

**МИДУКОВА МАРИЯ АЛЕКСАНДРОВНА**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ  
МАКУЛАТУРЫ ИЗ ОФИСНОЙ БУМАГИ С ПЕЧАТЬЮ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург – 2024**

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

Научный руководитель – **Смирнова Екатерина Григорьевна** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии бумаги и картона ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Официальные оппоненты – **Просвириков Дмитрий Богданович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

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

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет»

Защита состоится «28» марта 2024 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.02 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4, зал заседаний Учёного совета, А-233.

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

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Махотина Людмила Герцевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Циклическая экономика является актуальным направлением в ряде европейских стран. Наиболее важным документом для потенциального развития циркулярной экономики в России можно назвать «Стратегию научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2035 года». Задача циклической экономики — как можно более широко использовать возобновляемые ресурсы и, в конечном счете, перейти на безотходное производство. Многократное использование одного и того же материала как сырья вносит вклад в повышение доли промышленных ресурсов и позволяет минимизировать ущерб окружающей среде. В связи с этим актуальной задачей в целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) является переработка документов краткосрочного хранения, к которым относится макулатура марки МС-7Б. Для производства белых сортов бумаги из этой марки макулатуры в технологии предусмотрены процессы облагораживания, которые позволяют удалять печатные краски, тонер. Наиболее эффективной является технология удаления печатной краски, тонера методом флотации. В технологии флотации используются дорогостоящие химикаты, расходуется значительное количество воды и энергоресурсов. Самой большой проблемой в этом процессе является очистка офисной бумаги с печатью, которая имеет высокое содержание тонера, создающего прочные связи с волокнами целлюлозы, что увеличивает потребность в химикатах, повышает стоимость процесса и негативные последствия для окружающей среды. Одним из эффективных подходов к снижению расхода реагентов при флотации является увеличение площади контакта реагентов с тонером. Автором диссертации предлагается достигать этого сухим диспергированием макулатуры, в результате которого бумага разделяется на отдельные волокна с закрепленными на них частичками тонера. Другим эффективным методом для повышения эффективности облагораживания макулатурной массы является применение ферментных технологий. Кроме того, переработка возобновляемого сырья для производства бумаги и картона снижает долю использования первичного волокнистого полуфабриката при производстве биоразлагаемой упаковки.

Работа выполнена в рамках стратегического проекта «Развитие производства биоразлагаемой упаковки на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП)» по программе «Приоритет 2030».

**Цель работы** – совершенствование процесса очистки офисной бумаги с печатью от тонера методом флотации.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние сухого диспергирования макулатуры перед флотацией на морфологические свойства вторичных волокон.
2. Исследовать влияние сухого диспергирования перед флотацией макулатуры из офисной бумаги, запечатанной тонером, на оптические и механические свойства бумаги из макулатурной массы.

3. Исследовать применение отечественных ферментов в технологии флотационной очистки макулатуры и их влияние на свойства макулатурной массы.

4. Разработать цифровой метод оценки уровня запечатанности офисной бумаги и прогнозирования оптических свойств бумаги, полученной из переработанной макулатуры.

**Научная новизна.** Получены новые данные по влиянию сухого диспергирования на морфологические свойства вторичных волокон бумаги марок «SvetoCopy Classic» и «SvetoCopy ECO» с нанесенной на принтере лазерной печатью. Установлено, что сухое диспергирование незначительно влияет на среднюю длину волокна, которая во многом определяет бумагообразующие свойства.

С применением современных методов анализа получены данные влияния сухого диспергирования на оптические и физико-механические характеристики. Установлено, что сухое диспергирование приводит к равномерному распределению тонера, удаляя видимые вкрапления на бумаге, при этом физико-механические показатели снизились незначительно.

Установлено взаимодействие вторичных волокон в присутствии ферментов отечественного производства и химикатов после сухого диспергирования. Согласно полученным данным сравнения ферментов отечественного производства,  $\alpha$ -амилаза в большей степени повышает оптические свойства вторичных волокон с 95 до 98 %.

Была предложена новая цифровая модель для оценки уровня запечатанности офисной бумаги тонером до сухого диспергирования и оценки оптических свойств бумаги после облагораживания методом флотации.

**Практическая значимость работы.** Получены сравнительные данные о бумагообразующих свойствах вторичных волокон из офисной бумаги, прошедших сухое диспергирование и мокрый роспуск.

Разработаны практические рекомендации по совершенствованию процесса удаления тонера от вторичных волокон путем сухого диспергирования в присутствии ферментов отечественного производства.

Разработанные рекомендации в лабораторных условиях впервые были использованы при очистке макулатуры из бумаги «SvetoCopy ECO», которые позволили получить материал, обладающий прочностными и оптическими свойствами, сопоставимыми с промышленными образцами офисной бумаги.

Предложенная цифровая модель позволяет оценить эффективность различных способов флотации, а также спрогнозировать оптические свойства по уровню запечатанности офисной бумаги, что может использоваться на практике предприятиями, собирающими и сортирующими макулатуру, а также предприятиями-производителями на стадии входного контроля качества сырья.

**Объекты исследования.** Макулатура, относящаяся к марке МС-7Б: офисная бумага марок «SvetoCopy Classic» и «SvetoCopy ECO» (ПАО Светогорский ЦБК) с черно-белой печатью, нанесенной на лазерном принтере.

**Методы исследования.** При оценке запечатанности офисной бумаги тонером и последующего влияния на оптические свойства образцов бумаги использовались цифровые методы и современные аналитические программы. Получены данные в ходе проведения экспериментальных исследований, обоснованность и достоверность которых подтверждается использованием международных и российских стандартов по подготовке бумажной массы, флотации макулатуры, контролю качества образцов (оптических и механических свойств бумаги).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Технология эффективного удаления тонера от офисной бумаги методом флотации с применением сухого диспергирования.
2. Метод оценки эффективности флотации офисной бумаги с печатью с применением ферментов отечественного производства с предполагаемыми результатами промышленной апробации.
3. Цифровая модель прогнозирования оптических свойств образцов бумаги в зависимости от степени запечатанности макулатуры из офисной бумаги.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены на научно-практических конференциях: «Проблемы и пути решения в технологии гофропродукции», «Гофроиндустрия на современном этапе развития», Санкт-Петербург, 2019 г.; материалы II междунар. науч.-практ. конф. «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения», Санкт-Петербург, 2020 г.; XXV Международный БИОС-форум. Молодежная БИОС-олимпиада 2020 г. Санкт-Петербург, 2020 г, Dialogue of generations, SPb, 2020; IV междунар. науч.-техн. конф. молодых учёных и специалистов ЦБП «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения», Санкт-Петербург, 2022 г.; VIII Всероссийская науч.-техн. конф. «Леса России: политика, промышленность, наука, образование», Санкт-Петербург, 2023 г.; IV Всероссийская науч.-практ. конф. с участием молодых ученых «Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и экологической безопасности», Санкт-Петербург, 2023 г.; VII междунар. науч.-техн. конф., посвященная памяти профессора В.И. Комарова «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов», г. Архангельск, 2023 г.

**Публикации.** Опубликовано 10 печатных работ по теме диссертации, в том числе две статьи в изданиях, входящих в перечень, утвержденный ВАК РФ по специальности 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины», 1 патент РФ.

**Личный вклад автора** заключается в определении цели и задач работы, постановке и проведении экспериментальной работы, обработке полученных результатов, их обобщении и формулировке выводов, а также в подготовке к публикации полученных результатов, написания и оформления патента.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, библиографического списка и приложения. Диссертация изложена на 119 страницах машинописного текста и содержит 42 рисунка, 21 таблицу, 131 наименование использованных источников литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первом разделе** представлен аналитический обзор, в котором оценивается современное состояние исследований в области удаления тонера от целлюлозных волокон. Наиболее значимые научные результаты в совершенствовании технологии флотации вторичных волокон в России получены учёными крупных исследовательских центров страны, таких как Северный Арктический федеральный университет (САФУ), Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна (СПбГУПТД), Уральский государственный лесотехнический университет. В частности, приводится критический анализ источников литературы, посвящённых механизмам нанесения тонера на целлюлозные волокна, способам отделения краски, чернил, тонера от волокон, ферментативной обработке офисной бумаги с печатью с целью её очистки от тонера, а также анализируются промышленные способы очистки макулатуры.

**Второй раздел** посвящён сравнению очистки стандартного мокрого роспуска макулатуры перед флотацией и сухого диспергирования макулатуры перед флотацией (рисунок 1). Стандартная технология очистки офисной макулатуры от печатной краски и тонера методом флотации включает подачу макулатуры в гидроразбиватель, где макулатура распускается на волокна и одновременно при роспуске подаются химикаты для лучшего удаления тонера от волокон целлюлозы, выдержку при температуре 60 °С в течение часа, разбавление водой до концентрации 0,8-1 % и подачу на флотацию.

Способ с применением сухого диспергирования макулатуры перед флотацией включает предварительное измельчение макулатуры на куски в промышленном шредере, диспергирование в роторно-вихревой мельнице, подачу сухого волокна в массный бассейн, куда также добавляются химикаты. Затем масса выдерживается в бассейне не более 5 минут в течение часа при температуре 60 °С и подается на флотацию (Пат. № 2744563).

В этом же разделе даётся краткое описание методов исследований морфологических характеристик вторичных волокон, оценки вкраплений тонера.

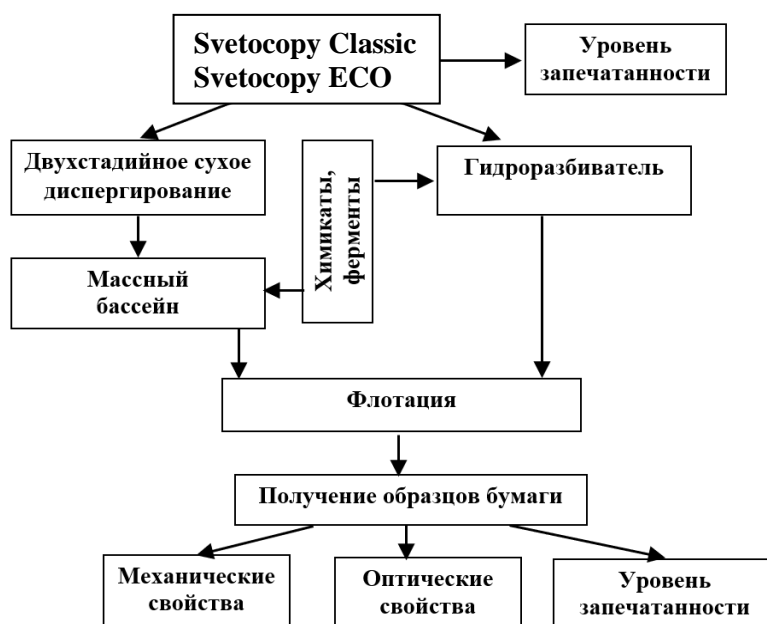


Рисунок 1 – Предлагаемый вариант очистки офисной бумаги от тонера

В третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований по оценке запечатанности офисной бумаги и прогнозированию оптических свойств бумаги, полученной из переработанной макулатуры различными способами (рисунок 2).

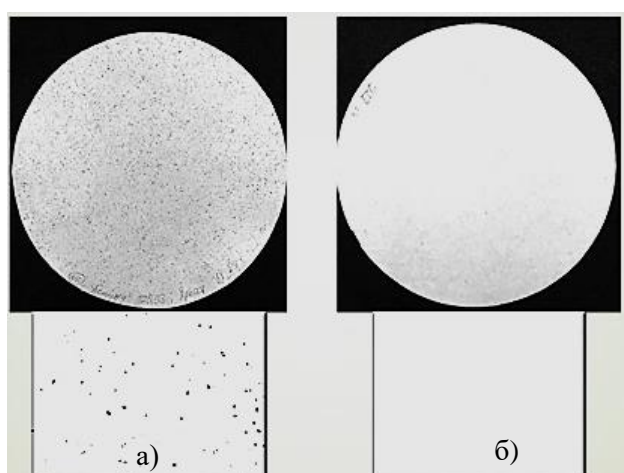


Рисунок 2 – Образцы, полученные из офисной бумаги запечатанной тонером: существующим методом (мокрый роспуск с флотацией) (а – 4,2 %); с помощью сухого диспергирования с флотацией (б – 0,34 %)

Из рисунка 2 видно, что при применении сухого диспергирования перед флотацией (б) практически полностью удаляются вкрапления тонера на образцах бумаги. Предложенная цифровая модель позволила определить уровень запечатанности образцов до и после флотации классическим мокрым способом и с сухим диспергированием, что позволило количественно оценить эффективность различных способов очистки макулатуры от тонера.

В третьем разделе рассматривается влияние ферментов отечественного производства на оптические и механические свойства бумаги при очистке. Механические свойства бумаги во многом определяются морфологическими характеристиками. На рисунке 3 представлены результаты сопоставления морфологических характеристик волокон после флотации с применением сухого диспергирования и классического мокрого роспуска при очистке макулатуры из газетной и офисной видов бумаги.

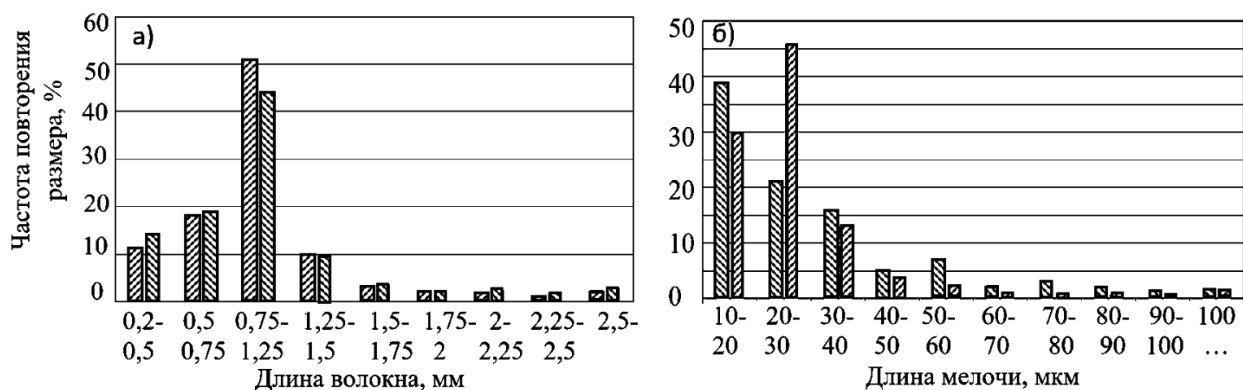


Рисунок 3 – Распределение волокон по длине: ▨ – после мокрого роспуска; ▤ – после сухого диспергирования газетной (а) и офисной (б) макулатуры

Из рисунка 3 видно, что средняя длина волокна офисной макулатуры, подготовленной сухим диспергированием, снизилась незначительно. Наибольшее снижение длины волокна произошло в диапазоне 0,75-1,25 мм. Максимальное содержание мелочи в макулатурной массе, подготовленной сухим диспергированием, находится в диапазоне 10-20 мкм, мокрым роспуском - в диапазоне 20-30 мкм (рисунок 3, таблица 1).

Таблица 1 – Морфологические характеристики волокон макулатуры из газетной и офисной бумаги после флотации

Параметр	Способ роспуска макулатуры			
	газетной		офисной	
	Мокрый роспуск	Сухое диспергирование	Мокрый роспуск	Сухое диспергирование
Ширина, мкм	31,0	33,0	24,0	24,3
Грубость, мг/м	0,3	0,3	0,2	0,2
Угол изгиба, °	132,0	130,0	134,0	133,0
Изогнутые волокна, %	13,6	14,3	26,0	43,3
Скрученность, %	5,9	7,7	7,3	10,7
Поврежденные концы, %	35,0	58,0	31,0	38,0

При сухом диспергировании офисной макулатуры повышается скручиваемость и изогнутость волокон. Впоследствии это может благоприятно сказаться на пухлости и впитываемости, что важно для санитарно-гигиенических видов бумаги. Судя по морфологическим характеристикам, можно ожидать от макулатуры офисных видов бумаги допустимых физико-механических свойств. Газетная макулатура в дальнейших экспериментах не использовалась ввиду низких бумагообразующих свойств волокон.

В таблице 2 представлены результаты исследования по влиянию сухого диспергирования перед флотацией макулатуры на механические свойства бумаги. Для этого из вторичных волокон (макулатуры офисных видов бумаг) были изготовлены образцы массой 1 м<sup>2</sup> 80 г. Образцы испытывали на сопротивление разрыву и сопротивление продавливанию. Из таблицы 2 видно, что показатель сопротивления продавливания уменьшился (на 15,2 %), также снизилась разрывная длина (на 3,4 %), разрушающее усилие при разрыве



уменьшилось на 14,4 %. Оценивая результаты, можно заключить, что сухое диспергирование перед флотацией в целом снижает механические свойства.

Помимо механических свойств важными характеристиками готовой продукции являются оптические показатели.

Таблица 2 – Результаты исследования механических свойств образцов

Показатели	Мокрый роспуск с флотацией	Сухое диспергирование с флотацией	Изменение показателя, %
Масса 1 м <sup>2</sup> , г	80±2	80±2	0
Толщина, мкм	150±5	150±5	0
Разрывная длина, км	3,28	3,17	-3,4
Разрушающее усилие, Н	45,5	39,4	-14,4
Сопротивление продавливанию, кПа	194	167	-15,2
Поглощ. энергия при растяж., Дж/м <sup>2</sup>	45,1	54,0	18,0
Сопротивление разрыву, кН/м	3,03	2,63	-14,1
Удлинение до разрыва, %	1,82	2,66	37,5
ТЕА индекс, Дж/г	0,48	0,64	28,6
Индекс сопротивления разрыву, Нм/г	32,2	31,1	-3,5
Модуль упругости, ГПа	2,46	2,34	-5,0

В таблице 3 представлены результаты сопоставления белизны, яркости, флуоресценции и непрозрачности образцов, полученных в соответствии с мокрым роспуском с флотацией и сухим диспергированием с флотацией.

Таблица 3 - Результаты исследования оптических свойств образцов бумаги

Показатели	Мокрый роспуск с флотацией	Сухое диспергирование с флотацией	Изменение показателя, %
Белизна (СIE), %	99	95	-4
Яркость (ISO), %	86	75	-14
Флуоресценция, %	10	9	-10
Непрозрачность, %	94	96	+2

Из таблицы 3 видно, что минимальные значения белизны и яркости характерны для образцов бумаги с сухим диспергированием. В этом варианте решается проблема наличия вкраплений, которые полностью исчезают за счёт равномерного распределения тонера по объёму всего материала. Но за счёт этого снижаются белизна, яркость и флуоресценция, при этом непрозрачность образцов увеличивается. Это объясняется тем, что оптическая плотность тонера выше оптической плотности целлюлозного волокна. Показатели максимальной белизны, яркости и флуоресценции бумаги из макулатурной массы характерны для мокрого роспуска с флотацией, однако этот способ не может быть рекомендован производителю бумаги и картона, если одним из требований к продукции является отсутствие вкраплений тонера. На рисунке 4 представлены результаты сопоставления различных способов облагораживания макулатурной массы.

Из рисунка 4 видно, что наиболее предпочтительным вариантом является флотация макулатуры с использованием сухого диспергирования, которая практически полностью удаляет вкрапления тонера.

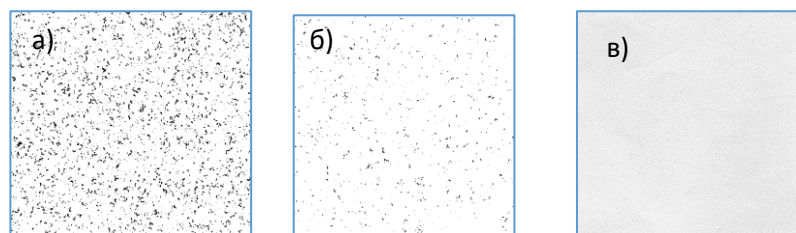


Рисунок 4 – Сопоставление результатов различных способов облагораживания макулатурной массы: а – после мокрого роспуска без флотации; б – после мокрого роспуска с флотацией; в – после сухого диспергирования с флотацией

В данном разделе также представлены результаты исследования по влиянию ферментативной обработки на механические и оптические свойства бумаги (таблица 4). Технологии очистки макулатуры от тонера проводились в разных вариантах: Вариант 1 – сухое диспергирование – обработка  $\alpha$ -амилазой с последующей флотацией; Вариант 2 – сухое диспергирование – обработка целлюлазой с последующей флотацией; Вариант 3 – сухое диспергирование – обработка  $\alpha$ -амилазой – без флотации; Вариант 4 – сухое диспергирование – обработка целлюлазой – без флотации

Таблица 4 – Результаты исследования физико-механических свойств образцов при ферментативной обработке

Показатели	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Масса 1 м <sup>2</sup> , г	80±2	80±2	80±2	80±2
Толщина, мкм	150±5	150±5	150±5	150±5
Разрывная длина, км	2,90	3,20	2,10	2,40
Разрушающее усилие, Н	36,0	39,0	28,0	30,0
Сопротивление продавливанию, кПа	152	167	100	115
Поглощ. энергии при растяж., Дж/м <sup>2</sup>	43,6	54,0	25,2	29,3
Сопротивление разрыву, кН/м	2,41	2,63	1,84	2,01
Удлинение до разрыва, %	2,3	2,7	1,7	1,9
ТЕА индекс, Дж/г	0,52	0,64	0,28	0,35
Индекс сопротивления разрыву, Нм/г	28,5	31,0	20,6	23,6
Модуль упругости, Н/мм <sup>2</sup>	2104	2337	1902	2004

Снижение механических характеристик при ферментативной обработке связано с тем, что большинство ферментов при взаимодействии с микрофибриллами волокон образуют водорастворимые соединения, которые легко удаляются вместе с тонером, а снижение фибрилляции приводит к уменьшению связей между волокнами, следовательно, к ухудшению механических свойств. Различные ферменты по-разному действуют на целлюлозное волокно. Поэтому их влияние на механические свойства образцов тоже отличаются. Из таблицы видно, фермент  $\alpha$ -амилаза (Вариант 1) в большей степени снижает механические характеристики образцов, чем целлюлаза (Вариант 2). Это связано с тем, что  $\alpha$ -амилаза в отличие от целлюлазы воздействует на крахмал, который входит в состав офисной макулатуры. Ферменты при правильном их использовании оказывают положительное влияние на оптические свойства при их добавлении перед флотацией. В таблице 5 представлены результаты исследования по влиянию ферментативной обработки на оптические свойства бумаги.

Согласно данным таблицы 5 использование фермента  $\alpha$ -амилазы позволяет восстановить оптические показатели бумаги практически до уровня, который приобретает макулатурная масса при мокром роспуске.

Таблица 5 – Результаты исследования оптических свойств образцов при ферментативной обработке

Показатели	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Мокрый роспуск с флотацией
Белизна (СIE), %	98	95	85,9	87	99
Яркость (ISO), %	76	75	63,9	66	86
Флуоресценция, %	9,5	8,9	6,7	7	10
Непрозрачность, %	96	96	99,4	99	94

Например, белизна при сухом диспергировании в присутствии  $\alpha$ -амилазы и последующей флотации составила 98 % (Вариант 1) по сравнению с 99 % при мокром роспуске и флотации. Остальные показатели восстановились в меньшей степени, но тенденция к росту наблюдалась и для яркости, и для флуоресценции. Сравнивая данные в таблице 5, можно заключить, что фермент целлюлаза (Вариант 2) практически не влияет на оптические свойства.

В 2022 году в России появился новый вид офисной бумаги «SvetoCopy ECO», который занял свою нишу в сегменте бумажного производства. Продукция применяется в основном для документов краткосрочного хранения, а значит может быть возвращена на повторное производство, поэтому необходимы исследования механических и оптических свойств образцов, полученных из бумаги «SvetoCopy ECO» при различных способах очистки от тонера (таблица 6). Экобумага имеет белизну 60 % (у «SvetoCopy CLASSIC» этот показатель равен 96 %). Натуральный оттенок бумаги обусловлен тем, что при ее производстве применяется безхлорная кислородно-щелочная отбелка. «SvetoCopy ECO» производится из 100 % лиственной целлюлозы, что обеспечивает рациональное использование лесных ресурсов.

Таблица 6 – Результаты исследования оптических свойств образцов, полученных из бумаги «SvetoCopy ECO» при различных способах облагораживания

Показатели	Мокрый роспуск с флотацией в присутствии $\alpha$ -амилазы	Сухое диспергирование с флотацией	Сухое диспергирование с флотацией в присутствии $\alpha$ -амилазы	Бумага «SvetoCopy ECO»
Белизна (СIE), %	14,1	12,79	13,7	13,4
Яркость (ISO), %	59,7	55,8	56,9	59,8
Флуоресценция, %	0,13	0,08	0,09	0,08
Непрозрачность, %	95	96,8	97,2	96,4
Вкрапления тонера, %	4	0,2	0	0,1

Из таблицы 6 видно, что максимальные значения разрывной длины, разрушающего усилия и сопротивления продавливанию соответствуют облагораживанию, где применяется мокрый роспуск с флотацией в присутствии фермента  $\alpha$ -амилазы. Минимальные значения механических

показателей соответствуют облагораживанию с сухим диспергированием в присутствии фермента  $\alpha$ -амилазы. Это связано с тем, что сухое диспергирование снижает физико-механические показатели, а фермент еще и воздействует на целлюлозное волокно и крахмал, который входит в состав «SvetoCopy ECO».

Для оценки эффективности флотации макулатуры из офисной бумаги с печатью тонером была разработана цифровая модель. Для разработки цифровой модели рассматриваются идеальные условия, при которых уровень запечатанности известен (0, 2, 4, 8, 16, 32 %) и вкрапления размером 0,1 мм<sup>2</sup> (спроектированные в графической программе и распечатанные на принтере) распределены равномерно по поверхности с одинаковой площадью. В этих условиях, так как площадь области и уровень запечатанности – известные величины, то при их равенстве будет меняться количество частиц размером 0,01 мм<sup>2</sup> и расстояние между ними уменьшится, что приводит к снижению белизны образца бумаги (рисунок 5).

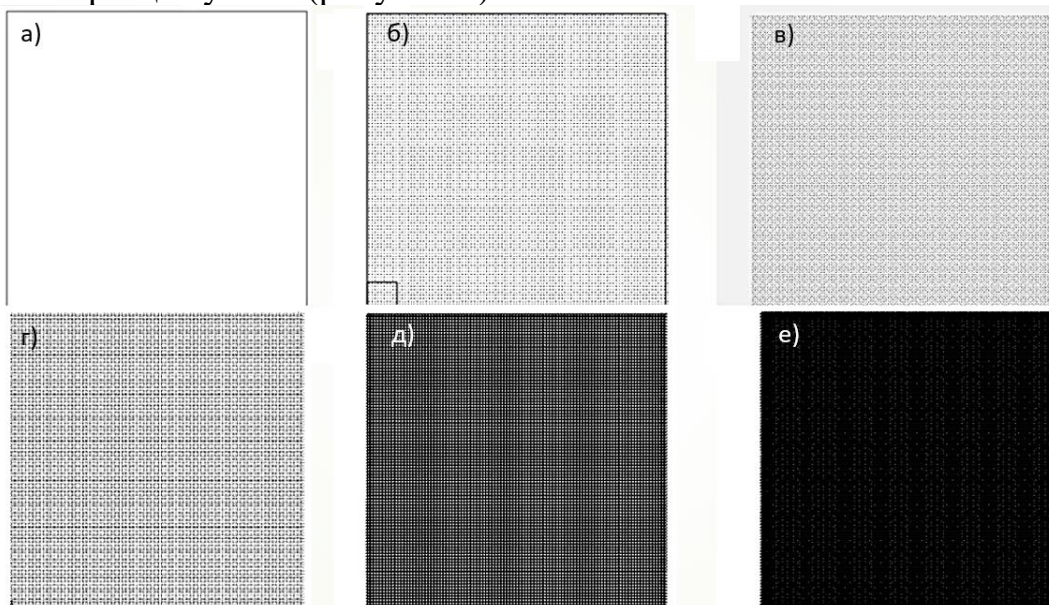


Рисунок 5 – Уровень запечатанности идеализированных образцов бумаги: а - 0 % (белизна CIE – 136,13 %, яркость ISO C/2 – 94,12 %, флуоресценция – 13,46, непрозрачность – 93,85 %); б - 2 % (белизна CIE – 121,7 %, яркость ISO C/2 – 79,5 %, флуоресценция – 10,9, непрозрачность – 94,6 %); в - 4 % (белизна CIE – 114,9 %, яркость ISO C/2 – 72,72 %, флуоресценция – 10,09, непрозрачность – 94,56 %); г - 8 % (белизна CIE – 99,56 %, яркость ISO C/2 – 57,54 %, флуоресценция – 7,63, непрозрачность – 95,58 %); д - 32 % (белизна CIE – 40,89 %, яркость ISO C/2 – 12,03 %, флуоресценция – 1,08 %, непрозрачность – 98,57 %); е - 64 % (белизна CIE – 27,06 %; яркость ISO C/2 – 12,03 %; флуоресценция – 0,44; непрозрачность – 99,96 %)

На рисунке б представлены зависимости оптических свойств от уровня запечатанности бумаги в идеальных условиях, которые соответствуют равномерному распределению вкраплений с одинаковой площадью.

Таким образом, определена идеальная зависимость между уровнем запечатанности бумаги и оптическими свойствами. На практике идеальные условия не возможны, так как тонер будет распределен на частицы разного размера, располагающиеся не на одинаковом расстоянии друг от друга. Идеальные условия предлагается использовать при оценке эффективности

флотации, которая будет определяться разностью белизны, яркости и вкраплениями тонера в идеальном случае и на практике.

Из рисунка 6 видно, что белизна, яркость и флуоресценция с увеличением уровня запечатанности снижаются по экспоненте и подчиняются уравнениям, представленным на графиках, а непрозрачность имеет пропорциональную зависимость от уровня запечатанности.

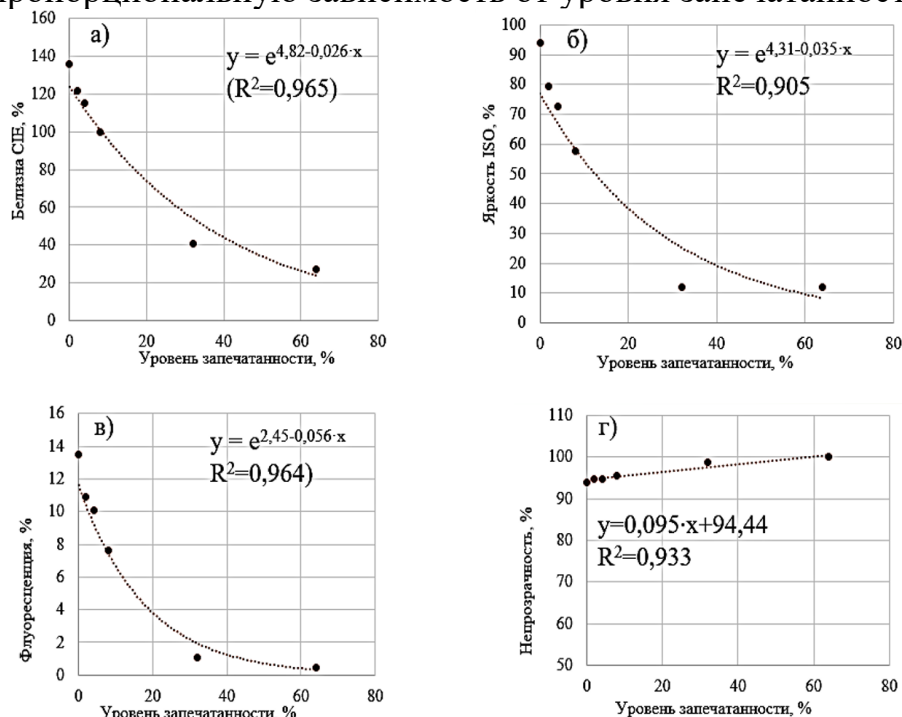


Рисунок 6 – Зависимость белизны (а), яркости (б), непрозрачности (в) и флуоресценции (г) от уровня запечатанности при идеальном распределении вкраплений тонера на бумаге «Svetocopy Classic»

По уравнениям можно рассчитать эффективность флотации относительно различных параметров белизны, яркости, флуоресценции и непрозрачности.

В таблице 7 представлены показатели, определяющие эффективность флотации различных вариантов. Оценка эффективности производилась по вкраплениям тонера, по белизне и по яркости. По данным исходного ( $T_n$ ) и полученного после флотации ( $T_k$ ) уровня запечатанности определялась эффективность ( $\Delta T$ ).

Эффективность флотации также оценивалась по оптическим показателям, а именно, по яркости и белизне, которые часто используются в качестве стандартных показателей белой бумаги и картона. Показатель эффективности флотации по белизне ( $\Delta B$ ) оценивался в зависимости от рассчитанного по уравнению показателя для уровня запечатанности  $x=8,2\%$  и полученного экспериментально после флотации показателя ( $y_B$ ). По аналогии рассчитывалась эффективность флотации по яркости ( $\Delta Y$ ) в зависимости от показателя, определённого теоретически по уравнению ( $y_{Yn}$ ) и экспериментальным путём ( $y_{Yk}$ ). Флуоресценция и непрозрачность рассчитывается аналогично.

Из таблицы 7 видно, что вкрапления тонера практически полностью удаляются, если использовать сухое диспергирование перед флотацией. Частицы тонера равномерно распределяются в исследуемой области, что приводит к повышению эффективности флотации с 48,8 до 95,9 %. Однако это

приводит к незначительному снижению белизны (CIE), яркости (ISO), что подтверждается снижением эффективности флотации по белизне (CIE) с 16,9 до 13,4 % и яркости (ISO) с 49,7 до 42,3 % при сухом диспергировании относительно мокрого способа флотации.

Таблица 7 - Результаты оценки эффективности флотации по оптическим показателям и уровню запечатанности тонером 8,2 %

Технологии очистки тонера от макулатуры	Показатели эффективности очистки тонера от макулатуры, %								
	по вкраплениям тонера			по белизне (CIE)			по яркости		
	исходный, $T_n$	полученный, $T_k$	эффективность, $\Delta_T = 100 \cdot (T_n - T_k) / T_n$	идеальный, $U_{Bн} = e^{4,82 \cdot 0,05 \cdot x}$ , при $x=8,2\%$	полученный, $U_{Bк}$	эффективность, $\Delta_B = 100 \cdot (U_{Bн} - U_{Bк}) / U_{Bн}$	идеальный, $U_{Ян} = e^{4,82 \cdot 0,026 \cdot x}$ при $x=8,2\%$	полученный, $U_{Як}$	эффективность, $\Delta_Я = 100 \cdot (U_{Ян} - U_{Як}) / U_{Ян}$
Мокрый роспуск с флотацией	8,2	4,2	<b>48,8</b>	82,3	99	<b>16,9</b>	43,25	86	49,7
Флотация с сухим диспергированием	8,2	0,34	95,9	82,3	95	13,4	43,25	75	42,3
Флотация с сухим диспергированием и обработкой – $\alpha$ -амилазой	<b>8,2</b>	<b>0,23</b>	<b>97,2</b>	<b>82,3</b>	<b>98</b>	<b>16,0</b>	<b>43,25</b>	<b>76</b>	<b>43,1</b>
Флотация с сухим диспергированием и обработкой целлюлазой	8,2	0,3	96,3	82,3	95	13,4	43,25	75	42,3

Использование ферментов в совокупности с сухим диспергированием позволяет восстановить эффективность флотации по оптическим показателям (по белизне с 13,4 % до 16 % практически до уровня, соответствующего мокрому роспуску (16,9%) и в меньшей степени по яркости до 76 %). По вкраплениям тонера эффективность флотации при использовании фермента  $\alpha$ -амилазы повышается до 97,2 %. Таким образом, определен наиболее эффективный способ облагораживания макулатуры МС-7Б, который можно рекомендовать производителям белых сортов бумаги или картона.

**В четвёртом разделе рассматривается модернизация технологической линии на примере бумажной фабрики ОАО «Караваш». Для этого была проведена оценка окупаемости инвестиций на организацию флотации на требуемое количество макулатуры из запечатанного архива (рисунок 7).**

Согласно рисунку 7 инвестировать средства на модернизацию технологии производства картона с белым покровным слоем рекомендуется, если у предприятия существует возможность собрать около 645,5 т/год макулатуры из офисных видов бумаг. Для предприятия, находящегося вблизи крупного мегаполиса (г. Москва), который потребляет около 140 000 тонн офисной бумаги необходима небольшая доля из общего оборота. При производительности в 60 т/сут ОАО «Караваш» может окупить инвестиции за короткий срок. Инвестиции в проект по совершенствованию линии по производству картона с белым слоем с помощью сухого диспергирования макулатуры составляют 31 429 тыс. руб.

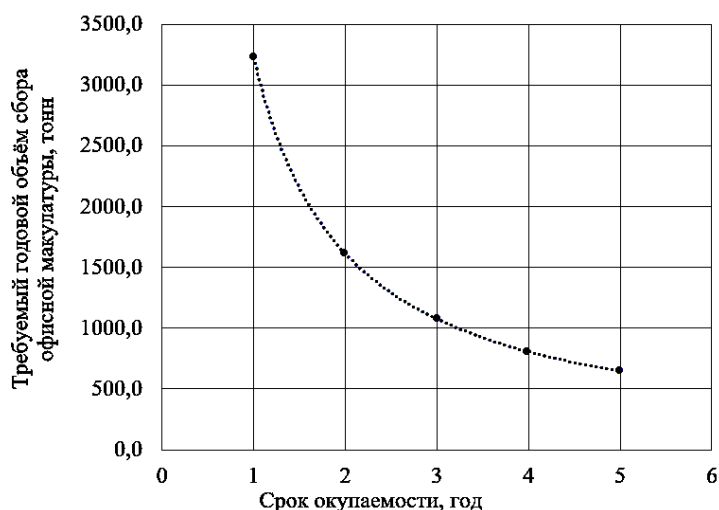


Рисунок 7 - Влияние срока окупаемости инвестиций на организацию флотации на требуемое количество макулатуры из запечатанного архива

Для окупаемости инвестиционного проекта в течение 5 лет необходимо ежегодно получать 6 285 800 руб. прибыли, что возможно при сборе 645,5 т/год макулатуры офисных видов бумаги и производстве более дорогостоящего картона с белым покровным слоем по предлагаемой технологии.

### Выводы

1. Установлено влияние сухого диспергирования на облагораживание макулатуры из офисной бумаги с печатью методом флотации. Показано, что по сравнению с мокрым роспуском макулатуры, сухое диспергирование макулатуры перед флотацией приводит к уменьшению оставшихся вкраплений тонера, более равномерному его распределению, что позволяет получить бумагу с равномерной структурой. При этом механические и оптические показатели снижаются незначительно.

2. Сухое диспергирование макулатуры из офисной бумаги «SvetoCopy Classic» и «SvetoCopy ECO» с печатью перед облагораживанием методом флотации показало, что увеличивается скрученность и изогнутость волокон. В последствии это может благоприятно сказаться на пухлости и впитываемости, что важно для санитарно-гигиенических видов бумаги.

3. Применение ферментов при флотации позволяет повысить оптические свойства бумаги «SvetoCopy Classic» и не требуется при облагораживании макулатуры из бумаги «SvetoCopy ECO». Применение фермента  $\alpha$ -амилазы при облагораживании макулатуры методом флотации с предварительным сухим диспергированием позволяет повысить показатель белизны бумаги «SvetoCopy Classic» на 3–5 %.

4. Результатом разработки цифровой модели стали зависимости оптических свойств от вкраплений тонера при различных способах флотации, что позволяет оценить эффективность каждого. Предложенные зависимости могут использоваться на практике предприятий, собирающих и сортирующих макулатуру, а также при входном контроле качества сырья на бумажных и картонных фабриках для прогнозирования оптических свойств готовой продукции.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ*

1. Мидукова, М.А. Сравнение морфологических свойств волокон макулатуры из газетных и офисных видов бумаг / М.А. Мидукова, Е.Г. Смирнова // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – № 243 – С. 267–275.

2. Мидукова, М.А. Совершенствование технологии флотации макулатуры из офисной бумаги / М.А. Мидукова, Е.Г. Смирнова, А.С. Смолин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – № 238. – С. 267–275

3. Пат. № 2744563 С1. Российская Федерация, МПК D21C 5/02. Способ удаления печатной краски от макулатуры / М.А. Мидукова, А.С. Смолин; заявитель и патентообладатель ВГОУ ВПО «СПбГУПТД» . – № 2020122059; заявл. 29.06.2020; опубл. 11.03.2021, Бюл. № 8.

*Прочие публикации*

4. Мидукова, М.А. Влияние различных способов очистки макулатуры от тонера на оптические свойства бумаги / М.А. Мидукова и др. // Известия вузов. Серия 4. Промышленные технологии. – 2022. – № 4. – С 85–90.

5. Мидукова, М.А. Снижение загрязнения окружающей среды при производстве белых сортов бумаги путём перехода на вторичное сырьё / М.А. Мидукова и др. // XXV междунар. Биос-форум и молодежная Биос-олимпиада. – СПб., – 2020. – С. 244–246.

6. Midukova, M.A Wastepaper deinking methods / M.A. Midukova // Dialogue of generations. – 2020. – SPb. – P. 76-78.

7. Мидукова, М.А. Технология флотации макулатуры из офисных видов бумаги / М.А. Мидукова, Е.Г. Смирнова // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: Матер. II междунар. научн.-техн. конф. молодых учёных ЦБП. – СПб. – 2020. – С. 55-57.

8. Мидукова, М.А. Способы деинкинга макулатуры в России и Европе// М.А. Мидукова, А.С. Смолин// Гофроиндустрия на современном этапе развития: XVII междунар. научн.-практ. конф. – СПб., – 2019. – С. 45–47.

9. Голяветдинов, Н.Д. Интенсификация процесса экстракции из растительного сырья в поле механических колебаний / Н.Г. Голяветдинов, М.А. Тихомирова и др. // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 14. – Т. 17. – С.359–361.

10. Мидукова М.А. Техничко-экономическая оценка внедрения технологии очистки офисной бумаги от тонера на отечественной фабрике / М.А. Мидукова, Е.М. Фрейдкина, А.В. Власов, Т.В. Дубровина // Известия вузов. Серия 4. Промышленные технологии. – 2023. – № 4. – С 82-91.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с указанием фамилии, имени, отчества, почтового адреса, адреса электронной почты, наименования организации, должности лица, составившего отзыв, подписанные и заверенные печатью, просим направлять по адресу: 198095 г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных,4.