

*На правах рукописи*

**ЛЫЧЕНКО АЛЕКСАНДРА АНДРЕЕВНА**

**ПРИМЕНЕНИЕ СУХОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ОТХОДОВ  
ПРОИЗВОДСТВА БУМАГИ И БУМАЖНОЙ ПРОДУКЦИИ  
В ПРОЦЕССЕ МАССОПОДГОТОВКИ**

Специальность 05.21.03 - Технология и оборудование химической переработки  
биомассы дерева; химия древесины

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Архангельск  
2017

Работа выполнена в АО «Всероссийский научно-исследовательский институт целлюлозно-бумажной промышленности» (АО «ВНИИБ»).

**Научные руководители:**

кандидат технических наук

**Осипов Петр Сергеевич**

кандидат технических наук

**Галкина Людмила Арсеньевна**

**Официальные оппоненты:**

**Махотина Людмила Герцевна**

доктор технических наук, профессор кафедры технологии целлюлозы и композиционных материалов Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

**Дернова Елена Валентиновна**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова

**Ведущая организация**

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (СПбЛТУ), г. Санкт-Петербург

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г. в \_\_ часов в ауд. \_\_ на заседании диссертационного совета Д 212.008.02. при ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова» (САФУ) по адресу: 163002, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САФУ имени М. В. Ломоносова и на сайте [www.narfu.ru](http://www.narfu.ru)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат химических наук, доцент

Т. Э. Скребец

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современные тенденции расширения ассортимента влагопрочной бумажной продукции и достижения прочности «классических» видов бумаги за счет применения синтетических добавок создают на предприятиях трудности для переработки производственных отходов. В связи с этим актуальной проблемой является поиск способа переработки отходов производства бумаги и бумажной продукции (отходов бумажного производства), альтернативного традиционному ро-спуску в гидродинамических аппаратах. В диссертационной работе в качестве возможного решения этой проблемы рассматривается способ сухого диспергирования отходов.

**Цель работы.** Научное обоснование и разработка основ технологии массоподготовки с применением сухого диспергирования отходов бумажного производства, в том числе влагопрочных.

Предложено сухое диспергирование отходов осуществлять в воздушной среде под действием ударной нагрузки, например в молотковой дробилке, поскольку именно эти условия позволяют максимально сохранить целостность вторичного волокна и получить дисперсию, пригодную для приготовления бумажной массы.

Решаемые задачи:

1. Системное изучение процесса сухого диспергирования отходов бумаги и бумажной продукции в аппарате ударного воздействия, включая следующие частные решения:

– анализ влияния процесса сухого диспергирования отходов на геометрические и морфологические характеристики и бумагообразующие свойства вторичного целлюлозного волокна;

– построение физико-механических моделей процесса сухого диспергирования отходов разного вида бумаги и бумажной продукции, включая влагопрочные;

– поиск технического решения для переработки влагопрочных отходов бумажного производства на базе сухого диспергирования в молотковой дробилке.

2. Разработка основ технологии массоподготовки с применением сухого диспергирования отходов бумажного производства.

**Научная новизна.** В результате выполнения диссертационной работы впервые:

– теоретически обоснованы существенные факторы, определяющие результат сухого диспергирования отходов производства бумаги и бумажной продукции в молотковой дробилке;

– получены индексированные оценки изменения геометрических характеристик и морфологических превращений целлюлозных волокон в процессе сухого диспергирования отходов в молотковой дробилке;

– научно обоснован полезный результат предварительного сухого диспергирования отходов бумажного производства – улучшение бумагообразующих свойств вторичного целлюлозного волокна и повышение механической прочности полученной бумаги;

– построены физико-механические модели процесса сухого диспергирования отходов бумажного производства, основанные на представлении о структуре бумаги как волокнистом композите;

– предложен принцип приготовления бумажной массы из влагопрочных отходов бумажного производства с применением сухого диспергирования.

**Практическая ценность работы:** Разработаны основы технологии массоподготовки с применением сухого диспергирования влагопрочных отходов бумажного производства (Патент РФ № 2583362).

Рекомендовано применение сухого диспергирования как способа, обеспечивающего возможность переработки влагопрочных отходов бумажного производства, а также высокую степень восстановления бумагообразующих свойств вторичного целлюлозного волокна.

**Методология и методы исследования.** Методология научных исследований основана на теоретической модели процесса сухого диспергирования. В работе использованы стандартные, оригинальные и современные методы анализа целлюлозного волокна и бумаги, в частности, аналитическая система – Morfi Compact.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ, включая 3 статьи в журналах, входящих в перечень, утвержденный ВАК РФ, и 1 патент РФ.

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на III Международной научно-практической конференции «Качество продукции ЦБП и гофроиндустрии», (Санкт-Петербург, 2014 г.), на Международной научно-практической конференции «Новое в конструировании, модернизации, автоматизации БДМ и КДМ», (Санкт-Петербург, 2016 г.).

Практическая апробация выполнена на АО «Пролетарий» для выработки картона хром-эрзац с частичной заменой свежей целлюлозы на вторичное волокно, полученное в результате сухого диспергирования отходов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация включает введение, аналитический обзор научно-технической информации, методическую, научную, технологическую и экономическую часть, а также выводы, список литературы, приложения. Содержание работы изложено на 116 страницах, включая 21 рисунок и 13 таблиц, список литературы из 105 наименований.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Системный теоретически обоснованный подход к изучению процесса сухого диспергирования отходов бумажного производства в молотковой дробилке.

2. Индексированные оценки морфологических и геометрических превращений целлюлозного волокна в процессе сухого диспергирования отходов бумажного производства.

3. Особенности воздействия сухого диспергирования отходов на восстановление бумагообразующих свойств вторичного целлюлозного волокна в процессе последующего водного размола.

4. Возможный механизм структурных превращений целлюлозного волокна в процессе сухого диспергирования (размола) целлюлозных материалов.

5. Физико-механические модели процесса сухого диспергирования отходов бумажного производства, основанные на представлениях о бумаге как волокнистом композите.

6. Принцип приготовления бумажной массы из влагопрочных отходов бумажного производства с применением предварительного сухого диспергирования.

7. Технологические основы применения сухого диспергирования влагопрочных отходов бумажного производства в процессе массоподготовки.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность постановки диссертационной работы с целью разработки способа диспергирования отходов бумажной продукции, альтернативного традиционному роспуску в гидродинамических аппаратах и позволяющего расширить возможность предприятия по переработке производственных отходов. Поставлена цель работы, определены решаемые задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту.

### **1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР**

В результате аналитического обзора выявлено, что известные способы переработки влагопрочных бумажных отходов приводят к деструкции целлюлозного волокна или полной утрате волокнистой структуры. Получить дисперсии единичных волокон с максимальным сохранением их целостности, пригодную для бумажной массы принципиально возможно в условиях сухого диспергирования в аппаратах ударного воздействия.

Выявлено, что на практике применение сухого способа диспергирования целлюлозных материалов ограничено получением пушонки технического назначения. Научные исследования в этой области проводились в середине прошлого столетия по двум направлениям: гидролиз целлюлозы и сухой размол целлюлозы в дисковой мельнице для выработки фильтровальной бумаги. Недостаток научных знаний по этому вопросу послужил предпосылкой для системного изучения сухого диспергирования отходов бумажного производства как научной основы его применения в процессе массоподготовки.

### **2 МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

Условия экспериментов по изучению сухого диспергирования отходов бумажного производства установлены на основании результатов теоретического анализа этого процесса. Скорость вращения ротора молотковой дробилки ( $v$ ) варьируется в интервале 1500–2100–2900 об/мин. Выборка изучаемых объектов включает отходы коробочного картона, мешочной и упаковочной бумаги, основы для ламинирования – так называемые «классические», и влагопрочные отходы чайной бумаги, содержащие синтетические добавки. Включение в выборку в качестве влагопрочных – отходов переработки чайной бумаги обусловлено актуальностью проблемы их регенерации и значительным объемом образования при формировании фильтр-пакетов. Экс-

периментальные данные обрабатывали методом вариационной статистики. Статистическую значимость показателей оценивали с помощью критерия Стьюдента при  $P = 0,95$ . Коэффициенты корреляции и регрессии рассчитывали по принятым формулам, значимость проверяли при  $P = 0,90$ .

### 3 НАУЧНАЯ ЧАСТЬ

**3.1 Теоретическое обоснование системного изучения процесса сухого диспергирования отходов бумаги.** Научной предпосылкой системного изучения сухого диспергирования отходов бумаги служат результаты теоретического анализа этого процесса. Анализ основан на представлениях о структуре бумаги как «волоконистом композите» – двухфазной системе, состоящей из целлюлозного волокна (армирующего элемента) и области межволоконного взаимодействия, заполненного аморфным полимером (матрицы). В условиях нагрузки композита разрушение матрицы осуществляется за счет касательных напряжений ( $\tau$ ), армирующего элемента – за счет нормальных напряжений ( $\delta$ ).

Процесс диспергирования отходов, направленный на получение дисперсии единичных волокон при максимальном сохранении их целостности, может быть описан неравенством:  $\sigma_{св} < \tau \div \delta < \sigma_{в}$ , а  $\delta$  и  $\tau$  представлены в виде функциональных зависимостей, переменные которых выражают совокупность существенных факторов процесса сухого диспергирования:  $\tau = f(v, Y_{о,в}, E_{о,в}, \frac{r}{l})$  и  $\delta = f(v, Y_{в}, E_{в})$ , где  $v$  – скорость соударения диспергируемых объектов и рабочей гарнитуры дробилки,  $v = f(v)$ ,  $Y_{о,в}$  и  $E_{о,в}$  – соответственно плотность и модуль упругости отходов и волокна,  $\frac{r}{l}$  – отношение радиуса и длины волокна,  $\sigma_{св}$  – предел прочности сцепления на границе фаз (межволоконных связей),  $\sigma_{в}$  – предел прочности армирующей фазы (целлюлозного волокна).

**3.2 Анализ влияния сухого диспергирования отходов на геометрические и морфологические характеристики вторичного целлюлозного волокна.** Геометрические и морфологические характеристики вторичного волокна анализировали на системе Morfi Comprat. Степень их изменения в процессе диспергирования оценивали по индексу показателя и его отклонению от 1.0, за единицу принято базовое значение показателя – значение для волокна в исходном состоянии (таблица 1).

Таблица 1– Геометрические и морфологические характеристики волокна и индексы показателей в зависимости от интенсивности процесса диспергирования

Показатель	Происхождение отходов	Базовое значение	Индекс показателя при $v$ , об/мин		
			1500	2100	2900
Длина волокна, мм	Мешочная бумага	1,35	0,90	0,88	0,87
	Коробочный картон	1,18	0,96	0,93	0,91
	Чайная бумага	2,13	0,82	0,81	0,80
Ширина, мкм	Мешочная бумага	29	0,97	1,00	1,00
	Коробочный картон	25	1,00	1,00	1,00
	Чайная бумага	28	1,07	1,07	1,04
Грубость, мг/м	Мешочная бумага	0,16	1,06	1,25	1,31
	Коробочный картон	0,15	1,07	1,13	1,13
	Чайная бумага	0,15	1,40	1,33	1,93

Скручиваемость, %	Мешочная бумага	6	1,17	1,33	1,33
	Коробочный картон	8	1,13	1,13	1,25
	Чайная бумага	16	1,44	1,38	1,25
Угол изгиба, °	Мешочная бумага	14	1,50	1,71	1,65
	Коробочный картон	23	1,39	1,43	1,65
	Чайная бумага	49	1,31	1,33	1,22

Из таблицы 1 следует, что индекс длины волокна существенно не отклоняется от 1 и снижается в пределах 0,96–0,80 соответственно ряду отходов: коробочный картон – мешочная бумага – чайная бумага, в этой же последовательности уменьшается разность между индексами при переходе от  $V_{\max}$  к  $V_{\min}$  соответственно 0,05–0,03–0,02. Индекс ширины волокна в составе отходов мешочной бумаги и коробочного картона равен 1,00, в случае отходов чайной бумаги отклоняется на 0,07. Полученные индексированные оценки длины и ширины вторичного волокна свидетельствуют о высокой степени сохранения его целостности в процессе диспергирования отходов в молотковой дробилке.

Индексы морфологических превращений волокна изменяются в интервале значений 1,1–2,0. При этом подверженность волокна морфологическим превращениям в процессе диспергирования преимущественно обусловлена его происхождением.

Так, жесткое волокно небеленой хвойной целлюлозы, образующее структуру мешочной бумаги и короткое ороговевшее вторичное волокно, из которого состоит коробочный картон, подвергаются преимущественно изгибу, индексы показателя соответственно находятся в пределах 1,50–1,71 и 1,39–1,65. Мягкое беленое волокно хвойной целлюлозы, превалирующее в композиции чайной бумаги, в отличие от них меньше подвержено изгибу, но имеет высокий индекс грубости в интервале значений 1,40–1,93, против 1,06–1,31 и 1,07–1,13 соответственно для мешочной бумаги и коробочного картона.

Исходя из определения грубости, как массы совокупности волокон, общая длина которых составляет 1 м, правомерно её увеличение в условиях диспергирования рассматривать в качестве косвенного свидетельства уплотнения целлюлозного волокна. Этот результат согласуется с экспериментальными данными Д. М. Фляте и М. Р. Кагана, которые также свидетельствуют о повышении плотности волокна в процессе сухого размол хлопковой и хвойной целлюлозы в дисковой мельнице.

Ранжирование средних значений отклонения показало, что по степени морфологических превращений волокна изучаемые отходы располагаются в следующем порядке: чайная бумага – 0,36, мешочная бумага – 0,31, коробочный картон – 0,21, а изменчивость изучаемых характеристик снижается согласно ряду: угол изгиба – 0,46, грубость – 0,29, скручиваемость – 0,26.

**3.3 Изучение процесса массоподготовки с включением предварительного сухого диспергирования отходов.** Роспуск и водный размол воздушных дисперсий, полученных в результате сухого диспергирования отходов, осуществляли в лабораторном ролле в процессе приготовления бумажной массы со степенью помола 30–33° ШР (таблица 2).

Таблица 2 – Графики роспуска и размол волокнистых дисперсий, полученных из отходов бумажного производства при разных скоростях вращения ротора дробилки (Р – нагрузка на барабан ролла, t – продолжительность)

Происхождение отходов	v, об/мин	Роспуск		Размол		
		t, мин	Дисперсный состав, степень помола	Р, усл. ед.	t, мин	Дисперсный состав, степень помола
Мешочная бумага	Базовый	30	Единичное волокно 16° ШР	1,0	10	Однородная волокнистая масса 30–31° ШР
	1510	20	Единичное волокно 17° ШР	2,5		Однородная волокнистая масса 31–33° ШР
Коробочный картон	Базовый	30	Единичное волокно 17° ШР	1,0	15	Однородная волокнистая масса 30–32° ШР
	1510	20	Единичное волокно 17° ШР	2,5		Однородная волокнистая масса 30–33° ШР
Чайная бумага	Базовый	20	Жгуты, сгустки, фрагменты	2,5	40	Однородная мелкодисперсная масса 78–80° ШР
	1510	10	Лепестки, пучки, единичное волокно 12° ШР	2,0	20	Однородная волокнистая масса 30–32° ШР
	2140		Пучки, единичное волокно 12° ШР			
	2870		Пучки, единичное волокно 12° ШР			

Из таблицы видно, что дисперсия единичных волокон из отходов мешочной бумаги и коробочного картона может быть получена даже при минимальной интенсивности сухого диспергирования. Для достижения степени помола массы 30–33° ШР из предварительно диспергированных отходов требуется нагрузка на барабан 2,5 усл. ед. (против 1,0 усл. ед. для базовых вариантов). Таким образом, способность изучаемых отходов бумажного производства к последующему водному размолу в результате диспергирования в молотковой дробилке снижается, при этом в большей степени в случае отходов из вторичного целлюлозного сырья (коробочного картона). Полученные экспериментальные данные также согласуются с выводами выше упомянутых авторов о влиянии сухого размол целлюлозы в дисковой мельнице на её способность к размолу в воде.

При изучении процесса массоподготовки с применением отходов чайной бумаги базовым образцом служили отходы, предварительно измельченные посредством резки. В этом случае в условиях водного размол отходов образуются жгуты и сгустки, а однородность массы достигается только при степени помола массы более 80° ШР. Как видно из таблицы, дисперсия частиц, полученная в этом случае в молотковой дробилке, кроме единичных волокон включает их пучки и лепестки, однако в условиях последующего водного размол однородность массы достигается уже при степени помола 30° ШР. Следовательно, фрагментарные части отходов в процессе сухого диспергирования приобретают способность к последующему водному размолу.

**3.4 Оценка бумагообразующих свойств вторичного целлюлозного волокна, полученного из отходов сухим способом.** Бумагообразующие свойства вторичного волокна, полученного из отходов бумажного производства с применением сухого диспергирования и последующего водного размола, изучали в сравнении с базовым волокном, приготовленным в результате водного роспуска, на стандартных отливках. Отливки толщиной 0,16–0,20 мм, массой 1 м<sup>2</sup> 75–80 г изготавливали на аппарате «Рapid» из бумажной массы со степенью помола 30–32° ШР (таблица 3).

Таблица 3 – Бумагообразующие свойства вторичных целлюлозных волокон, полученных из отходов бумажного производства, диспергированных в молотковой дробилке

Исходные отходы	v, об/мин	Разрушающее усилие, Н	Удлинение в момент разрушения, %	Разрывная длина, м	Предел прочности при растяжении, МПа	Соппротивление продавливанию, кПа	Энергия внутренних связей, Дж/м <sup>2</sup>
Бумага мешочная	базовый	49	1,1	3800	20	171	258
	1500	54	0,8	5000	23	177	265
	2100	53	1,1	5500	22	223	308
	2900	55	0,9	5100	26	230	309
Картон коробочный	базовый	36	1,1	3000	14	101	220
	1500	46	2,0	3100	19	164	264
	2100	54	1,8	4600	23	179	275
	2900	52	1,7	5100	26	175	230
Чайная бумага	1500	37	1,6	2300	12	155	218
	2100	38	1,8	3000	13	152	238
	2900	38	1,7	2600	12	145	195

Из таблицы видно, что сухое диспергирование отходов мешочной бумаги и коробочного картона в молотковой дробилке приводит к существенному улучшению бумагообразующих свойств вторичного волокна. Повышение прочности отливок по отдельным показателям составляет соответственно: по сопротивлению продавливанию 35 % и 78 %, разрывной длине 45 % и 70 %, пределу прочности 30 % и 85 %, энергии внутренних связей 20 и 25 %.

Известно, что восстановление бумагообразующих свойств вторичного волокна в условиях водного размола связано с развитием его удельной поверхности в результате набухания, гидратации и фибрилляции. Вполне очевидно, что условия сухого диспергирования исключают возможность возникновения этих процессов. Однако обоснованием достигнутого уровня бумагообразующих свойств вторичного волокна могут служить данные, ранее полученные при изучении сухого размола целлюлозы в дисковой мельнице, согласно которым этот процесс приводит к увеличению удельной поверхности и суммарного объема пор целлюлозного волокна примерно на 45 %. Наблюдаемое перераспределение в пористой структуре волокна авторы объясняют снижением общего объема одновременно и мелких микро-, и крупных макропор и соответствующим сдвигом полидисперсного распределения в область макропор. При этом наиболее мелкие микропоры блокирует мельштоф.

Следовательно, высокую степень восстановления бумагообразующих свойств в процессе сухого диспергирования отходов в молотковой дробилке можно рассматривать как следствие структурных превращений целлюлозного волокна. Очевидно, что предварительное увеличение удельной поверхности волокна способствует развитию процесса фибрилляции волокна в условиях последующего водного размола и развитию межволоконного взаимодействия.

Обобщая изложенное, механизм структурной перестройки целлюлозного волокна в процессе сухого размола можно представить следующим образом. Аналогично любому реальному твердому телу, в котором напряжения, возникающие при нагрузке, концентрируются вблизи пустот, напряжения, действующие на волокно в условиях сухого размола, концентрируются по краям пор. Это приводит к увеличению их размера и переходу микропор в категорию мелких, мелких – в средние и далее. Наиболее вероятно разрастание крупных макропор до критического размера и их исчезновение, которое приводит к локальному сплющиванию и уплотнению волокна. Результатом этих процессов является отмеченное выше изменение пористой структуры целлюлозного волокна с увеличением его удельной поверхности – существенного фактора формирования бумагообразующих свойств.

Таким образом, выявлено и научно обосновано положительное влияние предварительного сухого диспергирования отходов на бумагообразующие свойства вторичного целлюлозного волокна. Показана целесообразность применения сухого диспергирования отходов бумаги и картона с целью восстановления бумагообразующих свойств вторичного целлюлозного волокна.

В связи с отсутствием базового образца из отходов чайной бумаги изучали только принципиальную возможность получения вторичного волокна и формирования из него бумажного листа. Показано, что отливки из отходов чайной бумаги при степени помола массы до 30–32° ШР по прочностным свойствам соответствуют общим требованиям бумажного производства, а бумажная масса обладает существенным потенциалом бумагообразующих свойств, который может быть реализован при более высокой степени помола.

**3.5 Анализ индивидуального влияния существенных признаков отходов на результат сухого диспергирования.** В настоящем исследовании критерием результата сухого диспергирования служит индекс длины вторичного целлюлозного волокна. Взаимосвязь между индексом длины вторичного волокна и существенными признаками (физико-механическими характеристиками) отходов оценивали по результатам статистического анализа с помощью коэффициентов корреляции.

Анализ выполняли на следующей выборке отходов: бумага упаковочная, бумага-основа для ламинирования, картон хром-эрзац, варьируя два фактора сухого диспергирования – интенсивность процесса и диаметр сепарационного сита.

Графики распределения длины вторичного волокна в полученных дисперсиях приведены на рисунке 1, индексы длины вторичного волокна приведены в таблице 4.

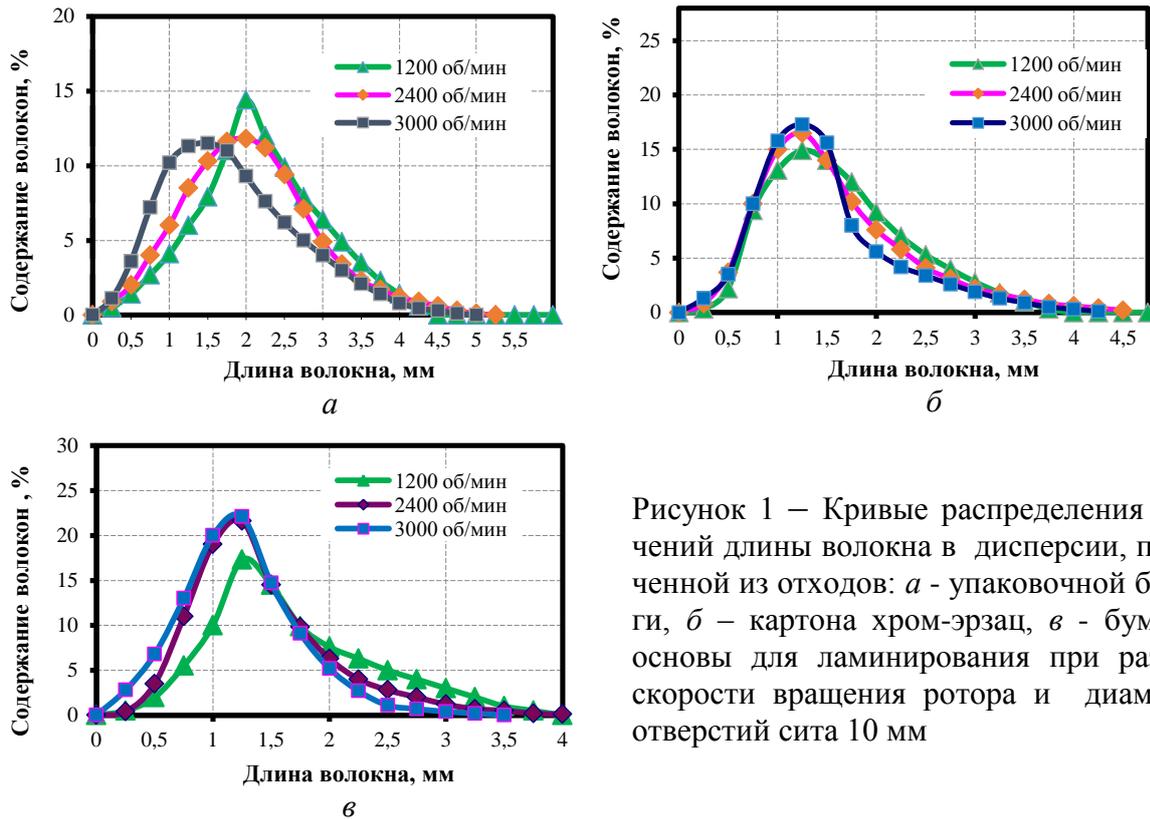


Рисунок 1 – Кривые распределения значений длины волокна в дисперсии, полученной из отходов: *a* - упаковочной бумаги, *б* – картона хром-эрзац, *в* - бумаги-основы для ламинирования при разной скорости вращения ротора и диаметре отверстий сита 10 мм

Таблица 4 – Индексы длины вторичного целлюлозного волокна при разных значениях скорости вращения ротора и диаметра отверстий сита

Происхождение отходов	Диаметр отверстий сита, мм	Индекс длины вторичного волокна при $v$ , об/мин		
		1200	2400	3000
Бумага упаковочная	10	1,00	0,95	0,91
	8	0,99	0,91	0,83
	6	0,94	0,88	0,84
Картон хром-эрзац	10	0,89	0,83	0,73
	8	0,83	0,78	0,75
	6	0,79	0,76	0,62
Бумага-основа для ламинирования	10	0,84	0,82	0,70
	8	0,79	0,75	0,74
	6	0,79	0,75	0,71

Полученные статистические зависимости между индексом вторичного волокна и физико-механическими характеристиками отходов бумажного производства выражаются эмпирическими уравнениями типа:  $y = b + kx$  (таблица 5).

Таблица 5 – Коэффициенты уравнений для зависимостей между индексом длины вторичного волокна и существенными признаками отходов

Существенные признаки отходов	$v$ , об/мин	Статистические оценки регрессии		
		Коэффициент корреляции ( $r$ )	Угловой коэффициент ( $k$ )	Свободный член уравнений ( $b$ )
Плотность, $\text{кг/м}^3$	1200	-0,9	-0,10	159,6
	2400	-0,9	-0,08	142,8
	3000	-0,8	-0,09	140,5

Предел прочности, МПа	1200	0,7	1,85	41,7
	2400	0,7	1,64	42,0
	3000	0,8	2,18	22,0
Удлинение в момент разрушения, %	1200	-0,7	-8,45	126,8
	2400	-0,7	-7,43	117,2
	3000	-0,8	-9,54	120,4
Разрывная длина, км	1200	0,9	10,67	49,2
	2400	0,9	9,14	50,0
	3000	0,9	10,80	37,4
Длина волокна, мм	1200	0,9	32,70	26,5
	2400	0,8	26,92	32,5
	3000	0,7	27,50	24,6

Из таблицы видно, что значения коэффициентов корреляции находятся в интервале 0,7–0,9 (значимы при  $P = 0.90$ ), что свидетельствует о тесной корреляционной зависимости между индексом длины вторичного волокна и изучаемыми характеристиками отходов. По степени влияния на сохранение целостности целлюлозного волокна в процессе диспергирования изучаемые характеристики отходов располагаются в следующей последовательности: плотность, разрывная длина и длина волокна.

Полученные уравнения позволяют качественно и количественно оценить индивидуальное влияние физико-механических характеристик отходов на сохранения целостности целлюлозного волокна в процессе сухого диспергирования и соответственно прогнозировать его результат.

**3.6 Физико-механические модели процесса сухого диспергирования отходов бумажного производства в условиях ударной нагрузки.** Системное изучение сухого диспергирования отходов предполагает построение физико-механической модели, которая, как и теоретическая модель, основана на представлениях о бумажных отходах как волокнистых композитах. Разрушение отходов в молотковой дробилке наступает под действием мгновенного удара, реализуется в упругой области и сопровождается выделением тепла. При этом аморфный полимер, заполняющий область межволоконного взаимодействия, застеклован и согласно теории Гриффитса разрушается хрупко в результате роста и распространения трещин.

Принципиальное значение имеют две модели процесса – диспергирование отходов бумаги с низкой плотностью и слабым межволоконным взаимодействием и, альтернативно, диспергирование отходов с высокой плотностью и сильным межволоконным взаимодействием.

Процесс диспергирования по первой модели осуществляется в области действия касательных напряжений. В результате сдвига волокон в аморфной фазе возникают трещины, их быстрому распространению способствует хрупкое разрушение застеклованного аморфного полимера. Волокна выдергиваются и высвобождаются, образуя индивидуальные единицы. Возможно, что наиболее слабые из них разрываются и превращаются в мелочь.

Для разрушения отходов высокой плотности требуется приложение более сильной нагрузки, при которой возникают и действуют нормальные напряжения. В этих условиях в результате сдвига волокна трещины в аморфной фазе образуются и распространяются мгновенно, а возникающие практически одновременно нормаль-

ные напряжения приводят к растяжению волокна с его разрывом или расколом. В условиях практически мгновенного разрушения матрицы высвобождение волокна при сохранении его целостности маловероятно.

Предложенные модели позволяют прогнозировать механизм разрушения отходов, содержащих синтетические добавки. Модель процесса зависит от соотношения предела прочности матрицы и предела прочности армирующего волокна. Теоретически возможно два варианта разрушения таких отходов. В случае незначительной разницы между прочностью матрицы и прочностью армирующего волокна диспергирование отходов осуществляется преимущественно по первой модели.

Необходимость ужесточения режима диспергирования приводит к тому, что в условиях сильной ударной нагрузки превалируют нормальные напряжения. Мгновенное распространение трещин сопровождается стремительным разрывом и расколом целлюлозных волокон, что приводит к полной утрате волокнистой структуры.

На основании моделирования процесса сухого диспергирования предложен принцип приготовления бумажной массы из влагопрочных отходов бумаги и бумажной продукции без существенной утраты целостности волокна.

Принцип основан на совмещении сухого диспергирования отходов и последующего водного размола и состоит в придании частицам в виде пучков и лепестков в условиях сухого диспергирования способности к водному размолу за счет образования трещин и ослабления межволоконного взаимодействия в результате сдвига и смещения волокон. Сухое диспергирование и водный размол реализуются в области касательных напряжений, что достигается за счет аппаратного оформления и подбора оптимальных параметров этих процессов.

Практическая реализация предложенного принципа иллюстрируется в технологической части работы на примере применения сухого диспергирования влагопрочных отходов переработки чайной бумаги в процессе подготовки массы для выработки специальных видов бумаги.

## **4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

**4.1 Изучение влияния вторичного волокна из отходов переработки чайной бумаги на потребительские свойства бумаги.** Для общей оценки вторичного волокна, полученного из диспергированных отходов чайной бумаги, как компонента бумажной массы, выбраны два альтернативных вида бумаги: пористая – основа фильтровальной бумаги для топливных фильтров (фильтровальная бумага) и плотная – основа этикеточной бумаги для упаковывания кондитерских изделий (упаковочная бумага).

Оценку производили, сравнивая лабораторные образцы бумаги, идентичные по композиции промышленным аналогам, и образцы, полученные с применением вторичного волокна (таблица 6).

Из таблицы следует, что при введении в композицию бумажной массы вторичного волокна из отходов чайной бумаги взамен свежей сульфатной беленой целлюлозы в количестве 40–60 % в целом достигается уровень качества лабораторных аналогов изучаемых видов бумаги.

Таблица 6 – Показатели качества образцов бумаги в зависимости от содержания в них вторичного волокна, полученного из отходов переработки чайной бумаги

Вид бумаги	Состав по волокну, нормируемые показатели по НТД	Значения показателей, содержание вторичного волокна, %		
		-	40	60
Основа фильтровальной бумаги для очистки топлива	Целлюлоза хвойная беленая, %	30	-	10
	Древесная масса, %	60	50	20
	Волокно полиэфиное, %	10	10	10
	Масса 1м <sup>2</sup> , г	98	99	100
	Предел прочности, МПа	1,4	1,5	2,0
	Разрушающее усилие, Н	10	11	12
	Сопротивление потоку воздуха, мм вод. ст.	3,6	3,6	4,2
Основа этикеточной бумаги для упаковывания кондитерских изделий	Целлюлоза хвойная беленая, %	100	60	40
	Масса 1м <sup>2</sup> , г	40	41	40
	Разрушающее усилие, Н	34	34	33
	Удлинение в момент разрушения, %	2,4	2,7	2,5

Результаты предназначены для разработки основ технологии массоподготовки с применением сухого диспергирования влагопрочных отходов бумажного производства в процессе выработки специальных видов бумаги.

**4.2 Технологическая схема сухого диспергирования отходов бумажного производства в молотковой дробилке.** Технологическая схема сухого диспергирования отходов бумажного производства в дробилке приведена на рисунке 2.

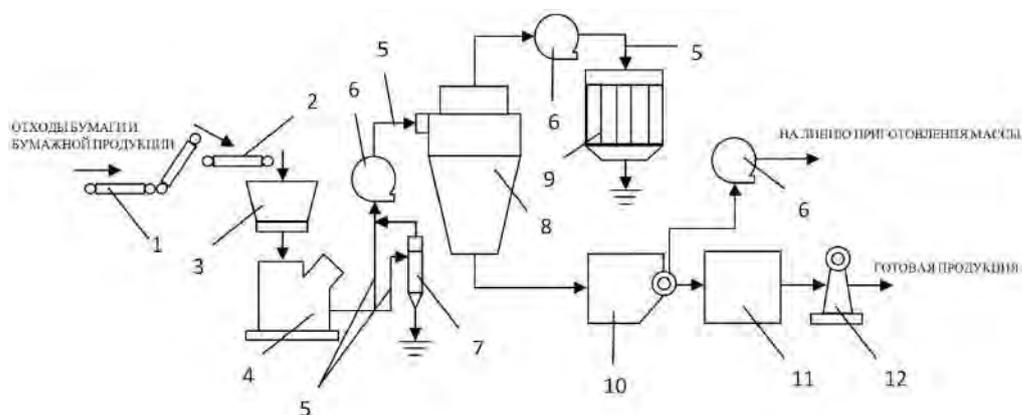


Рисунок 2 – Технологическая схема процесса сухого диспергирования отходов бумажного производства:

- 1 – игольчатый питатель, 2 – транспортер, 3 – ножевой измельчитель, 4 – молотковая дробилка, 5 – воздуховод, 6 – вентилятор, 7 – инерционный очиститель, 8 – циклон, 9 – воздушный фильтр, 10 – бункер-накопитель, 11 – установка для упаковки полученной дисперсии, 12 – весы

В рабочей зоне дробилки, поз. 4, отходы измельчаются под ударным воздействием молотков. Образовавшаяся в рабочей зоне дробилки воздушная дисперсия частиц после сепарации через сито направляется для очистки в циклон, поз. 8, затем через бункер-накопитель, поз. 10, поступает на линию подготовки бумажной массы или на упаковочный узел. Очищенные на фильтре, поз. 9, излишки воздуха выбрасываются в атмосферу, а выделенный мелштоф может быть использован в качестве сорбента для удаления масла и нефтепродуктов на производственных площадях. В



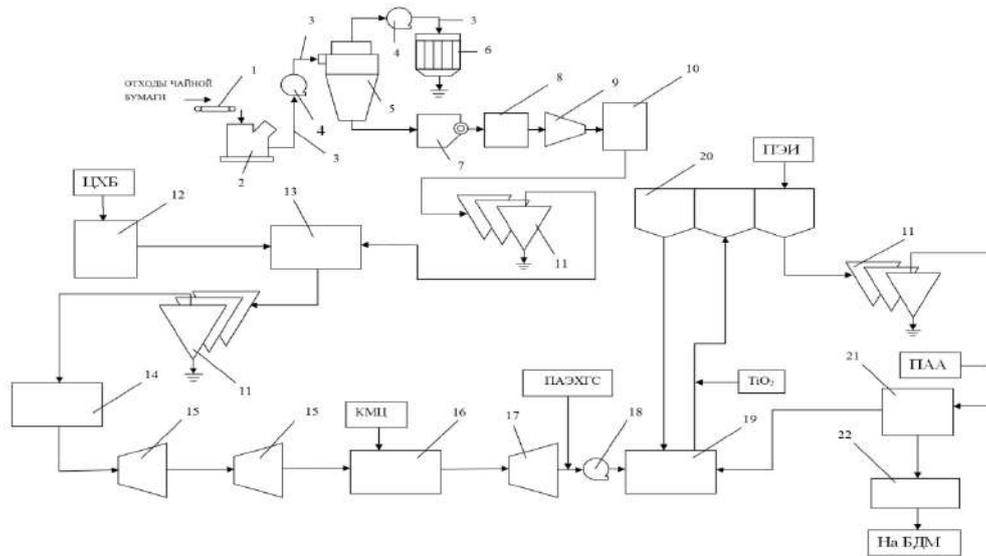


Рисунок 4 – Технологическая схема массоподготовки в процессе выработки упаковочной бумаги:

1 – транспортер, 2 – молотковая дробилка, 3 – воздуховод, 4 – вентилятор, 5 – циклон, 6 – воздушный фильтр, 7 – бункер накопитель, 8 – мешальный бассейн, 9 – коническая мельница, 10 – промежуточный бассейн, 11 – вихревые очистители, 12 – гидроразбиватель, 13 – мешальный бассейн, 14 – промежуточный бассейн, 15 – дисковые мельницы, 16 – композиционный бассейн, 17 – пульсационная мельница, 18 – смесительный насос, 19 – машинный бассейн, 20 – переливной бак, 21 – узлоуловитель, 22 – напорный ящик

**4.4 Апробация результатов работы в производственных условиях.** Практическая апробация результата работы выполнена на ЗАО «Пролетарий» в процессе выработки картона хром-эрзац с частичной заменой белой сульфатной целлюлозы на воздушную дисперсию из отходов чайной бумаги.

## 5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

**5.1 Экономическая эффективность реализации результатов диссертационной работы.** Условно годовая экономия от применения в композиции основы этикеточной бумаги для упаковывания кондитерских изделий влагопрочных отходов переработки чайной бумаги, диспергированных сухим способом, взамен 60 % свежего волокна белой хвойной целлюлозы составляет – 1953,6 тыс. руб., чистая прибыль – 1473,6 тыс. руб., простой срок окупаемости – 2,9 года.

## 6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен механизм перестройки пористой структуры целлюлозного волокна в процессе сухого диспергирования (размола) целлюлозных материалов и построены физико-механические модели процессов сухого диспергирования отходов бумажного производства. Модели могут быть использованы в качестве научной основы для направленного регулирования и прогнозирования результатов этого процесса, а также его продвижения и совершенствования.

Разработан и научно обоснован способ переработки отходов бумажного производства – альтернативный традиционному роспуску в гидродинамических аппаратах. Способ обеспечивает возможность переработки влагопрочных производственных отходов и высокую степень восстановления бумагообразующих свойств вторичного целлюлозного волокна.

Результаты работы способствуют решению таких народно-хозяйственных проблем, как обеспечение экологической безопасности окружающей среды и сбережение лесных ресурсов.

### **ВЫВОДЫ**

1. Определены индексированные оценки влияния сухого диспергирования отходов бумажного производства в молотковой дробилке на целлюлозное волокно. Полученные индексы длины и ширины волокна в интервале значений 0.80–0.96 и 0.97–1.0, соответственно, свидетельствуют о высокой степени сохранения его целостности. Степень и характер морфологических превращений волокна варьируются в зависимости от его природы в интервале индексов 1.1–2.0.

2. Показано, что в результате сухого диспергирования отходов бумажного производства в молотковой дробилке, аналогично ранее изученному процессу сухого размола целлюлозы в дисковой мельнице, снижается способность целлюлозного волокна к водному размолу в начальной стадии этого процесса.

3. Экспериментально установлено, что сухое диспергирование отходов бумаги и картона способствует повышению степени восстановления бумагообразующих свойств вторичного целлюлозного волокна в процессе последующего водного размола. Показано, что в результате сухого диспергирования характеристики прочностных свойств образцов, полученных из отходов мешочной бумаги и коробочного картона при степени помола массы 30–33° ШР, увеличиваются соответственно на 30–45 % и 70–85 %.

4. Предложен механизм перестройки пористой структуры целлюлозного волокна в процессе сухого диспергирования целлюлозных материалов, в результате которой изменяются его физико-химические и бумагообразующие свойства.

5. Получены эмпирические уравнения вида  $y = b + kx$ , которые позволяют качественно и количественно оценить индивидуальное влияние физико-механических характеристик отходов бумажного производства на сохранения целостности целлюлозного волокна в процессе сухого диспергирования.

6. Построены физико-механические модели процессов сухого диспергирования отходов бумажного производства с учетом их структуры и свойств. Научно обоснован принцип получения вторичного целлюлозного волокна из влагопрочных отходов, совмещающий сухое диспергирование в молотковой дробилке и водный размол.

7. Разработаны основы технологии применения сухого диспергирования влагопрочных отходов переработки чайной бумаги в процессе приготовления бумажной массы для выработки основы фильтровальной бумаги для топливных фильтров и основы этикеточной бумаги для упаковывания кондитерских изделий (Патент РФ № 25833620).

8. Условно годовая экономия от использования отходов переработки чайной бумаги взамен 60 % свежего волокна беленой хвойной целлюлозы в композиции основы этикеточной бумаги для упаковывания кондитерских изделий составляет – 1953,6 тыс. руб., чистая прибыль – 1473,6 тыс. руб., простой срок окупаемости – 2,9 года.

**Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1. Осипов, П. С. Моделирование процесса получения волокнистого полуфабриката из целлюлозосодержащих отходов в воздушной среде [Текст] / П. С. Осипов, Л. А. Галкина, А. А. Лыченко // «Целлюлоза. Бумага. Картон.». – 2012. – № 4. – С. 50-53.
2. Галкина, Л. А. Корреляционная взаимосвязь степени укорочения длины и упруго-прочностных характеристик волокон некоторых видов макулатуры [Текст] / Л. А. Галкина, А. А. Лыченко // Качество продукции ЦБП и гофроиндустрии: сборник трудов III Международной научно-практической конференции – СПб, 2014. – С. 31-34.
3. Лыченко, А. А. Бумагообразующие свойства вторичного целлюлозного волокна, полученного из отходов бумаги с применением сухого диспергирования [Текст] // Новое в конструировании, модернизации, автоматизации БДМ и КДМ: сборник трудов Международной научно-практической конференции – СПб, 2016. – С. 29-31.
4. Лыченко, А. А. О влиянии сухого диспергирования на геометрические и морфологические характеристики целлюлозных волокон [Текст] / А. А. Лыченко, Л. А. Галкина, П. С. Осипов // «Целлюлоза. Бумага. Картон.». – 2016. – № 1. – С. 63-67.
5. Лыченко, А. А. Отходы производства чайных фильтр-пакетов как вторичное сырье для бумажного производства [Текст] / А. А. Лыченко, Л. А. Галкина, П. С. Осипов // «Целлюлоза. Бумага. Картон.». – 2016. – № 2. – С. 60-64.

**Патент**

6. Пат. 2583362 Российская Федерация, МПК D 21 В 1/32. Способ переработки целлюлозосодержащих отходов [Текст] / Лыченко А. А., Осипов П. С., Галкина Л. А.; заявитель и патентообладатель ОАО «ВНИИБ». – № 2014106374/12; заявл. 21.02.14; опубл. 10.05.16, Бюл. № 13. – 3 с.

**Отзывы на автореферат в двух экземплярах с указанием фамилии, имени, отчества, почтового адреса, адреса электронной почты, наименования организации и должности, подписанные и заверенные печатью, просим направлять по адресу: 163002, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, 17, САФУ, диссертационный совет Д 212.008.02.**