего слоя; *в* – двухслойного картона [157]

Из рис.3.5 видно:

- среднее значение отрезков покровного слоя – 149 мкм;
- среднее значение отрезков нижнего слоя – 196 мкм;
- для двухслойного картона – 133 мкм.

При увеличении количества слоёв средняя длина отрезков сокращается, количество отрезков возрастает. Для двухслойного картона, например,

количество отрезков малой протяженности будет составлять 25 единиц, при этом в покровной части 5, а в нижней – 0. Общая область среза двухслойного картона (9548 мкм²) не будет отличаться более чем в два с половиной раза от области среза покровного и нижнего слоев (4789 мкм² для покровного, 4759 мкм² для нижнего слоев). Объясняется этот эффект тем, что флокулы при двухслойном формовании располагаются ближе друг к другу.

На рис.3.6 представлен фрагмент микроструктуры поперечного среза, обработанный графическим редактором. Были выделены области среза волокон и пустот.



Рисунок 3.6 – Результат графической обработки изображения микроструктуры поперечного среза двухслойного картона

Такое качество изображения позволяет разделить поперечный срез на слои, выделить флокулы, и установить их центры масс.

Рисунок также позволяет объяснить в последующем установить толщину среза волокон картона. Можно визуальнo, на первом этапе, установить в какой части среза больше или меньше пройдет света через материал, чтобы сопоставить результаты с существующими методами оценки неоднородности, основанными на интенсивности проходящего света.

Сравнить методы, которые предлагают производители приборов для оценки индекса формования с методом, основанным на графической

обработке микроструктуры поперечного среза сложно по нескольким причинам:

- производители приборов не раскрывают какой алгоритм расчёта индекса формования является основой расчёта индекса формования;

- размеры флокул по поверхности листа намного больше (макроуровень), в отличие от размеров флокул в поперечном сечении (микроуровень);

- принцип оценки неоднородности поверхности листа картона (основан на интенсивности проходящего света) и поперечного среза (основан на измерении и аналитической обработке толщины срезов в поперечном сечении) отличаются друг от друга.

Несмотря на отличие принципов оценки неоднородности картона интенсивности проходящего света, очевидно, что он находится в обратной зависимости от толщины среза. Чем больше волокнистого материала, тем меньше света он пропустит.

Рассмотрим, для начала, один из наиболее простых алгоритмов расчёта индекса формования, который был представлен в работе [118], согласно которому он рассчитывается по формуле:

$$I_K = \frac{N_c}{I_{max} - I_{min}}$$

где N_c – количество пикселей на картоне, со значением оттенков цвета, равный среднеарифметическому числу всех оттенков цветов (в черно-белом формате (I); I_{max} , I_{min} – максимальное и минимальное значение оттенка цвета.

Представленная формула, является одной из многих разновидностей расчёта индекса формования. Единства расчёта индекса формования для приборов оценки однородности нет.

Подобный индекс можно получить при графической обработке изображения микроструктуры поперечного среза (рис. 3.7).

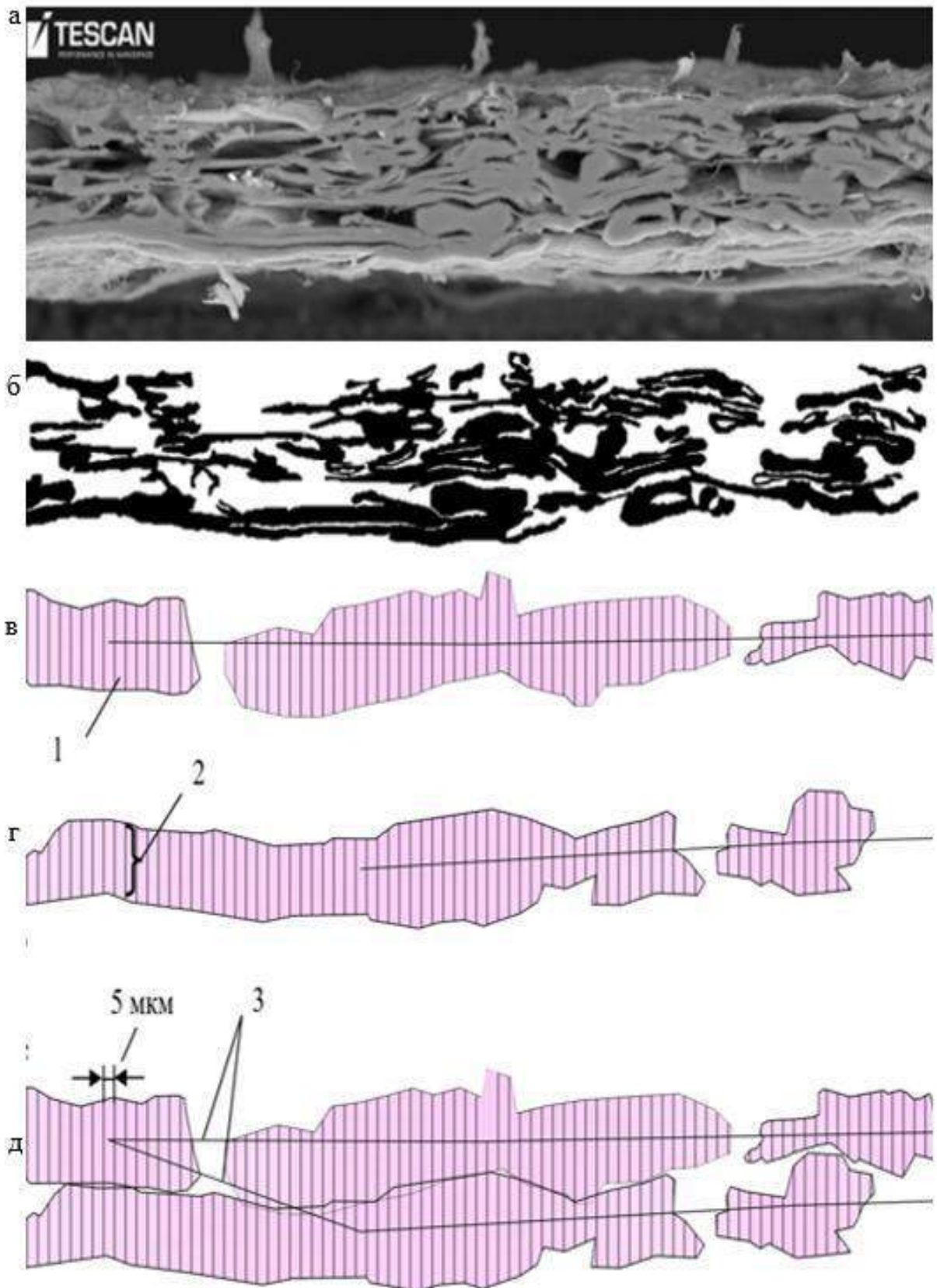


Рисунок 3.7 – Последовательность выделения флокул и их графическая обработка: *а* – покровный слой тест-лайнера; *а* – изображение микроструктуры в поперечном срезе ; *б* – бинарное изображение, выделение срезов (чёрным цветом); *в, г* – выделение сгустков волокон в поперечном срезе верхнего и нижнего слоя соответственно; *д* – объединение выделенных флокул двух слоёв; *1* – область выделенного сгустка волокон (флокулы); *2* – толщина флокулы; *3* – расстояние от центра одной флокулы до другой

Приняв за основу, что интенсивность проходящего света обратно-пропорциональна толщине среза, построим диаграмму распределения толщин срезов картона. Для этого разделим исследуемый фрагмент на сектора по 5 мкм. В целом принцип расчёта индекса формования будет включать в себя следующие этапы:

1. Подготовка образцов и формирование панорамных изображений микроструктуры поперечного среза (рис.3.7, а). Изображение должно иметь высокую детализировку для возможности последующей автоматической обработке в графических редакторах. Если это условие соблюдается, то на следующем этапе проводится графическая обработка.

2. Выделение срезов волокон (рис.3.7, б). На этом этапе необходимо добиться черно-белого изображения срезов волокон в поперечном сечении для выделения профилей слоёв. На данном изображении поперечного среза видна разница между волокнами нижнего (более эластичные длинные волокна в основном лежат вдоль) и волокнами верхнего слоя (больше волокон лежит поперек, отличаются размерами). Различие в геометрии расположения волокон в слоях позволяет разделить поперечный срез на две части (на два слоя картона).

3. Из рисунка 3.7, б видно, что каждый слой и двухслойный картон неравномерно сформированы. Выделяем области сгустков волокон в покровном слое (рис.3.7, в), в нижнем (рис.3.7, г) и в двухслойном картоне (рис.3.7, д). Из рисунков 3.7, в–д видно, что при соединении двух слоёв картона неоднородность снижается. Одна неоднородность накладывается на другую, но в целом наблюдается эффект более однородной структуры двухслойного картона. Для подтверждения того, что видно визуально, необходимо дать количественную оценку, поэтому необходим следующий этап.

4. Разделение поперечного среза вертикально на сектора по 5 мкм. Чем меньше значение каждого сектора, тем точнее будет расчёт. В каждом секторе толщина среза волокнистого материала будет разной. В тех секторах, где

толщина меньше – света будет проходить больше. В каждом слое в отдельности особенно заметно наличие промоин, в которых нулевое значение толщины флокулы в поперечном сечении. При объединении двух слоёв таких областей практически нет.

5. Количественный анализ, статистическая обработка секторов.

- протяжённость поперечного среза – 3500 мкм;
- количество секторов – 700 шт.;
- толщина каждого сектора – 5 мкм;
- рассчитанный индекс по анализу поперечного среза для покровного слоя – 41, для нижнего – 40; для двухслойного картона – 24.

Данные расчёта были получены по диаграммам распределения толщины срезов по 700 участкам (рис. 3.8)

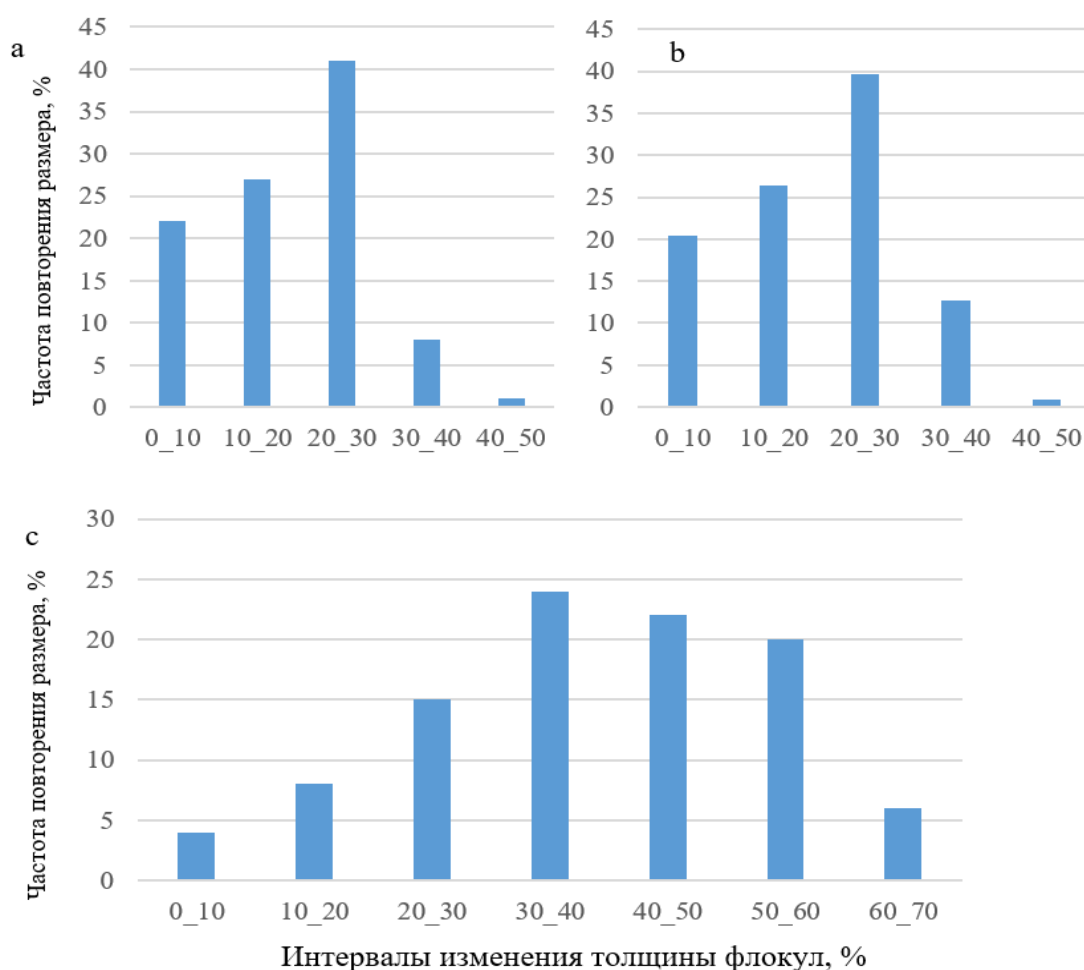


Рисунок 3.8 – Диаграммы распределения толщин срезов волокон в верхнем (a), нижнем (b) и в двухслойном картоне (c) [124]

Диаграммы распределения толщины срезов волокон (объединённых в флокулы) имеют аналогию с диаграммами распределения оттенков цветов при оценке неоднородности формования картона по интенсивности проходимого света. Во многих приборах диаграммы выстроены как распределение интенсивности проходимого света по частоте повторения размера. Программа обрабатывает неравномерное изображение области бумаги или картона, через которое пропускают свет. Затем изображение распределяют на матрицу, в каждой из ячеек которой находят количественное значение оттенка цвета. После чего задают диапазоны (карманы) для группировки данных по интенсивности проходимого цвета. Во многих приборах алгоритм расчёта индекса формования включает в себя отношение ординаты и абсциссы диаграммы.

То же самое можно произвести с диаграммами распределения толщин срезов неравномерно распределённых волокон, объединённых в сгустки.

В результате были получены следующие данные:

- индекс формования верхнего слоя – 1,15;
- индекс формования нижнего слоя – 1,05;
- индекс формования двухслойного картона – 2,86

При проверке образцов с помощью прибора, произведённого в Гренобле, 2D formation и по алгоритмам, разработанным для прибора «Анфор» (г. Архангельск) диапазон индекса формования двухслойного картона лайнера для 20 образцов составил 1,6 – 6,7.

Результаты определения предложенным методом вошли в представленный диапазон. Разумеется, сравнивать данные приборов и данные по предлагаемому способу нельзя по причинам, описанным выше. Но во всех случаях наблюдается единая тенденция снижения неоднородности распределения волокон при увеличении количества слоёв. Абсолютные показатели не сопоставимы между собой, но их динамика изменения остаётся идентичной.

3.2 Исследование микрорельефа поверхности многослойного картона по микроструктуре поперечного среза с оценкой параметров шероховатости

Для оценки равномерности распределения сечений волокон на поперечном срезе были использованы программы векторного формата. Контрастность изображения микроструктуры поперечного среза подбиралась с помощью программ растрового формата работы с изображениями (ImageJ).

Промежуточными результатами исследований являются снимки поперечного среза многослойного картона, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. Образцы были предварительно зафиксированы в держателях и залиты эпоксидной смолой, а затем отполированы в соответствии с методами, представленными в предыдущем разделе.

Исследованные изображения поперечного среза имеют разные размеры, но на каждом из них расположена масштабная шкала 2, расположенная в метаданных изображения 5 по (рис. 3.9). Коэффициент масштаба рассчитывается под каждое изображение. Важно, чтобы все изображения, из которых в последующем будет сформирован панорамный вид поперечного среза, были подведены под одинаковый масштаб по шкале 2.

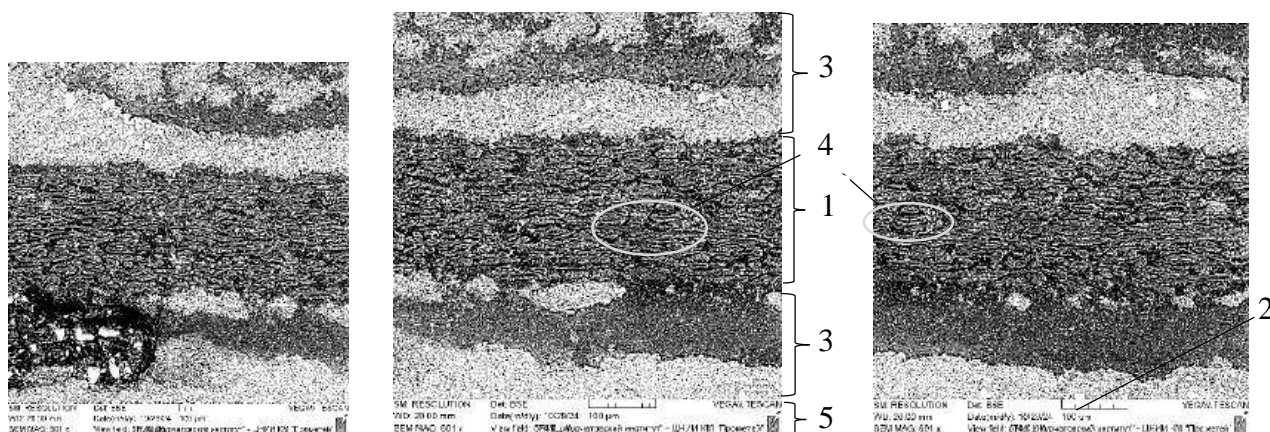


Рисунок 3.9 – Сшивка изображений поперечного среза: 1 – область поперечного среза многослойного картона; 2 – масштабная шкала; 3 – область заливки образцов многослойного картона эпоксидной смолой; 4 – повторяющиеся объекты; 5 – метаданные изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа [124, 158]

После масштабирования области поперечного среза *1* (рис. 3.9, 2) из серии изображений накладываются друг на друга. Сканирующий электронный микроскоп при формировании каждого снимка автоматически его не сшивает. Для этого необходима САD-программа, в которой выбираются идентичные, повторяющиеся объекты *4* (рис. 3.10), а затем наносятся точки совмещения изображений.

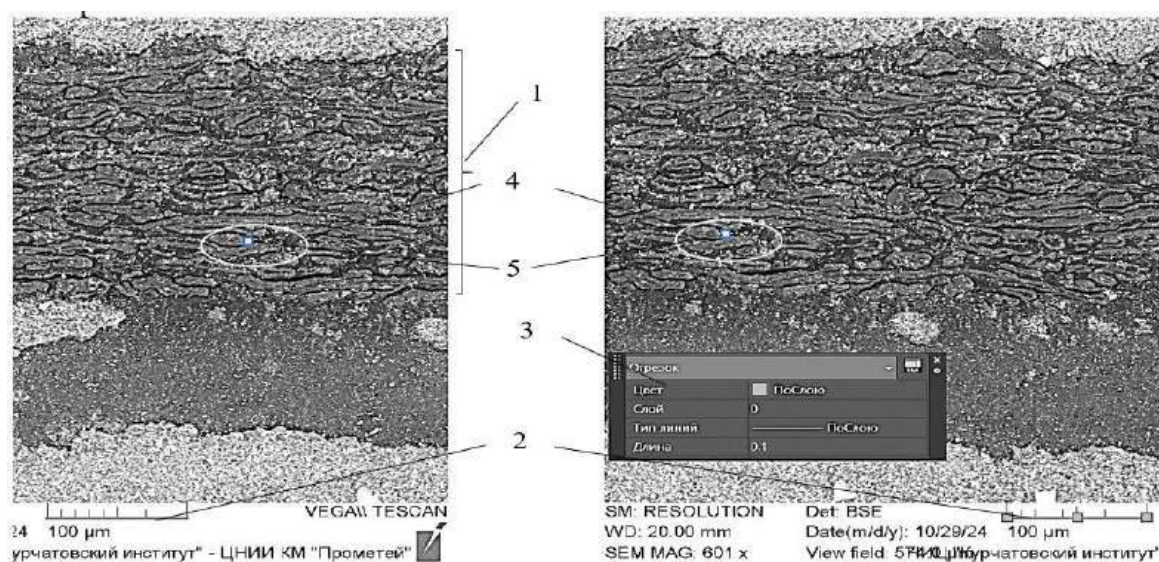


Рисунок 3.10 – Сшивка изображений поперечного среза: *1* – область поперечного среза многослойного картона; *2* – масштабная шкала; *3* – таблица свойств объекта измерения (длина отрезка); *4* – повторяющиеся объекты; *5* – точки совмещения изображений

Таким образом, сшиваются десятки изображений поперечного среза, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Результат сшивки четырех изображений представлен на рисунке 3.11, *а*. Чтобы базовая длина составила более 2500 мкм, необходимо больше изображений. На рисунка 3.11, *б* представлены сшитые девять изображений по методике масштабирования и сшивки, показанной на рисунках 3.9 и 3.10. Следующим этапом является поворот сшитых изображений на угол наклона *1* (рис. 3.11, *в*), который может быть образован в результате изменения поворота или положения камеры или образцов в ходе выполнения снимков.

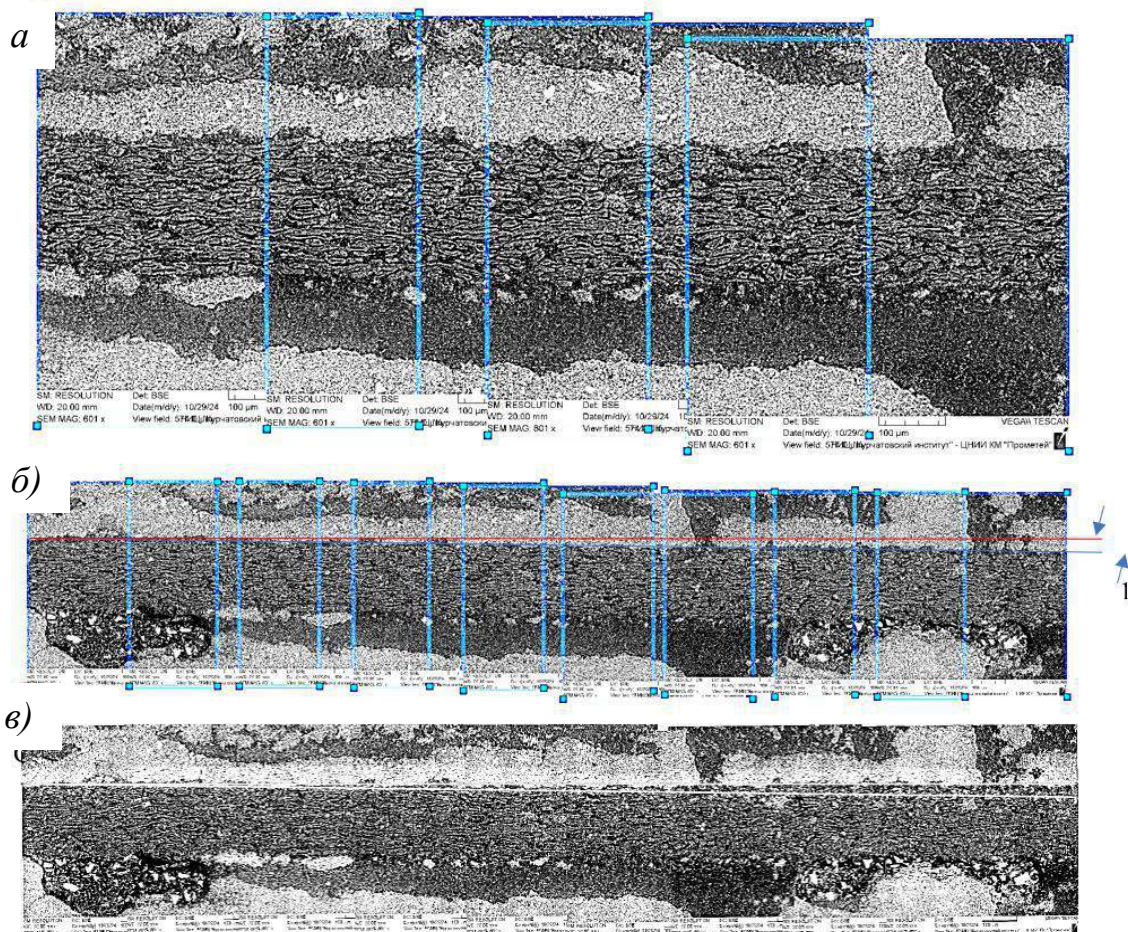


Рисунок 3.11 – Сшитые изображения поперечного среза многослойного картона, полученного с помощью сканирующей электронной микроскопии: *a* – изображение из четырех снимков; *б* – панорама поперечного среза из девяти снимков; *в* – панорама поперечного среза после поворота; *l* – угол наклона

Эта стадия имеет важное значение при определении шероховатости поверхности, так как графическая программа или нейросеть, с помощью которых проводится средняя линия относительно выступов и впадин, должна быть параллельна осям координат. В этом случае можно доверять координатам точек, соответствующих выступам и впадинам, по которым далее ведется расчет параметров Ra , Rz , $Rmax$ [158].

Предлагаемый метод оценки шероховатости поверхностей картона также позволяет во многих программах векторного формата в «один клик» установить геометрические параметры исследуемой области, такие как периметр, толщина, площадь (рис. 3.12, *б*). Эти показатели будут использованы при расчете пористости, плотности, массы m^2 картона.

Толщина картона установлена программой относительно максимального значения выступа с лицевой стороны и минимального значения впадины с тыльной стороны.

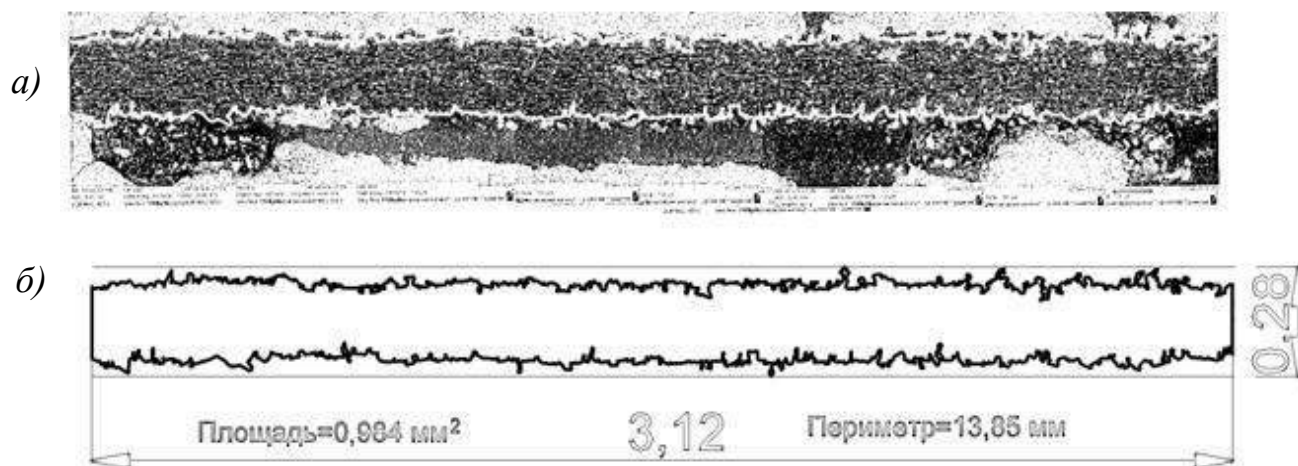


Рисунок 3.12 – Выделение профилей в поперечном срезе многослойного картона: *a* – выделение профилей картона с двух сторон (лицевой и тыльной); *б* – расчет основных параметров исследуемой области многослойного картона (периметра, площади, толщины)

При определении толщины с помощью толщиномера получают данные немного завышенные, так как рабочий орган прибора сжимает отдельные концы волокон или их фрагменты, «выступающие» над поверхностью картона. Толщина, определенная по расстоянию от средней линии выступов и впадин с одной и другой сторон картона, по значению близка к данным, определенным с помощью толщиномера.

Каждый профиль поверхности картона с тыльной и лицевой стороны обрабатывался с помощью графической программы векторного формата работы с файлом. Результатом графической обработки являлись координаты точек по оси ординат, соответствующие максимальным отклонениям выступов (H_{\max}) и минимальным отклонениям впадин (h_{\min}) относительно средней линии (рис. 3.13).

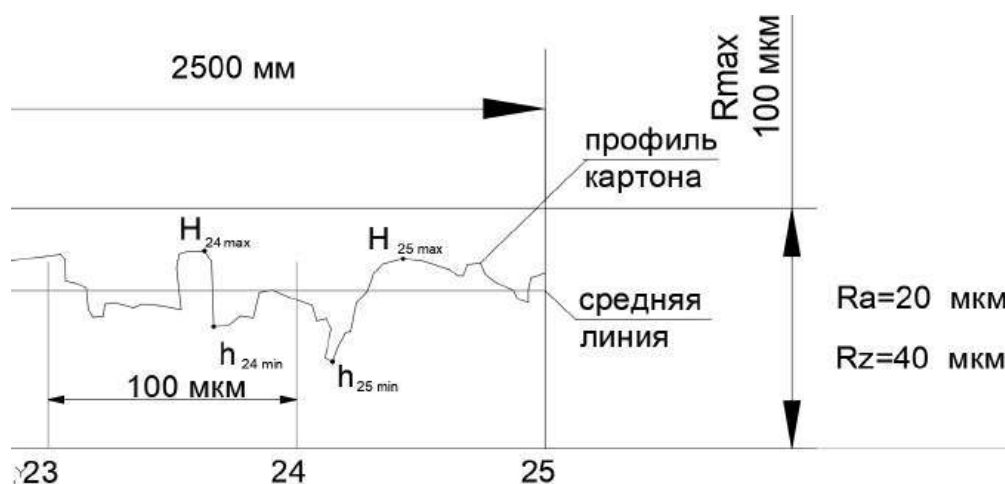


Рисунок 3.13 – Определение шероховатости многослойного картона по анализу изображений профиля поперечного среза многослойного картона [121, 145]

Средняя линия (рис. 3.13) была построена по данным максимумов и минимумов профиля, разделенного на 25 секторов по 100 мкм. Таким образом, была охвачена рекомендованная в ГОСТ 2789-73 базовая длина в 2500 мкм.

Область, ограниченная верхним и нижним профилями картона, будет использована при расчете пористости картона.

3.3 Разработка алгоритмов определения пористости многослойного картона с помощью графической обработки микроструктуры поперечного среза

Пористость является одним из ключевых свойств бумаги и картона, непосредственно влияющим на качество печати. Определение данного параметра приобретает особую значимость при использовании таких технологий, как флексография, струйная и офсетная печать. В этих случаях характер проникновения печатных красок и чернил в структуру материала играет решающую роль в формировании конечного изображения. В отличие от технологий лазерной печати, где тонер преимущественно наносится на поверхностный слой целлюлозного материала, при использовании жидких красок и чернил их способность проникать вглубь пористой структуры определяет устойчивость отпечатка. Следовательно, точное определение

показателя пористости является неотъемлемым этапом в обеспечении высокого качества продукции.

В рамках данной работы предлагается метод оценки пористости, основанный на анализе микроструктуры поперечного среза образцов многослойного картона (рис. 3.14). Графическая обработка изображений поперечных срезов позволяет с высокой степенью точности определить общую площадь поперечного среза исследуемого материала, а также площадь, занимаемую срезами волокон. Пористость материала в таком случае может быть рассчитана как отношение площади, занимаемой порами, к общей площади поперечного среза образца бумаги или картона [126, 159, 160].

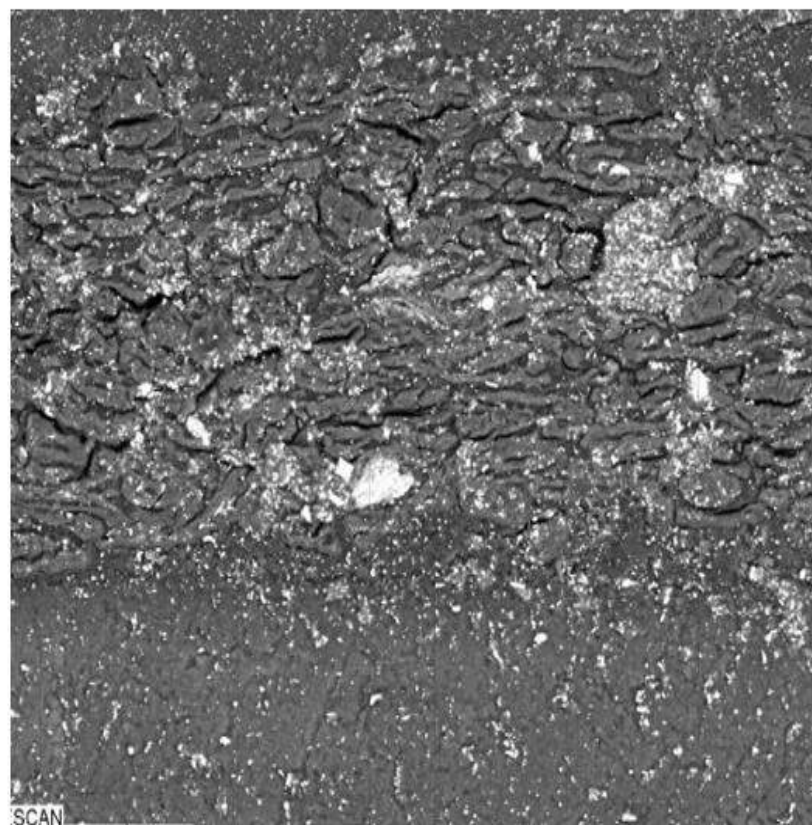
Процесс определения пористости включает в себя следующие основные этапы:

- **Выделение области поперечного среза.** На данном этапе осуществляется идентификация и выделение всей области поперечного среза образца, как показано на рис. 3.15, *а* для двухслойного картона.

- **Графическая обработка с выделением пор.** После выделения общего среза производится дальнейшая графическая обработка, направленная на идентификацию и выделение областей пор внутри поперечного среза (рис. 3.15, *в*).

Следующим шагом является выделение и векторизация областей, соответствующих срезам волокон, присутствующих в поперечном срезе материала (рис. 3.16) [126].

a



SCAN
30/24 100 µm WD: 20.02 mm Det: BSE
Date(m/d/y): 10/30/24 100 µm
SEM MAG: 800 x View field: 480 µm
ЦНИИ КХИ им. Ю. А. Гагарина

b

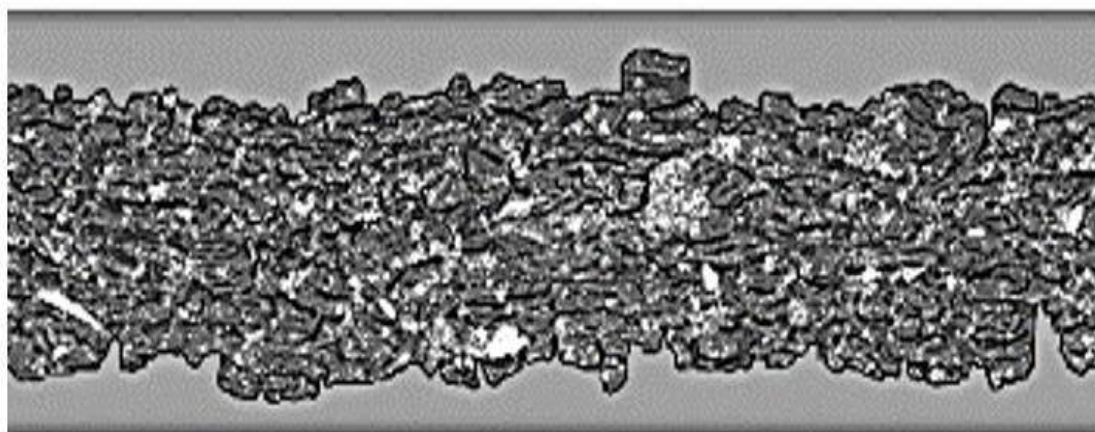


Рисунок 3.14 – Фрагменты микроstructures многослойного картона из панорамы поперечного среза: *a* – изображение микроstructures, полученное при сканирующей микроскопии; *b* – выделенный профиль поперечного среза многослойного материала

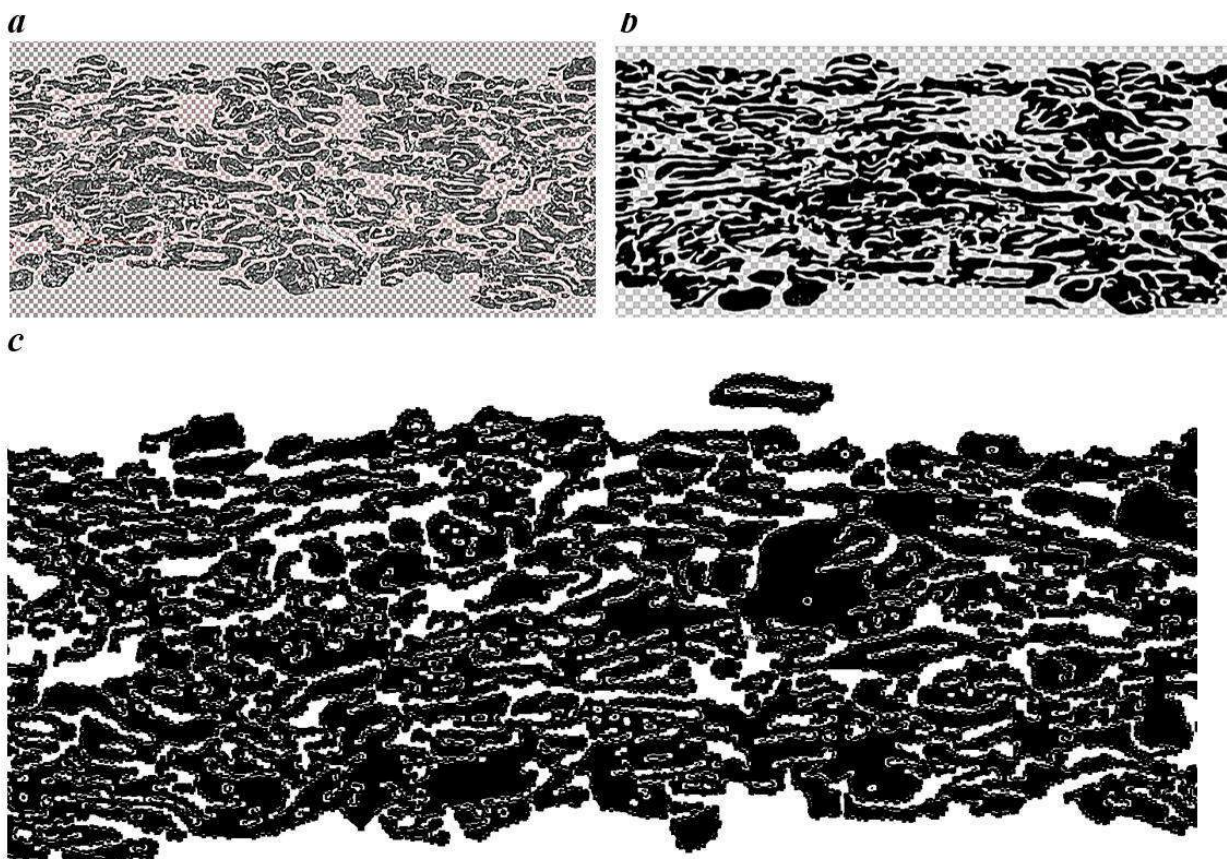


Рисунок 3.15 – Графическая обработка поперечного среза многослойного картона: *a* – результат обработки поперечного среза в программе ImageJ; *b* – результат автоматической векторизации; *c* – результат выделения срезов волокон для дальнейшего расчета пористости

Векторизация проводилась путем передачи бинарных изображений в программу «Illustrator». Для этого автоматически были трассированы изображения (Image Trace) с параметрами:

- режим – Black and White Logo, порог – 188, упрощение контуров – 94 %, подавление шума – 4 px, постобработка векторных контуров – удаление объектов площадью менее 5 px², оптимизация контуров (Object → Path → Simplify), объединение пересекающихся контуров.

Ранее были установлены оптимальные параметры автоматической векторизации: black point – 52; gamma – 1,15; white point – 205; порог бинаризации – 188. При этих параметрах достигнута точность сегментации $97,3 \pm 0,8 \%$ [124].

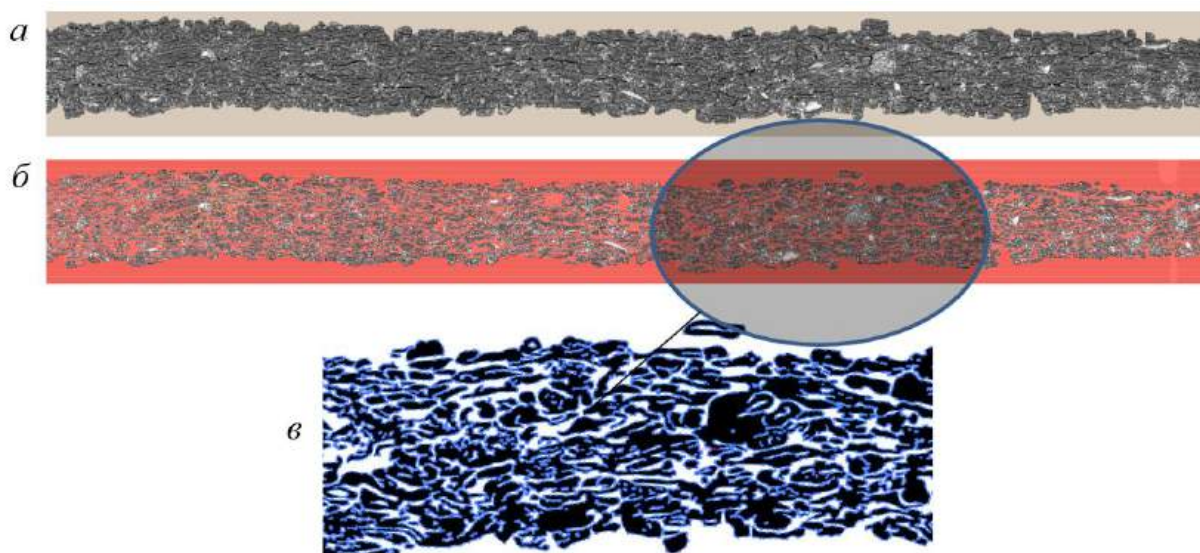


Рисунок 3.16 – Выделение срезов волокон в поперечном сечении картона для последующего определения пористости: *a* – выделение области поперечного среза картона; *б* – выделение областей пор; *в* – векторизация областей среза волокон

После векторизации изображения пористость определяется в свойствах программы, работающей в векторном формате работы с файлами [124, 161].

3.4 Особенности оценки толщины (максимальной, минимальной, средней) многослойного картона по изображениям микроструктуры поперечного среза

Сшивка и позиционирование в панорамное изображение осуществляется по методу, представленному выше при определении шероховатостей верхнего и нижнего слоев плоского слоя гофрокартона. На первом этапе производится выделение профилей верхнего и нижнего слоев. При увеличении масштаба области поперечного среза становятся различимы срезы волокон и поры (рис. 3.9). Перед измерением толщины слоев необходимо верифицировать масштаб изображения, используя масштабную шкалу в метаданных.

На рисунке 3.15, *A* представлен выделенный профиль образца многослойного картона протяженностью 2500 мкм, исключая области заливки эпоксидной смолой. Для каждого профиля определяются три горизонтальные линии, соответствующие максимальным выступам (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) и среднее значение по всем выступам и впадинам (n_1 , n_2). Статистическая обработка данных проводилась с использованием программного обеспечения Microsoft Excel. Область профиля разделялась на 25 секторов (i) протяженностью 100 мкм каждый (рис. 3.15, С). В каждом секторе определялись максимальные и минимальные значения высоты профилей верхнего и нижнего слоев. На основе среднего значения, полученного из 50 измерений, строилась средняя линия для каждого профиля. Максимальная толщина картона, определенная как разница между максимальным значением профиля 1 и минимальным значением профиля 2 ($H_{max1} - h_{min2}$) (рис. 3.15С) составляет 243 мкм (рис. 3.15, В) и соответствует максимальной толщине картона лайнера [126].

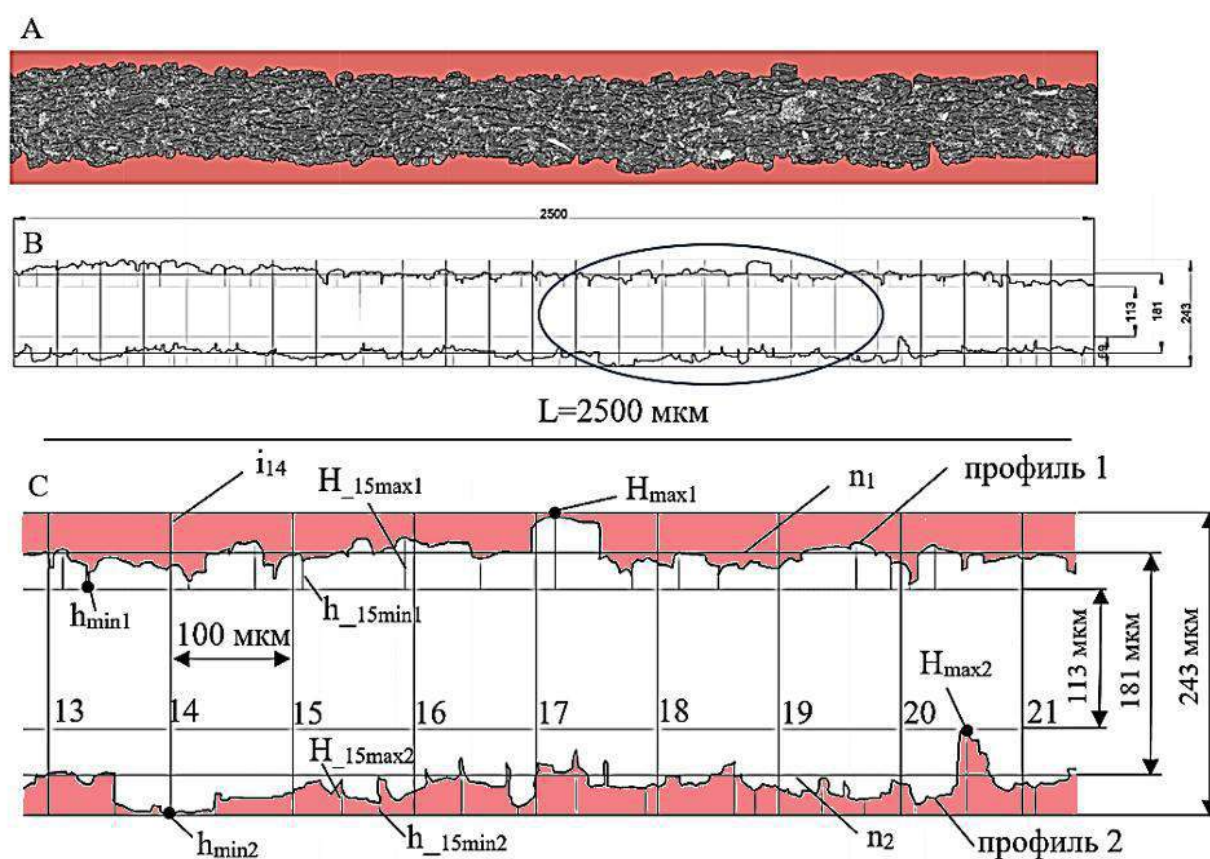


Рисунок 3.17 – Схема для определения толщин картона по графической обработке профиля: А – выделение области среза волокон с удалением области заливки картона полимером; В – выделение профилей и оценка толщин в пределах базовой длины; С – увеличение области исследования для визуализации схемы оценки толщин и равномерности их распределения: 1 – профиль покровного слоя; 2 – профиль нижнего слоя; $L = 2500$ мкм – базовая длина, по протяженности которой велись измерения [124, 162]

Включение данных о площади исследуемой области в расчет механических характеристик потенциально могло бы повысить точность получаемых результатов. Однако гетерогенность структуры бумаги и картона обуславливает значительные различия в профиле поверхности в зависимости от места измерения, что делает применение представленного метода трудоемким и ресурсозатратным. Развитие программных и аппаратных средств для профилометрии поверхности бумаги и картона, а также методов обработки 2D/3D-изображений на основе нейронных сетей, способствует прогрессу в решении данной сложной задачи. Экстраполируя текущие темпы развития технологий искусственного интеллекта, можно предположить, что задачи, представляющие значительные трудности в настоящее время, могут быть существенно упрощены в будущем. На данном этапе целесообразно сопоставить отклонения, наблюдаемые между средними значениями толщины, определенными с использованием методов графической обработки, и результатами измерений толщиномером, выполненными в соответствии со стандартом.

Разработанные методы оценки физических свойств (толщины и неравномерности ее распределения, шероховатости, пористости, неравномерности формования) по графической обработке микроструктуры поперечного среза, а также алгоритм прогнозирования качества печати на многослойном картоне требуют экспериментального подтверждения [124, 162].

4 Экспериментальная часть

4.1 Оценка неоднородности формования многослойного картона

Критический анализ литературных источников по определению неоднородности формования установил, что единой системы оценки по расчету индекса нет. В случае эталонной однородности формования многослойного целлюлозного композиционного материала в каждой точке измерения толщина и оптическая плотность совпадает. В реальном же материале присутствуют флокулы различных групп (1, 2, 3, 6, 10 и 12 мм). Определение неоднородности формования определяется по интенсивности света, проходящего через бумагу и картон.

Изготовление отливок бумаги и картона проводилось на лабораторном листоотливном аппарате, который позволяет получить распределение волокон в плоскости листа без определенной ориентации по осям. Многослойные отливки были изготовлены по методикам, представленным в работах [163, 164]. Качество формования сравнивается по интенсивности проходимого света (*L. T. – light transmission*). Многие приборы, определяющие индекс формования, имеют показатель *L. T.*, который определяет интенсивность проходимого света [124]. Обсуждается взаимосвязь между количеством слоев и неоднородностью образцов, получаемых из полуфабрикатов, которые используются на практике производства плоских слоев гофрокартона. На рисунке 4.1 видно, что с появлением каждого нового слоя идет снижение неоднородности на просвет, и для двухслойного образца произведенного из вторичных волокон офисной бумаги снижается с 74,3 до 52,0 относительных единиц. Такая тенденция по неоднородности на просвет для двухслойного формования относительно формования в один слой сохраняется для всех лабораторных образцов с массой 120 г/м². Увеличение слоев до трех на выходе дало снижение на 1 % относительно двух. Четырехслойное формование картона дополнительно снижает неоднородность на просвет, при этом такой картон производить будет экономически не выгодно.

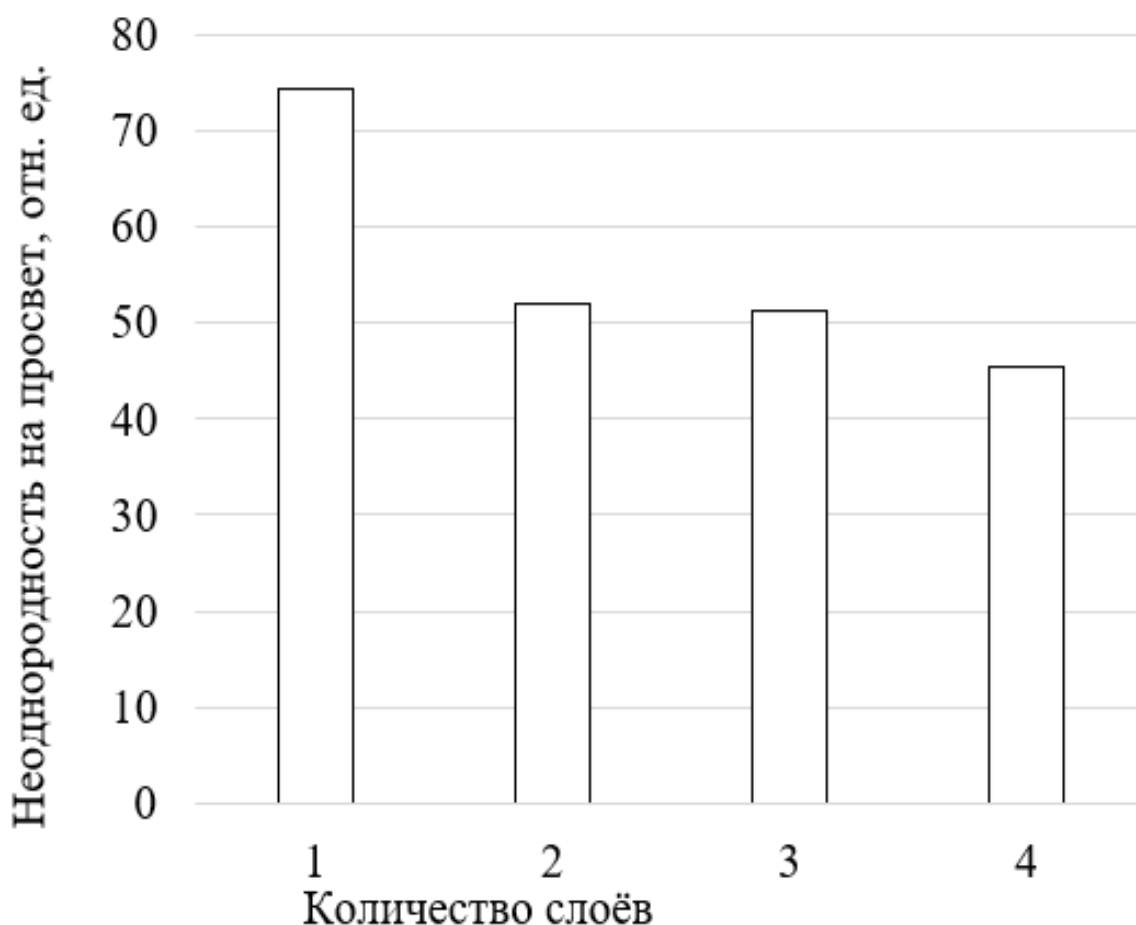


Рисунок 4.1 – Снижение неоднородности формования картона с повышением количества слоёв

Если однослойный картон разделить на два слоя при этом сохранив массу квадратного метра постоянной, то наиболее часто встречающийся размер флоккулы смещается в меньшую сторону. График на рисунке 4.2 это подтверждает. По нему видно, что размер флоккулы в однослойном картоне – 3 мм, в двухслойном – 1 мм. Такая тенденция в большей степени проявляется для вторичных волокон из макулатуры, состоящей из офисных видов бумаги (рис. 4.2). Снижение размера флоккул связано с тем, что если два неоднородных по структуре материала накладываются друг на друга, то неоднородность в целом снижается [124].

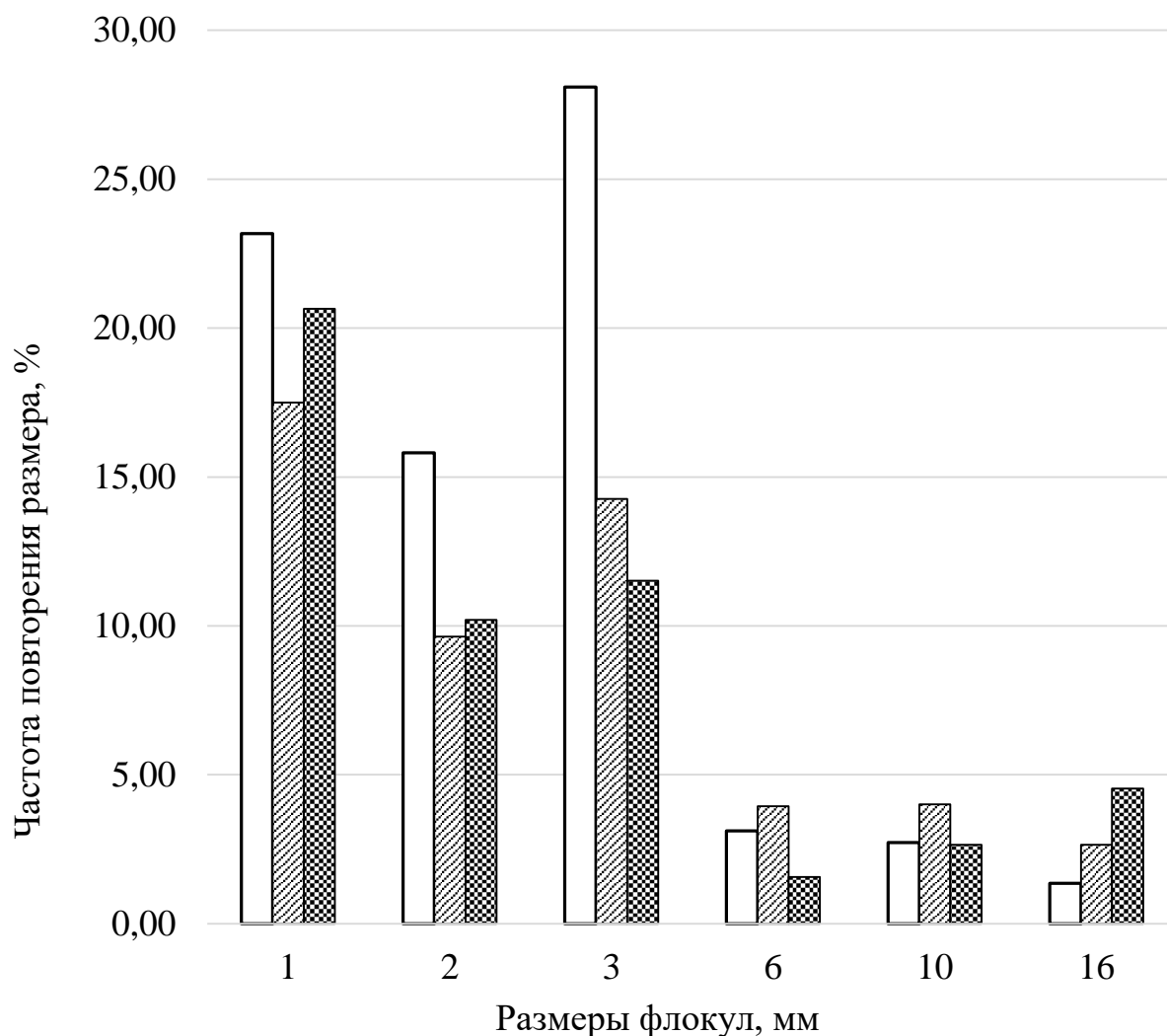


Рисунок 4.2 – Распределения флокул по размерам образцов, произведенных из вторичных волокон, содержащихся в офисной макулатуре с различным количеством слоев: □ – один слой; ▨ – два слоя; ▩ – три слоя [122, 124]

Использованный при оценке неоднородности формования прибор имел несколько режимов измерения: 1 – бумага; 2 – картон. Это обусловлено тем, что интенсивность проходящего света через картон должна быть выше, чем через бумагу. Гофрокартон, как известно, содержит до 15 % лигнина, который придаёт материалу бурый цвет. Фактически, увеличивает оптическую плотность (рис. 4.1). Поэтому данные по неоднородности распределения флокул в различных материалах сопоставлять сложно. Белая офисная бумага состоит из прозрачных волокон, в связи с чем её способность пропускать свет сильно отличается от картона.

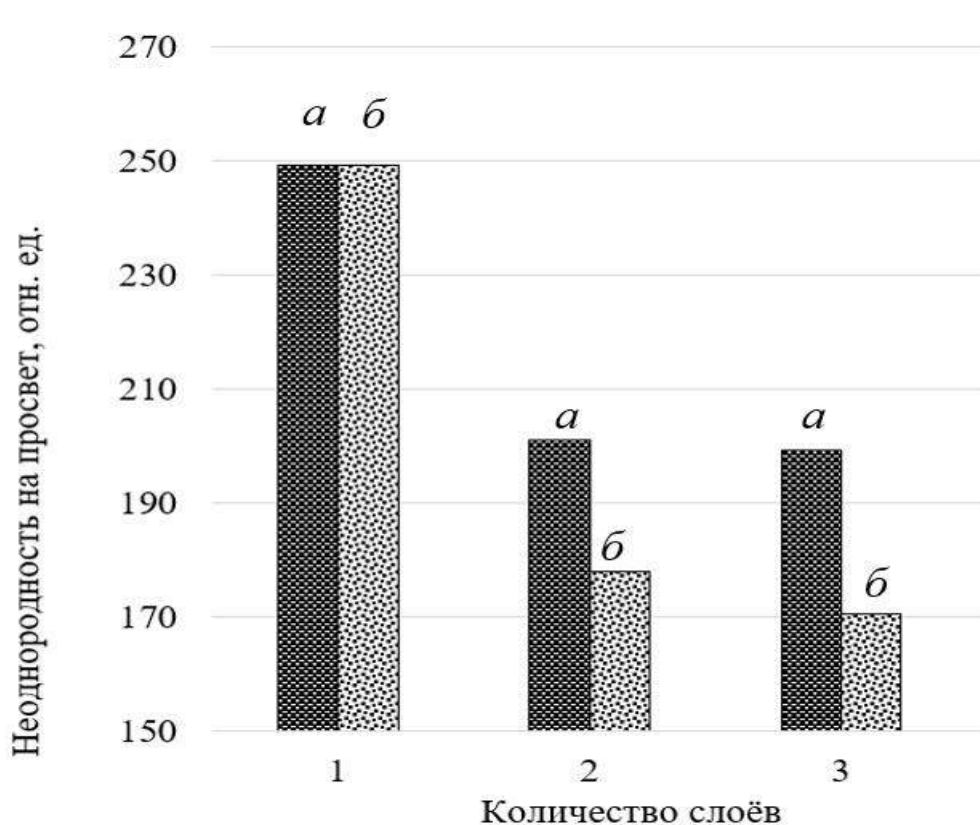


Рисунок 4.3 – Влияние количества слоев на неоднородность на просвет образцов, изготовленных из вторичных волокон: ■ – вторичные волокна, содержащиеся в гофрокартоне; ▨ – композиция вторичных волокон, содержащихся в офисной бумаге и гофрокартоне; *a* – вторичные волокна, содержащиеся в гофрокартоне; *б* – композиция вторичных волокон, содержащихся в офисной бумаге и гофрокартоне [122, 124]

Как и в предыдущем случае в картоне бурого цвета снижается неоднородность с появлением дополнительного слоя. Особенно это заметно, когда картон разделён на два слоя. В конкретном варианте, согласно диаграмме (рис. 4.2), среднее значение размеров флокул из категории 6, 10, 16 мм (рис.4.4) приходят в диапазон 1, 2, 3 мм. Очевидно, что во всех случаях снижение неоднородности в большей степени происходит с разделением на два слоя, последующее разделение на 3 и более слоёв не существенно улучшает однородность.

Нанесение покровного слоя картона из вторичных волокон, которые находились в офисной бумаге, на характер распределения значительно не повлияло, однако, как видно из рисунка 4.4, на рисунке 4.5 сократилось количество флокул с размером 6, 10 и 16 мм. Особенно заметно снижение

флокул больших размеров при наличии двух покровных слоев для трех- и четырехслойного картона тест-лайнера.

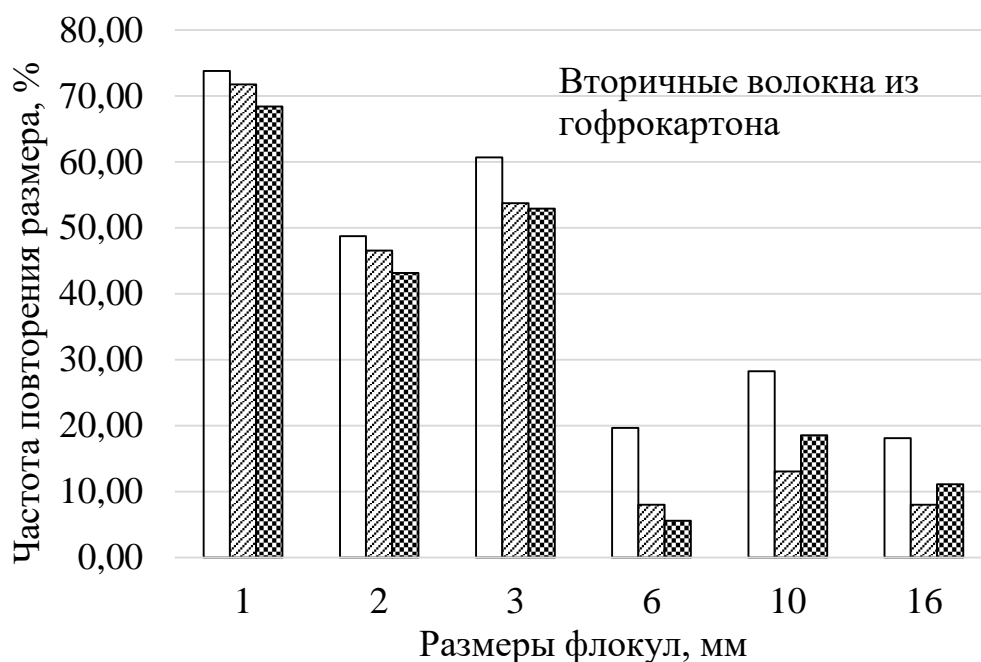


Рисунок 4.4 – Распределения флокул по размерам образцов, произведенных из вторичных волокон, содержащихся в гофрокартоне с различным количеством слоев: □ – один слой; ▨ – два слоя; ▩ – три слоя [122, 124]

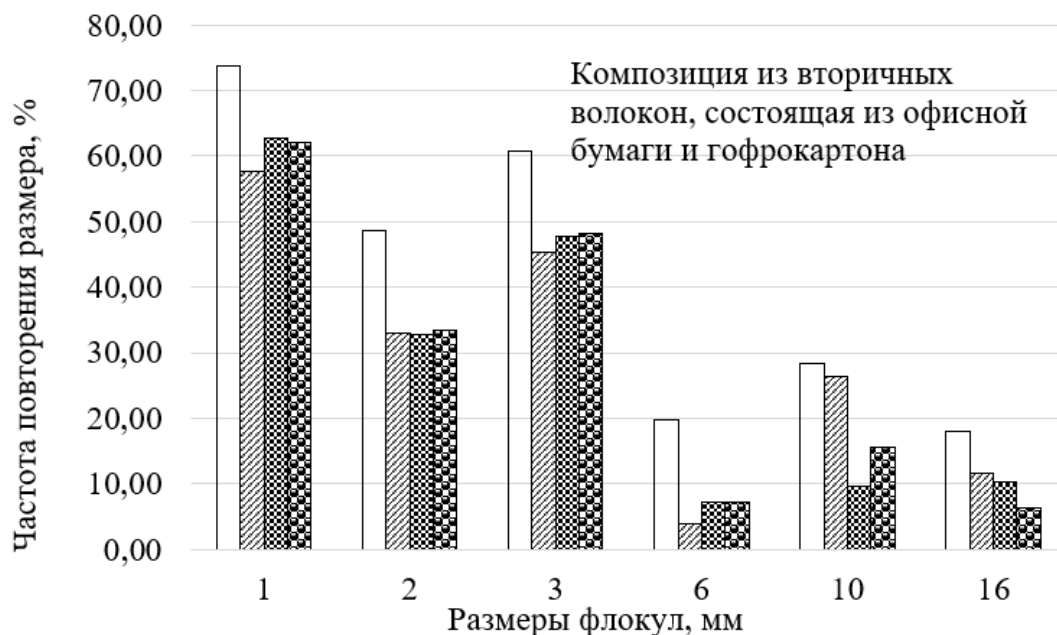


Рисунок 4.5 – Распределения флокул по размерам образцов, произведенных из композиции вторичных волокон, содержащихся в офисной бумаге и гофрокартоне: □ – один слой полностью из волокон гофрокартона; ▨ – два слоя (покровный из волокон офисной макулатуры и нижний из волокон гофрокартона); ▩ – три слоя (два слоя из волокон офисной макулатуры и один слой из волокон гофрокартона); ▨ – четыре слоя (два слоя покровных из волокон офисной макулатуры и два из волокон гофрокартона) [122, 124]

При производстве многослойных волокнистых композиционных материалов, в частности, многослойного картона для плоских слоев гофрокартона, существует проблема неравномерности распределения волокон в покровном слое. Обычно картон тест-лайнер вырабатывают в два слоя, так как формирование трехслойного связано с большими капитальными вложениями. При этом, как показывают результаты исследований, разница между неоднородностью распределения волокон при двух- и трехслойном варианте не существенна. Но если потребитель упаковки требователен к качеству наносимой печати, то трехслойное формование, которое уменьшает количество флокул больших размеров, может положительно сказаться на печатных свойствах. Высокое содержание флокул больших размеров вызывает неравномерное распределение толщины картона. В таких условиях частицы наносимой краски или тонера могут заваливаться в пустоты, что вызывает неравномерность нанесения печати.

Таким образом, анализ распределения флокул по размерам показал смещение в меньшую сторону для картона массой метра квадратного в 120 г при двух и более слоях. В большей степени это характерно для образцов, полученных из вторичных волокон. Экспериментально было установлено снижение неоднородности формования при наличии покровных слоев, изготовленных из белых волокон в совокупности с нижними слоями бурого цвета. Наиболее предпочтительной комбинацией для повышения печатных свойств картона является формование в три слоя с двумя белыми покровными и одним нижним бурым. Такой способ позволяет сократить наличие флокул больших размеров, что повышает равномерность формования и улучшает печатные свойства покровного слоя гофрокартона. Для других плоских слоев гофрокартона, к которым не предъявляют высокие требования для печати, достаточно двухслойного формования [124].

Сопоставление различных методов оценки неоднородности формования разработчики приборов не представляют. Каждая компания-производитель дает свои алгоритмы оценки индекса формования, не сопоставляя его с

другими. Сложность заключается в том, что оптическая плотность образцов сильно отличается между собой. То, что подходит для бумаги, не подходит для картона лайнера. Однако существует закономерность снижения неоднородности при формовании бумаги или картона в несколько слоев. В таблице 4.1 представлены результаты сравнения графической обработки микроструктуры поперечного среза с результатами, полученными на приборах Formation 2D, и по алгоритмам, разработанным учеными Северного Арктического Федерального университета.

Таблица 4.1 – Снижение неоднородности многослойного картона лайнера, определенное разными приборами и методами

Способы оценки неоднородности	Метод, разработанный в САФУ, %	Formation2D, НПАО «Светогорский ЦБК», %	Предлагаемый метод графической обработки среза, %
Снижение неоднородности с появлением второго слоя	25	24	22,9
Снижение неоднородности с появлением третьего слоя	Не более 5		

Сравнить данные не представляется возможным, но тенденции изменения в неоднородности формования при добавлении второго и третьего слоя сопоставимы между собой.

4.2 Оценка шероховатости многослойного картона

В результате графической обработки поперечного среза были получены профили поверхности картона с тыльной и лицевой стороны. Результатом графической обработки являлись координаты точек по оси ординат, соответствующие максимальным отклонениям выступов (H_{\max}) и минимальным отклонениям впадин (h_{\min}) относительно средней линии (рис. 3.13). Средняя линия была построена по данным максимумов и минимумов профиля, разделенного на 25 секторов по 100 мкм. Таким образом, была охвачена рекомендованная в ГОСТ 2789-73 базовая длина в 2500 мкм. Статистическая обработка данных проводилась в соответствии с

инструкциями, представленными ГОСТ 2789-73, с помощью электронной таблицы Excel. Всего было обработано и проанализировано 32 профиля для многослойного картона. Результаты исследований параметров шероховатости Ra , Rz , $Rmax$ представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты оценки шероховатости многослойного картона по графическому анализу профиля поперечного сечения и по стандартному методу [124]

Образцы и их показатели	Сторона	Область измерения	Шероховатость поверхности			
			по методу Бендстена, мл/мин	по профилю в поперечном сечении, мкм		
				Ra	Rz	Rmax
Количество слоев – 1 Номер образца – 10 Масса образца – 3,8 г Масса м ² – 122 г/м ²	лицевая	6	198	12,5	20	53
		4	161	12,5	25	92
		12	143	12,5	20	68
		14	196	12,5	25	55
	тыльная	6	302	12,5	25	60
		4	278	12,5	25	49
		12	410	16	32	78
		14	373	25	40	96
Количество слоев – 2 Номер образца – 12 Масса образца – 3,6 г Масса м ² – 115 г/м ²	лицевая	6	131	12,5	20	22
		4	135	12,5	20	-
		12	109	10	16	61
		14	152	12,5	20	55
	тыльная	6	392	32	50	90
		4	274	16	25	73
		12	218	16	20	61
		14	301	16	25	78
Количество слоев – 3 Номер образца – 14 Масса образца – 3,9 г Масса м ² – 124 г/м ²	лицевая	6	128	8	10	38
		4	167	12,5	20	58
		12	161	12,5	16	45
		14	137	10	12,5	39
	тыльная	6	233	12,5	16	39
		4	285	16	32	78
		12	216	12,5	16	35
		14	215	12,5	25	58
Количество слоев – 4 Номер образца – 18 Масса образца – 3,74 г Масса м ² – 118 г/м ²	лицевая	6	168	12,5	25	63
		4	168	12,5	25	71
		12	122	12,5	25	68
		14	122	12,5	25	59
	тыльная	6	299	16	25	75
		4	413	20	40	100
		12	285	16	25	71
		14	249	16	25	70

Из данных таблицы видно, что максимальное значение шероховатости по $Rmax$ не превышает 100 мкм, поэтому достаточно исследовать область в

пределах базовой длины в 2500 мкм. Область измерения была выбрана таким образом, чтобы отливка размером в 200 мм была разделена на 17 секторов, из которых были выбраны четыре, находящиеся на максимальном удалении друг от друга и от краев круглой отливки картона (рис. 4.6). Шероховатость по стандарту методом Бендтсена была определена с лицевой и тыльной сторон. Таким образом, исследовалось четыре отливки с лицевой и тыльной стороны в четырех областях среза (6, 4, 12, 14).

Данные таблицы 4.2 подтверждают справедливость представлений, высказанных авторами работы [165] о том, что шероховатость, которая определяется косвенным способом, в конкретном случае по Бендтсену, может не соответствовать данным, полученным по профилю картона. При равных значениях Ra количество проходимого через зазор между металлическим кольцом и поверхностью картона может быть разным.

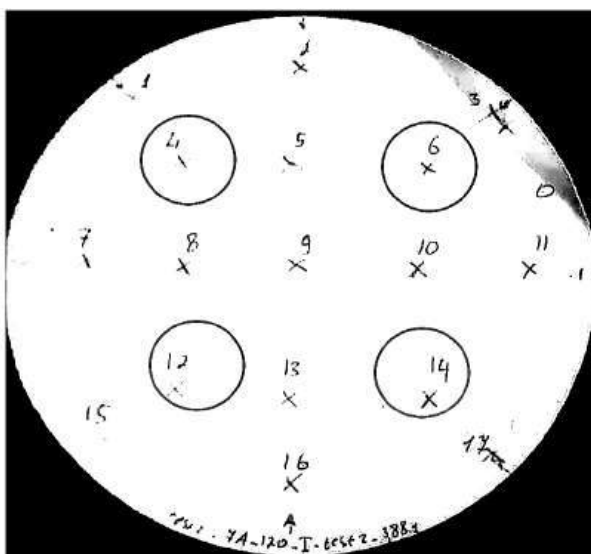


Рисунок 4.6 – Исследуемая область измерения: 4, 6, 12, 14 – области, наиболее удаленные друг от друга и от края образца картона

На рисунке 4.7 представлены результаты сопоставления метода Р. Бендтсена с методом оценки картона по профилю поперечного сечения картона.

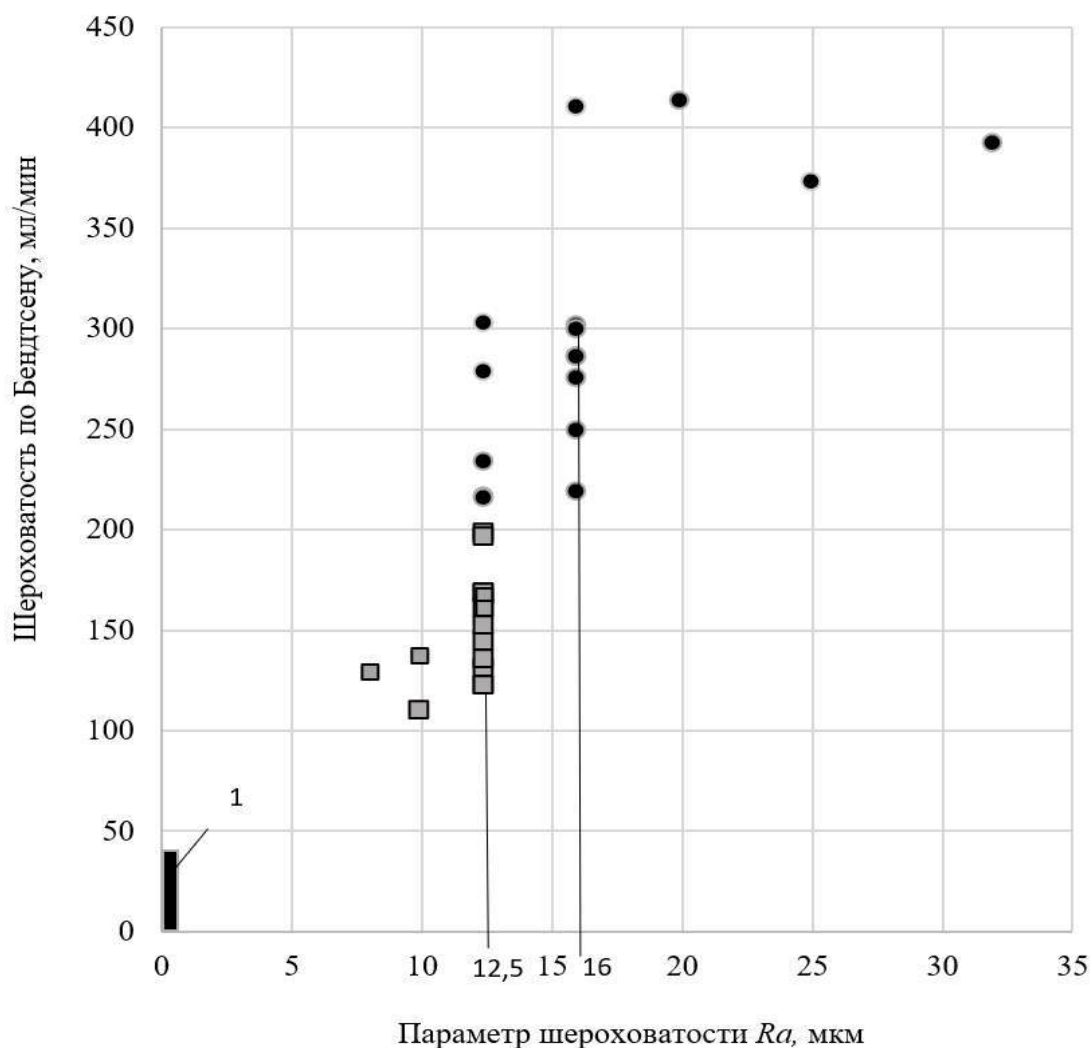


Рисунок 4.7 – Результаты сопоставления данных шероховатости по методу Р. Бендтсена и Ra , полученные в ходе графической и аналитической обработки профиля картона: 1 – диапазон шероховатости по Бендтсену для картона с покрытием; ■ – результаты оценки шероховатости лицевой стороны картона; ● – результаты оценки шероховатости тыльной стороны картона [124]

Из рисунка 4.7 видно, что при шероховатости лицевой стороны картона $Ra = 12,5$ мкм показания прибора Бендтсена хоть и входят в норматив шероховатости для бумаги (до 400 мл/мин), но имеют разные значения. 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 .

Несмотря на то, что отсутствует корреляция между параметром шероховатости поверхности по Бендтсену и Ra , проведенные исследования показали возможность применения метода прямого анализа шероховатости

поверхности при оценке картона без покрытия. Анализ шероховатости поверхности прямым методом, путем графической и аналитической обработки профиля поверхности применим вне зависимости от наличия или отсутствия покровного мелованного слоя. Согласно проведенным исследованиям установлено, что при многослойном формовании количество слоев не оказывает влияние на формирование профиля поверхности, а шероховатость поверхности определялась с поверхностью сетки и покровным картоном.

В результате по профилю были получены данные шероховатости поверхности картона без покрытия с тыльной и лицевой сторон с помощью графической обработки. Предложенный метод позволяет расширить диапазон измерений шероховатости поверхности по профилю в пределах базовой длины 2500 мкм, что соответствует параметру шероховатости R_{max} картона без покрытия до 100 мкм.

Предложенный метод графической и аналитической обработки поверхности применим вне зависимости от наличия или отсутствия покровного мелованного слоя и может использоваться при оценке качества нанесения печатных символов на поверхность картона без покрытия. Это особенно важно для получения красочной упаковки, что значительно увеличивает привлекательность при продаже товаров народного потребления.

4.3 Оценка пористости многослойного картона по предлагаемому методу и сопоставление с воздухопроницаемостью по методу Р. Бендтсена

В ходе исследований была установлена корреляция между показателями пористости и воздухопроницаемости образцов многослойных картонов в диапазоне пористости от 30 до 50 %. Было выявлено, что увеличение показателя воздухопроницаемости коррелирует с увеличением показателя пористости, определенного методом графической обработки поперечных срезов (рис. 4.8).

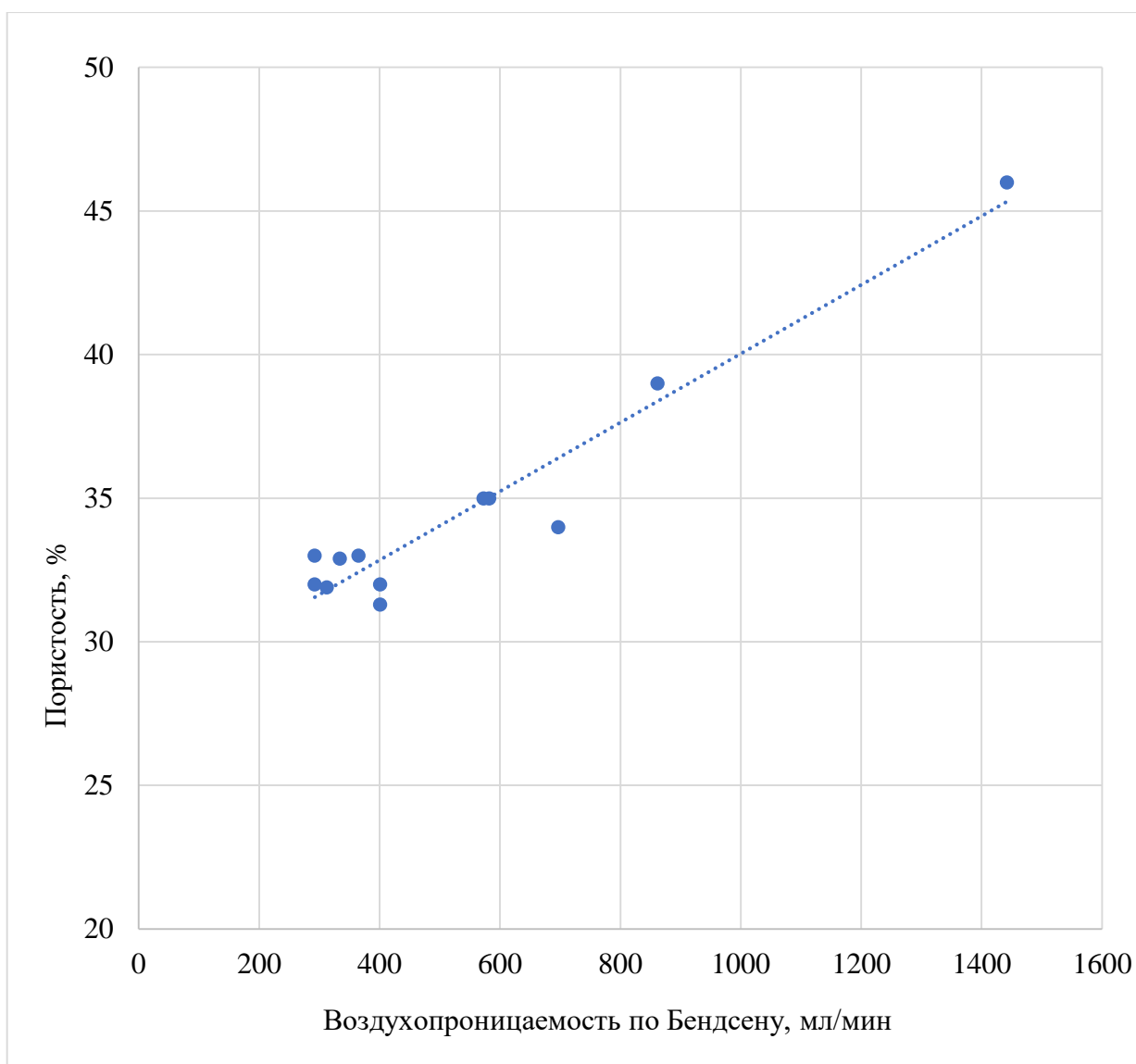


Рисунок 4.8 – Взаимосвязь между воздухопроницаемостью, определенной по методу Р. Бендтсена, и пористостью, установленной графическим методом [124]

Высокая точность графической обработки изображений для определения пористости была достигнута благодаря использованию программного обеспечения, работающего с векторными форматами. Однако следует отметить, что данный метод является весьма трудоемким и требует значительных затрат времени на ручную обводку контуров пор и волокон. В рамках данной работы также была рассмотрена возможность применения программного обеспечения, работающего с растровыми форматами, которое обладает функционалом векторизации изображений. Такой подход значительно ускоряет процесс оценки площади пор, позволяя производить расчеты в пикселях [124].

4.4 Экспериментальное подтверждение адекватности разработанного метода оценки толщины многослойного картона

Некорректно измеренная толщина многослойного картона во многом связана с неравномерным распределением волокон и наполнителей, при условии, что оборудование для массоподготовки и формования картона работает на должном уровне. В противном случае в структуре картона, например, при плохом роспуске, дороспуске либо тонкой и грубой очистке, окажутся крупные не волокнистые частицы мела, песка, металла, пластика и др. При неэффективной работе центриклинеров в структуре картона могут быть сгустки (узелки) волокон. На стадии формования в движущееся полотно может попасть пыль, содержащая частицы песка, металла. Перечисленные частицы, сгустки волокон, размером в сотни микрон будут влиять на определение стандартизированной толщины. Это приведет к ошибке расчетов физических свойств картона.

Некорректность определения толщины связана с тремя основными причинами: присутствие узлов волокон, крупных частиц наполнителя или других включений на поверхности (рис. 4.9) или внутри отдельного слоя (рис. 4.10). При их наличии увеличивается стандартизованная толщина 5 при этом профиль поверхности картона становится неровным и появляется большое количество пустот 1. Из рисунка 4.9 видно, как профиль нижнего слоя искажается из-за присутствия сгустков волокон 3 на поверхности. Толщину и размеры срезов волокон 2 по микроструктуре поперечного среза можно определить по масштабной линейке 4.

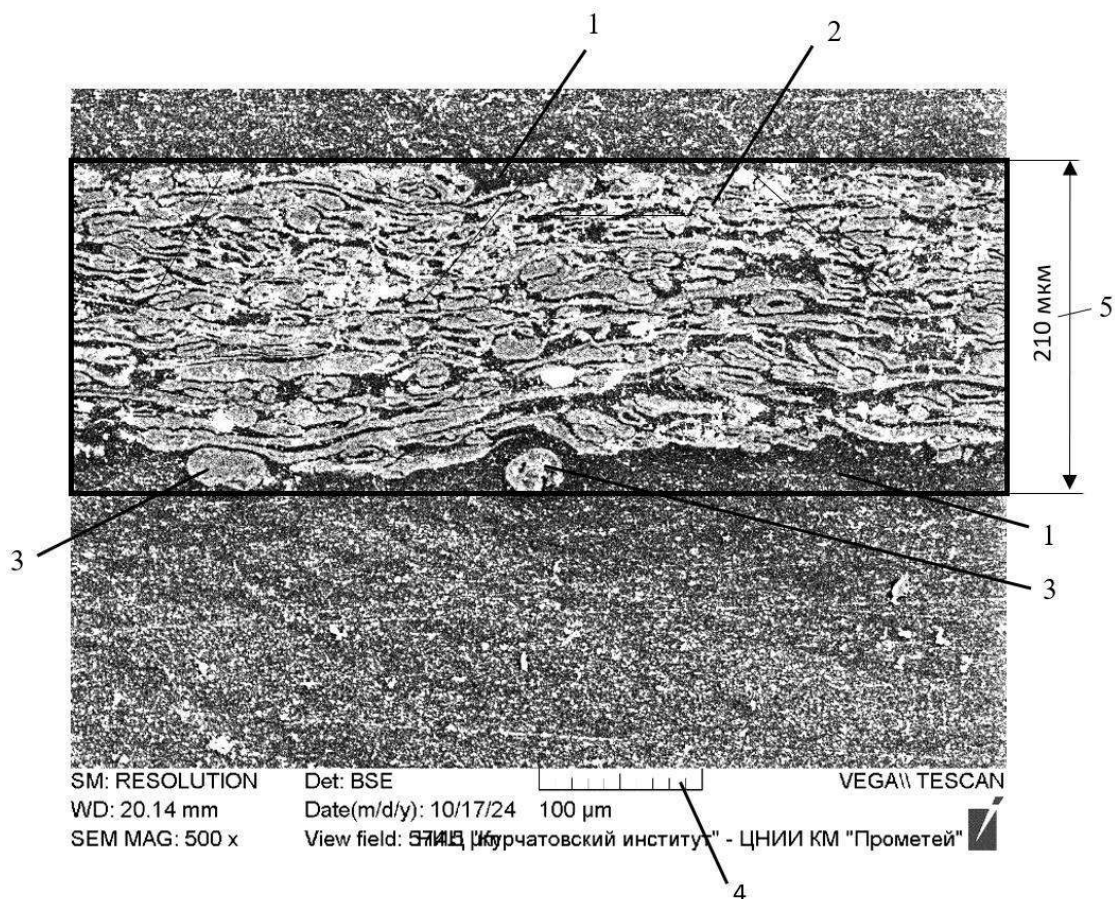


Рисунок 4.9 – Поперечный срез двухслойного картона для плоских слоев гофрокартона: 1 – пустоты; 2 – срезы волокон; 3 – сгустки волокон, крупные частицы наполнителя и др.; 4 – масштабная линейка; 5 – стандартизованная толщина

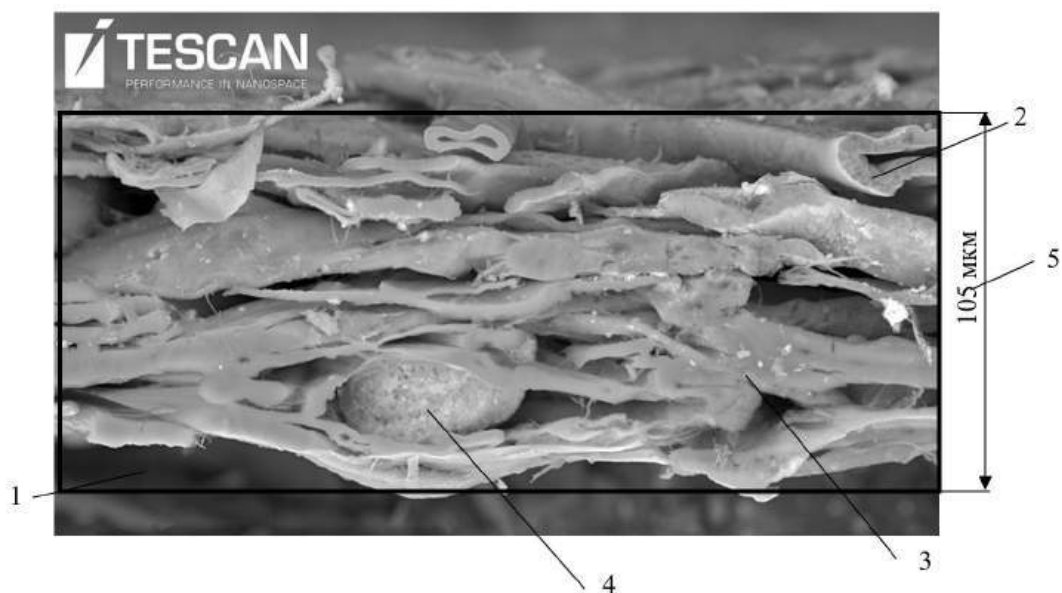


Рисунок 4.10 – Поперечный срез одного из слоев (покровного) картона тест-лайнера: 1 – пустоты; 2 – срезы волокон; 3 – сгустки волокон, крупные частицы наполнителя и др.; 4 – масштабная линейка; 5 – стандартизованная толщина

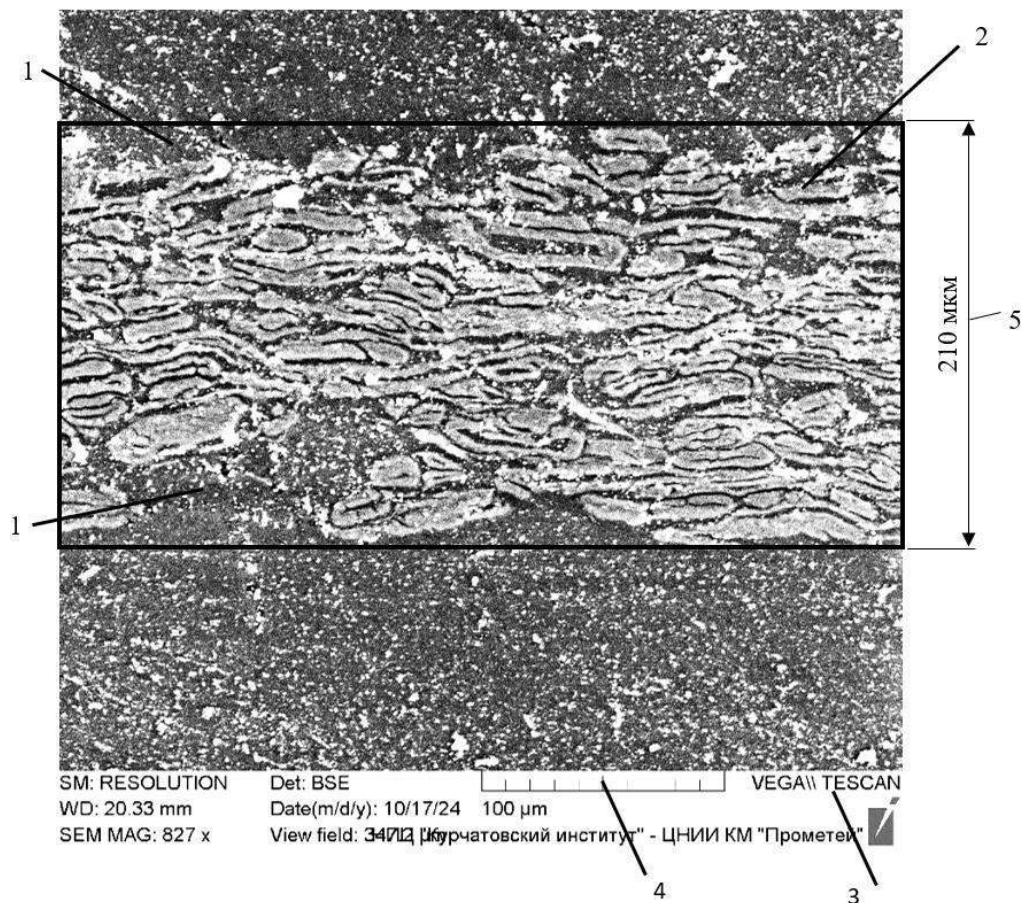


Рисунок 4.11 – Поперечный срез двухслойного картона для плоских слоев гофрокартона: 1 – пустоты; 2 – срезы волокон; 3 – информация об образце, оборудовании и условиях получения микроснимка; 4 – масштабная линейка; 5 – стандартизованная толщина

Представленные на рисунках 4.9–4.11 изображения микроструктуры поперечного среза картона, указывают на наиболее распространенные причины несоответствия стандартизованной толщины с эффективной, которую необходимо было бы учитывать при расчете физико-механических свойств. Из существующих источников неясно, каким образом определить эффективную толщину. Однозначного ответа на этот вопрос нет. Существует несколько вариантов. Во-первых, можно принять за эффективную минимально возможную толщину, а именно найти наиболее глубокую впадину на поверхностях слоев и провести перпендикуляр до противоположного профиля. Тогда при расчете толщины данные механических характеристик будут сильно занижены. Кроме того, при расчете объемной массы и пухлости (физических свойств) большое количество срезов волокон не будет учтено. Правильнее было бы использовать толщину, которая

является расстоянием между средними линиями профилей покровного и нижнего слоев, по схеме, представленной в предыдущих исследованиях по определению шероховатости поверхности многослойного картона.

Стандартизованная толщина картона сравнивалась с максимальной и средней. На рисунке 4.12 представлены результаты сравнения 10 вариантов картона из различных видов сырья (в каждом варианте по три образца, на каждом образце было выполнено 10 замеров толщины) [124, 156].

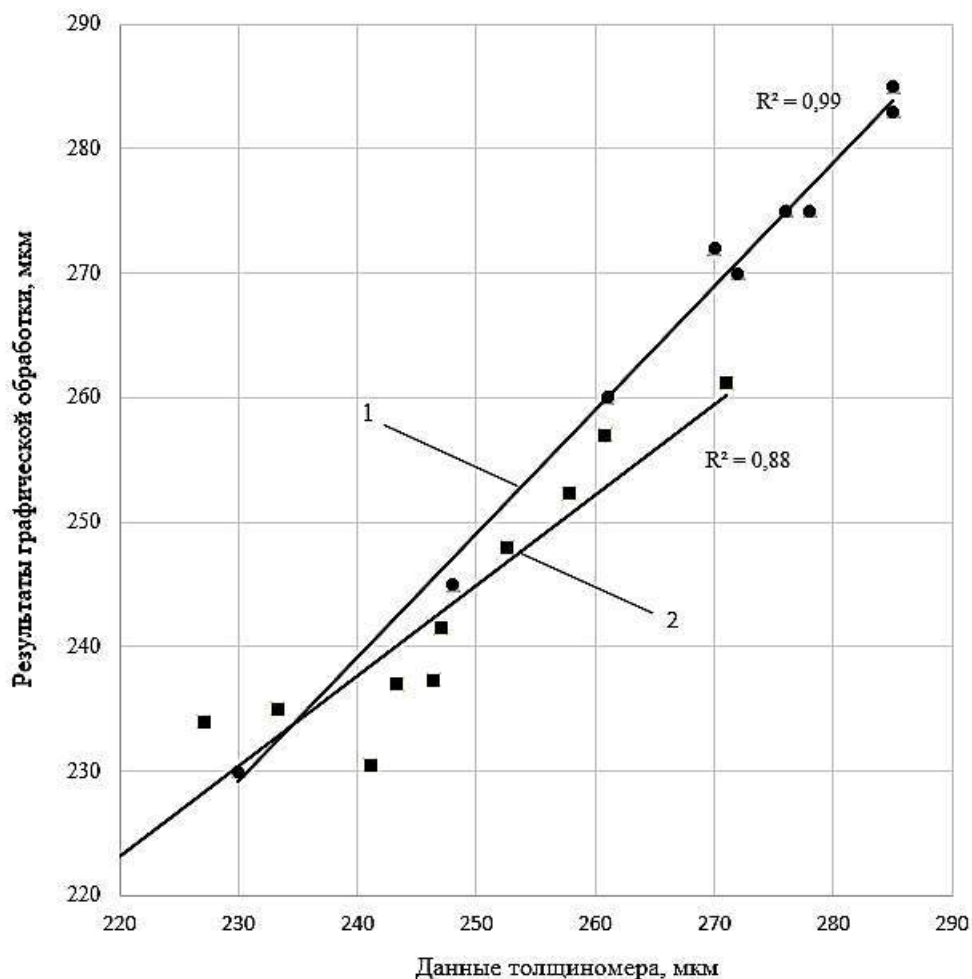


Рисунок 4.12 – Сопоставление стандартизованной толщины с толщинами, определенными по графической обработке: 1 – с максимальным значением толщины; 2 – со средним значением толщины

Из рисунка 4.12 видно, что данные, которые были определены по ГОСТ Р ISO 534-2012 [166] с помощью толщиномера (стандартизованная толщина) для испытуемых образцов в условиях постоянной влажности воздуха и температуры, соответствуют больше максимальной толщине, определенной графическим путем ($R^2 = 0,99$). Среднее значение толщины, которое следовало

бы взять за эффективную и использовать при расчете физико-механических свойств, соответствует в меньшей степени ($R^2 = 0,88$), несмотря на то, что при расчете свойств учитывается меньше пустот.

Приведенный на рисунке 4.12 график подтверждает неточность в определении толщины стандартным методом. Важно отметить, что контроль качества образцов, в том числе физических и механических, определялся при постоянной относительной влажности воздуха 60 % и температуре 20 °С в климатической комнате [167]. При изменении условий, например, повышении влажности целлюлозные волокна становятся более эластичными и при одинаковом усилии сжатия в 0,1 МПа стандартизованная толщина будет уменьшаться, приближаясь к эффективной. Для различных видов сырья, в которых содержание лигнина, целлюлозы, гемицеллюлозы разное, корреляция между стандартизованной и эффективной толщинами неодинаковая из-за разницы в сжимаемости волокон. Все это при условии, что в микроструктуру не попали крупные частицы наполнителя и сгустки, узелки волокон. Некорректное определение толщины требует перерасчета некоторых данных механических свойств.

Существенных отклонений в оценке толщины нет, так как шероховатость лабораторных образцов невысокая, сырье использовалось со стабильными бумагообразующими свойствами, несмотря на то, что было вторичным. Последний образец «КВ_образец с производства» обладал неровной поверхностью, так как содержал различные наполнители, сгустки волокон, примеси и промой, вызванные нестабильным качеством сырья, несовершенством работы оборудования, что привело к увеличению шероховатости, а следовательно, уменьшению эффективной толщины. В результате объемная плотность и пухлость картона определены, на наш взгляд, не корректно. Ошибка в измерении физических величин, которые зависят от толщины, составила 22,6 %. Для лабораторных образцов этот показатель находился в пределах погрешности измерений и не превысил 5 %. В отличие от физических свойств, механические зависят от толщины в

различной степени. Например, модуль упругости при растяжении находится в обратно пропорциональной зависимости от толщины, а жесткость при изгибе меняется в третьей степени [168]. Известно, что жесткость при изгибе, которая характеризуется произведением модуля упругости материала E и моментом инерции поперечного сечения I , зависит от толщины δ в кубе раз (1).

Модуль эластичности (упругости) при разрыве E_p , МПа вычисляют по формуле (3) [169]:

$$E_p = ((F_2 - F_1) \cdot l_0) / (A_0 \cdot (\Delta l_2 - \Delta l_1)), \quad (3)$$

где F_2 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,3 %; F_1 – нагрузка, соответствующая относительному удлинению 0,1 %; l_0 – расчетная длина образца, мм; A_0 – площадь начального поперечного сечения образца, мм²; Δl_2 – удлинение, соответствующее нагрузке F_2 , мм; Δl_1 – удлинение, соответствующее нагрузке F_1 , мм.

4.5 Корректировка физико-механических показателей в соответствии с уточнением толщины картона

В таблице 4.3 представлены физические свойства, которые определены с использованием стандартизованной и эффективной толщины. В таблице 4.4 представлены данные корректировки механических свойств.

Таблица 4.3. – Результаты корректировки физических свойств [121]

Наименование	Масса, г	Масса г/м ²	Толщина, мкм		Объемная плотность, кг/м ³		Пухлость, см ³ /г		Отклонение, %
			С	Э	С	Э	С	Э	
7А_120_I_10	3,8	122	235	233,3	519,15	523	1,93	1,91	0,7
7А_120_II_12	3,6	115	223,8	219,5	513,85	524	1,95	1,91	1,9
7А_120_III_14	3,9	124	241,1	230,5	514,31	538	1,94	1,86	4,4
5Б_120_I_20	3,7	118	271	261,2	435,42	452	2,3	2,21	3,6
5Б_120_II_24	3,7	118	252,6	248	467,14	476	2,14	2,10	1,8
5Б_120_III_28	3,8	122	257,8	252,3	473,24	484	2,11	2,07	2,1
5Б_120_IV_29	3,6	115	260,8	257	440,95	447	2,27	2,24	1,5
7А+5Б_II_33	3,7	118	243,3	237	485,00	498	2,06	2,01	2,6
7А+5Б_III_36	3,7	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	22,6

С – значение физического параметра, определенного по стандартизованной толщине; Э – значение физического свойства, определенное по эффективной толщине (толщина, определенная по средним линиям профилей нижнего и верхнего слоев)

Таблица 4.4 – Результаты корректировки механических свойств

Наименование	Толщина, мкм		Модуль упругости при растяжении, Н/мм ² (МС/МД)			Жесткость при изгибе, кН·м (МС/МД)		
	С	Э	С	Э	Δ, %	С	Э	Δ, %
7А_120_I_10	235	233,3	2443	2425	0,7	1,4	1,39	2,2
7А_120_II_12	223,8	219,5	2810	2756	1,9	1,3	1,35	6
7А_120_III_14	241,1	230,5	3009	2877	4,4	1,3	1,60	14,4
5Б_120_I_20	271	261,2	1995	1923	3,6	1,4	1,61	11
5Б_120_II_24	252,6	248	2012	1975	1,8	1,4	1,48	5,7
5Б_120_III_28	257,8	252,3	2097	2052	2,1	1,4	1,49	6,7
5Б_120_IV_29	260,8	257	2151	2120	1,5	1,3	1,47	4,5
7А+5Б_II_33	243,3	237	2483	2419	2,6	1,4	1,43	8,1
7А+5Б_III_36	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	53/116

Из таблицы 4.4 видно, что разница в измерении жесткости при изгибе в продольном и поперечном направлении образца, произведенного на картонной фабрике, сильно отличается. Максимальная ошибка в измерении жесткости при изгибе составила 116 %. Для лабораторных образцов этот показатель не превысил 15 %.

Таким образом, современные технологии графической обработки микроструктуры поперечного среза многослойного волокнистого композиционного материала, в частности картона, позволили получить новые данные в области исследования физико-механических свойств. По-новому была решена задача оценки эффективной толщины, которую в данной работе предложено определять, как расстояние между средними линиями профилей нижнего и покровного слоя картона. Причем экспериментально была доказана существующая гипотеза о некорректности использования стандартизованной толщины в расчетах. Для этого были сопоставлены данные максимальных и средних значений, определенных с помощью толщиномера и графической обработки поперечного среза картона. Как и предполагалось, стандартизованная толщина в большей степени коррелируется с максимальной толщиной и в меньшей степени со средней. Однако

использование максимальной толщины в расчетах физико-механических свойств связано с ошибкой, которая обусловлена тем, что учитывается много пустот, которые не влияют на физические и механические показатели. Причины возникновения пустот вызваны присутствием сгустков волокон, крупных частиц наполнителя, промоин в микроструктуре картона, влияние которых было показано на изображениях микроструктуры поперечного среза многослойного волокнистого композиционного материала.

Сравнение механических свойств, соответствующих стандартизованной и эффективной толщине, позволили установить ошибки при растяжении и изгибе. Была установлена ошибка в измерении жесткости при изгибе в продольном и поперечном направлениях образца, произведенного на картонной фабрике. 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 волокнистого композиционного материала.

4.6 Влияние количества слоев на физико-механические свойства картона лайнера

Среди механических свойств, был определен широкий перечень показателей для различных видов многослойных волокнистых композиционных материалов [124, 170–172]. Данные механических характеристики представлены в таблице 4.3.

По аналогии с представленными данными были получены и оформлены результаты данных на все объекты исследования, указанные в таблице 4.5. Данные на небелёные волокна и комбинацию белёных и небелёных представлены в приложении 5.

Таблица 4.5 – Механические показатели образцов из вторичных беленых волокон

Наименование образца	7A_120_I_2	7A_120_I_3	7A_120_II_1	7A_120_II_3	7A_120_III_1	7A_120_III_2	7A_120_IV_1	7A_120_IV_3
Номер образца	9	10	11	13	16	15	19	17
Масса, г	3,73	3,82	3,55	3,59	3,89	3,87	3,78	3,83
Масса м ² , г/м ²	121		113	114	123	123	120	122
Степень помола, °ШР	более 55	более 55	более 55	более 55	более 55	более 55	более 55	более 55
Сопротивление продавливаю, кПа	243	253,9	268,5	289,7	313,6	326	330,4	293,3
Разрывная длина, км	3,35	3,4	4,1	3,93	4,4	4,62	4,54	4
Поглощение энергии при разр, Дж/м ²	45,2	50,1	66,8	79,4	80	86,12	82,5	67,5
Сопротивление разрыву, Н/м	3980,9	4060,2	4545,5	4400	5275	5580	5348,91	4775
Удлинение при разрыве, %	1,65	1,76	2,1	2,62	2,16	2,2	2,19	2
ТЕА-индекс, Дж/г	0,37	0,41	0,6	0,7	0,65	0,7	0,69	0,6
Индекс сопр. Разрыву, Н/мм ²	32,9	33,3	40,23	38,6	43	45,4	44,57	39,1
Удлинение, мм	1,65	1,76	2,1	2,62	2,16	2,2	2,19	2
Модуль упругости, Н/мм ²	2496	2443	2809,6	2344	3009	2888	3023	2745,3
Максимальное усилие, Н	59,7	60,9	68,2	66	79,1	83,7	80,2	71,6

5 Разработка практических рекомендаций по снижению доли брака для предприятий ЦБП

5.1 Описание технологии и оборудования на стадии печати информации на гофрокартон

Разработанные методы позволили оценить печатные свойства плоского слоя (тест-лайнера) и гофрокартона, что дает возможность разработать 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 [119, 126].

Техническая задача производителей на каждом предприятии может быть разная, несмотря на то, что линия по производству картонных коробок, изготовленных из исследованного ранее сырья, может быть одинаковая. В Санкт-Петербурге находятся представительства компаний, которые поставляют автоматические линии на многие картонные фабрики. В подмосковной фабрике ОАО «Каравасово» установлена автоматическая линия для производства картонных коробок Модели 9РА-109/9FGT17 формат: 660x1800. Она предназначена для последовательного нанесения двухцветной флексографической печати, просечки, нанесения поперечной рилевки на заготовках гофроящиков из листов трех- и пятислойного гофрокартона с последующей склейкой, укладкой и упаковкой. Технические характеристики машины представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Технические характеристики автоматическая линия для производства картонных коробок Модели 9РА-109/9FGT17

Параметр	Размерность	Значение
Максимальный размер заготовки	мм	646*1772
Минимальный размер заготовки	мм	200*475
Максимальный размер длины печати	мм	1750
Максимальная скорость работы машины	лист/ мин	400
Давление воздуха в системе, не менее	бар	5,5

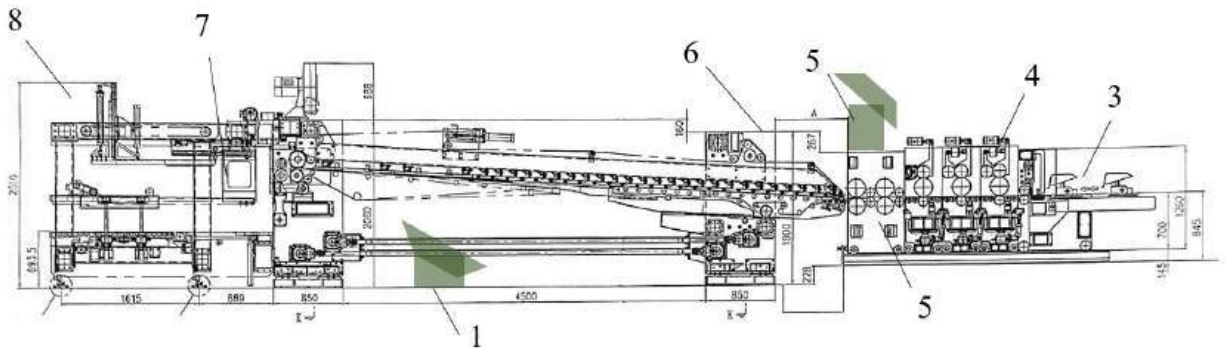


Рисунок 5.1 – Схема линии для печати на гофрокартоне (ОАО «Караван»): 1 – камера для контроля за качеством печати после фальцовки, загиба и склейки; 2 – камера для контроля за качеством печати после вырубки; 3 – секция подачи; 4 – секция флексопечати; 5 – просекательно-релевочная секция; 6 – фальцевально-склеивающая секция; 7 – узел подсчета и формирования пачки; 8 – упаковочная секция

Подача листов в секции подачи осуществляется с помощью полиуретановых роликов. За передними ограничителями расположена система протягивающих роликов, предназначенная для транспортировки заготовок к печатной секции.

Секция флексопечати предназначена для нанесения печати (рисунка) на лист гофрокартона. Секция оснащена камер-ракульной системой для флексопечати, включающей керамический анилоксовый вал и ракульную камеру для получения качественного оттиска на гофрокартоне, а также вакуумную систему трансфера заготовки, систему автоматической промывки водой, устройства моторизированной настройки всех зазоров для регулировки процесса печати. Линиатура анилоксового вала – 240 линий/дюйм. Диаметр печатного вала – 211 мм.

Просекательно-релевочная секция имеет верхние и нижние просечные ножи, предназначенные для вырубki просечек, и отрезной нож, отсекающий излишки длины заготовки. В секции расположены релевочные муфты, продавливающие гофрокартон по будущей линии сгиба для облегчения процесса сложения гофроящика.

Фальцевально-склеивающая секция преобразует заготовку в четырехклапанный ящик. На клеевой клапан клей наносится посредством экструзионной системы. На основании сигналов датчика клеевая форсунка наносит клей. Фальцовка (сложение) заготовки выполняется вдоль

предварительно сформированных линий сгиба. Процесс осуществляется посредством фальцевальных направляющих и системой вспомогательных штанг. Перемещение ящиков вдоль секции осуществляется с помощью тянущих верхних и нижних ремней. Формирование короба происходит со складыванием боковых панелей ящика вниз. Узел подсчета и формирования пачки, а также упаковочная машина предназначены для подсчета и обвязки пачек готовой продукции полипропиленовой лентой. С помощью изложенных в работе методов были определены основные печатные характеристики верхнего плоского слоя гофрокартона (тест-лайнера), установлены базовые углы отклонения относительно горизонтали, которые характеризуют эффект стиральной доски, появляющийся на гофрокартоне. Характеристики тест-лайнера, который является частью трехслойного гофрокартона марки В с шагом в 4,5 мм, представлена в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Характеристика тест-лайнера, произведенного на ОАО «Каравачево», верхнего слоя гофрокартона марки В с шагом 4,5 мм [126, 126, 173]

Наименование	Размерность	Значение
Количество слоев	шт.	2
Базовая длина	мкм	2500
Периметр	мм	8,09
Площадь исследуемого образца	мм ²	0,461
Площадь среза волокон	мм ²	0,306
Площадь пор	мм ²	0,155
Пористость	%	33,6
Толщина (максимальная)	мкм	243
Толщина (минимальная)	мкм	114
Толщина (по ср. линиям профилей)	мкм	181
Шероховатость по Ra	мкм	12,5
Шероховатость по Rz	мкм	20
Шероховатость по Rmax	мкм	61
Неоднородность формования (прибор Formation2D)	отн. ед	125

Для разработки системы онлайн-контроля, основанного на графической обработке символов, предложена система камер с высоким разрешением, установленных на держателе. Для получения цифровых изображений, напечатанных на картон с высоким качеством, камеры устанавливаются под секциями фальцовки загиба и склейки, чтобы разработанный программный алгоритм смог зафиксировать наличие брака после секций. Цифровые изображения напечатанных символов дважды проходят системы контроля, из которых первая находится после просекательно-рилевочной секции (рис. 5.1).

Практические рекомендации для ОАО «Каравеево» автоматической линии для производства картонных коробок (Модель 9РА-109/9FGT17 Формат: 660x1800) заключаются в разработке алгоритмов онлайн-контроля качества печати с учетом неравномерности структуры и микрорельефа многослойного картона «Каравеево».

5.2 Практические рекомендации по онлайн-контролю качества печати на гофрокартон

Результаты исследований микрорельефа подтверждают, что увеличение шероховатости коррелирует со снижением качества печати. В условиях производства необходимы объективные показатели, обеспечивающие быстрый и оперативный контроль качества нанесения печатного изображения. В качестве таких показателей могут выступать периметр и площадь напечатанного символа, которые зависят от микрорельефа целлюлозного композиционного материала и расхода используемой краски [124, 126].

Для оценки влияния широкого диапазона шероховатости были выбраны следующие целлюлозные композиционные материалы: глянцевая бумага ($Ra < 1$ мкм); офисная бумага ($Ra < 7$ мкм); плоский слой гофрокартона ($Ra < 12,5$ мкм); гофрокартон «В» с шагом 4,5 мм ($Ra < 40$ мкм), гофрокартон «С» с шагом 7,5 мм ($Ra < 80$ мкм), литая тара ($Ra > 80$ мкм). На основе данных о шероховатости и графически определенных значениях периметра и площади

символов были построены графики зависимости для трех различных режимов расхода чернил. Из рисунка 5.2 визуально можно наблюдать влияние расхода чернил на периметр и площадь напечатанного символа, это особенно выражено при высокой шероховатости поверхности. Построение графиков зависимости между шероховатостью, периметром и площадью символа с учетом требований заказчика позволяет установить предельные значения данных показателей, превышение которых квалифицируется как дефект продукции (рис. 5.3, 5.4).

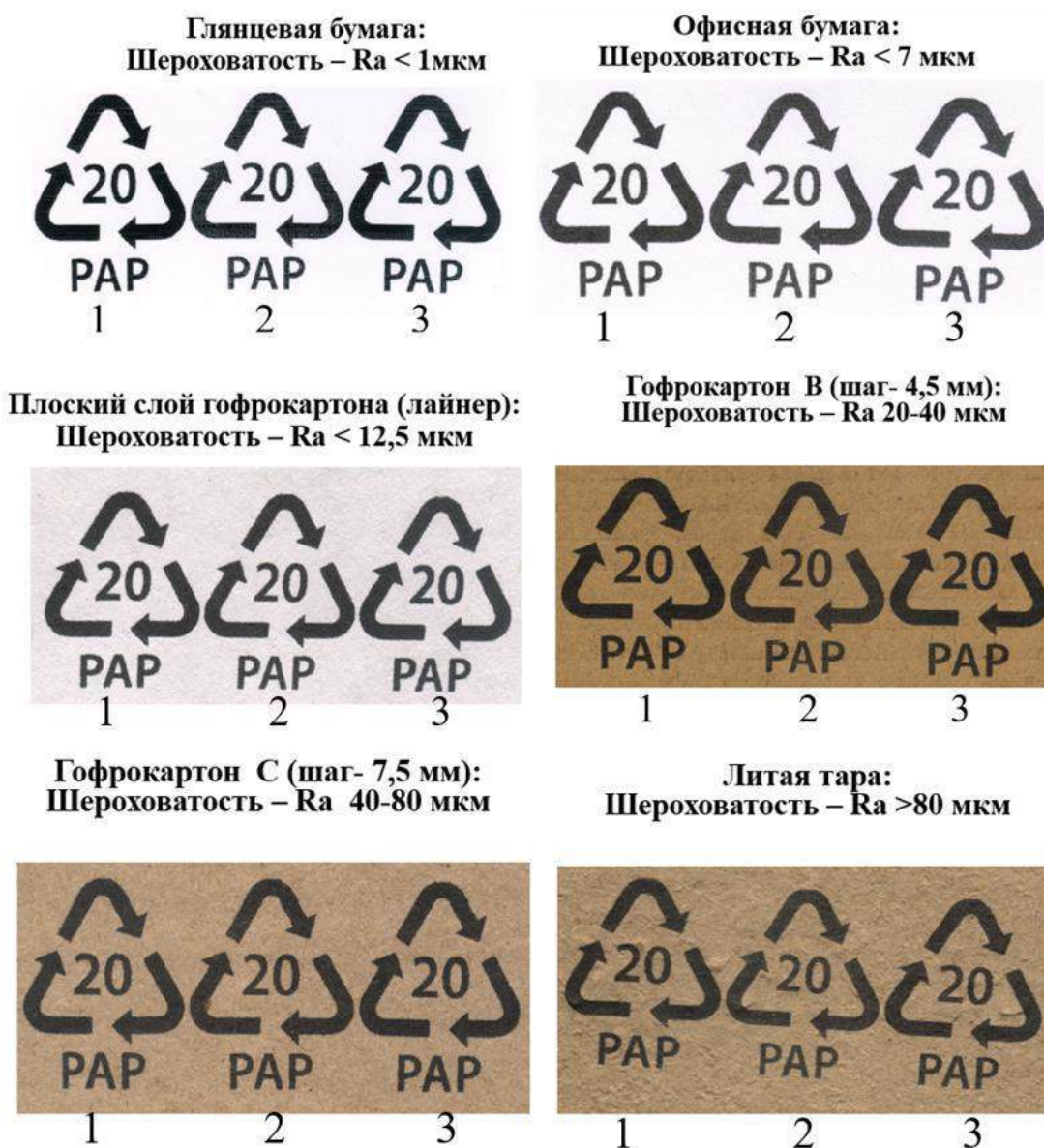


Рисунок 5.2 – Образцы с различной шероховатостью для графического определения значений периметра и площади символов при трех различных режимах расхода чернил: 1 – высокий расход; 2 – низкий расход; 3 – среднее значение расхода

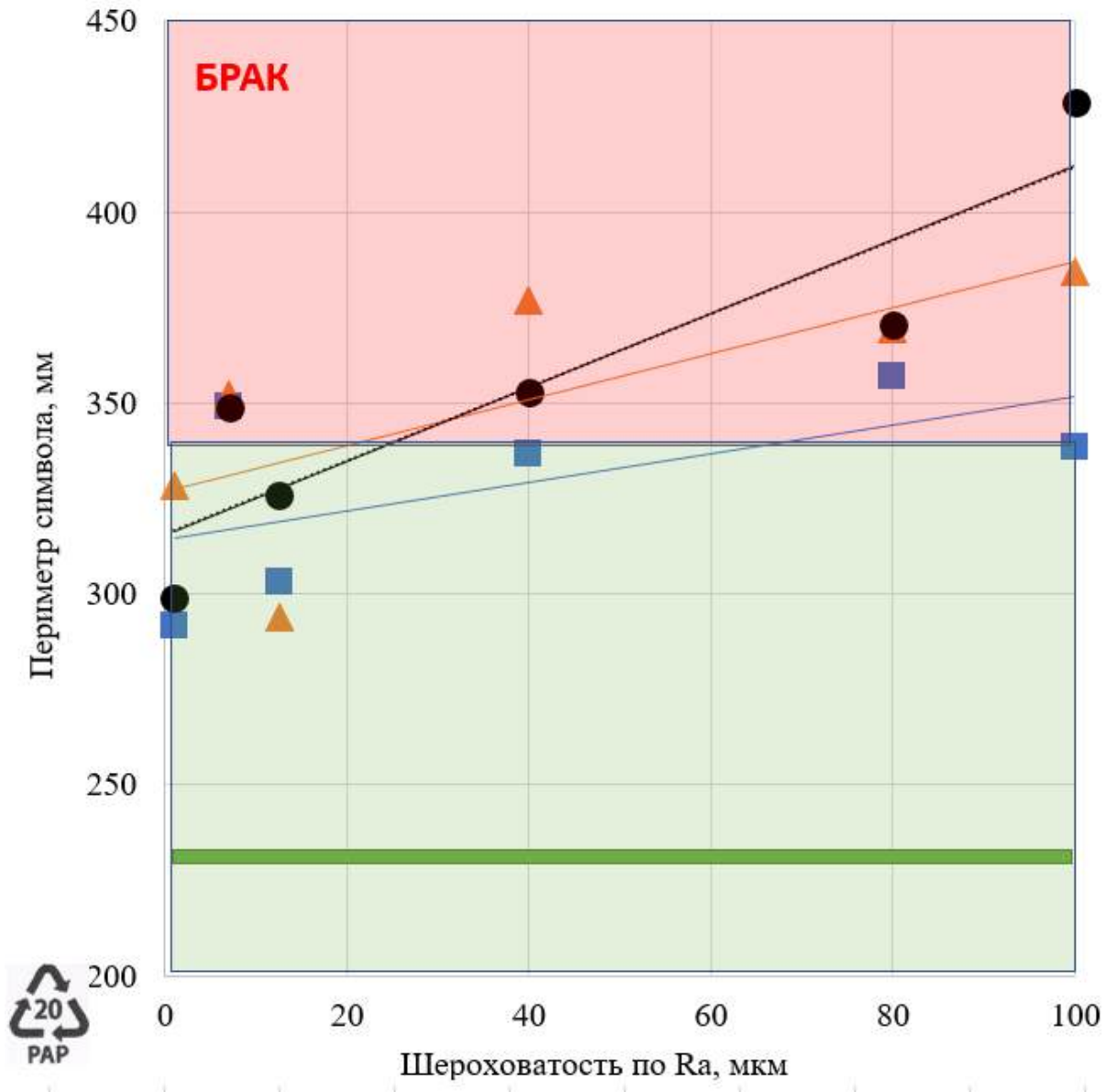


Рисунок 5.3 – Графики зависимости между шероховатостью и периметром, площадью символа с учетом требований заказчика

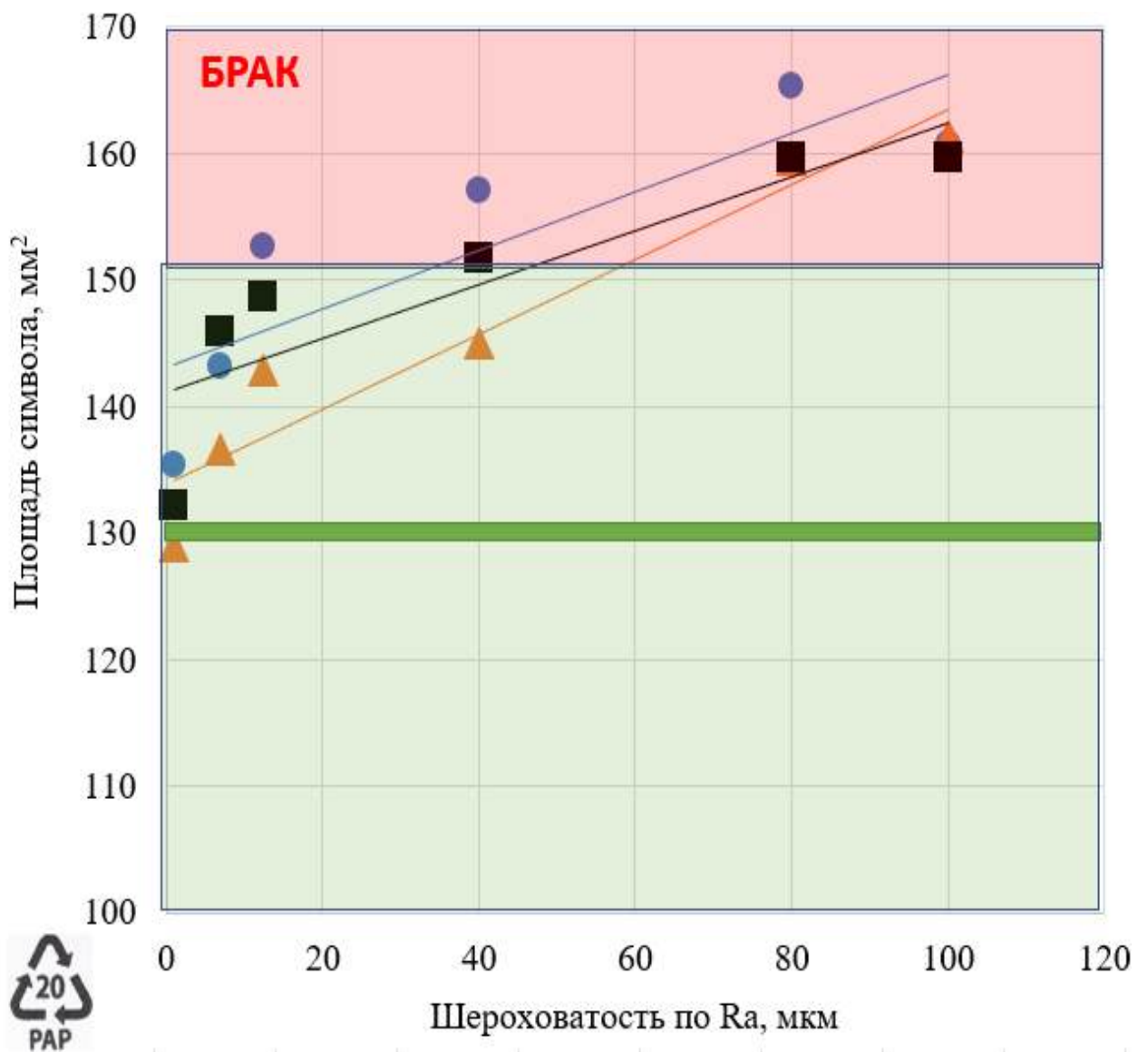


Рисунок 5.4 – Графики зависимости между шероховатостью и периметром, площадью символа с учетом требований заказчика

Из рисунка 5.4 следует, что увеличение шероховатости приводит к росту количества дефектных образцов во всех рассмотренных случаях. При превышении шероховатости в 40 мкм периметр напечатанного символа достигает 350 мм, что вызывает снижение его читаемости и, согласно критериям заказчика, является признаком брака. Аналогичный принцип может быть применен для контроля площади символа. Совместное использование данных показателей, в сочетании с оценкой пятнистости оттиска, может послужить основой для разработки системы оперативного контроля качества нанесения печатного изображения.

В таблице 5.3 представлены значения цветового охвата, полученного при оценке неравномерности оттиска, основанные на определении цветового различия, который позволяет оперативно получать результаты.

Таблица 5.3 – Цветовой охват символов из разных видов бумаги и картона при максимальном, минимальном и среднем расходе краски [119, 121]

№	Наименование образца	Цветовой охват, ед. цветов		
		низкий расход	высокий расход	среднее значение
1	Глянцевая бумага	2364	6637	4445
2	Офисная бумага	1955	4209	1999
3	Плоский слой гофрокартона	1540	1870	1730
4	Гофрокартон В (шаг 4,5 мм)	3096	5307	3237
5	Гофрокартон С (шаг 7,5 мм)	1734	2485	1748
6	Литая тара	1914	3353	3305
7	Эталон	3		

Критерии отнесения образцов к категории удовлетворительных или бракованных определяются заказчиком, в связи с чем границы красной и зеленой областей на графике могут варьироваться в зависимости от требований к качеству нанесения текста, выполненного мелким шрифтом. Исследуемые символы представляют собой калибровочные изображения, пригодные для захвата камерами в системе онлайн-контроля. Данная работа не содержит результатов определения пятнистости оттиска на основе цветового различия символов, для чего использовался метод, описанный в публикациях [51, 52].

Таким образом, в результате исследования микрорельефа картона с

высокой шероховатостью был предложен метод оценки, который, в отличие от стандартного способа, основанного на измерении объемного расхода воздуха через зазор между рабочим органом и поверхностью материала, обеспечивает возможность проведения измерений в диапазонах, не охватываемых существующими приборами. Данный метод также позволяет оценить однородность распределения толщины по размерам, демонстрируя конвергенцию результатов, полученных с помощью толщиномера, и результатов определения толщины графическим методом. В результате анализа были идентифицированы области (пустоты), которые учитываются при расчете физико-механических свойств картона, характеризующегося повышенной шероховатостью. Предлагаемый метод является дополнением к существующему стандартному способу определения шероховатости, диапазон измерения которого не превышает 5000 мл/мин, что соответствует шероховатости, определяемой по профилю более 12,5 мкм. Метод позволяет проводить оценку шероховатости плоского слоя гофрокартона, гофрированного картона и литой тары. Полученные зависимости шероховатости от периметра и площади нанесенного символа позволили разработать практические рекомендации по оценке и контролю качества продукции в режиме реального времени.

5.3 Экономическая целесообразность использования предлагаемой системы онлайн-контроля

Экономический эффект от внедрения системы онлайн-контроля за качеством нанесения печати индивидуальный в каждом случае. Цифры, приведенные в расчете, были взяты с предприятий, которые работают на минилайнерах ТСУ (Тайваньского производства). Несмотря на то, что компания-производитель один тот же, количество брака, которое образуется, разное. На рисунке 1.33 были представлены основные факторы, которые влияют на качество готовой продукции. В данном разделе следует уточнить год выпуска машины. Например, купленная автоматическая линия ОАО

«Каравасво» для производства картонных коробок (модель 9РА-109/9FGT17 Формат: 660x1800) была введена в эксплуатацию в 2011 году, такая же линия, того же формата модель 9РА-FGT введена в эксплуатацию на ООО «Фабрика Южуралкартон» в 2022 году.

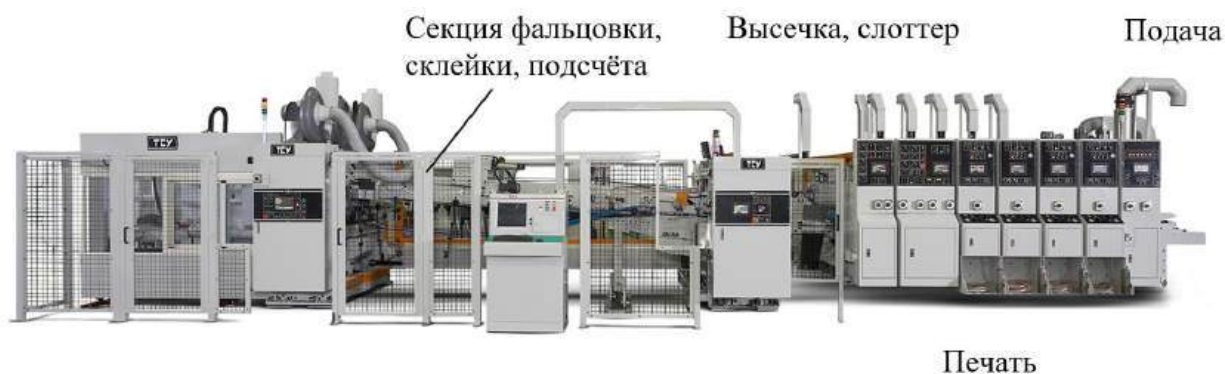


Рисунок 5.5 – Автоматическая линия для производства картонных коробок, модель 9РА-FGT, введенная в эксплуатацию в 2022 г. (ООО «Фабрика Южуралкартон») [174, 175]

За 11 лет производитель совершенствовал автоматическую систему контроля. Количество брака, которое образуется при выпуске продукции и связано с неравномерностью печати, будет отличаться. Например, линия, которая была установлена в 2011 году, сегодня по причине износа может работать с образованием до 3 % брака, а 2022 года – до 1,5 %. Эффект от внедрения системы онлайн-контроля будет выше в первом случае, при работе машины 2011 года, которых достаточно много на российских предприятиях. В условиях перепроизводства картона и отсутствия стабильного роста заказов на гофрокартон предприятия неохотно идут на обновление подобных линий.

При расчете экономической целесообразности внедрения системы будут приняты средние показатели на 2025–2026 гг. в условиях определенного предприятия. При перерасчете на другие фабрики экономический эффект будет отличаться.

В качестве исходных данных примем следующие:

1. Объем производства (V) – 19 200 000 м²/год.
2. Количество брака, образованного при работе автоматической линии, без учета коробок, прогоняемых линией для калибровки (С), – 3 %.

3. Количество брака в год, образованного при работе автоматической линии, без учета коробок, прогоняемых линией для калибровки (C_m), – 576 000 м².

4. Среднее значение площади трехслойного гофрокартона на одну коробку. Для коробки с размерами 600 × 400 × 400 мм из трехслойного гофрокартона формула примет вид:

$$S = (((600 + 400) \times 2 + 59) \times (400 + 400 + 8)) / 1000000 = 1,7 \text{ м}^2.$$

5. Стоимость одной коробки (Ц) – 30 руб.

6. Количество коробок в год, которое уходит в брак:

$$B = C_m / S = 576 \text{ 000} / 1,7 = 338 \text{ 824 шт.}$$

7. Количество сотрудников ОТК – 1 чел.

8. Средняя зарплата сотрудника ОТК в регионах – 70 000 руб/мес.

9. Количество коробок, взятых за смену сотрудником ОТК, для определения качества коробки – 10 шт.

10. Цена на макулатуру марки МС–5Б – 15 000 руб/т.

11. Целевой показатель снижения брака для линии, введенной в эксплуатацию в 2011 году, – на 1 %.

12. Принимаем, что весь брак обнаружен сотрудниками ОТК предприятия, возврата бракованных коробок от заказчика нет.

Стоимость системы для онлайн-контроля за качеством нанесения печати:

13. Камера с разрешением 4к – 70 000 руб. × 3 шт.

14. Материал для рамы (алюминиевые листы, вспененный ПВХ 5 мм, филомент (смола) – 100 000,00 руб.

15. Компьютер – 50 000,00 руб.

16. SMS месенджер – 30 000,00 руб.

17. Монтаж, доставка и пуско-наладочные работы – 25 000,00 руб.

18. Проект – 25 000,00 руб.

19. Сопровождение продления патента – 20 000,00 руб.

На основании вышеизложенных данных выполним расчет эффективности внедрения системы контроля качества печати. Для этого рассчитаем потери (П) от брака при текущей ситуации:

$$П = Б \times Ц = 338\,824 \times 30,00 \text{ руб.} = 10\,164\,720,00 \text{ руб./год}$$

Рассчитаем возврат макулатуры (брак идет на переработку). Вес 1 м² трехслойного гофрокартона составляет в среднем 400–600 г, принимаем 0,5 кг:

$$\text{Вес брака} = 576\,000 \text{ м}^2 \times 0,5 \text{ кг} = 288\,000 \text{ кг} = 288 \text{ т}$$

Снижение затрат на приобретение сырья (Э_{сырья}):

$$Э_{\text{сырья}} = 288 \times 15\,000,00 = 4\,320\,000 \text{ руб./год}$$

Реальные потери (РП) предприятия от брака без учета зарплаты ОТК будет составлять:

$$\begin{aligned} \text{РП} = \text{Потери} - \text{Экономия на сырье} &= 10\,164\,720,00 - 4\,320\,000,00 = \\ &= 5\,844\,720,00 \text{ руб./год} \end{aligned}$$

Рассчитаем затраты на ручной контроль ОТК:

Количество смен при 5 дневной рабочей неделе составляет 247 в год. На проверку в год идет $247 \times 10 = 2\,470$ штук, что составляет менее 0,001 % от общего объема производства предприятия. Фактически, ручной контроль не может обнаружить системный брак, но при этом затраты на сотрудника будут составлять:

$$\text{ЗП}_{\text{отк}} = (70\,000,00 + 30\% \text{ налоги}) \times 12 = 1\,092\,000,00 \text{ руб./год}$$

Текущий контроль ОТК не обеспечивает снижение брака, а формально производит проверку небольшой выборки производимой продукции.

Произведем расчет эффективности от внедрения системы онлайн-контроля:

Текущее количество брака производства составляет 3 %, требуется снизить количество брака до 2 %.

Рассчитаем снижение брака:

$$\text{в м}^2 \text{ получим} - \Delta V_{\text{брак}} = 19\,200\,000 \times 0,01 = 192\,000 \text{ м}^2$$

$$\text{в коробках} - \Delta Б = 192\,000 / 1,7 \approx 112\,941 \text{ шт.}$$

Экономия (Э) от снижения брака (валовая):

$$\text{Э} = 112\,941 \times 30 = 3\,388\,230 \text{ руб. / год}$$

Учтем, что часть бракованных коробок идет в макулатуру (но при снижении брака их станет меньше, поэтому продажа макулатуры снизится):

С учетом себестоимости переработки брака в сырье для производства (ориентировочная себестоимость 1 тонны возвратного сырья 20 000,00 руб./т):

$$\text{Э}_{\text{чист}} = 3\,388\,230 - (96 \times 20\,000,00) \approx 1\,468\,230 \text{ руб./год}$$

Для определения срока окупаемости рассчитаем стоимость системы контроля ($C_{\text{СК}}$):

$$C_{\text{СК}} = 70\,000,00 \times 3 + 100\,000,00 + 50\,000,00 + 30\,000,00 + 25\,000,00 + 25\,000,00 + 20\,000,00 = 460\,000,00 \text{ руб. капитальных затрат}$$

Эксплуатационные расходы принимаем 10% от капитальных затрат в год: $460\,000,00 \times 0,1 = 46\,000,00 \text{ руб./год}$

$$\text{Срок окупаемости} = 460\,000 / 1\,468\,230 \approx 0,31 \text{ года} = 3,7 \text{ месяца.}$$

Внедрение системы онлайн-контроля качества печати с капитальными затратами 460 000,00 руб. позволяет снизить брак на 1 абсолютный процентный пункт (с 3 % на 2 %), что дает годовое сокращение брака в 192 000 м², или 113 000 коробов. Чистая экономия предприятия с одной линии печати ТСУ (Модель 9РА-109/9FGT17 Формат: 660x1800), рассчитанная с учетом стоимости готовой продукции и возврата макулатуры на внутреннюю переработку по цене замещения сырья 15 000,00 руб./т, составляет порядка 1,9 млн. руб. в год. Срок окупаемости предлагаемого решения не превышает четырех месяцев.

Проект экономически обоснован, высокоэффективен и рекомендуется к реализации. Дополнительным эффектом является снижение нагрузки на сотрудника ОТК, переход от выборочного ручного контроля к сплошному автоматизированному контролю, а значит, повышение гарантии качества для заказчика.

Заключение и выводы

Таким образом, на основании проведенного критического анализа литературных источников была установлена общая тенденция к цифровизации методов оценки печатных свойств картона. В частности, графический способ оценки микроструктуры картона для прогнозирования и определения его печатных свойств используется при оценке неоднородности формования, шероховатости, пористости, толщины и равномерности ее распределения. Графическая обработка изображений микроструктуры обладает рядом преимуществ: определение неоднородности каждого слоя картона в отдельности; не ограничена толщиной картона (в отличие от оптических методов); позволяет точно определить все параметры шероховатости Ra , Rz , $Rmax$ благодаря выделению профиля поверхности; легко интегрируется в способ оценки шероховатости по профилю; пористость коррелируется с воздухопроницаемостью, при этом графический метод учитывает все поры (открытые, глухие и закрытые); по профилям верхнего и нижнего слоев с высокой точностью определяется эффективная толщина, а также графический метод позволяет установить равномерность распределения толщины в поперечном сечении.

Разработан и запатентован способ исследования микроструктуры для оценки параметров картона и устройство для его реализации. Устройство позволяет зафиксировать серию образцов картона перпендикулярно плоскости среза, что дает возможность получить высокого качества изображение микроструктуры поперечного среза картона. Метод и устройство позволили получить более 100 изображений 10 мм срезов, что позволило сопоставить существующий метод с методом графической обработки.

Была установлена закономерность в снижении неоднородности формования картона лайнера с увеличением количества слоев. Динамика уменьшения неоднородности в методах оптических приборов TECHPAP SAS F-SENSOR, изготовленном в Техническом центре исследования бумаги

Гренобля и «Анфор» (САФУ, РФ), коррелируется с предлагаемым графическим методом. При одинаковой массе метра квадратного в 120 грамм образцы, выполненные в 2 слоя, обладают большей однородностью на 22–25 % относительно однослойного образца. С появлением 3го и четвертого слоев неоднородность формования снижается не более чем на 5 %, согласно предлагаемому и сравниваемым методам. Большой объем экспериментальных данных по неоднородности формования с различными по природе волокнами картона и с различной оптической плотностью позволяют заключить, что метод может быть использован для оценки неоднородности картона.

Проведенные исследования шероховатости показали отсутствие корреляции предлагаемого метода, основанного на графической обработке поперечного среза, с методами, основанными на воздухопроницаемости. К этому логическому выводу пришли и другие авторы работ, представленные в литературных источниках. В данном случае графическая обработка микроструктуры позволила получить профили лицевых и нижних плоских слоев (лайнеров), что расширило диапазон измерений шероховатости бумаги по профилю поверхности. А именно, установлены данные шероховатости R_a , R_z , R_{max} для базовой длины 2500 мкм. Такая базовая длина позволяет оценивать шероховатость на уровне 12,5 мкм по R_a и 100 мкм по R_{max} . Кроме того, предложенный метод графической обработки позволяет учитывать и корректировать эффект «стиральной доски», который присутствует в гофрокартоне. Метод не ограничен в диапазоне измерений в отличие от метода Р. Бендтсена с максимально измеряемым значением 5000 мкм/с.

Установлена корреляция между воздухопроницаемостью и пористостью многослойного картона. Статистическая обработка данных позволила получить прямолинейную зависимость между воздухопроницаемостью и долей пустот в поперечном срезе многослойного картона. Коэффициент детерминации при сравнении двух методов в исследуемом диапазоне составил $R^2 = 0,93$, что говорит о достоверности разработанного метода.

Графическая обработка поперечного среза многослойного картона позволила установить разницу между стандартизированной и эффективной толщиной. Исследования показали, что стандартизированная толщина коррелируется на $R^2 = 0,99$ больше с максимальной толщиной, чем со средней (0,88). Разница между эффективной и стандартизированной толщиной дает неточность в оценке физико-механических свойств. Если физические свойства по стандартизированной и эффективной толщине отличались не более чем на 5 %, то некоторые из механических свойств (жесткость на изгиб) 115 % в машинном направлении. В большей степени физические свойства некорректно определяются для производственных образцов с высокой шероховатостью (отклонение составляет 22,1 %. Кроме того, графический способ оценки толщины позволяет установить равномерность ее распределения.

Полученные данные печатных свойств позволили выбрать наиболее информативные показатели при осуществлении онлайн-контроля за качеством нанесения печати, а именно: периметр и площадь напечатанного символа, которые зависят от микрорельефа целлюлозного композиционного материала и расхода используемой краски, а также цветовое отличие, которые необходимо будет сравнить со значениями эталонных образцов.

Выводы по работе:

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 целлюлозного композиционного материала.

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 формования) 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 «Караваево» сокращает брак на 192 000 м² картона. Экономия с одной линии печати составляет около 1,9 млн. руб./год. Срок окупаемости предлагаемого технического решения не превышает четырех месяцев.

Список литературы

1. Hooke, R. *Micrographia* // London. J. Martyn and J. Allestry, 1665. Pp. 246.
2. Neumann, M. Capturing Centimeter-Scale Local Variations in Paper Pore Space via μ -CT: A Benchmark Study Using Calendered Paper Neumann M., Charry E. M., Baikova E., Hilger A., Hirn U., Schennach R., Manke I., Schmidt V., Zojer K. - DOI 10.1017/S1431927621012563.- Text : electronic // *Microscopy and Microanalysis*. - 2021. - №. 27. - Pp. 1305–1315. - URL: <https://academic.oup.com/mam/article/27/6/1305/6951634> (дата обращения: 19.09.2025).
3. Iacoviello, F. Microstructure analysis and image-based modelling of face masks for COVID-19 virus protection / Iacoviello F., Du W., Fernandez T., Loureiro R., Brett D. J. L., Shearing P. R., – DOI 10.1038/s43246-021-00160-z. - Text : electronic // *Communications materials*. - 2021. - №. 2. - Pp. 69–79. - URL: <https://www.nature.com/articles/s43246-021-00160-z>. (дата обращения: 25.09.2025).
4. Afrookhteh, S. S. Stochastic reconstruction of carbon fiber paper gas diffusion layers of PEFCs: A comparative study / Afrookhteh S. S., Jamali J., Shakeric M., Baniassadi M., - Text : electronic // *Energy Equimen and System*. - 2018. - №. 1 (6). - Pp. 51–59. – URL: https://www.researchgate.net/publication/324213831_Stochastic_reconstruction_of_carbon_fiber_paper_gas_diffusion_layers_of_PEFCs_A_comparative_study. (дата обращения: 27.09.2025).
5. Borodulina, S. Constitutive modeling of a paper fiber in cyclic loading applications / Borodulina S., Kulachenko A., Tjahjanto D. D., - DOI 10.1016/j.commatsci.2015.08.039. - Text : electronic // *Computational Materials Science*. - 2015. - №. 110. - Pp. 227–240. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927025615005480>. (дата обращения: 19.10.2025).
6. Serebrennikova, A. Physics informed neural networks reveal valid models for reactive diffusion of volatiles through paper / Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K., -DOI 10.1016/j.ces.2023.119636. – Text: electronic // *Chemical Engineering Science*. - 2024. - № 285. - Pp. 12. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250923011922>. (дата обращения: 12.05.2024).

7. Serebrennikova, A. Transport of Organic Volatiles through Paper: Physics Informed Neural Networks for Solving Inverse and Forward Problems / Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K. – DOI 10.1007/s11242-022-01864-7. -Text : electronic // Transport in Porous Media. - 2022. - № 1 (145). - Pp. 589–612. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11242-022-01864-7>. (дата обращения: 19.09.2025).

8. Neumann, M. Capturing Centimeter-Scale Local Variations in Paper Pore Space via μ -CT: A Benchmark Study Using Calendered Paper / Neumann M., Charry E. M., Baikova E., Hilger A., Hirn U., Schennach R., Manke I., Schmidt V., Zojer K. - DOI 10.1017/S1431927621012564. Text : electronic // Microscopy and Microanalysis. Cambridge. - 2021. - № 27. - Pp. 1–11. - URL: <https://academic.oup.com/mam/article/27/6/1305/6951634>.

9. Leitl, P. Joint Distributions of Local Pore Space Properties Quantitatively Explain Simulated Air Flow Variations in Paper / Leitl P., Charry E. M., Baikova E., Neumann M., Hirn U., Schmidt V., Zojer K. – DOI 10.1007/s11242-023-01964. – Text : electronic // Transport in Porous Media. - 2021. - № 148. - Pp. 627–648. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11242-023-01964-y>. (дата обращения: 05.04.2025).

10. Song, S. A filler distribution factor and its relationship with the critical properties of mineral-filled paper / Song S., Yuan S., Zhang M., Li L., Yang B., Nie J., and Lu Z. – DOI 10.15376/biores.13.3.6631-6641. - Text: electronic // BioResources. - 2018. - № 13(3). - Pp. 6631-6641. – URL: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/a-filler-distribution-factor-and-its-relationship-with-the-critical-properties-of-mineral-filled-paper/>

11. Стандартный денситометр Герлея / ОЛЛЕНПРО: Приборы для испытания материалов : [сайт]. – URL: <https://ollen.pro/shop/gycobel/standard-densometer-gurley/?ysclid=1wku8njtx4234457663>– Текст: электронный. (дата обращения: 20.07.2025).

12. T 541 Om-05 / ANSI WEBSTORE : [website]. - URL: <https://webstore.ansi.org/standards/tappi/541om05> Текст: электронный. (date accessed: 10.08.2025).

13. Bollstrom, R., Paper Substrate for Printed Functionality / Bollstrom R., Toivakka M. – DOI 10.15376/frc.2013.2.945. - Text : electronic // Materials Science. Cambridge. - 2013. - № 15. Pp. 945–966. – URL: https://www.researchgate.net/publication/262522685_Paper_substrate_for_printed_functionality. Текст: электронный. (дата обращения: 10.06.2025).

14. TAPPI T 555 OM-2010 Roughness of paper and paperboard (Print-surf method). 2010.

15. Richard, E. M. Handbook of physical testing of paper / Richard E. M., Hanberger C. C., Borch J., Bruce L. M.; New York. - CRC Press. 2012. - 1040 p. - ISBN 9780429178474. – Text: direct.

16. Tojaga, V. Modeling multi-fracturing fibers in fiber networks using elastoplastic Timoshenko beam finite elements with embedded strong discontinuities – Formulation and staggered algorithm/ Tojaga V., Kulachenko A., Östlund S., Christian T. - DOI 10.1016/j.cma.2021.113964. - Text: electronic // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2021. - №. 384. - Pp. 1-18. URL: https://www.researchgate.net/publication/352244004_Modeling_multi-fracturing_fibers_in_fiber_networks_using_elastoplastic_Timoshenko_beam_finite_elements_with_embedded_strong_discontinuities_-_Formulation_and_staggered_algorithm (дата обращения: 10.06.2025).

17. Wicht, D. Anderson-accelerated polarization schemes for fast Fourier transform-based computational homogenization / Wicht D., Schneider M., Böhlke T. – DOI 10.1002/nme.6622. - Text : electronic // International Journal for Numerical Methods in Engineering. - 2021. - №. 122. - Pp. 287–231. – URL: https://www.researchgate.net/publication/348367205_Anderson-accelerated_polarization_schemes_for_fast_Fourier_transform-based_computational_homogenization (дата обращения: 11.06.2025).

18. Lin, B. Data-driven microstructure sensitivity study of fibrous paper materials / Lin B., Bai Y., Xu B.-X. - Text : direct// Materials and Design. - 2021. - No. 197. - Pp. 1–10. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520307280> (дата обращения: 11.06.2025).

19. Лебедев, И. В. Характеристика структурно-размерных свойств волокон хвойной сульфатной целлюлозы с применением статистического моделирования / И. В. Лебедев, Я. В. Казаков. – Текст: непосредственный // Хвойные бореальной зоны. 2016. – Т. XXXVII, № 5-6. – С. 333–337.

20. Лебедев, И. В. Моделирование структуры бумажного листа / И. В. Лебедев, Я. В. Казаков. – Текст: непосредственный // Лесной журнал. – 2017. – № 2/356. – С. 160–172.

21. Лебедев, И. В. Методы анализа волокнистых структур с применением численных методов 3D моделирования / И. В. Лебедев, Я. В. Казаков. – Текст: непосредственный // Макулатура как основополагающее сырье в развитии производства бумажно-картонной, гофрокартонной продукции. Новые технологии, оборудование, экология на производствах ЦБП: сб. матер. и докл. 14-й Междун. науч.-техн. конф., 23-24 мая 2013 г., Караваево. – С. 98–104.

22. Лебедев, И. В. Алгоритмы создания 3D модели целлюлозного волокна / И. В. Лебедев, Я. В. Казаков. – Текст: непосредственный // Использование и разработка инновационных экологически безопасных технологий переработки макулатуры при производстве всего спектра бумажно-картонной продукции: сб. матер. и докл. 15-й Междун. науч.-техн. конфер, 29-30 мая 2014 г., Караваево. С. 59–67.

23. Kazakov, Ya. 3D-modelling of cellulose fibers. Progress in Paper / Kazakov Ya., Lebedev I., Guriev, T. - Text: electronic // Physics Seminar 2016. Conference Proceedings, Darmstadt. - 2016. - Pp. 189–192.

24. Moralis, F.P. 3D fiber models to simulate and optimize tissue materials / Moralis F.P, Carta A.M., Amaral M.E., Curto M.R. - DOI: 10.15376/biores.15.4.8833-8848. - Text: direct// Bioresources 2020. - No. 15. - Vol

4. - Pp 8833-8848. – URL: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/3d-fiber-models-to-simulate-and-optimize-tissue-materials/>

25. Moralis F.P, Carta A.M., Challenges in computational materials modelling and simulation: A case-study to predict tissue paper properties. Helion. 2020. No 8. 12 p.

26. Richard, E. Handbook of physical testing of paper / Richard E. M., Hanberger C. C., Borch J., Bruce L. M. - New York. - CRC Press, - 2012. - 1040 p. – ISBN 9780429178474.

27. Патент № 2723972 РФ. Способ подготовки поперечного среза для контроля параметров целлюлозосодержащего материала: Бюл. № 17: опублик. 18.06.2020 / Мидуков Н. П., Куров В. С., Смолин А. С., Сомов П. А. – 22 с. – Текст: непосредственный.

28. Куров, В. С. Диспергирование бумажной массы и равномерность многослойного картона / В. С. Куров, Н. П. Мидуков, Ю. А. Тихонов. – СПб. 2024. – С. 245. – Текст: непосредственный.

29. Патент № 2795190 РФ. Способ подготовки микроструктуры для контроля параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала: Бюл. № 17. опублик. 02.05.2023 / Мидуков Н. П., Куров В. С., Литвинов М. А., Зильберглейт М. А. – 15 с. – Текст: непосредственный.

30. Midukov N.P., Kurov V.S. Evaluation of the formation quality of multilayer fiber composite material according to cross-sectional cut microstructure / Fibre Chemistry. - 2021. - №2. – Vol. 53. – Pp. 115-119.

31. Литвинов, М.А., Тужилов Д.Р., Мидуков Н.П., Куров В.С. Новый подход к оценке связеобразования волокон в бумаге и картоне / Вестник СПбГУПТД. - 2020. - №2. - С.101-106.

32. Литвинов М.А., Тужилов Д.Р., Яндушкина М, Мидуков Н.П., Куров В.С. Инновационные технологии в исследовании микроструктуры многослойных волокнистых материалов / Известия высших учебных заведений. Промышленные технологии. – 2020. - №3. - С 45-53.

33. Norman, B., Söderberg, D. The science of papermaking. ed XII . Manchester: Res. Symp. Oxford. 2001. 431–558 p.

34. Al-Qararah, A., Ekman, A., Hjelt, T., Kiiskinen, H., Timonen, J., Ketoja, J. Porous structure of fibre networks formed by a foaming process: a comparative study of different characterization techniques // Journal of microscopy. 2016. № 00. Pp. 1–14.

35. Lindblad, G. The Ultrasonic Measuring echnology on Paper and Board. / Lindblad, G., Filrst, T. – 9197378100 ed. - Sweden: Lorentzen and Wettre. – 2001. – 100 p.

36. 2D FSensor – Lab formation Sensor // Techpap. Innovation for paper. URL: <http://www.techpap.com/lab-formation-sensor,lab-device,6.html> (date accessed: 07.03.2025).

37. Патент № 2 463 578 РФ. Способ контроля анизотропии углового распределения волокон в структуре плоского волокнистого материала: Бюл. № 28: опубл. 10.10.2012 / Шляхтенко П. Г., Нефедов В. П., Ветрова Ю. Н., Рудин А. Е. Сухарев П. А. – 12 с. – Текст: непосредственный.

38. Патент № 9066 Беларусь. Способ определения показателя фрактальной размерности поверхности бумаги / Кулак М. И., Медяк Д. М.; опубл. 30.04.2007. – Текст: непосредственный.

39. Патент № 224994 РФ. Оптическая контролирующая система для производства сигаретной бумаги: опубл. 27.02.2004. / Бокелман Г. Г., Флетчер Т. А., Фэн Д. Э., Шай Эу-Хва, Рейнолдс Б. Ч., Хаук Э. С. –30 с. – Текст: непосредственный.

40. Патент № 236932 РФ. Способ контроля качества бумажного полотна в процессе его производства и устройство для контроля качества бумажного полотна в процессе его производства: Бюл. № 25: опубл. 10.09.2009 / Трачук А. В., Курятников А. Б., Чеглаков А. В., Солдатченков В. С., Круликовский А. В., Филинов Д. А., Чернопятков А. В., Цветков А. В., Бобрович П. К., Юренев А. В., Журавлева И. В. – 9 с.

41. Pat. № 4857747 USA. Method and apparatus for analyzing the formation of a web of material via generating a formation index: №. 07/159,830: publ. 1989. Bolton J. A., Harbaugh S. K. 7 p. – Text : direct.

42. Pat. № 6301373 USA. Paper quality determination and control using scale of formation data: №. 09/164,562: publ. 2001. Bernie J. P., Douglas M. 31 p. – Text: direct.

43. Измерение качества бумаги и картона // Дзен. – URL: <https://dzen.ru/a/ZWcYUGVLb0k6k-0w>– Текст: электронный. (дата обращения: 12.10.2025).

44. Pat. № 5047652. USA System for on-line measurement of color, opacity and reflectance of a translucent moving web: №. 509,589: publ. 1991. Lisnyansky K., Hubbe A. 14 p. – Text: direct.

45. Патент № 2427823 РФ. Способ определения прозрачности плоских светопропускающих запечатываемых материалов: Бюл. № 24: опублик. 27.08.2011 / Виноградов Е. Л., Тропец В. А. – 6 с. – Текст: непосредственный.

46. M/K Systems Model 1200 Formation Tester // mksystems.com. URL: <https://mksystems.com/mk-3d-formation-analyzer/> (date accessed: 13.07.2025).

47. Патент № 2 294997 РФ. Оптико-электронная система для настройки и диагностики технического состояния бумагоделательных машин (варианты): Бюл. № 7: опублик. 10.03.2007 / Вилюкотный М. А., Семин С. С., Яковлев С. В. – 8 с. – Текст: непосредственный.

48. Pat. № 4513441 USA. Image comparison system: №. 06/519,736: publ. 1985. Henshaw P. D. 11 p. – Text: direct.

49. Pat. № 5684707 USA. Apparatus and method for analyzing paper surface topography: №. 08/514622: publ. 1997. Rogowski D. F. 15 p. – Text : direct.

50. José, F. C. Determination of paper formation by Fourier analysis of light transmission images/ José F. C., Josep P. - Text : direct // Appita Journal. - 2001. - Vol. 54. - No 2. - Pp. 103–115. – URL: https://www.researchgate.net/publication/287605229_Determination_of_paper_formation_by_Fourier_analysis_of_light_transmission_images. (дата обращения: 12.09.2025).

51. Зильберглейт М. А. Оценка устойчивости показателей неоднородности бумаг для полиграфии / Зильберглейт М.А., Марченко И.В., Старченко О.П., Нестерова С.В. –DOI 10.32864/polymmattech-2021-7-4-24-32. Текст: непосредственный // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – № 4. – С. 24–32.

52. Зильберглейт, М. А. Сравнительная оценка методов анализа размера пор барьерных бумаг / М. А. Зильберглейт, В. И. Темрук, Т. А. Лобан. – Текст: непосредственный // Полимерные материалы и технологии. – 2020. – № 3. – С. 29–37.

53. Зильберглейт, М. А. Применение пакета ImageJ для обработки изображений, полученных электронной сканирующей микроскопией (на примере анализа бумаги) / М. А. Зильберглейт, В. И. Темрук. – Текст: непосредственный // Полимерные материалы и технологии. – 2017. – № 1. Т. 3. – С. 71-74.

54. ГОСТ 30022.2–93. Бумага и картон. Метод определения шероховатости (метод с применением пропускания воздуха). / Метод Бендтсена. - Минск: Изд-во стандартов, 1999. – 7 с.

55. ISO 8791–3:2005. Paper and board – Determination of roughness/smoothness (air leak method) – Part 3: Sheffield method. – Switzerland, 2005. - 11 с. (in Eng.). - Text: direct. (дата обращения: 13.09.2025).

56. ГОСТ 12795–89. Бумага и картон. Метод определения гладкости по Бекку. - М.: Изд-во стандартов, 1989. - 7 с.

57. ISO 8791–4:2008-05. Бумага и картон. Определение шероховатости/гладкости (методы определения воздухопроницаемости). – Ч. 4: Метод испытания печатной поверхности. – Швейцария: Изд-во стандартов, 2007. – 26 с.

58. Всё о бумаге. – URL: <https://www.vseobumage.ru/1140/izmerenie-kachestva-bumagi-i-kartona/> – Text : electronic. (дата обращения 15.02.2025).

59. ГОСТ 2789–73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М. : Изд-во Стандартформ, 2006. – 7 с.

60. Кирсанкин, А.А. Изучение топографии материалов на целлюлозной основе методом атомно-силовой микроскопии / Кирсанкин А.А., Михалева М.Г., Политенкова Г.Г., Никольский С.Н., Стовбун С.В. – Текст: непосредственный // Лесной вестник. – 2018. – № 1 (22). – С. 88–93.

61. Midukov, N.P. New concepts accounting for variations in the formation of multilayer fiber composite materials / Midukov N.P., Kurov V.S., Litvinov M.A., Kazakov Y.V. – Text : direct // Fibre Chemistry. – 2021. – № 2(53). – 94–99 pp.

62. Midukov, N.P. Investigation of transverse section of multi layered paperboard by ion cutting technique / Midukov N.P., Kazakov Ya.V., Heineman S., Kurov V.S., Smolin A.S. – Text : direct // Fiber Chemistry. – 2020. – № 1(52). – 51–57 pp.

63. Абрамова, В. В. Оценка равномерности формования макроструктуры офисной бумаги / В. В. Абрамова, А. В. Гурьева. – Текст: электронный // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2017. – № 4. – С. 172–186.

64. Rosalen, S. Analysis of roughness measurements of coated cardboards / S. Rosalen, J. Backhaus. – Text: direct // Tappi Virtual. – 2021. – № 1. – 14 p.

65. Михалёва, М.Г. Анализ шероховатости поверхности целлюлозно-бумажных материалов прямым и косвенным методами / М. Г. Михалева, Д. Н. Втюрина, С. Ю. Сарвадий, С. Н. Никольский, С. В. Стовбун, Н. В. Жолнерович, Н. А. Герман, И. В. Николайчик. – Текст: электронный // Труды БГТУ. – Серия 2. – 2019. – № 1. – С. 67–71.

66. Бабаханова, Х. А. Анализ зависимости качества продукции от поверхностных свойств бумаги и параметров печати / Х. А. Бабаханова, З. К. Галимова, И. Г. Громыко. – Текст: непосредственный // Труды БГТУ. Сер. 4. – 2022. – №1. – С. 5–13.

67. Juric, I. Influence of the surface roughness of coated and ancoated papers on the digital print mottle/ Juric I., Randelovich D., Karlovich I., Tomic I. – Text: electronic // Journal of graphic engineering and design. – 2014. – № 1(5). – 23 p.

68. Brandwein, M. Mitigation of biofilm formation on corrugated cardboard fresh produce packaging surfaces using a novel thiazolidinedione derivative Integrated in acrylic emulsion polymers / Brandwein M., Al-Quntar A., Goldberg H., Mosheyev G., Goffer M., Marin-Iniesta F., López-Gómez A. and Steinberg D. – Text: electronic // *Frontiers in Microbiology*. – 2016. – № 59 (7). – 9 p.
69. Christophliemk, H. Surface analyses of thin multiple layer barrier coatings of poly (vinyl alcohol) for paperboard / Christophliemk H., Bohlin E., Emilsson P., Järnström L. – Text : electronic // *coatings 2023*. – № 13(1). – 21 p.
70. Sirviö, P. Effect of roughness of low-grammage coated papers on print quality in color electrophotography / Sirviö P., Backfolk K. – Text : electronic // *J. Imaging Sci. – Technol.* – 2008. – № 1(52). – 9 p.
71. Фляте, Д.М. Свойства бумаги. – 5-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2012. – 384 с.
72. Кларк, Дж. Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка ее на бумагу, методы испытаний). – М.: Лесная промышленность, 1983. – 456с.
73. Gigac, J. Comparison of capillary flow porometry and mercury intrusion porosimetry in determination pore size distribution of papers / Gigac J., Stankovska M., Fiserova M. – Text : electronic // *Wood Research*. – 2017. – № 62 (4). – Pp. 587-596.
74. Jang, E.-S. Comparison of the mercury intrusion porosimetry, capillary flow porometry and gas permeability of eleven species of Korean wood / Jang E.-S., Kan C.-W., Jang S.-S. – Text : electronic // *J. Korean Wood Sci. Technol.* – 2018. – 46 (6). – Pp. 681-691.
75. Агеев, М.А. Изучение пористой структуры бумажного полотна при прессовании / Агеев М.А., Шаклеин А.С. – Текст: электронный // *Химия растительного сырья*. – 2014. – №3. – С. 265-269.
76. Hannun, J.A. Fines effect on gas flow in sandy sediments using μ CT and pore networks / Hannun J.A., Al-Raoush R.I., Jarrar Z.A., Alshibli K.A., Jung J. –

Text : electronic // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2022. – Vol. 108. – 14 p.

77. Карабутов, А.А. Измерение пористости бумаги оптико-акустическим методом / Карабутов А.А., Пеливанов И.М., Подымова Н.Б. – Текст: электронный // Акустический журнал. – 2005. – № 5 – Т. 51. – С. 652-657.

78. Патент 2650710 Российская Федерация. Способ определения пористости бумаги: № 2017102956 : заявл. 27.01.2017 : опубл. 17.04.2017 / Михайлова Г.Н., Фоминых И.М., Пазникова С.Н., Косарева М.А. – Текст: электронный.

79. Зильберглейт М.А. Сравнительная оценка методов анализа размера пор барьерных бумаг / Зильберглейт М.А., Темрук В.И., Лобан Т.А. и др. – Текст: электронный // Полимерные материалы и технологии. – 2020. – № 3. – С. 29–37.

80. ISO 8791-2:2013. Бумага и картон. Определение шероховатости/гладкости (методы прохождения воздуха). – Часть 2. – Метод Бендтсена, 2013. – 22 с.

81. ISO 5636-5-2013. Бумага и картон. Определение воздухопроницаемости (средний диапазон измерения). – Часть 5. – Метод Герлея, 2013. – 18 с.

82. ISO 5636-4-2005. Бумага и картон. Определение воздухопроницаемости (средний диапазон измерения). – Часть 4. – Метод Шеффилда, 2005. – 20 с.

83. Мидуков, Н.П. Сравнительная оценка микроструктуры бумаги с помощью программ ImageJ и AutoCAD / Мидуков Н.П., Куров В.С., Литвинов М.А., Зильберглейт М.А. – Текст: непосредственный // Вестник СПбГУПТД. – 2022. – №1. – С.110–113.

84. Литвинов, М.А. Инновационные технологии в исследовании микроструктуры многослойных волокнистых материалов / Литвинов М.А., Тужилов Д.Р., Яндушкина М.А. и др. – Текст: непосредственный // Вестник

Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна.
– Серия 4: Промышленные технологии. – 2020. – № 1. – С. 83-88.

85. Мидуков, Н.П. Влияние микроструктуры картона на его механические свойства / Мидуков Н.П., Куров В.С. – Текст: непосредственный // Химия растительного сырья. – 2021. – № 4. – С. 361–371.

86. Мидуков, Н.П. Теоретические основы производства многослойного картона из макулатуры / Мидуков Н.П., Куров В.С. – Текст: непосредственный // СПб: Вузиздат. – 2021. – 359 с.

87. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Гонсалес Р., Вудс Р. – Текст : электронный // М.: Техносфера. – 2012. – 1072с.

88. Serebrennikova, A. Physics informed neural networks reveal valid models for reactive diffusion of volatiles through paper/ Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K. – Text : electronic // Chemical Engineering Science. – 2024. – № 285. – 12 p.

89. Serebrennikova, A. Transport of Organic Volatiles through Paper: Physics-Informed Neural Networks for Solving Inverse and Forward Problems / Serebrennikova A., Teubler R., Hoffellner L., Leitner E., Hirn U., Zojer K. – Text : electronic // Transport in Porous Media. – 2022. – № 1 (145). – Pp. 589–612.

90. Matthias, N. Capturing Centimeter-Scale Local Variations in Paper Pore Space via μ -CT: A Benchmark Study Using Calendered Paper/ Matthias N., Eduardo M. C., Baikova E., Hilger A., Hirn U., Schennach R., Manke I., Schmidt V., Zojer K. – Text : electronic // Microscopy and Microanalysis. – Cambridge. – 2021. – № 27. – Pp. 1–11.

91. Leitl, P. Joint Distributions of Local Pore Space Properties Quantitatively Explain Simulated Air Flow Variations in Paper / Leitl P., Eduardo M.C., Baikova E., Matthias N., Hirn U., Schmidt V., Zojer K. – Text : electronic // Transport in Porous Media. – Cambridge. – 2021. – № 148. – Pp. 627 – 648.

92. Lipponen, J. Novel method for quantitative starch penetration analysis through iodine staining and image analysis of cross-sections of uncoated fine paper/

Lipponen J. – Text: electronic // Nordic Pulp & Paper Research Journal. – 2004. – Vol. 19. – Pp. 300 - 308.

93. Aslannejad, H. Characterizing the hydraulic properties of paper coating layer using FIBSEM tomography and 3D pore-scale modeling / Aslannejad H., Hassanizadeh S.M., Raof A., de Winter D.A.M, Tomozeiu N., van Genuchten M.Th. – Text: electronic // Chemical Engineering Science. – 2017. – Vol. 160. – Pp 275-280.

94. Marulier, C. 3D analysis of paper microstructures at the scale of fibres and bonds/ Marulier C., Dumont P.J.J., Orgeas L.et al. – Text: electronic // Cellulose. – 2015. – Vol. 22. – Pp. 1517–1539.

95. ГОСТ Р ИСО 534 – 2012 Бумага и картон. Определение толщины, плотности и удельного объема. – М: Стандартинформ. – 2014. – 15 с.

96. Ода, М. Жесткость бумаги, Ч. 1 Субъективные оценки жесткости и определение жесткости по Кларку перевод Руф Л.Е / Ода М., Кадоя Т., Усуда М., Кимура М. – Text: electronic // Japan TAPPI. – 1979. – № 3. – Т. 33. – Pp. 35-40.

97. Белоглазов, В. И. Анизотропия деформативности и прочности тарного картона и методы ее оценки / Белоглазов В. И., Гурьева А. В., Комаров В. И. – // Архангельск : Издательство АГТУ. – 2005. – 252 с.

98. Фляте, Д.М. Технология бумаги: учебник для вузов./ Фляте Д.М. – Текст : электронный // М.: Лесная промышленность. – 1988. – 440 с.

99. Комаров, В. И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов / В. И. Комаров. – Архангельск: АГТУ, 2002. – 440 с. – Текст: непосредственный.

100. ГОСТ 30435-96. Определение жесткости при изгибе статическими методами. – Минск: МССМС. – 2001. – 8 с.

101. ГОСТ 13525.1-79. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Методы определения прочности на разрыв и удлинения при растяжении. – М: Стандартинформ. – 2007. – 5 с.

102. Cagnon, T. of the Structure of Paper Support in Gas Transfer Properties of Protein-Coated Paper / Cagnon T., Guillaume C., Gastaldi E., Gontard N. – Text: electronic // Journal of Applied Polymer Science. – 2013. – № 130(4). – Pp. 2848–2858.

103. Wiltsche, M. Automated serial sectioning applied to 3D paper structure analysis / Wiltsche M., Donoser M., Kritzing J., Bauer W. – Text: electronic // Journal of Microscopy. – Vol. 242. – Pt. 2. – 2011. – Pp. 197–205.

104. Куров, В. С. Диспергирование бумажной массы и равномерность многослойного картона: [монография] / В. С. Куров, Н. П. Мидуков, Ю. А. Тихонов; М-во науки и высшего образования РФ, С.-Петерб. гос. ун-т пром. технологий и дизайна, Высш. шк. технологии и энергетики. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. – 245 с.

105. Толивер-Нигро Х. Технологии печати: учеб. пособие для вузов / Пер. с англ. Н. Романова. – М.: ПРИНТ-МЕДИА центр. 2006. – 232 с.

106. Техника флексографской печати: Учебное пособие / Пер. с нем. под ред. В. П. Митрофанова. – М.: Изд-во МГУП «Мир книги». 1997. – 202 с.

107. Статьи «Гофромир». – URL: <https://spb.gofromir.ru/blog/articles/> (дата обращения: 20.03.2026). – Текст: электронный.

108. Замечательная статья о том, как приручить краску «Gofro.expert» – URL: <https://упаковка.jofo.me/1843452-zamechatelnaya-statya-o-tom-kak-priruchit-krasku-gofro-expert.html> (дата обращения: 20.03.2026). – Текст: электронный.

109. Pescoller, L. Control the washboard effect. – URL: <https://www.peret.it/Articles/CORRCHECK%20Article%20english.pdf> (дата обращения: 19.03.2026). – Text: electronic.

110. Патент № 2545372 РФ, МПК G03F 7/26 (2006.01). Фоточувствительный полимерный слоистый материал и его термическая обработка : № 2013140794/28 : заявл. 11.01.2012 : опубл. 27.03.2015 / Рикчия Д.А., Блейер Д.Х., Вест Р.В. – Бюл. № 9. – 31 с.

111. Патент № 2742280 Российская Федерация, МКП C09J I03/00 (2020.01). Гофрированный картон, содержащий клейкое вещество, содержащее крахмал и тонкую микрофибриллированную целлюлозу: № 2019116892 : заявл. 31.10.2017: опубл. 04.02.2021, Бюл. № 4. 12 с.

112. Авторское свидетельство № 144295. Способ измерения коробоватости и волнистости листового материала. Э.А. Гарбер, А.В. Грачёв, Опубл. 18.02.1962. Бюл. № 2. 3 с.

113. Gregor-Svetec, D. Tomato Plant Residues, a Sustainable Fiber Source for Cardboard Packaging/ Gregor-Svetec D., Vodnik, Ž., Gale T., Kavčič U. – Text : electronic // Sustainability. – 2024. – № 16. – Pp 7801.

114. Система видеоконтроля REVISION II «Полиграфическое оборудование». – URL: http://www.paper-service.ru/index.php?p=systems&cat=systems_3 (дата обращения: 17.03.2026)). – Текст: электронный.

115. Система видеоконтроля линейной флексографской печатной машины. – URL: <https://www.bronko.ru/customers/articles/fleksograficheskie-pechatnye-mashiny/sistema-videokontrolya-lineynoy-fleksografskoy-pechatnoy-mashiny-serii-dh/?ysclid=mm7p18daq5167672928> (дата обращения: 20.03.2026). – Текст : электронный.

116. Зильберглейт, М.А. Влияние структуры бумаги на цветопередачу струйной печати / Зильберглейт М.А., Марченко И.В. – Текст: электронный // Труды БГТУ. – Сер. 4. – 2024. – № 1 (279). – С. 13–18.

117. Зильберглейт, М. А. Оценка устойчивости показателей неоднородности бумаг для полиграфии/ Зильберглейт М. А., Марченко И. В., Старченко О. П., Нестерова С. В. – Текст: электронный // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – № 4 (7). – С. 24–32.

118. Леонтьев, В.Н. Методы и средства совершенствования печатных свойств бумаг в системе «бумага – краска – оттиск»: учебное пособие/ Леонтьев В.Н. – Текст: непосредственный // СПбГТУРП. – СПб. – 2009. – 170 с.

119. Светогорский ЦБК. Продукция: [сайт]. – URL: <https://svetopaper.com/products/paper/> (дата обращения: 08.05.2025). – Текст : электронный.

120. Мидуков, Н.П. Ресурсосберегающая технология тест-лайнера с белым покровным слоем – СПб.: Дисс. на соискание ученой степени док. техн. наук. - 2020. – 304 с.

121. Шрайнер, Т. Использование облагороженной газетной макулатуры в технологии производства картона вайт-лайнера/ Шрайнер Т., Гроссман Н.П., Мидуков, Куров В.С., Смолин А.С. – Текст : электронный // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2016. - № 4. – С. 58 – 61.

122. Litvinov, M.A. Structural irregularity of cellulose-containing multilayered composites/ Litvinov M.A., Kazakovite Ya.V., Midukov N.P., Kurov V.S., Kolosova M.V. – Text : electronic // Fibre Chemistry. – 2025. – № 1(57). – Pp.45–49.

123. Midukov, N.P. Evaluation of the printing properties of cardboard based on graphic processing of the microstructure international conference Renewable wood and plant resources. / Midukov N.P., Kolosova M.V., Kurov V.S. – Text : direct // St. Petersburg State Forest Technical University. – September 24 – 26. – 2025.

124. Мидуков, Н.П. 3D-моделирование микроструктуры бумаги и картона для оценки печатных свойств / Мидуков Н.П., Зильберглейт М.А., Куров В.С., Колосова М.В. – Текст : непосредственный // Учебное пособие. – СПбГУПТД ВШТЭ. – Санкт-Петербург. – 2025. – 118 с.

125. ГОСТ 12605-97. Бумага и картон. Метод определения поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба). – М.: Изд-во межгосударственный стандарт. – 6 с.

126. Колосова, М.В. Новое в исследовании микрорельефа поверхности целлюлозного композиционного материала при оценке качества нанесения печати – // Деревообрабатывающая промышленность. – 2025. – № 4. – С. 92–101.

127. EPIC – одно из ведущих предприятий по производству упаковки из формованного бумажного полотна. URL <https://epic.ru.com> (Дата обращения: 10.05.2025).

128. ISO 638 (Paper, board and pulps – Determination of dry matter content – Oven-drying method)

129. ISO 287 (Paper and board – Determination of moisture content of a lot – Oven-drying method)

130. ISO 4119 (Pulps- Determination of stock concentration)

131. ISO 5263-1 (Pulps – Laboratory wet disintegration – Part 1: Disintegration of chemical pulps)

132. ISO 5264-2 (Pulps – Laboratory beating – Part 2: PFI mill method)

133. ISO 5267-1:1999 (Pulps – Determination of drainability – Part 1: Schopper-Riegler method)

134. ISO 5269-2 (Pulps – Preparation of laboratory sheets for physical testing – Part 2: Rapid-Köthen method)

135. ГОСТ Р ИСО 534-2012. Бумага и картон. Определение толщины, плотности и удельного объема. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 16 с.

136. ГОСТ Р ИСО 8791-4-2011. Бумага и картон. Определение шероховатости (гладкости) методом воздушного потока. Часть 4. Метод Шеффилда. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 12 с.

137. Технология целлюлозно-бумажного производства: справ. материалы: В 3 т. / Всерос. науч.-исслед. ин-т целлюлоз.-бумаж. пром-сти (ВНИИБ); редкол.: Осипов П. С. и др. Т. II. Производство бумаги и картона. Ч. 2. Основные виды и свойства бумаги и картона, фибры и древесных плит / М. А. Остреров и др. – СПб.: Политехника, 2006. – 499 с. – Текст: непосредственный.

138. Иванов, С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов. – М.: Гослесбумиздат, 2006. – 696 с. – Текст: непосредственный.

139. - ГОСТ ИСО 1924-1-96. Бумага и картон. Определение прочности при растяжении. Часть 1. Метод нагружения с постоянной скоростью. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 8 с.

140. ГОСТ Р ИСО 534-2012. Бумага и картон. Определение толщины, плотности и удельного объема. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 16 с.

141. ГОСТ Р ИСО 2758-2017. Бумага. Метод определения сопротивления продавливанию. – Москва : Стандартиформ, 2017. – 16 с.

142. - ГОСТ Р ИСО 2493-1-2017. Бумага и картон. Определение сопротивления изгибу. Часть 1. Постоянная степень прогиба. – Москва: Стандартиформ, 2017. – 16 с.

143. Struers TegraPol-21. Полуавтоматическая шлифовально-полировальная установка: руководство по эксплуатации. – Ballerup: Struers A/S, [б. г.]. – 60 с.

144. Vasile, M. J. Microfabrication techniques using focused ion beams and emergent applications/ M. J. Vasile, R. Nassar, J. Xie, H. Guo // Micron. 1999. Vol. 30. Pp. 235–244.

145. Radi, Zs. Surface polishing and slope cutting by parallel ar ion beam for high-resolution EBSD measurements / Zs. Radi, K. Havancsak, Sz. Kalacska, A. // Baris Technoorg Linda // Ltd, Eotvos Lorand university, Faculty of science, 22 April // International Conference on Nanoscience and Nanotechnology. Adelaide, SA. 2014.

146. TESCAN MIRA3 microscope. URL: www.tescan.com/en-us/technology/sem/mira3 (date accessed: 19.09.25)

147. TESCAN MIRA3 microscope. URL: www.tescan-uk.com/tecnology/sem/mira3 (date accessed: 19.09.25)

148. Creality Halot R6: руководство пользователя. – Версия 1.0. – Shenzhen: Creality 3D, 2024. – 24 с. – URL: <https://www.creality.com/download/halot-r6> (дата обращения: 02.06.2026). – Текст: электронный.

149. HAZ Labs Dental Yellow Clear PRO. – Регистрационное удостоверение на медицинское изделие № РЗН 2020/12007. – Соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 10993. – Россия : HAZ Labs.

150. Датчик формования бумаги и картона // TECHPAP SAS (Техпап). URL:https://www.techpap.com/data/fckeditor/file/2D_LAB_Rev0016_RU_M_001.pdf (дата обращения: 19.09.25). – Текст: электронный.

151. Патент № 2835897 С1 РФ, МПК G01N 21/89. Способ подготовки микроструктуры для контроля параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала и устройство для его реализации / Н.П. Мидуков, В.С. Куров, М.В. Колосова [и др.]: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СПбГУПТД, № 2024109568 заявл. 09.04.2024 : опубл. 05.03.2025, Бюл. № 7, 5 с.

152. Мидуков Н.П., Куров В.С., Колосова М.В., Литвинов М.А. Моделирование волокон бумаги и картона с применением 3Д-технологии // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы VIII Всерос. Науч.-техн.й конф., СПб, 24–26 мая 2023: СПбГЛТУ имени С.М. Кирова. – С. 479-481.

153. Пат. № 239168 U1 РФ, МПК G01N 1/28, B01L 9/00. Устройство для фиксации малоразмерного твердого образца перед изготовлением среза для микроскопического исследования / Н.П. Мидуков, М.В. Колосова, М.А. Зильберглейт, В.С. Куров. Заяв. и патентообладатели ФГБОУ ВО СПбГУПТД, УО БГТУ. № 2025115070, заявл. 02.06.2025, опубл. 25.11.2025, Бюл. № 33, 4 с.

154. Колосова, М.В. Мидуков Н.П. Устройство для подготовки микроструктуры при контроле параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала // Вестник СПбГУПТД. Серия 4: Промышленные технологии. 2025. № 1. С. 103-107.

155. Колосова М.В., Разработка способа для подготовки микроструктуры при контроле параметров волокнистого целлюлозосодержащего материала // Вестник СПбГУПТД. Серия 4: Промышленные технологии. 2025. № 1. С. 86-90.

156. Литвинов М.А., Колосова М.В., Мидуков Н.П., Куров В.С. Визуализация микроструктуры поперечного среза бумаги и картона // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: Материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В.И. Комарова, Архангельск, 14–16 Сентября 2023. САФУ имени М.В. Ломоносова». С. 54-58.

157. 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. No 4 (56). Pp. 135–139.

158. 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, SPb, 24–26 of September 2025. SPbSFTU. – Pp. 51.

159. Одинцова С.Е., Светлолобов 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.

160. Светлолобов А.Ю., Литвинов М.А., Мидуков Н.П., Колосова М.В. [и др.] Метод и устройство для подготовки образцов бумаги и картона для визуализации микроструктуры поперечного среза // Вестник СПбГУПТД. Серия 4: Промышленные технологии. 2023. № 3. С. 104-108.

161. Мидуков Н.П., Колосова М.В., Куров В.С. [и др.] Особенности в определении толщины по микроструктуре поперечного среза бумаги и картона // Вестник СПбГУПТД. Серия 4: Промышленные технологии. 2025. № 2. С. 84-89.

162. 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.

163. Midukov, N. P., Smolin, A. S., Kurov, V. S., Schrinner, T., Grossmann, H., Development and testing of new structure of three-layers test liner cardboard. Materialien zum wissenschaftlichen Seminar der Stipendiaten der Programme “Michail Lomonosov” und „Immanuel Kant III“ 2012/2013, Moskau, 26-27 April 2013. Pp. 53–56.

164. Мидуков, Н. П. Производство многослойного картона тест-лайнера с белым слоем / Н. П. Мидуков, В. С. Куров, А. С. Смолин. – СПб., 2018. – 208 с. – Текст: непосредственный.

165. Михалёва, М. Г. Анализ шероховатости поверхности целлюлозно-бумажных материалов прямым и косвенным методами / М. Г. Михалёва, Д. Н. Втюрина. – Текст: непосредственный // Труды БГТУ. Серия 2. – 2019. – № 1. – С. 67–71.

166. ГОСТ Р ISO 534-2012 Бумага и картон. Определение толщины, плотности и удельного объема. М.: Изд-во Стандартиформ. 2014. 15 с.

167. ГОСТ ИСО 187–2012 Целлюлоза, Бумага, Картон. Стандартная атмосфера для кондиционирования и испытания. М.: Изд-во Стандартиформ. 2014. – 12 с.

168. ГОСТ 30435-96 Определение жесткости при изгибе статическими методами. Минск: МССМС. 2001. – 8 с.

169. ГОСТ 13525.1-79 Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Методы определения прочности на разрыв и удлинения при растяжении. М: Стандартиформ, 2007. – 5 с.

170. Midukov N.P., Kurov V.S., Litvinov M.A., Kolosova M.V. Interlayer strength of fiber cellulose-containing composite material // Fibre Chemistry. 2024. No 1(56). Pp. 195–199.

171. Midukov N.P., Kurov V.S., Litvinov M.A., Kolosova M.V. Investigation by 3D simulation of the interaction of fibers of a multilayered cellulose-containing material // Fibre Chemistry. 2023. No 2(55). Pp. 79 – 84.

172. Midukov N.P., Kurov V.S., Kolosova M.V. Modeling paper and cardboard fibers using 3D technology // Fibre Chemistry. 2023. No 6(54)

Рр. 362 – 371.

173. Мидуков Н.П., Клосова М.В. Современное состояние исследований пористости бумаги и картона // Вестник СПбГУПТД. Серия 4: Промышленные технологии. 2026. № 2. С. 86-93.

174. Официальный сайт ООО «Фабрика Южуралкартон». [Электронный ресурс]. URL: https://sybox.ru/?utm_source=fabricators

175. Официальный сайт ООО «Гофро-Технологии» (поставщик гофрооборудования). [Электронный ресурс]. URL:<https://gofrotech.ru>

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

СОГЛАСОВАНО
Зам. директора ВШТЭ СПГУПТД

проф. Куров В.С.



УТВЕРЖДАЮ
генеральный директор

ОАО «Каравачево»
Зайцев В.Б.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий документ удостоверяет проведение научно-технических работ в рамках проекта, направленного на разработку универсального метода оценки физико-механических свойств многослойных волокнистых композиционных материалов. Цель проекта — подтвердить эффективность метода путем тестирования его на практике. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

1) тестирование промышленных образцов волокнистых композиционных материалов и оценка их свойств стандартизированными методами;

2) получение изображений микроструктуры промышленных образцов с помощью сканирующей электронной микроскопии;

3) прогнозирование свойств с помощью цифровых технологий (программ векторного формата) и их сравнение с результатами оценки стандартизированными методами.

Экономический эффект от использования разработанной методики оценки физико-механических характеристик многослойных волокнистых композиционных материалов для каждого вида продукции разный. Метод позволяет точно оценивать шероховатость, пористость, однородность распределения элементный состав и др., а также прогнозировать физико-механические свойства волокнистых композитных материалов.

Исполнители ВШТЭ СПГУПТД Предприятие

Ассистент каф. ИГАП Литвинов М.А. Главный технолог

Ассистент каф. ПАХТ Колосова М.В. Дубровина Т.В.

Соискатель каф. ТБК Зайцев А.В.

СОГЛАСОВАНО
 Директор ВШТЭ СПГУПТД
 Лукашин Н.В.
 10.10.2018




УТВЕРЖДАЮ
 Технический директор АО «Печатня»
 Ильин А.В.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий документ удостоверяет проведение научно-технических работ в рамках совместного проекта Санкт-Петербурга и Республики Беларусь: «Разработка методов оценки и анализ неоднородности межволоконных связей в 2D/3D гетерогенной среде целлюлозных композиционных материалов», направленных на создание универсального метода оценки печатных свойств многослойных волокнистых композиционных материалов. Цель проекта – подтверждение эффективности метода контроля качества печати путем тестирования его на практике. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие задачи:

1. Разработан метод контроля качества печати, основанный на оценке периметра, площади, и количества оттенков цветов, запечатанных символов;
2. Разработаны и изготовлены узлы машины с помощью стереолитографического 3D-принтера.

Экономический эффект от использования разработанной методики оценки печатных свойств многослойных волокнистых композиционных материалов для каждого вида продукции разный.

1. Метод позволяет прогнозировать качество печати на различных волокнистых материалах. Алгоритмы контроля и аппаратное оформление могут быть рекомендованы при дополнительных исследованиях качества печати на материалах с высокой шероховатостью, а также при выходе из строя существующего зарубежного оборудования на предприятии.


2. Узлы печатной машины, зарубежного производства были восстановлены с использованием 3D-печати и установлены взамен вышедшим из строя из-за износа. Исполнитель УО БГУ со стороны Республики Беларусь старший научный сотрудник Лукашевич М.М.

Исполнители ВШТЭ СПГУПТД (Россия):

Зав. каф. ПиАХТ, руководитель проекта

 д.т.н., Мидуков Н.П.

Преподаватель каф. ПиАХТ, исполнитель

 М.В. Колосова

Предприятие АО «Печатня»

Директор по производству

Фомин А.В.





СОГЛАСОВАНО

Директор ВШТЭ СПбГУПТД
Лужанин П.В.
Дата 20.10.2025

УТВЕРЖДАЮ

Директор федерального фонда
Российской национальной библиотеки
Ладовицкий Е.А.
Дата 20.10.2025

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий документ удостоверяет проведение научно-технических работ в рамках совместного проекта Санкт-Петербурга и Республики Беларусь: «Разработка методов оценки и анализ неоднородности межволоконных связей в 2D/3D гетерогенной среде целлюлозных композиционных материалов», направленных на создание универсального метода оценки печатных свойств многослойных волокнистых композиционных материалов. Цель проекта – подтверждение эффективности метода контроля качества печати путем тестирования его на практике. Для достижения поставленной цели были выполнены следующие работы:

1. Подготовка проб, срезов для оптической микроскопии;
2. Электронная микроскопия бумаги с реплицированными чернилами.

Анализ результатов выполненных работ показал перспективность предложенного метода для оценки взаимодействия чернил с бумажной основой. Российская национальная библиотека заинтересована в развитии данного метода с целью исследования микроструктуры волокнистого материала и чернил документов.

Исполнители ВШТЭ СПбГУПТД (Россия):

Российская национальная библиотека


Зав. каф. ПиАХТ, руководитель проекта

Научный сотрудник ЛКИИНТЭД
Отдела рукописей Российской национальной библиотеки

 д.т.н., Мидуков Н.П.

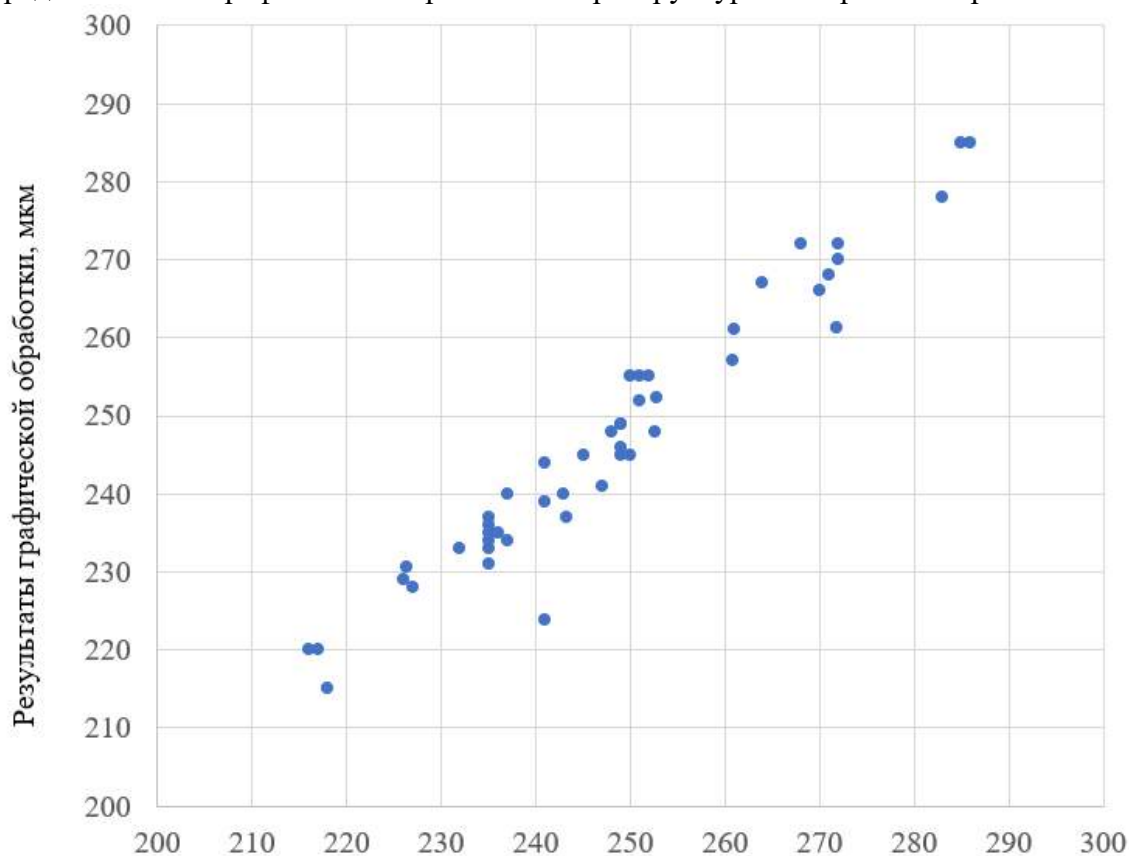
Преподаватель каф. ПиАХТ, исполнитель

 Деркачева О.Ю.

 М.В. Колосова

Результаты статистической обработки данных

Результаты сопоставления данных стандартизированной толщины и толщины, определённой по графической обработке микроструктуры поперечного среза



Данные полученные с помощью толщиномера, мкм

Коэффициент корреляции – 0,97
 Коэффициент детерминации. $R^2 = 0,9438$
 t-статистика. Критерий Стьюдента.
 $t_{крит}(n-m-1; \alpha/2) = t_{крит}(45; 0.025) = 2,311$
 $t_b = 27,48$
 $t_a = 1,4$
 Критерий Фишера – $F = 755,339$

Поскольку фактическое значение $F > F_{табл}$, то коэффициент детерминации статистически значим (найденная оценка уравнения регрессии статистически надежна).

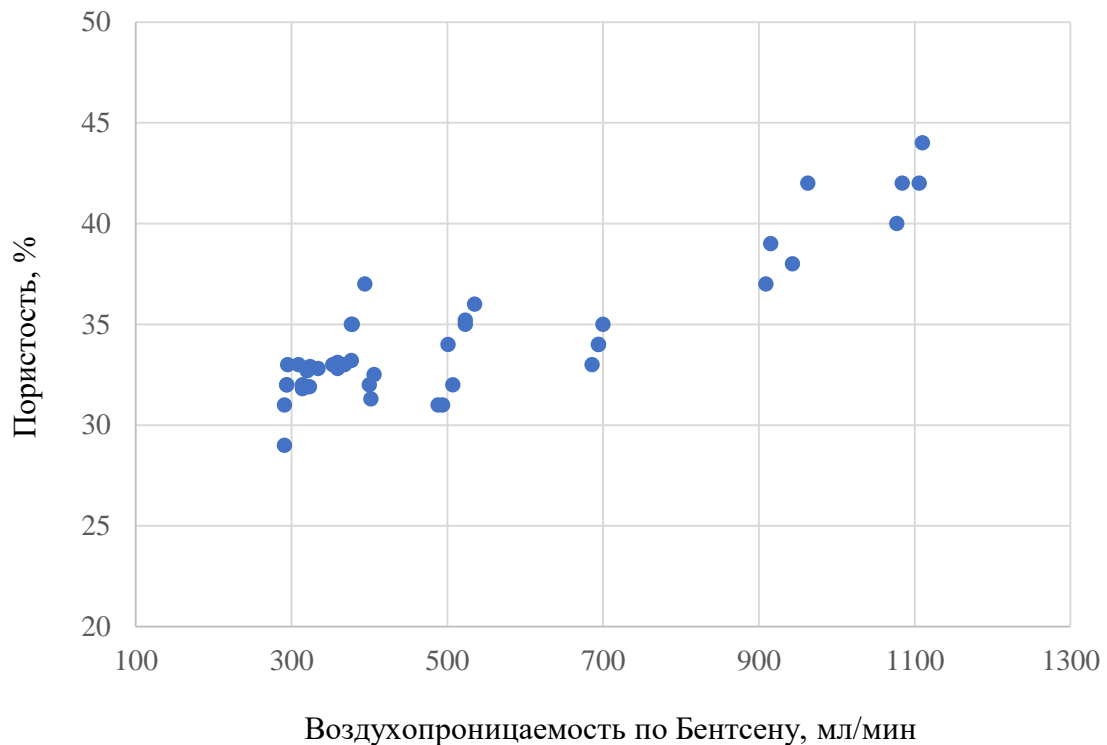
Выводы.

Изучена зависимость Y от X . На этапе спецификации была выбрана парная линейная регрессия. Оценены её параметры методом наименьших квадратов: $y = 0,947 * x + 11,968$. Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 94,38% общей вариабельности Y объясняется изменением X . Установлено также, что параметры модели статистически не значимы. Возможна экономическая интерпретация параметров модели - увеличение X на 1 ед.изм. приводит к увеличению Y в среднем на 0,947 ед.изм. Линейный коэффициент корреляции равен 0,971, следовательно, связь между признаком Y и фактором X весьма высокая и прямая. Также подтверждается его значимость. Значение ошибки аппроксимации (1,22%) говорит о хорошем качестве найденной модели.

Решение было получено и оформлено с помощью сервиса: <https://math.semestr.ru/corel/prim.php>

Продолжение приложения 4

Результаты сопоставления данных пористости, определённой по графической обработке микроструктуры поперечного среза и воздухопроницаемости по Бендтсену



Коэффициент корреляции – 0,875
Коэффициент детерминации – $R^2 = 0,7656$
t-статистика. Критерий Стьюдента.
 $t_{\text{крит}}(n-m-1; \alpha/2) = t_{\text{крит}}(42; 0,025) = 2,311$
 $t_b = 11,71$
 $t_a = 50,2$

Поскольку $50,02 > 2,311$, то статистическая значимость коэффициента регрессии а подтверждается

Критерий Фишера – $F = 137,18$

Поскольку фактическое значение $F > F_{\text{табл}}$, то коэффициент детерминации статистически значим (найденная оценка уравнения регрессии статистически надежна).

Выводы.

Изучена зависимость Y от X . На этапе спецификации была выбрана парная линейная регрессия. Оценены её параметры методом наименьших квадратов: $y = 0,0114 \cdot x + 28,387$. Статистическая значимость уравнения проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 76,56% общей вариабельности Y объясняется изменением X . Установлено также, что параметры модели статистически значимы. Возможна экономическая интерпретация параметров модели - увеличение X на 1 ед.изм. приводит к увеличению Y в среднем на 0,0114 ед.изм. Линейный коэффициент корреляции равен 0,875, следовательно, связь между признаком Y и фактором X высокая и прямая. Также подтверждается его значимость. Анализ коэффициента эластичности показывает о не существенном влиянии X на Y . Значение ошибки аппроксимации (3,67%) говорит о хорошем качестве найденной модели.

Решение было получено и оформлено с помощью сервиса: <https://math.semestr.ru/corel/prim.php>

Приложение 5

Результаты физико-механических испытаний образцов

Наименование образца	5Б 120 I 1	5Б 120 I 2	5Б 120 II 1	5Б 120 II 3	5Б 120 III 2	5Б 120 III 3	5Б 120 IV 1	5Б 120 IV 2
Номер образца	22	21	25	23	27	26	31	30
Масса, г	3,86	3,35	3,86	3,96	3,67	3,88	3,55	3,63
Масса м ² , г/м ²	123			126	117	123,5	113	115,6
Степень помола, ШР	более 55	более 55	более 55	более 55	более 55	более 55	более 55	более 55
Сопrotивление продавливанию, кПа	223,5	185,5	251,2	274,1	232,6	246,24	221	224,1
Разрывная длина, км	2,9	2,7	3,24	3,05	3,26	3,29	3,28	3,44
Поглащение энергии при разр., Дж/м ²	39,45	30,26	51,5	52,65	51,14	55,54	48,93	49,13
Сопrotивление разрыву, Н/м	3502	2810,4	3909	3769,65	37,39	3984,4	3715,2	3896
Удлинение при разрыве, %	1,62	1,55	1,9	2	1,94	2	1,87	1,81
ТЕА-индекс, Дж/г	0,32	0,29	0,42	0,42	0,44	0,45	0,42	0,43
Индекс сопр. Разрыву, Нм/г	28,47	26,51	31,8	29,9	31,96	32,26	32,14	33,7
Удлинение, мм	1,62	1,56	1,9	2	1,94	2	1,87	1,82
Модуль упругости, Н/мм ²	1995	1728,56	2012,35	2049	2096,91	1993	2151	2163
Максимальное усилие, Н	52,5	42,16	58,64	56,6	56,08	60	55,73	58,44

Наименование образца	7А+5Б 120 II 1	7А+5Б 120 II 3	7А+5Б 120 III 1	7А+5Б 120 III 3	7А+5Б 120 IV 1	7А+5Б 120 IV 2
Номер образца	34	32	37	35	40	39
Масса, г	3,7	3,75	3,69	3,89	3,58	3,52
Масса м ² , г/м ²	117	119	117	123	114	112
Степень помола, ШР	более 55	более 55	более 55	более 55	более 55	более 55
Сопrotивление продавливанию, кПа	268,8	178,9	308,2	269,9	263,8	251,5
Разрывная длина, км	3,52	1,82	3,97	3,75	3,72	3,65
Поглащение энергии при разр., Дж/м ²	48,47	29,81	67,65	63,85	55,92	51,1
Сопrotивление разрыву, Н/м	4044	2119	4555	4529	4158	4014
Удлинение при разрыве, %	1,69	2,05	2,11	2	1,92	1,82
ТЕА-индекс, Дж/г	0,41	0,25	0,58	0,52	0,49	0,46
Индекс сопр. Разрыву, Нм/г	34,57	17,8	38,93	36,82	36,47	35,84
Удлинение, мм	1,7	2,05	2,11	2	1,92	1,83
Модуль упругости, Н/мм ²	2483,34	846,4	2552	2519,68	2402	2433
Максимальное усилие, Н	60,7	31,8	68,32	67,93	62,37	60,21