

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И  
ДИЗАЙНА»

На правах рукописи

Зайцев Артем Валерьевич

**Совершенствование технологии переработки отходов макулатуры МС-5Б и  
МС-6Б производства тароупаковочных видов бумаги и картона**

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, профессор

Дубовый Владимир Климентьевич

Санкт-Петербург - 2026

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	14
1.1. Макулатура, классификация и области использования.....	14
1.2. Характеристика бумагообразующих свойств вторичного волокна.....	17
1.3. Основные процессы технологии вторичного волокна.....	20
1.4. Общая технологическая схема переработки макулатуры в тест-лайн и флютинг.....	22
1.5. Виды загрязнений в макулатуре.....	24
1.6. Количество загрязнений в макулатуре.....	26
1.7. Влияние загрязнений на качество макулатурной массы и продукции.....	28
1.8. Эффективность современного оборудования для удаления загрязнений при производстве макулатурной массы.....	31
1.9. Современное оборудование для переработки отходов производства макулатурной массы.....	34
1.10. Заключение по аналитическому обзору литературы, определение цели и постановка задач диссертационного исследования.....	40
ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	42
2.1. Объекты исследования.....	42
2.2. Методики исследования.....	42
2.2.1. Общие принципы анализа качества макулатуры и макулатурной массы.....	42
2.2.2. Анализ качества макулатуры перед переработкой .....	43
2.2.3. Анализ загрязнений макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б.....	46
2.3. Основные процессы и оборудование получения и анализа макулатурной массы.....	48
2.3.1. Отбор и роспуск макулатуры.....	48
2.3.2. Размол макулатурной массы.....	49
2.3.3. Определение рН массы.....	50

2.3.4. Определение массовой доли волокна в макулатурной массе.....	50
2.3.5. Определение степени помола макулатурной массы.....	51
2.3.6. Определение времени обезвоживания макулатурной массы.....	52
2.3.7. Определение содержания (концентрации) взвешенных веществ в фильтрате макулатурной массы.....	52
2.3.8. Фракционирование массы из макулатуры.....	53
2.3.9. Измерение длины волокна .....	54
2.3.10. Изготовление лабораторных образцов бумаги.....	55
2.3.11. Анализ образцов бумаги и картона.....	56
2.4. Методика проведения эксперимента на установке получения полимерпесчаных плит.....	58
2.4.1. Цель эксперимента.....	58
2.4.2. Оборудование и материалы.....	58
2.4.3. Подготовка сырья.....	59
2.4.4. Процесс формирования и прессования.....	59
2.4.5. Контроль качества.....	59
2.4.6. Анализ результатов.....	59
2.5. Методики исследования качества полимерпесчаных плит.....	60
2.5.1. Определение предела прочности при статическом и динамическом изгибе.....	60
2.5.2. Определение истираемости плит.....	61
2.5.3. Определение разбухания по толщине и водопоглощения при выдержке в воде в течение 24 часов.....	62
2.6. Оценка надежности аналитической методики и результатов измерения.....	63
<b>ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....</b>	<b>68</b>
3.1. Исследование количества и качества отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б при переработке во вторичное волокно для флютинга и тест-лайнера .....	68

3.1.1. Исследование источников образования отходов в технологии флутинга и тест-лайнера.....	68
3.1.2. Исследование видов и количества отходов в макулатуре МС-5Б и МС-6Б.....	70
3.1.3. Исследование компонентного состава отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б.....	74
3.1.4. Исследование наличия опасных веществ и химического элементного состава отходов макулатуры.....	76
3.1.5. Общие выводы по разделу 3.1.....	80
3.2. Обоснование концепции технологии и опытно-промышленной линии для переработки отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты.....	81
3.2.1. Концепция переработки отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б в полимерпесчаные плиты.....	81
3.2.2. Ожидаемые экологические и экономические результаты.....	82
3.3. Обоснование и исследование технологических процессов переработки отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты и выбор оборудования производственной линии.....	83
3.3.1. Обоснование выбора способа переработки отходов на основе связующих и наполняющих свойства компонентов.....	83
3.3.2. Последовательность и характеристика технологических процессов переработки отходов в полимерпесчаные плиты.....	84
3.3.3. Характеристика опытно-промышленной линии.....	87
3.3.4. Испытание опытно-промышленной установки.....	90
3.3.5. Общие выводы по разделу 3.3.....	92
3.4. Исследование технологии полимерпесчаных плит.....	92
3.4.1. Требования к полимерпесчаным плитам.....	93
3.4.2. Факторы технологии полимерпесчаных плит.....	94
3.4.3. Анализ влияния параметров режимов и прогноз качества плит.....	95
3.4.4. Выбор режима для обеспечения целевого качества плит.....	97
3.4.5. Исследование влияния композиции «песок/сырье» на свойства полимерпесчаных плит.....	98
3.4.6. Исследование структуры полимерпесчаных плит.....	104

3.4.7. Выводы по разделу 3.4.....	113
3.5 Внедрение технологии и установки производства полимерпесчаных плит с оценкой экономической эффективности использования результатов диссертационного исследования.....	114
3.5.1. Расчет себестоимости полимерпесчаных плит.....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	121
Приложение А. Спецификация оборудования опытно-промышленной линии.....	135
Приложение Б. Акт испытания и введения в эксплуатацию установки переработки отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б в полимерпесчаные плиты.....	138
Приложение В. Технические условия. Плиты полимерпесчаные.....	141
Приложение Г. Акт внедрения результатов диссертационной работы «Совершенствование технологии переработки отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б производства тароупаковочных видов бумаги и картона».....	145

## ВВЕДЕНИЕ

Неоспоримая экономическая выгода и ужесточение законодательства по охране окружающей среды, как в России, так и в зарубежной практике производства бумаги и картона, привели к крупномасштабному использованию макулатуры в качестве источника качественного растительного волокна. Современное бумажно-картонное производство, являясь ресурсоемкой отраслью промышленности, нуждается в таком волокне. Однако получение качественного волокна из макулатуры (вторичное волокно) сопряжено с рядом технологических проблем. Известно [1-3], что макулатура является многокомпонентной системой, состоящей из различного вида древесных волокон, обладающей более низкими бумагообразующими свойствами по сравнению с первичными волокнами. К наиболее отрицательно влияющему фактору, присущему макулатурному волокну, является существенно меньшие показатели механических свойств (прочность, деформируемость), по сравнению с первичным волокном. Исходя из того, что основным видом продукции, в которую перерабатывается макулатура марки МС-5Б и МС-6Б, является упаковка из гофрированного картона – ящичная тара и упаковка промышленных изделий, требуется обеспечивать минимально допустимую механическую прочность и требуемые иные показатели качества.

К числу основных технологических проблем при переработке макулатуры относятся: наличие большого количества посторонних включений (загрязнений) различной природы, подлежащих максимально возможному удалению при производстве качественной макулатурной массы и неизбежное остаточное содержание загрязнений в массе, в виде, так называемых, «анионных загрязнений». Они представляют собой сложную смесь физико-химически превращенных групп вспомогательных химических веществ – проклеивающих, удерживающих, диспергирующих, упрочняющих, флокулирующих и др. Указанные вещества в бумажной массе – это отрицательный фактор формирования бумаги и картона [4]. В процессе переработки макулатуры в волокно, различные современные схемы и

оборудование позволяют удалять различное количество загрязнений, которые являются отходами производства. Чем больше удаляется отходов, тем меньше выход качественного (кондиционного волокна), но лучше его качество. Поэтому на каждом предприятии отрабатывается собственный технологический режим, обеспечивающий удовлетворяющее качественное и количественное удаление отходов.

**Актуальность темы.** Неоспоримая экономическая выгода и ужесточение законодательства по охране окружающей среды, как в России, так и в зарубежной практике производства бумаги и картона, привели к крупномасштабному использованию макулатуры в качестве источника сырьевой базы целлюлозно-бумажной промышленности. К числу основных технологических проблем при переработке макулатуры относятся: наличие большого количества посторонних включений различной природы, подлежащих максимально возможному удалению при производстве качественной макулатурной массы. Предприятия ЦБП России, перерабатывающие макулатуру, ежегодно сдают на полигоны сотни тысяч тонн отходов макулатуры.

Характерный всем предприятиям отрасли выход отходов, рассмотрен на примере одного из старейших предприятий России по производству гофропродукции из макулатуры - ОАО «Каравачево». На суточную производительность 60 т флутинга и тест-лайнера в гидроразбивателе образуется до 2,5 т, а в очистителях и сортировках еще до 1 т отходов. Суммарно, более 3,5т, в пересчете на сухие отходы. Эта масса отходов, предварительно обезвоженная свободным отеканием воды до 60-65% влажности, примерно 10 т/сут, отправляется на полигон для захоронения. Такой вид утилизации отходов обуславливает существенные финансовые потери. На период исследования – 2023 год, это более 2000 руб./т или более 20000 руб./сут. (более 7 млн. руб./год). Ужесточение экологических требований и риски закрытия полигонов актуализировали проблему рациональной переработки отходов макулатуры у источника образования.

Ежегодное количество перерабатываемой макулатуры в России составляет более 4,5 млн. т. Суммарные финансовые потери из-за отсутствия эффективной

переработки отходов макулатуры для предприятий ЦБП являются существенными. Следовательно, повышение доли и эффективности переработки отходов макулатуры является актуальной проблемой производства макулатурных тароупаковочных видов бумаги и картона.

**Степень разработанности темы.** Разработка новых и совершенствование известных процессов полезного использования отходов макулатуры находилась и находится в поле научных интересов за рубежом и в России. Поскольку вовлечение в переработку все новых ресурсов макулатуры сопряжено с всевозрастающими объемами отходов макулатуры и изменением их компонентного состава, то исследованиями достигаются существенные результаты по переработке отходов макулатуры с расширением прогрессивных процессов и новых технологических приемов. Отметим имена тех ученых, исследования, и разработки которых позволили достичь современных успехов в области переработки макулатуры - С.Н. Иванов, Д.М. Фляте, А.С. Смолин, В.И. Комаров, Д.А. Дулькин, Дж. Кларк, L. Gottsching, H. Pakarinen.

Обобщение научных данных, практических результатов и собственного опыта в области переработки макулатуры МС-5Б и МС-6Б в макулатурную массу для флютинга и тест-лайнера, позволили автору рационально подойти к объекту изучения – отходам макулатуры. В основу исследования положено сочетание свойств органических и минеральных фракций макулатурных отходов как активного связующего наполняющей песчаной фракции с достижением результата – получение полимерпесчаных плит требуемого качества.

Данная работа решает актуальную научно-техническую задачу – эффективной переработки отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б в полимерпесчаные плиты при производстве флютинга и тест-лайнера. Достижение цели и решение задач диссертации основывалось на лабораторном и опытно-промышленном исследовании макулатурных отходов и полимерпесчаных плит. В результате выполненных задач, цель диссертации достигнута.

**Цель диссертации.** Целью диссертационной работы является совершенствование технологии переработки отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б производства тароупаковочных видов бумаги и картона в полимерпесчаные плиты.

**Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:**

1. Исследование количества и качества отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б при переработке во вторичное волокно для флютинга и тест-лайнера.
2. Обоснование концепции технологии и опытно-промышленной линии для переработки отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты.
3. Выбор оборудования, характеристика процессов и испытание опытно-промышленной установки при производстве полимерпесчаных плит.
4. Исследование технологических факторов и качества полимерпесчаных плит с установлением величин режимных параметров их получения.
5. Отработка технологии полимерпесчаных плит на опытно-промышленной установке.
6. Внедрение технологии и установки производства полимерпесчаных плит с оценкой экономической эффективности использования результатов диссертационного исследования

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены новые научные результаты исследования по совершенствованию технологии переработки отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б производства тароупаковочных видов бумаги и картона в полимерпесчаные плиты с целевыми показателями качества.

1. Установлено количественное содержание в отходах макулатуры 3-х групп разнородных веществ – синтетических полимеров (70%), волокон макулатуры (23%), других компонентов (7%).
2. Методом электронной сканирующей микроскопии определен массовый химический элементный состав неволокнистых макулатурных отходов, а также переменность состава и массовой доли элементов во времени и от партии к партии макулатуры, при сохранении постоянства содержания большинства элементов с отсутствием содержания тяжелых металлов (Pb, Bi, Cd) и фторидов.

3. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены, включая опытно-промышленные исследования, пределы технологических факторов при переработке отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты: влажность, % (не более 25), размеры фракции, мм (10-12), соотношение «песок /сырье», % (40-50/60-50), температурные зоны нагрева, °С (170, 180), зоны плавления, °С (210, 220), температура прессования, °С (205), удельное давление прессования, МПа (26,4), время прессования, мин (2).

4. Установлены экспериментальные закономерности влияния соотношения макулатурных отходов и песка, на свойства полимерпесчаных плит. При соотношениях «песок/сырье» = 50/50 % и 40/60 %, получены плиты со средними значениями основных показателей качества:  $F = 7,7$  МПа;  $Q = 3,4$  кДж/м<sup>2</sup>;  $G = 1,5\%$ ;  $\varepsilon = 0,09$  г/см<sup>2</sup>, что отвечает условию эффективного использования ресурсов макулатурных отходов и потребительским характеристикам полимерпесчаных плит по качеству.

5. Установлено, что полимерпесчаная плита представляет собой многокомпонентный гетерогенный композит, полученный методом термомеханического компаундирования и горячего прессования. Структура композита характеризуется жестким минеральным каркасом из песка, пространство которого заполнено гибридной матрицей на основе смеси синтетических полимеров, дискретно армированной целлюлозными волокнами.

#### **Теоретическая и практическая ценность:**

1. Научно-обоснованные характеристики группового состава отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б, применены для выбора технологических процессов и количественных пределов переменных факторов переработки отходов.

2. Установлены закономерности влияния компонентного состава полимерпесчаных плит на их характеристики качества.

3. Разработан технологический режим переработки отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты.

4. Обосновано и выбрано оборудование технологических процессов для установки по переработки отходов макулатуры.

5. Установка внедрена для переработки отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б в ОАО «Караваево».

6. Экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы при постоянной переработке отходов составит более 14 млн. руб. в год.

**Методология и методы исследования.** Объектами исследования были промышленные отходы макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б, образующиеся при получении макулатурной массы для производства флютинга и тест-лайнера. Для оценки объектов исследования использовалась современная лабораторная техника и приборы, химические и физико-химические методы анализа, электронная микроскопия, стандартные методы и методики анализа качества полимерпесчаных плит.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Научное обоснование содержания в отходах основных групп компонентов – синтетические полимеры, волокна макулатурные, другие компоненты. Подтверждение химического элементного состава и массового содержания элементов макулатурных отходов.

2. Обоснование концепции технологии и опытно-промышленной установки для переработки отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты.

3. Выбор оборудования, характеристика процессов и испытание опытно-промышленной установки при производстве полимерпесчаных плит.

4. Исследование влияния факторов процессов технологии на показатели качества полимерпесчаных плит.

5. Научное обоснование технологического режима получения полимерпесчаных плит.

6. Внедрение технологии и установки производства полимерпесчаных плит.

7. Оценка экономической эффективности внедрения производства полимерпесчаных плит с использованием результатов диссертационного исследования.

**Внедрение результатов в практику.** Технология переработки отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты и опытно-промышленная установка

внедрена в ОАО «Каравачево». Экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы при постоянной переработке отходов составит более 14 млн. руб. в год.

**Личный вклад.** Автором обоснована тема диссертации, поставлена цель и определены задачи, которые решены в виде теоретического, методического, экспериментального и прикладного вклада по разработке технологии и установки переработки отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б в полимерпесчаные плиты.

Выполнены исследования, обработаны результаты и проанализированы полученные данные, сформулированы положения научной новизны, теоретической и практической ценности и заключение. Автор составил программу, организовывал и руководил созданием установки, опытно-промышленными испытаниями и внедрением результатов работы. Автору принадлежат основные идеи опубликованных в соавторстве и использованных в диссертации трудов.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует паспорту специальности 4.3.4. - Технология, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины: п. 2 - Химия, физикохимия и биохимия основных компонентов биомассы дерева и иных одревесневших частей растений, композиты, продукты лесохимической переработки»; п. 4 - Технология и продукты в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревоперерабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующим им производствам.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов и выводов по диссертации базируется на глубокой теоретической проработке темы и объективного выбора направления исследования, на применении современных методов, методик, поверенных приборов и оборудования, а также использовании стандартных методов проведения эксперимента с обработкой данных методами математической статистики, использовании аккредитованных лабораторий. Выводы по диссертации экспериментально подтверждены.

Основные положения диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на: V Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП, 13 – 14 ноября 2023 г. СПбГУПТД, Санкт-Петербург; IX Всероссийской научно-технической конференция, Леса России: политика, промышленность, наука, образование. 22-24 мая 2024 г. Архангельск. Всероссийской научно-технической конференции Макулатура и целлюлоза: ресурсы, наука, техника, производство, продукты. экология, перспективы (Караваево, 30-31 мая 2024), д. Караваево, Московская обл., ОАО «Караваево». СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург; IX Всероссийской научно-технической конференции Леса России: политика, промышленность, наука, образование. 21-23 мая 2025 г. СПбГТУ им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург; Всероссийская научно-технической конференции «Экологические и экономические проблемы ЦБП России и пути их решения в современных условиях» 29.05.2025; IX научно-технической конференции. имени проф. В.И. Комарова. Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов, 11-12.09.2025. Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективы решения VII Международной научно-технической конференции ученых и специалистов ЦБП, 24-25 ноября 2025, Санкт-Петербург.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 10 трудах автора с соавторами, в том числе, 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, 7 докладов в материалах научно-технических конференций.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Содержание работы изложено на 145 страницах машинописного текста, включающих 25 рисунков и 14 таблиц, и 147 наименований используемых источников литературы.

## ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

### 1.1. Макулатура, классификация и области использования

Макулатура относится к одному из основных сырьевых источников волокна для бумажной промышленности в XXI веке [1]. Основная доля ежегодно накапливаемой в мире макулатуры, являясь ресурсосберегающим сырьем, перерабатывается в бумагу и картон по традиционной бумагоделательной технологии [2–5]. Макулатура является важным и незаменимым видом волокнистого сырья для производства основных массовых видов картона – тарного, коробочного, облицовочного, строительного, переплетного и ряда других. Макулатура также находит широкое применение для производства многих видов бумаги. Учитывая широкое вовлечение макулатуры в производство бумажно-картонной продукции и наличие многих противоречивых явлений при ее использовании, изучению теоретических и практических аспектов ее переработки посвящено много научных трудов [1–16].

Основным критерием любого сырья является качество, как интегральная характеристика множества свойств. Классификация и качество макулатуры в России нормируется государственным стандартом ГОСТ 10700-2019. Макулатура по качеству классифицируется на 3 группы: группа А – макулатура высокого качества; группа Б – макулатура среднего качества; группа В – макулатура низкого качества, а в группах – на марки (Таблица 1.1). В зависимости от компонентного состава по виду волокна, источников поступления, цвета, степени загрязненности и способности к переработке в нем содержится 13 марок макулатуры. Анализ состава макулатуры, подтверждает очень широкий охват видов бумаги и картона, в целом, и в пределах групп и марок макулатуры. Фактор состава макулатуры является решающим при выборе целевого использования макулатуры и технологии ее переработки в волокно. В отличие от первичного или свежего волокна, напрямую производимого из растительного сырья, волокно из макулатуры называют «вторичное волокно». Его доля в мировом балансе волокна составляет

примерно 25%. На долю растительного волокна приходится около 75%. Из них примерно 65-70% – это волокно из хвойных пород древесины, 20–25% – из лиственной древесины и примерно 10% волокна вырабатывается из недревесного сырья [17].

Таблица 1.1 – Марки макулатуры по ГОСТ 10700-2019

Группа	Марка	Состав:
А	МС-1А	Отходы производства белой бумаги (кроме газетной): бумага для печати, писчая, чертежная, рисовальная, основа светочувствительной бумаги и другие виды белой бумаги
	МС-2А	Отходы производства всех видов белой бумаги в виде обрезков с линовкой и черно-белой или цветной полосой – бумага для печати, писчая, диаграммная, рисовальная
	МС-3А	Отходы производства бумаги из сульфатной небеленой целлюлозы: упаковочной, шпагатной, электроизоляционной, патронной, мешочной, основы абразивной, основы для клеевой ленты, а также перфокарты, бумажный шпагат, отходы производства электроизоляционного картона
	МС-4А	Использованные мешки бумажные не влагопрочные (без битумной пропитки, прослойки и армированных слоев)
Б	МС-5Б	Отходы производства и потребления гофрированного картона, бумаги и картона применяемых в его производстве
	МС-6Б	Отходы производства и потребления картона всех видов (кроме электроизоляционного, кровельного и обувного) с черно-белой и цветной печатью
	МС-7Б	Использованные книги, журналы, брошюры, проспекты, каталоги, блокноты, тетради, записные книжки, плакаты и другие виды продукции полиграфической промышленности и бумажно-беловых товаров с однокрасочной и цветной печатью, без переплетов, обложек и корешков, изданные на белой бумаге
В	МС-8В	Отходы производства и потребления газет и газетной бумаги
	МС-9В	Бумажные гильзы, шпули (без стержней и пробок), втулки (без покрытия и пропитки)
	МС-10В	Литые изделия из бумажной массы
	МС-11В	Отходы производства и потребления бумаги и картона с пропиткой и покрытием: влагопрочные, битумированные, ламинированные, а также бумажные мешки, изготовленные из бумаги указанных видов
	МС-12В	Отходы производства и потребления бумаги и картона черного и коричневого цветов, бумага с копирующим слоем, для вычислительной техники, бумага-подложка с нанесенным дисперсным красителем разных оттенков, а также кровельный картон
	МС-13В	Отходы производства и потребления различных видов картона, белой и цветной бумаги (кроме черного и коричневого цветов), обложечной, светочувствительной, в том числе запечатанной на аппаратах множительной техники, афишной, обойной, пачечной.

Как выше указывалось, основной областью переработки вторичного волокна было и остается производство картона [18]. Из него, 30% – это тарный картон (тест-лайнер и флютинг), 20% - коробочный картон. Остальную долю продукции составляют упаковочная бумага (15%), газетная бумага (12%), санитарно-бытовая (10%) и писче-печатная бумага (7%), прочие виды картона (8%) [9,19]. Элементы тарного картона – тест-лайнер и флютинг идут на изготовление гофрированного картона (около 80%). Из него производят транспортную тару – картонные ящики (около 80% от гофрированного картона) [20]. Важное свойство картонных ящиков – это легкая утилизация, позволяющая до 80% ящиков многократно использовать в виде макулатуры [7, 21-22].

Преимущественным сырьем для производства тарного картона является макулатура группы «Б», марок МС-5Б и МС-6Б. В Таблице 1.2 приведены данные по составу данных видов макулатуры. Анализируя состав, следует отметить превалирование макулатуры, изготовленной из высокопрочных волокнистых полуфабрикатов сульфатного производства, как первичных, так и вторичных.

Таблица 1.2 – Марки макулатуры группы «Б» по ГОСТ 10700-2019

Группа	Марка	Состав:
Б	МС-5Б	Отходы производства и потребления гофрированного картона, бумаги и картона, применяемых в его производстве
	МС-6Б	Отходы производства и потребления картона всех видов (кроме электроизоляционного, кровельного и обувного) с черно-белой и цветной печатью

Применение макулатуры данных марок является обязательным условием для получения картона с требуемыми физико-механическими показателями и, следовательно, обеспечивающими механическую прочность и барьерные свойства ящичной таре из гофрокартона (требуемое сопротивление внешним механическим и атмосферным воздействиям) [8, 23-25]. Отличительной особенностью макулатуры, как сырья, в сравнении с первичной бумажно-картонной продукцией,

является наличие в ней неволокнистых включений различного происхождения, отделяемых при переработке в виде отходов. В силу различного происхождения, переработка отходов очень проблематична и, как правило, они сдаются на специальные полигоны.

## **1.2. Характеристика бумагообразующих свойств вторичного волокна**

Макулатурное или вторичное волокно обладает бумагообразующими свойствами, подобными первичному волокну, но отличающимися более низким уровнем проявления их в технологических процессах производства бумажно-картонной продукции. Уровень бумагообразующих свойств вторичного волокна зависит от следующих интегрированных факторов: марки и качества макулатуры; техники и технологии переработки макулатуры во вторичное волокно технической оснащенности бумаго- или картоноделательной машины и технологии производства на ней бумаги и картона.

Являясь продуктом переработки макулатуры, вторичное волокно имеет следующие важные отличия от первичного волокна [10,26-27]:

а) это трудно предсказуемая смесь различных видов волокнистых полуфабрикатов в пределах марок макулатуры;

б) преобладание в массе коротких и мелких фракций волокна;

в) наличие как минимум одной предварительной технологической стадии переработки (всего, 1...7 стадий);

г) высокая загрязненность широким спектром липких и посторонних включений бактериальной, органической и неорганической природы.

Отличия относятся к отрицательным факторам и требуют сложных технологических линий для рационального использования вторичного волокна.

В Таблице 1.3 представлены сравнительные данные средневзвешенной длины первичного и вторичного волокна.

Таблица 1.3 – Сравнительные данные длины волокна и исходные степени помола целлюлозы и вторичного волокна из ряда основных марок макулатуры

Показатель	Древесина		Макулатура
	Сосна/ Ель	Береза/Осина	МС-5Б МС-7Б
Средневзвешенная длина, мм	2,20...3,00/2,30...2,50	1,15...1,20/1,10...0,73	1,90...1,10
Степень помола, ° ШР	13...16	15...18	16...45

По Таблице 1.3 видно, что средневзвешенная длина вторичного и первичного целлюлозного волокна из лиственных пород древесины сопоставимы, следовательно, бумага из вторичного волокна по физико-механическим свойствам должна быть близка бумаге из лиственной целлюлозы. Подтверждением тому служат результаты работ [10,28-29,30-32]. При сравнении показателей механической прочности наиболее массовых элементов гофрированного картона, например, крафт-лайнера и тест-лайнера, полученных в результате однократной переработки крафт-лайнера в тест-лайнер, обнаружена потеря прочности на 30-60%. Важной особенностью вторичного волокна является высокая исходная степень помола. Она ограничивает возможность управлять качеством бумаги последующим размолотом вторичного волокна.

Из анализа литературных данных следует [2-3,6], что главным источником воздействия на первичное, а, в последствии, и на вторичное волокно, является предыдущий технологический процесс переработки волокна в бумагу и картон. В дальнейшем, при использовании макулатуры, вторичное волокно многократно проходит технологический цикл переработки, каждый из которых оказывает определенное влияние на прочностные и иные бумагообразующие свойства волокна. Это влияние одновременно и отрицательное – на разрывную длину, сопротивление продавливанию, сопротивление излому при изгибе, кажущуюся плотность, растяжение, и положительное - на жесткость, сопротивление раздиранию, коэффициент рассеяния, непрозрачность и воздухопроницаемость картона. Исследованиями установлено, что интенсивность отрицательного и

положительного влияния количества циклов переработки на бумагообразующие свойства волокна снижается от первого к последующим циклам. Указывается, что влияние количества циклов переработки волокна монотонно стремится к пределу, который находится в интервале 5-7 циклов.

Причина снижения ряда важных физико-механических показателей вторичного волокна объясняется необратимыми изменениями в структуре клеточных стенок [3, 21,33]. Оно происходит под воздействием многих факторов технологии и, прежде всего, обусловлено активной кислотностью бумажной массы (рН) и температурой сушки полотна. Влияние технологических факторов проявляется в существенной потере волокном внутренней и поверхностной способности к гидратации и резком повышении его хрупкости. И эта потеря, главным образом, обуславливает низкую способность к набуханию и межволоконному связеобразованию. Рассмотренное явление известно как «ороговение» волокна.

В работе [20] показано, что потеря прочности вторичного волокна из макулатуры марок МС-5Б, МС-6Б, по сравнению с первичным волокном, составляет 30...50 %. Суммарная обратимость ороговения, определяемая по увеличению водоудерживающей способности, может быть достигнута 55...74 % от первоначального значения. Изучены также основные факторы, которые, по мнению исследователя, наиболее эффективно могли бы повлиять на рост водоудерживающей способности вторичного волокна или, иными словами, увеличить степень обратимости ороговения. Эти факторы, следующие: размол (преимущественно фибриллирующий), продолжительность набухания (степень гидратации), облагораживание (промывка, обработка ферментами, кавитация), активная кислотность массы и применение поверхностно-активных веществ, длина волокна и дефлокулирование массы. Установлено следующее влияние факторов, в порядке их перечисления, %: 30-40; 12-15; 6-8; 4-6; 3-5.

Таким образом, после надлежащей переработки макулатура МС-5Б и МС-6Б превращается в макулатурную массу (ММ), основным компонентом которой является вторичное волокно заданного качества.

### 1.3. Основные процессы технологии вторичного волокна

Процесс переработки (облагораживания) макулатуры — это совокупность технологических операций для придания вторичным волокнам определенных бумагообразующих свойств, при максимальном удалении нежелательных составляющих макулатурной массы: загрязнений и примесей органического и неорганического характера (всей суммы загрязнений или отходов).

Технология переработки макулатуры значительно сложнее, чем первичных волокон, так как макулатура — вторичное волокнистое сырье, представляющее собой смесь различных полуфабрикатов, видов бумаги и картона. Кроме того, она содержит определенное количество примесей и других нежелательных составляющих:

- а) различные добавки, используемые в процессе производства бумаги, (наполнители, красители, компоненты покрытий и другие функциональные и технологические добавки);
- б) вещества, используемые при переработке бумажной продукции (краски, покрытия, ламинаты и проклеивающие вещества);
- в) материалы, попадающие в бумагу во время ее использования и в процессе сбора вторичного сырья, включая проволоку, веревки, песок, камни, скрепки, зажимы и т.д.

Композиция (состав по волокну) макулатуры оказывает значительное влияние на эффективность процессов ее переработки в качественную ММ. Основные технологические операции, выполняемые установками по переработке макулатуры, следующие [12,33,35-38].

- а) роспуск макулатуры;
- б) грубая очистка и сортирование;
- в) дополнительный роспуск (дороспуск) макулатуры;
- г) тонкая очистка и сортирование;
- д) сгущение и фракционирование;
- е) термодиспергирование и/или размол;

ж) аккумуляция.

При подготовке бумажной массы для производства тарного картона основное внимание уделяется качеству массы, обеспечивающей ему заданные характеристики жесткости и прочности. Следует указать, что, сохраняя сочетание основных процессов и их последовательность, конкретные производства существенно разнятся. По литературным данным [8,24-25], к главным отличиям в организации технологических процессов производства тарного картона относят:

а) подготовку массы из макулатуры при низкой или комбинированной (низкой и высокой) концентрации массы;

б) использование массоподготовительного оборудования различных типов и производительности; использование различных схем обработки, разбавления и подачи бумажной массы на машину;

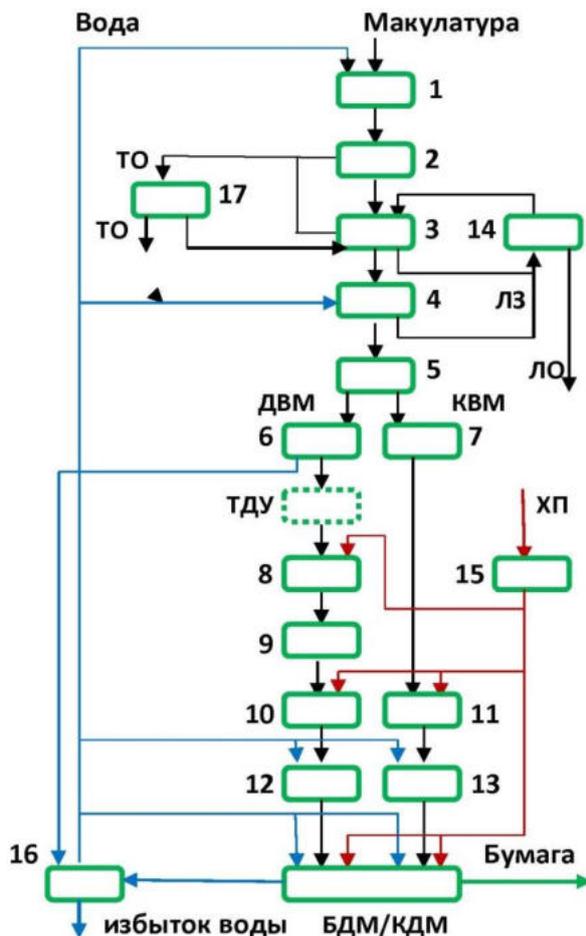
в) использование картоноделательных машин различного уровня оснащенности современными техническими решениями;

г) применение отличающихся комплексов химических функциональных средств.

Перечисленные отличия технологий имеют широкий спектр характерных особенностей, рассмотрение их в полном объеме в данном литературном исследовании не входит в задачу. Для целей диссертационной работы наиболее актуальной и значимой областью научных интересов явилось производство макулатурной массы, влияние факторов технологии на выход волокна и отходов; качественные, характеристика массовых долей компонентного состава отходов, их качество и свойства.

## 1.4. Общая технологическая схема переработки макулатуры в тест-лайнер и флютинг

Общая технологическая схема переработки макулатуры в бумагу представлена на Рисунке 1.1.



- 1 - участок роспуска макулатуры;
- 2 - грубая очистка и сортирование;
- 3 - дороспуск (флокуляция);
- 4 - тонкое сортирование;
- 5 - фракционирование;
- 6 - сгущение ДВМ;
- 7 - сгущение КВМ;
- 8, 10, 11 - аккумулярование;
- 9 - размол;
- 12, 13 - тонкое сортирование;
- 14 - сортирование, отделение ЛО;
- 15 - участок приготовления и подачи химических продуктов;
- 16 - участок улавливания волокна и очистки оборотной воды;
- 17 - участок сортировки и переработки твердых отходов.

Рисунок 1.1 – Принципиальная блок-схема технологии переработки макулатуры в флютинг и тест-лайнер: ТО – твердые отходы; ТДУ – термодисперсионная установка; КВМ – фракция коротковолокнистой массы; ЛЗ – легкие загрязнения; легкие отходы; ДВМ – фракция длиноволокнистой массы; ХП – химические продукты

Что касается общей схемы переработки макулатуры, то в литературе можно найти много вариантов. Например, в монографиях [39-40], в учебном пособии [41]. Многообразие схем в определенной мере отражает реальные производства. Здесь приводится только принципиальная блок-схема переработки макулатуры в тест-лайнер и флютинг. Она включает все необходимые процессы технологии для

решения задачи производства флютинга и тест-лайнера с высокой прочностью и жесткостью. Не углубляясь в анализ приведенной схемы, укажем на прогрессивные решения при подготовке бумажной массы, которые, по мере объективной необходимости, осваиваются предприятиями.

Роспуск макулатуры, например, целесообразнее проводить при средней (7-12%) и высокой концентрации массы (15-18%) с последующим грубым сортированием и дороспуском массы. После разбавления и тонкого сортирования, массу фракционируют на фракции коротко- и длинноволокнистой массы (КВМ) и (ДВМ). Примерное соотношение фракций 50-40% КВМ и 50-60% ДВМ, но, в зависимости от технической оснащённости, количественно фракции могут быть в интервале 20-50 КВМ и 80-50 ДВМ. Важно, чтобы во фракциях превалировало короткое и длинное волокно. Оба вида массы следует обрабатывать отдельно, а подаваться на БДМ или КДМ они могут как отдельно (при наличии двух и более формующих устройств), так и вместе, объединенные в общий поток. При наличии двух фракций массы, двухслойное или многослойное формование существенно предпочтительнее однослойному формованию бумаги (картона). Однако и однослойное формование с использованием двух фракций массы дает существенно лучшие эффекты. Также новым принципиально важным решением является отдельная обработка КВМ и ДВМ разнохарактерными химическими функциональными средствами. Отличием, приводимой блок-схемы от имеющихся в литературе, является дополнение ее участком приготовления и подачи химических продуктов, объективно неотделимым от современной технологии.

Как видно на схеме, основными процессами подготовки массы из макулатуры, в которых образуются отходы, являются разволокнение, грубая очистка, дополнительное разволокнение и сортирование, тонкая очистка. По существующей схеме отходы поименованных процессов аккумулируются в сборнике отходов. Часть отходов волокнистого происхождения образуется непосредственно на БДМ.

### 1.5. Виды загрязнений в макулатуре

Согласно данным ряда исследований, доля загрязнений в макулатуре может составлять от 2 до 15% от её массы в зависимости от категории макулатуры, условий сбора и хранения, а также методов сортировки [42-44]. Столь широкий диапазон содержания загрязнений обусловлен различным источником происхождения бумажных отходов (типографии, офисы, торговля, бытовой сектор), а также культурой обращения с отходами в регионе.

Как указывалось выше, в РФ требования к качеству регламентируются рядом документов, в том числе: ГОСТ 10700-2019 «Макулатура. Общие технические условия» [45]. Этот стандарт определяет общие требования к макулатуре, её качеству, упаковке и маркировке, описывает категории макулатуры. Одним из важных критериев является допустимое содержание различных загрязнений и отбраковываемых включений (степень засорённости). ГОСТ 10701.1-2013 – ГОСТ 10701.7-2013 «Тара и упаковка» (серия стандартов по качеству и испытаниям сырья для картонно-бумажной промышленности) [46]. Часть положений этих стандартов пересекается с требованиями к сырью (макулатуре), особенно если речь идёт о выработке картона или тарной продукции. ГОСТ 7933-89 «Бумага. Методы определения зольности, влажности и механических примесей» [47]. Включает методики испытаний, которые могут применяться и к макулатуре при оценке содержания минеральных и механических примесей. Также в большинстве случаев предприятиями используется внутренняя классификация макулатуры по сортам (АО, БО, ВО и т. п.) либо по зарубежным аналогам (ОСС — old corrugated containers, ONP — old newspapers, и т. д.), где для каждого сорта есть предельно допустимое количество нецеллюлозных включений.

При переработке макулатуры необходимо ориентироваться на международные рынки бумажного вторсырья, так как большая доля макулатуры марок МВ-5Б и МС-6Б поступает в качестве упаковки из-за рубежа. Важны европейская и международная классификация: EN 643 «European List of Standard

Grades of Paper and Board for Recycling» [48]; европейский стандарт, содержащий детальное описание сортов макулатуры, а также максимально допустимые уровни загрязнений (non-paper components) и общий уровень «нежелательных материалов» (outthrows); CEPI (Confederation of European Paper Industries) публикует регулярные отчёты и статистические данные о переработке макулатуры, где также отражена оценка загрязняющих примесей [49]; ISRI Specifications (Institute of Scrap Recycling Industries, США) — аналогичный классификатор для североамериканского рынка [50].

В зарубежных документах более детально регламентируются виды примесей: пластики, металлы, текстиль, органические включения, пищевые отходы, песок и пр. Каждый вид макулатуры (например, газетная, офисная, гофрокартон и т.д.) имеет свой допустимый предел по содержанию таких загрязнений.

При сборе и хранении макулатуры (особенно несортированной) в ней могут накапливаться разные виды нежелательных включений, которые условно делят на несколько групп [45, 47, 51-52]:

а) не целлюлозные бумажные продукты и фрагменты: ламинированная и вощёная бумага, упаковка с плёнкой (Tetra Pak и подобные виды комбинированных материалов), обои и бумага со специальными покрытиями, клеевыми слоями;

б) полимерные включения (пластики): плёнки (полиэтиленовая, полипропиленовая), пластиковая упаковка; пластиковые окна конвертов, вставки, этикетки, полимерные обложки, корешки на переплётах и т. д.;

в) металлы и металлические изделия: скрепки, скобы от степлеров, спирали от блокнотов, канцелярские зажимы, мелкая фурнитура;

г) клеевые и липкие материалы (Stickies), остатки клеев (особенно горячего расплава – hot melt adhesives), клейких лент (скотча), самоклеящиеся этикетки, наклейки;

д) текстильные и волокнистые примеси: тряпки, нити, волокна тканей, нитки из мешков «big-bag» и пр.;

е) неорганические включения: песок, пыль, мелкие камни, стекло (фрагменты бутылок, банок), керамика;

ж) прочие органические примеси: остатки пищевых продуктов, жирные пятна, биологические загрязнения (микроорганизмы, плесень и др.).

Отдельно следует отметить, что часть загрязнений может быть «скрытой», например, мелкие частицы клея и чернил, которые при переработке (размоле, флотации, промывке) переходят в осадок и шламы.

Анализ видов загрязнений показывает большое их разнообразие по происхождению и по свойствам, что подтверждает необходимость применения ряда методов и сложных процессов для получения кондиционной ММ.

### **1.6. Количество загрязнений в макулатуре**

По данным исследований и производственных отчётов российских и зарубежных предприятий, содержание загрязняющих компонентов в макулатуре может колебаться в весьма широких пределах — от 20–30 кг до 150–200 кг на 1 тонну сырья [44, 51, 53]. Конкретные цифры зависят от:

а) источника макулатуры: офисные и типографские отходы обычно содержат меньше внешних загрязнений (до 2–3%), но могут иметь высокий уровень клеевых включений; торговая (гофрокартон, коробки) и бытовая макулатура зачастую имеет высокий процент пищевых, полимерных и органических загрязнений (5–10% и выше);

б) метода сбора и сортировки: отдельный сбор (бумага отдельно от других твёрдых бытовых отходов) существенно снижает уровень примесей; при совместном сборе или несоблюдении правил хранения доля загрязнений растёт;

в) требований к конечной продукции: для производства газетной бумаги или гофрокартона может допускаться более высокая доля загрязнений, чем для производства офисной бумаги или санитарно-гигиенических изделий;

г) уровня предварительной сортировки на предприятиях вторичной переработки (применение баллистических сепараторов, оптических сепараторов, ручной выборки и т.д.).

Приведём усредненный диапазон массовой доли загрязнений (в кг на 1 т. макулатуры) для некоторых категорий макулатурного сырья [44, 51-54]:

а) офисная макулатура (писчая и офисная бумага, вырезки типографий): 20–40 кг/т (2–4%);

б) гофрокартон и картонная упаковка: 30–70 кг/т (3–7%);

в) газетная макулатура (газеты, журналы): 30–50 кг/т (3–5%);

г) смешанная бытовая макулатура (общего сбора): 50–150 кг/т (5–15%).

По данным отечественного производства, в среднем содержание загрязнений при использовании смешанного потока макулатуры (без тщательной сортировки) оценивается в 7–10%. Европейские и американские предприятия при высоком уровне раздельного сбора и жёстком контроле могут поддерживать уровень до 2–3% [44,51-54].

В Таблице 1.4 представлено усредненное распределение загрязнений по видам, которое подтверждается специалистами целлюлозно-бумажных предприятий (ориентировочно на 1 т сырья):

Таблица 1.4 – Удельная масса загрязнений по видам (на 1 т макулатуры)

Вид загрязнений	Количество, кг/т	Комментарий
Полимерные включения (пленка, пластики)	5,0-40,0	В офисной макулатуре 0,5-2,0%. В бытовой достигает 3-4%
Металлы (скрепки, скобы, проволока)	0,5-5,0	В офисной макулатуре зачастую ниже, в картонной - выше
Клеевые включения	1,0-10,0	Относительно малые количества существенно ухудшают переработку
Неорганика (пыль, песок, стекло, керамика)	1,0-15,0	Зависит от условий хранения
Органика (пищевая органика, жиры)	1,0-20,0	Больше в бытовой макулатуре и значительно меньше в офисных отходах

Содержание загрязнений отражают различия в исходном качестве сырья (офисное, коробочное, газетное, смешанное). Полимерные включения в офисной макулатуре 0,5–2% (чаще всего это прозрачные плёнки, конверты). В бытовой может достигать 3–4%. Металлы (скрепки, скобы, проволока) 0,5–5 кг/т В офисной бумаге зачастую ниже, в картонной таре (со скобами, проволокой) выше. Клеевые включения (stickies) – это клейкие ярлыки, клей «горячего расплава» (hot melt), скотч. Даже малое количество может сильно влиять на качество переработки. Содержание неорганики зависит от условий хранения (особенно при хранении на открытых площадках). Органические загрязнения чаще встречаются в бытовой макулатуре, а в офисных отходах обычно минимальны.

Таким образом, содержание загрязнений в макулатуре в пересчёте на 1 т может колебаться в довольно широких пределах — от 20–30 кг при хорошо отсортированном офисном сырье и до 150 кг и более при несортированном бытовом сборе. При этом наиболее значимыми по массе обычно оказываются полимерные включения, органические остатки и неорганические (пыль, песок). Контролировать и снижать уровень примесей возможно за счёт совершенствования систем отдельного сбора, строгих требований к поставкам и применения более эффективного оборудования для сортировки (оптические сенсоры, магнитная и баллистическая сепарация и т.д.).

### **1.7. Влияние загрязнений на качество макулатурной массы и продукции**

Качество ММ, получаемой из макулатурного сырья, в значительной степени определяется содержанием в ней различных инородных включений. Массовая доля таких загрязнений не только отрицательно влияет на физико-химические и механические свойства бумаги и картона, но и увеличивает эксплуатационные затраты (износ оборудования, потребление химреагентов, простой). Присутствие загрязнений в макулатуре напрямую влияет на качество ММ и готовой продукции. Проанализируем влияние отдельных видов загрязнений, рассматриваемых в работах [55-59].

Полимерные включения (плёнки, пластики) вызывают засорение и повреждение оборудования. Крупные фрагменты полимерных плёнок могут наматываться на вращающиеся элементы (валы, сетки, вальцы) и забивать трубы и насосы, снижая пропускную способность оборудования и повышая риск аварийных остановок. Мелкие частицы пластиков в волокнистой массе могут создавать дефекты на готовом листе: тёмные или полупрозрачные включения, ухудшающие внешний вид продукта.

Металлические включения (скобы, скрепки, проволока) повышают износ режущего и сортировочного инструмента. Металлические элементы, даже небольшие по массе, могут приводить к быстрому износу ножей гидроразбивателей (пульперов), перфорационных сит и других механизмов. Повышают вероятность повреждений и аварий. Попадание металлических предметов в насосы, валы или гидравлические системы может привести к серьёзным поломкам оборудования и длительным простоям. Металлические включения могут стать причиной дефектов (проколов или даже обрывов бумажного полотна). Даже при невысокой массовой доле металлов (0,1–0,5% от массы сырья) важно иметь магнитные сепараторы, отлов скоб в пульперах, а также ручную выборку крупных фрагментов.

Клеевые включения (stickies) – это проблема «липкости» в технологическом процессе. Клеевые включения (остатки скотча, этикеток, горячих расплавов, клеев переплётных материалов) могут скапливаться на ситах, в трубопроводах и на валах. При этом снижается эффективность размола и флотации, образуются пятна и дефекты в бумажном полотне, частицы клея при прессовании и сушке могут образовывать визуально заметные липкие или блестящие пятна на поверхности листа. Сложность полного удаления - Stickies часто фрагментируются на мелкие части, которые проходят через стандартные сита. Поэтому для борьбы с клеевыми включениями применяют многоступенчатую флотацию, химические диспергаторы, высокие температуры.

Неорганические включения (пыль, песок, стекло, керамика) повышают абразивный износ. Песок, мелкие камешки, керамические осколки действуют как

абразив и ускоряют изнашивание сеток, режущих кромок пульперов, мешалок, сортировок. Высокая зольность. Минеральные примеси (в том числе пыль) повышают зольность волокнистого сырья, что ухудшает прочностные параметры бумаги и усложняет обесцвечивание и очистку. Стекло и осколки керамики повышают травмоопасность при ручной сортировке.

Органические загрязнения (пищевые остатки, жиры, биологические включения) повышают риск микробиологического обрастания производственных потоков. Наличие органики способствует развитию бактерий, плесени, что может сказаться на качестве волокна (гниение), а также на санитарно-гигиенических показателях готовой бумаги. Вызывают ухудшение показателей белизны и запаха. Присутствие жиров и пищевых остатков часто приводит к постороннему запаху, а также к появлению жирных пятен. Повышается потеря волокна. Для их удаления требуются дополнительные операции (химическая промывка, Усиленные меры по промывке и флотации для удаления органики приводят к тому, что часть полезного волокна теряется в отходах, снижая выход годной массы. дезинфекция).

Суммарное воздействие загрязнений на качество продукции и производство можно представить следующими положениями:

- а) снижение прочностных характеристик и внешнего вида;
- б) увеличение количества производственных отходов;
- в) увеличение потребления всех материальных ресурсов;
- г) увеличение эксплуатационных и капитальных затрат.

Таким образом, проблема наличия загрязнений в макулатуре является одной из важнейших в контексте повышения эффективности использования макулатуры. Содержимое примесей на 1 т макулатуры может варьироваться от нескольких десятков до сотен килограммов (2–15%), что существенно влияет на технологические и экономические показатели переработки. Для сокращения данного показателя применяются многоступенчатые системы сортировки и очистки, отдельный сбор бумаги и совершенствование норм и стандартов. Дальнейшее развитие технологий анализа и сепарации примесей, а также работа с

поставщиками и потребителями макулатуры позволит добиться более стабильного и качественного вторичного сырья. Контроль и снижение массовой доли загрязнений в макулатуре — один из ключевых факторов повышения эффективности и устойчивости целлюлозно-бумажного производства на основе вторичного сырья.

### **1.8. Эффективность современного оборудования для удаления загрязнений при производстве макулатурной массы**

В основе производства ММ лежит процесс извлечения волокон из вторичного сырья (бумаги и картона) и отделения различных загрязнений – как органических, так и неорганических. В зависимости от вида макулатуры (офисная бумага, газетная бумага, картон с полимерным покрытием и т. д.) спектр загрязнений может быть очень широким: механические включения (крупные элементы: скрепки, проволока, пластмассовые изделия, металлическая фольга); полимерные фрагменты (ламинаты, клеи, плёнки, в том числе липкие включения); пигменты, остатки красок (особенно при обесцвечивании газетной или офисной макулатуры); органические примеси (мелкие пищевые отходы, другие постпотребительские загрязнения). Эффективность работы оборудования по сортировке и очистке макулатуры во многом определяет качество получаемой ММ и экономичность последующих процессов переработки (деинкинг, промывка, флокуляция и др.). Рассмотрим основное оборудование, применяемое для удаления загрязнений, а также приведём результаты исследований, посвящённых оценке его эффективности. Рассмотрим в следующей последовательности:

- тип загрязнения;
- первичный метод отделения

а) крупногабаритные и тяжёлые включения – это грубая сухая сортировка [60]. Является первой стадией при переработке макулатуры. Цель – удаление крупных металлических, пластиковых и иных фракций, не подлежащих дальнейшему измельчению. Используются: транспортеры и ручная сортировка –

операторы вручную извлекают крупные загрязнения; барабанные сита (trommel screens) – вращающийся барабан с отверстиями определённого диаметра отделяет крупные фрагменты. Эффективность и факторы влияния: скорость вращения барабана, угол наклона, размер отверстий, скорость подачи макулатуры.

Устройство для сортировки макулатуры [61-63] - мокрая сортировка и гидроразбиватели. В ряде технологических схем макулатуру сначала подают в гидроразбиватель (pulper), где под действием воды и механического перемешивания волокно отделяется от крупных загрязнений. Затем крупные тяжёлые частицы оседают на дно (heavy reject), а лёгкие всплывают. Эффективность и особенности: зависят от конфигурации ротора, времени контакта и концентрации волокна, наличие устройств для удаления тяжёлых включений (жгут).

б) среднеразмерные и мелкие загрязнения – это ситовая очистка и очистители [64-65]. Ситовая очистка: после гидроразбивателя смесь подаётся на ситовую очистку - дисковые и вибрационные сита, где ячейки или щели определённого размера отделяют волокнистую пульпу от крупных stickies и пучков волокна; роторные сита – работают при повышенном давлении, эффективны для тонкого разделения. Факторы эффективности: размер щелей (0,15–0,30 мм; 0,5–1,2 мм), конструкция ротора (тип «барракуды», «насечки»); гидроциклоны-очистители [66-67]. Гидроциклоны удаляют более тяжёлые частицы (песок, стёкла, металлическая крошка), а в специальных конструкциях – лёгкие включения (плёнки, клеи). Работают за счёт разности плотностей и центробежной силы.

в) удаление клеев, липких включений [68-70] – это диспергирование при повышенной температуре и добавках ПАВ; флотация – мелкие частицы клеев, красок всплывают при барботаже воздуха. Оборудование: диспергаторы (High-consistency dispersers) – оборудования фирмы ANDRITZ; флотационные установки (Voith EcoCell, Kadant MAK-C).

Ферментативное удаление клеевых включений [71-72]. Перспективное направление – использование ферментов (эстераз, липаз) для гидролиза липких

компонентов. При этом снижается необходимость в агрессивных химических реагентах. Оборудование: • Реакторы ферментативной обработки – специальные мешалки, контролируемая температура (35–50 °С), рН 7–8.

г) удаление красок и пигментов (деинкинг); как ключевой метод применяется флотация [73-74]. Используются флотационные аппараты с применением воздуха, флокулянтов, ПАВ. Частицы краски прикрепляются к пузырькам и выводятся с пеной. Эффективность: зависит от типа ПАВ, размеров частиц красок, турбулентности в камере флотации, коэффициента «яркости» (brightness) макулатурной массы, как основного показателя. Оборудование: Voith EcoCell, Kadant MAC-Cell, Andritz SelectaFlot.

Химический и ферментативный деинкинг [75]. При химическом деинкинге используется щёлочь, перекись водорода, силикаты, ПАВ. При ферментативном деинкинге используются целлюлазы, гемицеллюлазы и особые энзимы, способствующие «отшелушиванию» красок.

Оценка эффективности работы оборудования осуществляется ключевыми показателями: степень удаления загрязнений, %; выход волокна (потеря волокна при очистке не должна быть чрезмерной), %; снижение зольности (для пигментов, мелких минеральных включений), %; уровень энергетических затрат (kWh/т массы); чистота кондиционной массы – оценивается оптически, по яркости, по содержанию stickies (штук на тонну).

Сравнительные данные исследования: Ombye и Venkatesh (2010) [76] сравнивали эффективность различных схем ситовой очистки и выявили, что комбинирование грубых и тонких сит увеличивает степень удаления крупных и мелких загрязнений до 90–95 %; Dorris и Allen (2009) [77] изучали гидроциклонные установки и получили 80–90 % удаления тяжёлых фрагментов при оптимальном давлении (1,5–2,0 бар).

Экологические и экономические показатели [78-79]: снижение потребления свежей воды за счёт замкнутых циклов флотации; минимизация объёмов шламов и отходов и, как следствие, существенное повышение экономичности переработки макулатуры.

Таким образом, грубая и тонкая сортировка (сухие сепараторы, барабанные сита, гидроразбиватели, ситовые системы) – необходима для удаления крупных и средних загрязнений; гидроциклонная очистка – эффективно отделяет тяжёлые частицы (песок, металл) и при специальных конструкциях – лёгкие полимерные включения; флотация и диспергирование – основной метод борьбы с мелкими включениями красок, клеев (stickies), пигментов; ферментативная обработка – перспективная технология, дающая возможность более мягко и экологически эффективно удалять клеевые и красочные загрязнения.

Производители оборудования (Voith, ANDRITZ, Kadant, Valmet) – предлагают комплексные решения с учётом требований к типу макулатуры, производительности и экологическим нормам [80-86]. Оценка эффективности оборудования базируется на таких показателях, как степень очистки по различным фракциям загрязнений, сохранность целлюлозных волокон, удельные затраты энергии и воды. Современные линии позволяют автоматизировать процесс за счёт систем мониторинга и управления (SCADA/HMI), что повышает общую производительность и качество макулатурной массы.

### **1.9. Современное оборудование для переработки отходов производства макулатурной массы**

При переработке макулатуры в ММ для производства картона, бумаги, туалетной бумаги и др. отделяются различные виды загрязнения. Как выше рассматривалось, виды загрязнений могут значительно варьироваться по составу и количеству в зависимости от вида макулатуры (газетная, журнальная, офисная бумага, упаковочный картон с полимерными покрытиями и пр.) и включают:

а) волокнистые осадки (шламы, илы) – образуются в системах очистки сточных вод и при фильтрации/сгущении волокон. Содержат целлюлозные волокна (короткие), минеральные наполнители (каолин, карбонат кальция), органические соединения, связующие компоненты и т. д.

б) отходы деинкинга – формируются при удалении красок, пигментов, клеев; содержат пигменты, частицы красок, минеральные наполнители, остатки реагентов.

в) полимерные включения (плёнки, клеи, покрытия, ламинаты) – так называемые липкие включения, которые могут содержать полиэтилен, полипропилен, ПВХ, акриловые дисперсии и т. д.

г) механические примеси (скрепки, металлическая фольга, крупные полимерные фрагменты) – как правило, удаляются на стадии грубой сортировки (сухой или влажной).

Современная промышленность стремится к экономике замкнутого цикла: все отходы либо перерабатываются в полезные продукты, либо утилизируются с получением энергии. Рассмотрим основные технологии, установки и результаты исследований, подтверждающие эффективность таких решений.

2. Использование шламов в строительной индустрии - суть технологии: подсушенные шламы (часто до влажности 40–50 %) вводят в состав цементных смесей, бетонных блоков, кирпича, керамзита; минеральные компоненты шлама выполняют функцию наполнителя; органическая фракция при обжиге может обеспечивать дополнительную энергию.

В данном литературном исследовании акцент сделан на мелкие и средние включения, которые вызывают основные затруднения в процессе бумажного производства. Современные тенденции в области ресурсосбережения и развития экономики замкнутого цикла направлены на максимальное вовлечение подобных отходов в повторное использование или переработку в полезную продукцию.

Рассмотрим основные способы утилизации и оборудование, применяемое для переработки каждой группы загрязнений.

а) волокнистые осадки (илы) и шламы содержат: короткие волокна (менее 0,8 мм); минеральные наполнители (каолин, мел, титановые белила и т. д.); остатки клеевых веществ (крахмал, смолы, латексы); органические примеси (лигнин, экстрактивные вещества и пр.). По данным ряда исследований [80,87], объём

подобных отходов в целлюлозно-бумажной промышленности может составлять до 40–50 кг на 1 тонну готовой бумажной продукции. Используются:

В строительной индустрии [88] шламы (обезвоженные до влажности 30–50%) часто применяют как добавку в цементные смеси или бетонные блоки, где минеральная часть шлама служит наполнителем, а органика (целлюлоза) может выполнять роль фибры, улучшающей реологические свойства.

В производстве кирпичей [89], керамзита или при обжиге керамики, где сгорающая органическая фракция способствует повышению пористости материала.

Оборудование: прессы (ленточные, шнековые) или центрифуги для обезвоживания шлама; смесители (бетоносмесители, конусные смесители) для приготовления строительных смесей; линии по производству керамзита или кирпича (вращающиеся печи обжига, туннельные печи).

Биологическая переработка [90-92] - компостирование и анаэробное сбраживание. Компостирование: при отсутствии токсичных примесей и тяжёлых металлов шлам может использоваться как углеродистый компонент в смеси с другими органическими отходами (пищевыми, древесными опилками). Анаэробное сбраживание: органическая часть (целлюлоза, крахмал и пр.) под воздействием метаногенных бактерий разлагается с образованием биогаза (метана), который улавливается и сжигается для получения тепловой и/или электрической энергии.

Оборудование: роторные компостеры, валы для переворачивания компостных буртов, системы аэрации, анаэробные реакторы (UASB-реакторы, метантенки), системы сбора биогаза, газовые генераторы.

Термическая утилизация (сжигание, пиролиз, газификация) [93-95]. Прямое сжигание (в котлах с циркулирующим кипящим слоем) позволяет утилизировать органическую часть шлама как топливо, при этом минеральный остаток (зола) может идти в дальнейшие технологические цепочки. Пиролиз: при температуре 400–600 °С выделяется пиролизный газ и жидкие углеводороды, остаётся твёрдый

остаток (биоуголь). Газификация: при более высоких температурах и контролируемом доступе кислорода образуется синтез-газ (CO, H<sub>2</sub>).

Оборудование: котлы с топками (чаще с кипящим слоем), системы фильтрации дымовых газов; пиролизные установки (реакторы шахтного или ретортного типа, вращающиеся реакторы); газификаторы (шахтные, циклонные, плазменные).

б) отходы деинкинга (деинкинг-шламы) [93-95]. Состав: деинкинг-шламы в основном состоят из пигментов (CaCO<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, каолина); частиц красок, чернил, лакокрасочных дисперсий; остатков реагентов (ПАВ, комплексообразователей); мелких фрагментов волокон (менее 0,5 мм) и полимерных компонентов (латекса, клеевых включений). Используются:

В качестве минерального наполнителя [96-98]. Из-за высокого содержания каолина и карбоната кальция такие шламы могут служить вторичным сырьём для производства наполнителей или пигментов (при соблюдении требований к чистоте и при наличии технологии фракционирования).

Оборудование: гидроциклоны и центрифуги для фракционирования частиц; флотационные аппараты для отмывки красок; системы классификации (сепараторы, вибрационные сита, декантеры).

Применение в стройматериалах [79,99]. Как и волокнистые шламы, обезчернённые отходы могут использоваться: в цементных связующих (вместо части песка или известняка); в композитных материалах (гипсокартон, огнеупорные плиты).

в) полимерные включения: плёнки, клеи, пластики (stickies) [100-101]. В макулатуре (особенно упаковочной) присутствуют: ламинаты (бумага + полиэтиленовая плёнка), полипропиленовые или полиэтилентерефталатные (ПЭТ) слои, клеевые включения (на основе акриловых, виниловых, полиуретановых дисперсий). Способы удаления полимерных фракций включают: сухую сортировку (грохочение, воздушная сепарация); водную флотацию (лёгкие фракции всплывают); ферментативные методы для разложения некоторых клеев (разработка последних лет).

Оборудование: барабанные или дисковые сита, воздушно-ситовые сепараторы, флотационные машины (отстойники, флотационные колонны), реакторы с ферментами (энзимные реакторы).

Вторичная переработка полимерных фракций включает [102]: механическое рециклирование, при относительно чистых и однородных полимерных потоках (например, чистая полиэтиленовая плёнка от ламината); химическая переработка (пиролиз, гидролиз) – позволяет получить синтетическую нефть, дизельные фракции или газ. При температуре 400–600 °С получается пиролизный газ, жидкая фракция (смесь углеводородов) и твёрдый остаток (биоуголь). Газификация - высокотемпературный процесс (800–1300 °С) при ограниченном доступе кислорода для получения синтез-газа (CO, H<sub>2</sub>).

Энергетическая утилизация (RDF-топливо) [103-104]. При невозможности выделить чистые полимеры их смешивают с остатками волокна и используют как твёрдое топливо в цементных печах, котельных, ТЭЦ.

Оборудование: пресс-грануляторы или брикетировочные машины для формирования RDF-топлива; котлы для сжигания RDF (часто с многосекционными топками и системами очистки газов).

Биоконверсия (компостирование, анаэробное сбраживание) [105-107].

Компостирование. При невысоком содержании тяжелых металлов шлам может быть смешан с другими органическими отходами (например, пищевые отходы, древесные опилки) для получения компоста.

Анаэробное сбраживание. Органическая фракция (целлюлоза, крахмал, клейевые компоненты) в анаэробных реакторах разлагается до биогаза (метана), который сжигается для получения энергии.

Оборудование: установки непрерывного компостирования (роторные компостеры, туннельные системы); анаэробные реакторы (UASB, CSTR), системы сбора и утилизации биогаза.

Оценка эффективности и современные тенденции, основные критерии эффективности, степень извлечения ценных фракций (волокон, минеральных наполнителей), сокращение объёмов отходов на захоронение, энергетическая

отдача при термических процессах (кВт·ч/тонну), экономическая целесообразность (ROI, CAPEX/OPEX), соответствие экологическим нормам (выбросы, токсичность остатков).

Промышленная реализация и примеры установок - Voith: комплексные линии BlueLine (гидроразбиватель + ситовая очистка + флотация). ANDRITZ: линии для утилизации шламов (диспергаторы, фильтр-прессы, пиролизные котлы). Kadant: флотационные модули МАК-С, системы ситовой сортировки (RADIScreen). Valmet: OptiCell Deinking, OptiFiner (диспергатор), решения для закрытых водных циклов.

Новые разработки [105-109]: ферментативные и нанотехнологические подходы. Ферментативное удаление stickies – использование липаз, эстераз для деструкции клеевых включений. Нано- и мембранные технологии – ультрафильтрация для тонкого удаления минеральных и органических примесей.

Таким образом, технологические линии по переработке отдельных видов отходов макулатурного производства (шламы, полимерные включения, деинкинг-шламы) становятся всё более комплексными и ориентированы на максимальное извлечение ценных компонентов (волокон, минеральных наполнителей) и получение энергии (через биогаз или сжигание/пиролиз); современное оборудование (Voith, ANDRITZ, Kadant, Valmet и др.) сочетает в себе механическую, химическую, биологическую и термическую обработку, что повышает общую эффективность и сокращает экологический след производства; ферментативные технологии и нанофильтрация открывают новые возможности по более избирательному удалению красящих и клеевых компонентов без значительной потери волокна; строительная индустрия и энергетический сектор (RDF, котлы на биомассе, газификация) — основные направления утилизации и повторного использования подобных отходов; исследования показывают высокую эффективность (до 80–95 %) по удалению загрязнений при правильном выборе и комбинации установок (гидроразбиватель + ситовая очистка + гидроциклоны + флотация + диспергирование), что в итоге повышает качество готовой макулатурной массы.

Современные технологические установки позволяют эффективно перерабатывать различные виды отходов от макулатуры — шламы, полимеры, пигментные осадки — и вовлекать их в повторный цикл производства либо использовать в качестве топлива или сырья для строительной отрасли. Постоянное совершенствование оборудования и расширение научных исследований в области ферментативных и химических методов обработки обеспечивают дальнейшее повышение экологической и экономической эффективности переработки макулатуры.

#### **1.10. Заключение по аналитическому обзору литературы, определение цели и постановка задач диссертационного исследования**

Общие выводы из анализа научных результатов и их практической реализации, содержащихся в научных трудах по теме диссертации, сводятся к следующим положениям:

1. Макулатура МС-5Б и МС-6Б относится к категории отходов бумаги и картона, которые широко используются в производстве упаковочных материалов, гофрированного картона и других изделий. Эти марки макулатуры содержат примеси, такие как клей, краски, пластик и другие загрязнения, что усложняет процесс их переработки.

2. Современные технологии переработки макулатуры включают этапы сортировки, роспуска, очистки от примесей, дезинфекции и производства вторичного сырья. Для марок МС-5Б и МС-6Б важно применение эффективных методов очистки, таких как флотация, сепарация и фильтрация, чтобы удалить максимальное количество загрязнений.

3. Научные исследования показывают, что использование современных технологий позволяет достичь высокой степени очистки макулатуры, что повышает качество вторичного сырья. Однако для марок МС-5Б и МС-6Б остается проблема снижения потерь волокна в процессе переработки, что требует дальнейшей оптимизации технологических процессов.

4. Переработка макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б способствует снижению нагрузки на окружающую среду за счет уменьшения объема отходов и экономии ресурсов. Экономическая эффективность переработки зависит от качества исходного сырья, применяемых технологий и рыночного спроса на вторичные материалы.

5. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку более эффективных методов очистки макулатуры, а также на создание технологий, позволяющих перерабатывать макулатуру с минимальными потерями волокна. Важным направлением является также внедрение автоматизированных систем сортировки и переработки, что повысит производительность и снизит затраты.

6. Многообразие разработанных способов и продолжение исследований в этой области, с одной стороны, является подтверждением сложности переработки данного вида сырья, а с другой стороны, говорит о незавершенности поиска альтернативных путей решения имеющейся проблемы;

7. Большинство технических решений, как следует из литературного обзора, отличаются противоречивостью, имеют положительные и отрицательные стороны, совокупность которых не обеспечивает преобладающего положения ни одному из них.

Исходя из данных аналитического обзора научных трудов и заключения, автор определил цель диссертационной работы и сформулировал задачи исследований для ее достижения. Цель и задачи изложены во введении.

## **ГЛАВА 2. МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **2.1. Объекты исследования**

Макулатура марки МС-5Б и МС-6Б ГОСТ 10700–1997: к данной группе отнесены: отходы производства и потребления гофрированного картона, бумаги и картона применяемых в его производстве; отходы производства и потребления картона всех видов (кроме электроизоляционного, кровельного и обувного) с черно-белой и цветной печатью).

Тарный картон: картон-лайнер для плоских слоев гофрированного картона (тест-лайнер) и бумага для гофрирования (флютинг).

### **2.2. Методики исследования**

При выполнении исследований применялись современные приборы и методики исследований качества сырья (макулатуры), материалов, производства, а также испытаний лабораторных и промышленных образцов бумаги и картона, в соответствии с принятыми нормативными документами [110-136].

#### **2.2.1. Общие принципы анализа качества макулатуры и макулатурной массы**

В методической части приводится описание конкретных методик анализа ключевых показателей качества макулатуры (предназначенной для производства тест-лайнера и флютинга) и полученной из неё макулатурной массы. Данные методики основаны на широко используемых международных и отечественных стандартах (ISO, TAPPI, ГОСТ) и могут служить основой для локальных производственных инструкций.

## 2.2.2. Анализ качества макулатуры перед переработкой

а) сортность и визуальная оценка (первичная). Цель: подтвердить соответствие партии макулатуры заявленному сорту и выявить крупные загрязнения. Отбор пробы: из каждой поставленной партии выбирают представительную пробу - отбирают несколько отдельных фрагментов с разных точек (верх, середина, низ тюка); масса суммарной пробы должна составлять 1–2 % от общей массы партии, но не менее 5–10 кг.

б) сортность и классификация (ГОСТ 10700, EN 643): определяют соответствие требованиям по содержанию картона, газеты, мелованных бумаг и т. д.; фиксируют наличие посторонней бумаги (с покрытием, ламинированием), полимерных включений.

в) визуальное выявление крупных загрязнений: металл, фольга, пластики >10–20 мм; отдельно фиксируют возможные пищевые и биологические загрязнения (плесень, органика).

г) оценка пригодности: делают итоговое заключение о соответствии партии необходимому сорту (например, «картонно-бумажная группа без покрытий» для будущего флютинга).

Определение влажности. Цель: установить реальное количество сухого вещества в партии макулатуры. Оценка: для производства тест-лайнера/флютинга рекомендуют влажность макулатуры не выше 12–15 %. Слишком высокая влажность снижает экономическую эффективность и может привести к рискам плесени.

Определение зольности. Цель: оценить содержание минеральных и неорганических примесей (CaCO<sub>3</sub>, глины, мел, красители и т. д.) в исходном сырье. Оценка: высокая зольность (более 10–12 %) может свидетельствовать о нежелательных наполнителях (мел, каолин), что негативно влияет на прочность будущего картона.

Определение посторонних примесей и крупных загрязнений. Цель: количественно оценить содержание неволокнистых включений (плёнки, фольга,

пластики). Оценка: чем ниже процент неволокнистых примесей (<1–2 %), тем лучше пригодность для флютинга и тест-лайнера.

Анализ полученной макулатурной массы. После технологической подготовки (гидроразбиватель, сортировка, флотация, очистители и т. д.) оценивают характеристики уже полученной массы.

Дренажная способность. Цель: определить скорость освобождения волоконной суспензии от воды (важно для настройки скорости бумагоделательных машин). Более высокое значение обезвоживания говорит о лучшем дренировании, но меньшей связности волокон.

Определение степени помола волокна (Шоппер-Риглера – ISO 5267-1) Цель: альтернативный метод дренирования (в градусах °SR). Чем выше °SR, тем более «замедляется» водоотделение и более высокий размол волокна. Типичные значения для массы на тест-лайнер/флютинг: 18–30 °SR (в зависимости от желаемой прочности).

Содержание липких включений (частиц) – TAPPI T 277 / T 563. Цель: выявить и количественно оценить клеевые частицы (обрезки скотча, горячие клеи, акриловые дисперсии). Результат: количество частиц (шт./м<sup>2</sup>) и суммарная площадь (мм<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>). Для нормальной работы без проблем в бумагоделательной машине содержание крупных частиц не должно превышать 10–30 шт./м<sup>2</sup>.

Волоконный состав и длина волокна (ISO 16065-2, TAPPI T 271). Цель: определить среднюю длину волокон, их распределение и фракционный состав. Оценка: для флютинга и тест-лайнера обычно важно наличие достаточного количества «длинных» волокон ( $\geq 1$  мм) для прочности.

Зольность макулатурной массы (ISO 2144) Цель: проверить остаточное содержание минеральных наполнителей и примесей после очистки. Зольность готовой макулатурной массы часто ниже, чем у исходной макулатуры, если процесс подготовки эффективно удаляет лишние минеральные примеси.

Формование лабораторных листов и определение прочности. Для более точной оценки применяют полноценный комплекс испытаний готовых «отливок» листов, который моделирует свойства будущей продукции (тест-лайнер, флютинг):

формование листа (TAPPI T 205) – лабораторный лист массой 60–120 г/м<sup>2</sup>; кондиционирование (ISO 187, TAPPI T 402) – 23 °С, 50 % относительной влажности в течение не менее 24 часов.

Определение прочностных свойств: разрывная длина: ISO 1924, TAPPI T 494, сопротивление продавливанию, ISO 2758, TAPPI T 403, сопротивление раздиранию (Tear index): ISO 1974, TAPPI T 414, определение SCT: ISO 9895 и RCT). Оценка этих показателей даёт предварительную характеристику прочностных свойств будущего картона (особенно важны SCT, RCT для флютинга и лайнера).

Анализ полученных результатов:

1. Макулатура: влажность не должна превышать 12–15 %, зольность в исходном сырье — чем меньше, тем лучше (обычно <10 %), наличие крупных загрязнений <1–2 %, соответствие макулатуры определённой сортности.

2. Макулатурная масса: дренаж (CSF) в диапазоне 200–400 мл (или °SR 18–30) для оптимальной скоростной работы на бумагоделательной машине (зависит от типа продукта), низкое содержание частиц (оптимально < 30 шт./м<sup>2</sup> для крупной фракции), средняя длина волокна (0,8–1,2 мм и выше) – зависит от необходимой прочности, лабораторные листы должны обеспечивать удовлетворительные значения SCT, RCT, Burst index и т. д. в соответствии с техническими условиями на тест-лайнёр/флютинг.

Применение описанных методик (основанных на ISO, TAPPI, ГОСТ) позволяет всесторонне контролировать качество макулатуры и макулатурной массы: 1. На входе (сортность, влажность, зольность, крупные загрязнения) – чтобы отсеять непригодное сырьё и соблюсти требуемый вид макулатуры. 2. После подготовки массы (дренаж, содержание частиц, длина волокна, зольность) – чтобы обеспечить стабильный технологический процесс и достижение нужных прочностных свойств будущего гофрокартона. Соблюдение данных методик и своевременная корректировка производственного процесса (например, настройки очистителей, рафинирования, удаления липких включений) обеспечивают высокое и стабильное качество тест-лайнера и флютинга, что, в конечном счете, отражается

на экономике.

### **2.2.3. Анализ загрязнений макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б**

Используется комплекс методов, которые позволят определить состав, размер, природу и количество примесей. Ниже приведены методики анализа с указанием приборов и оборудования.

**а) Отбор проб загрязнений.**

Методика: отбор проб производится на разных этапах очистки макулатурной массы (после роспуска, флотации, сепарации и фильтрации).

Оборудование: пробоотборники для твердых и жидких сред; весы аналитические для взвешивания проб.

**б) Определение гранулометрического состава (размер частиц).**

Методика: анализ распределения частиц по размерам с использованием ситового анализа или лазерной дифракции.

Оборудование: ситовой анализатор (Retsch AS 200 control), лазерный анализатор размера частиц (Malvern Mastersizer 3000).

**в) Определение химического состава загрязнений.**

Методика: использование сканирующей электронной микроскопии, спектроскопических и хроматографических методов для идентификации органических и неорганических компонентов.

Оборудование: сканирующий электронный микроскоп (TESCAN MIRA3 LMH) электронная колонна (FEG SEM) с источником электронов на основе катода Шоттки; ускоряющее напряжение 200 В – 30 кВ; ток зонда 2–200 нА; разрешение 1,0 нм (при 30 кВ); увеличение до 1 000 000×, инфракрасный спектрометр с преобразованием Фурье (FTIR, Thermo Scientific Nicolet iS50) для анализа органических примесей (клей, краски, пластик), рентгенофлуоресцентный спектрометр (XRF, Bruker S8 TIGER) для анализа минеральных примесей (песок, глина, металлы), газовая хроматография-масс-спектрометрия (ГХ-МС, Agilent 7890B/5977A) для анализа летучих органических соединений.

г) Определение морфологии загрязнений.

Методика: исследование формы и структуры частиц с использованием микроскопии.

Оборудование: оптический микроскоп (Olympus BX53) для предварительного анализа, электронный микроскоп SEM Sigma VP Zeiss для детального изучения структуры морфологии и элементного состава.

д) Определение содержания влаги и летучих веществ

Методика: высушивание пробы при определенной температуре для определения потери массы.

Оборудование: сушильный шкаф (Memmert UF110), весы аналитические.

е) Определение плотности загрязнений.

Методика: измерение плотности с использованием пикнометра или гидростатического взвешивания.

Оборудование: пикнометр (Brand GmbH), весы аналитические.

ж) Определение токсичности загрязнений.

Методика: оценка токсичности с использованием биотестирования или химического анализа на содержание тяжелых металлов и органических токсикантов.

Оборудование: атомно-абсорбционный спектрометр (ААС, PerkinElmer PinAAcle 900T) для анализа тяжелых металлов, биотестовые системы (Daphnia magna для оценки токсичности водных вытяжек).

з) Определение термостабильности загрязнений.

Методика: термогравиметрический анализ (ТГА) для изучения поведения загрязнений при нагревании.

Оборудование: ТГА (Netzsch STA 449 F3 Jupiter).

и) Анализ органической составляющей.

Методика: определение содержания целлюлозы, лигнина и других органических соединений.

Оборудование: УФ-видимый спектрометр (Shimadzu UV-2600), высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ, Agilent 1260 Infinity II).

к) Обработка и интерпретация данных.

Методика: использование программного обеспечения для обработки данных и построения графиков.

Оборудование: программное обеспечение (OriginLab, Microsoft Excel, специализированные программы для анализа спектров).

Таким образом, предложенные методики и оборудование позволяют провести комплексный анализ загрязнений, отделенных от макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б. Это обеспечивает контроль качества макулатурной массы для производства флютинга и тест-лайнера, а также помогает оптимизировать технологические процессы очистки.

## **2.3. Основные процессы и оборудование получения и анализа макулатурной массы**

### **2.3.1. Отбор и роспуск макулатуры**

Отбирали пробу макулатуры, взвешивали расчетное количество на технических весах, замачивали на 40 минут в воде, и распускали в лабораторном дезинтеграторе фирмы FRANK-PTI по ГОСТ 14363.4-89. Общий вид дезинтегратора представлен на Рисунке 2.1. После роспуска массу сгущали до концентрации 6 %, и исследовали необходимые характеристики. Затем массу использовали в исследованиях без размола или с размолом.



Рисунок 2.1 – Дезинтегратор для роспуска макулатурной масс

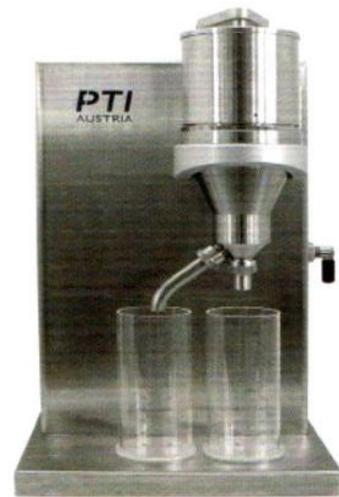
### 2.3.2. Размол макулатурной массы

Размол волокнистых материалов – один из основных процессов производства, определяющий многие характерные свойства готовой бумаги. Проводился в соответствии с ГОСТ 14363.4–89 [199].

По варианту II размол проводился в мельнице Йокро при концентрации массы 6%. Процесс размола контролировали путем определения степени помола массы. Внешний вид мельницы Йокро представлен на Рисунке 2.2(а).



а)



б)

Рисунок 2.2 – (а) – мельница Йокро для размола массы; (б) – аппарат для измерения степени помола массы СР-2 (Шоппер-Риглера)

По варианту III размол проводился в лабораторной дисковой мельнице ЛДМ-3, входящей в лабораторный размольный комплект ЛРК-1. Общий вид ЛРК-1 представлен на Рисунке 2.2(б). Мельница состоит из цилиндрического корпуса, который закрывается крышкой, фиксируемой с помощью болтов. В данной части бака устанавливаются статорное кольцо гарнитуры, а на приводном валу смонтирована крылатка и роторное кольцо гарнитуры. Межножевой зазор изменяется путем осевого перемещения бака при помощи штурвала. В зазоре между ножами гарнитуры волокнистый материал размалывается и центробежной силой отбрасывается к стенке бака, на которой установлены планки, уменьшающие вращение массы и способствующие возникновению пристенного восходящего

потока. В центре бака создается нисходящий поток массы, которая с помощью лопаток крылатки попадает в межножевое пространство гарнитуры. Таким образом, организуется замкнутая циркуляция массы.

Ход работы: после гидроразбивателя суспензию объемом 2 л загружали в мельницу, закрывали крышку, включали привод мельницы и проводили перемешивание массы без прижима дисков гарнитуры. Таким образом осуществлялся подмол массы при расстоянии между ножами 0 мм в течение 2,5 мин, затем вращением штурвала начинали уменьшать расстояние между ножами гарнитуры. Непосредственно размол производился при расстоянии между ножами 0,7 мм в течение 1,5 мин. По окончании размола сначала разводили диски гарнитуры, потом выключали электродвигатель мельницы. Контроль степени помола массы в мельнице вели периодическим отбором пробы и определяли степень помола гидросуспензии.

### **2.3.3. Определение рН массы**

Определение проводили в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 [198]. Метод определения величины рН проб основан на измерении ЭДС электродной системы, состоящей из стеклянного электрода, потенциал которого определяется активностью водородных ионов, и вспомогательного электрода сравнения с известным потенциалом.

### **2.3.4. Определение массовой доли волокна в макулатурной массе**

Определение массовой доли волокна в волокнистой суспензии основано на гравиметрическом (весовом) методе по ГОСТ Р 50068-92 (ИСО 4119-78). Отбирается проба макулатурной массы 1 л, масса обезвоживается фильтрованием на бумажном фильтре, сушится вместе с фильтром и взвешивается. При взвешивании должны быть соблюдены следующие условия: температура окружающей среды,  $20 \pm 1$ , °С; относительная влажность воздуха, 30-80%.

Высушенный фильтр с массой взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,01 г и обрабатывают результаты определения. Расчет массовой доли волокна в макулатурной массе проводят по формуле:

$$C_B = \left( m_1 - \frac{m_2}{m_3} \right) \times 100, \quad (2.1)$$

где  $C_B$  – массовая доля волокна (концентрация), %;

$m_1$  – масса сухого волокна с фильтром, г;

$m_2$  – масса сухого бумажного фильтра, г;

$m_3$  – масса пробы волокнистой суспензии, г.

### 2.3.5. Определение степени помола макулатурной массы

Определение степени помола образцов макулатурной массы производилось в соответствии с ГОСТ 14363.4-89. Измерение степени помола основано на различной скорости отдачи воды массой концентрацией 2 г/л с различной степенью помола при фильтровании через сетку. Разница в скорости водоотдачи при фильтровании 1 л массы через сетку отражается количеством фильтрата, вытекшего через боковое отверстие конусной части прибора СР-2 (Шоппер-Риглера), который применяется для этих целей. Общий вид аппарата представлен на Рисунке 2.2 (б).

Чем выше степень помола массы, тем меньший объем фильтрата вытекает через боковое отверстие. Результаты определения рассчитывают по формуле:

$$S = \frac{(1000 - V)}{10}, \quad (2.2)$$

где  $S$  – степень помола массы, °ШР;

$V$  – объем фильтрата, вытекший через боковое отверстие аппарата, см<sup>3</sup>;

10 – коэффициент пересчёта см<sup>3</sup> в градусы °ШР.

### **2.3.6. Определение времени обезвоживания макулатурной массы**

Метод подобен определению степени помола массы с помощью аппарата СР-2 по стандартной методике. Отличие состоит в том, что измеряют время истечения определенного объема фильтрата 500, 600 или 700 см<sup>3</sup>, либо измеряют объем вытекающего фильтрата за определенное время -10, 15 или 20 с (интервал 5 с) через боковое отверстие, при закрытом центральном отверстии. В результате предварительных испытаний выявляют оптимальное время для скорости обезвоживания. Затем составляют таблицу зависимости скорости обезвоживания от времени испытания. За оптимальное время испытания принимают время максимального прироста скорости обезвоживания между двумя точками. Измерения. Таким образом, сравнивают способность к обезвоживанию (водоотдачу) различных волокнистых масс. Время обезвоживания массы измеряется в секундах (с).

Порядок определения, следующий:

а) плотно закрывается центральное отверстие приемного конуса прибора пробкой, под боковое отверстие подставляется градуированный цилиндр или сухой стакан на 1000 см<sup>3</sup>, заполняется водой до уровня бокового отверстия центральное отверстие прибора, опускается уплотняющий конус на сетку;

б) в приемный стакан прибора заливается макулатурная масса – 1000 см<sup>3</sup> с содержанием 3 г а.с.в., при температуре  $20,0 \pm 2,0$  °С;

г) после выдержки массы в стакане 5 с, открывается конус и засекается время обезвоживания массы на сетке.

### **2.3.7. Определение содержания (концентрации) взвешенных веществ в фильтрате макулатурной массы**

Определение массовой доли взвешенных веществ суспензии основано на гравиметрическом (весовом) методе по ПНД Ф 14.1;2.110-97. Основан на выделении из пробы фильтрованием воды через мембранный фильтр с диаметром

0,45 мкм или бумажный фильтр «синяя лента» и взвешивании осадка на фильтре после высушивания его до постоянной массы. Содержание взвешенных веществ в анализируемой пробе воды, рассчитывают по формуле:

$$X = \frac{(m_1 - m_2) \times 1000}{V}, \quad (2.3)$$

где  $X$  – массовая доля взвешенных веществ (концентрация), мг/дм<sup>3</sup>;

$m_1$  – масса бюкса с высушенным осадком на фильтре, г;

$m_2$  – масса бюкса с мембранным или бумажным фильтром, г;

$V$  – объем отфильтрованной воды, дм<sup>3</sup>.

### 2.3.8. Фракционирование массы из макулатуры

Фракционирование массы выполняется для разделения на отдельные фракции по длине волокна и последующего определения сравнительного весового соотношения фракций. Фракционирование макулатурной массы производилось на установке Bauer McNett представленной на Рисунке 2.3.

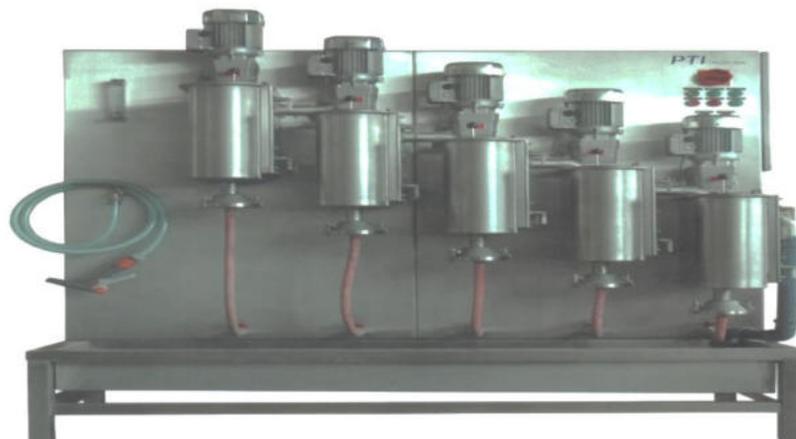


Рисунок 2.3 – Установка для фракционирования массы Bauer McNett

Аппарат состоит из пяти узких стандартных ячеек, имеющих сетки-экраны размером 335 см<sup>2</sup> на стенках ячеек. Ячейки соединены между собой последовательно в единый модуль с уменьшающимся размером ячеек сеток (ASTM

16, 30, 50, 100, 200). Ячейки снабжены мешалками. Волокнистая масса (100 г а.с.в.) в определенном режиме циркуляции воды последовательно разделяется в ячейках на соответствующие фракции, которые улавливаются в сборниках фракций. Фракционирование длится 60 мин. После чего, фракции массы извлекаются, отфильтровываются и определяется их массовая доля.

### 2.3.9. Измерение длины волокна

Для измерения длины волокна применялся Анализатор «Kajaani FS 300». Общий вид прибора показан на Рисунок 2.4.



Рисунок 2.4 – Анализатор длины волокна «Kajaani FS 300»

Прибор способен анализировать любое светополяризующее волокно. Распределение длины волокон, средние показатели и индекс скручиваемости рассчитывается исходя из длины отдельных волокон в диапазоне 0,01-7,6 мм. Современная технология позволяет измерять с точностью до 1  $\mu\text{м}$ . Скорость измерений – 80 волокон в секунду, продолжительность анализа 6-8 мин. Среднеарифметические и средневзвешенные показатели длины и веса вычисляются в соответствии с требованиями международных стандартов TAPPI и ISO. Для всех тестов, образцы были приготовлены одинаково, 500 мг абсолютно сухого волокна были добавлены в 5000 мл дистиллированной воды. После перемешивания в течение 10 минут, 50 мл образца помещали в пластиковую

мензурку и анализировали. Каждый образец был, измерен дважды при одинаковых условиях, и средняя величина была взята за результат.

### 2.3.10. Изготовление лабораторных образцов бумаги

Лабораторные отливки бумаги выполнялись на аппарате “Rapid Kothen”, представленном на Рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Аппарат для изготовления отливок “Rapid Kothen”

Для всех вариантов исследований изготавливалась бумага массой  $80 \text{ г/м}^2$ . Аппарат с одной сушильной камерой предназначен для получения стандартных образцов отливок из всех видов волокнистых полуфабрикатов. Принцип работы аппарата заключается в изготовлении отливок бумаги круглой формы диаметром 200 мм. Формование производится из суспензии волокна на формующей сетке, № 40, при отсасывании воды с помощью вакуума, последующим прессованием и сушкой отливок в сушильной камере, обеспечивающей полное предохранение бумаги от усадки.

После подготовки в соответствии с нормами 1 л суспензии волокна, аппарат запускается в работу. В загрузочную камеру набирается вода до 4 л и прибавляется суспензия волокна. По достижении уровня 7 л, подача воды прекращается и начинается перемешивание сжатым воздухом в течение 5 с. В течение следующих 5 с волокнам дают осесть. Затем в процессе обезвоживания удаляется воздушная

подушка, образующаяся в нижней части камеры, с последующим удалением воды под вакуумом в течение 10 с. В результате на никелевой сетке образуется отливка, обезвоженная в процессе вакуумного отсоса воды. Далее, верхняя часть загрузочной камеры откидывается, и мокрая отливка с помощью валика прикатывается к картону. На влажную отливку накладывается покровный лист и помещают в сушильную камеру. Процесс формования отливки занимает около 1 минуты, а процесс сушки – около 6 минут. Отливка готова к физико-механическим испытаниям.

Получение образцов бумаги на аппарате Рапид-Кеттен хорошо известно, изложено во многих источниках литературы, приведенных выше, не требует расширенного рассмотрения.

### **2.3.11. Анализ образцов бумаги и картона**

Анализ образцов бумаги и картона выполнялся согласно соответствующих ГОСТ. Перед испытанием образцы бумаги подвергались кондиционированию по ГОСТ 13523–78 при относительной влажности воздуха 50 % и температуре  $23 \pm 2$  °С в течение 4 часов.

Влажность образцов макулатуры и лабораторных образцов определяли по ГОСТ 16932-93. Толщину образца определяли по ГОСТ 27015-86 на приборе микрометр цифровой SE 250 с цифровым блоком регистрации, Рисунок 2.6 (а).

Прочность на разрыв и удлинение при растяжении определяли по ГОСТ 13525.1–79 на приборе Тест-система 101, Рисунок 2.6 (б).

Соппротивления продавливанию определяли по ГОСТ 13525.8–86 на приборе L&W Bursting Strength Tester – Code 180, Рисунок 2.6 (в).

Испытание образцов на сжатие - прибор ИТС-201, Рисунок 2.6 (г).

Определение разрушающего усилия при сжатии кольца (RCT) по ГОСТ 10711–97, Рисунок 2.6 (д).

Определение сопротивления плоскостному сжатию гофрированного образца выполняли по методу  $СМТ_{30}$  – ГОСТ 20682–75.

Определение сопротивления торцовому сжатию (ССТ) гофрированного образца – по ГОСТ 28686–90.



(а)



(б)



(в)



(г)



(д)



(е)

Рисунок 2.5 – Общий вид приборов для анализа физико-механических показателей образцов флютинга и тест-лайнера:  
 (а) – L&W Микрометр SE 250; (б) -разрывная машина «Тест-система-101»;  
 (в) – прибор для испытания на сопротивление продавливанию L&W Bursting Strength Tester SE 180/181; (г) – пресс ИТС-201 для испытания на сжатие компонентов гофрокартона, бумаги и картона; (д) – прибор для определения сопротивления сжатию кольца; (е) – прибор для определения энергии внутренних связей по Скотт-Бонду.

Определение энергии внутренних связей по Скотт-Бонду осуществляли в соответствии с TAPPI T833 (ГОСТ 7933-89). на приборе для определения энергии внутренних связей по Скотт Бонду включающем автоматическую станцию для подготовки образцов, Рисунок 2.6 (е).

Определение поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба) по ГОСТ 12605-97 выполняли на приборе для испытания влагопоглощения типа L&W SE 146.

Определение капиллярной впитываемости – по методу Клемма ГОСТ 12602-93.

## **2.4. Методика проведения эксперимента на установке получения полимерпесчаных плит**

### **2.4.1. Цель эксперимента**

Исследование процесса получения полимерпесчаных плит с использованием установки для термопрессования. Оптимизация параметров процесса (температура, давление, время прессования) для получения плит с заданными физико-механическими свойствами.

### **2.4.2. Оборудование и материалы**

Установка для термопрессования (пресс с нагревательными элементами).

Компоненты: макулатурные отходы, песок, полимерные отходы (полипропилен), красители (при необходимости).

Весы для дозирования компонентов.

Смеситель для подготовки однородной смеси песка и полимера.

Формы для прессования плит.

Приборы для контроля температуры и давления.

Оборудование для испытания образцов на прочность, износостойкость.

### **2.4.3. Подготовка сырья**

Просеивание песка для удаления крупных фракций и примесей. Измельчение макулатурных отходов до фракции 10-12 мм. Смешивание песка и макулатурных отходов в различных соотношениях в смесителе до получения однородной массы.

### **2.4.4. Процесс формования и прессования**

Загрузка подготовленной смеси в форму для прессования. Установка формы в пресс. Нагрев формы до температуры 220°C. Приложение давления до 26,4 МПа. Выдержка под давлением при температуре 205°C в течение 2 минуты. Охлаждение формы до температуры 50-60°C перед извлечением плиты.

### **2.4.5. Контроль качества**

Визуальный осмотр плит на наличие дефектов (трещины, пузыри, неравномерность поверхности). Измерение геометрических параметров (толщина, длина, ширина). Испытание образцов на прочность при изгибе, износостойкость и водопоглощение.

### **2.4.6. Анализ результатов**

Сравнение полученных характеристик плит с требованиями стандартов. Определение оптимальных параметров процесса (температура, давление, время) для достижения наилучших свойств.

## 2.5. Методики исследования качества полимерпесчаных плит

В ходе испытаний определяли толщину образцов, предел прочности при статическом изгибе, предел прочности при динамическом изгибе (ударную вязкость), истираемость, разбухание и водопоглощение образцов после выдержки в холодной воде в течение 24 ч.

Толщину определяли на каждом образце по четырём точкам с использованием толщиномера ручного ТР 25-60Б.

### 2.5.1. Определение предела прочности при статическом и динамическом изгибе

Предел прочности при статическом изгибе определяли согласно ГОСТ 10635–88. Образцы размером 180×50 мм укладывают на опоры испытательной машины так, чтобы продольная ось образца была перпендикулярна опорам, а поперечная ось – параллельна оси ножа. Расстояние между опорами 150 мм. Скорость движения нагружающей головки устанавливают равной 10 мм/мин. Предел прочности при статическом изгибе ( $\sigma_{\text{изг.}}$ , МПа) рассчитывают по формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{3Pl}{2bh^2} \cdot 9,81, \quad (2.4)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, кг/см<sup>2</sup>;

$l$  – расстояние между опорами на испытательной машине (100 мм);

$b$  – ширина образца, мм;

$h$  – толщина образца, мм.

Определение предела прочности при динамическом изгибе (ударная вязкость) определяли согласно ГОСТ 9626–90. Маятник копра взводили на угол 120°. Стрелку индикатора маятника устанавливали на 0°. Маятник освобождали и

после его остановки по индикатору определяли угол его холостого хода. Затем на опоры копра устанавливали испытуемый образец. Маятник копра взводили на угол  $120^\circ$ . Стрелку индикатора маятника устанавливали на  $0^\circ$ . Освобождали маятник. После разрушения образца и остановки маятника определяли по индикатору угол рабочего хода. Ударную вязкость ( $\alpha$ , кДж/м<sup>2</sup>), рассчитывали по формуле:

$$\alpha = \frac{A}{S}, \quad (2.5)$$

где  $A$  – работа, затрачиваемая на разрушение образца, кДж;

$S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

$$A = 9,8PL(\cos \beta - \cos \alpha) \cdot 10^{-3}, \quad (2.6)$$

где  $P$  – масса маятника (1 кг);

$L$  – длина маятника (0,43 м);

$\beta$  – угол рабочего хода маятника, град;

$\alpha$  – угол холостого хода маятника, град.

### 2.5.2. Определение истираемости плит

Испытание плиты выполняется по ГОСТ 30629- 2011. Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытаний, п.6.8. Сущность метода заключается в определении потери массы образца плиты, прошедшей четыре цикла испытаний (общий путь истирания равен 600 м). Плита истиралась (шлифовалась) на лабораторном круге истирания ЛКИ-4. Шлиф-зерно №16.

Обработка результатов испытания Истираемость  $K_{ист.}$ , г/см<sup>2</sup>, вычисляют с точностью до 0.1 г/см<sup>2</sup> по формуле:

$$K_{ист.} = m - m_1/S, \quad (2.7)$$

где  $m$  — масса образца до испытания, г:

$m_1$  — масса образца после испытания, г;

$S$  - площадь истирания образца, см<sup>2</sup>. За результат принимают среднеарифметическое значение результатов шести параллельных испытаний.

### **2.5.3. Определение разбухания по толщине и водопоглощения при выдержке в воде в течение 24 часов**

Образцы размером 50×50 мм взвешивали на весах с точностью до 0,01 г. В четырёх точках определяли толщину каждого образца. Образцы погружали в ванну с водой в вертикальном положении. Уровень воды в ванне должен быть на 20 мм выше образцов, температура воды 20±2 °С. Через 24 ч образцы извлекали из ванны, взвешивали и определяли их толщину. Перед взвешиванием образцы промокали фильтровальной бумагой. Водопоглощение ( $\Delta W_x$ , %) рассчитывали по формуле:

$$\Delta W_x = \frac{m_2 - m_1}{m_1}, \quad (2.8)$$

где  $m_1$  – масса образца до погружения в воду, г;

$m_2$  – масса образца после выдержки в воде, г.

Разбухание по толщине ( $\Delta S_x$ , %) рассчитывали по формуле:

$$\Delta S_x = \frac{h_2 - h_1}{h_1}, \quad (2.9)$$

где  $h_1$  – толщина образца до погружения в воду, мм;

$h_2$  – толщина образца после выдержки в воде, мм.

## 2.6. Оценка надежности аналитической методики и результатов измерения

В диссертационном исследовании проводили оценку надежности примененных аналитических методик и результатов измерения величины параметров [136].

Аналитическая методика считается надежной, если ее относительная максимальная погрешность не превышает некоторого установленного значения (обычно не более 5 %). При наличии нескольких методик для определения одного и того же параметра желательно выбрать ту, у которой погрешность наименьшая.

Погрешность методики оценивается по результатам параллельных определений одного опыта.

Далее на конкретном примере приводится расчет погрешности аналитической методики и ряда дополнительных характеристик, которые могут быть получены на основе результатов параллельных определений.

Исходные данные для оценки аналитической методики

X	X=const				
Y	8,1	8,3	8,1	8,0	8,2

1) Определение среднего значения выходного параметра

$$Y_{cp} = \frac{\sum Y_i}{m}, \quad (2.10)$$

где  $m$  – число параллельных определений.

$$Y_{cp} = \frac{8,1+8,3+8,1+8,0+8,2}{5} = 8,14$$

2) Определение выборочной дисперсии, которая характеризует меры отклонения (рассеивания) результатов параллельных определений от их среднего значения

$$S_u^2 = \frac{\sum (Y_i - Y_{cp})^2}{f_u}, \quad (2.11)$$

где  $f_u = m - 1$  – число степеней свободы выборочной дисперсии

$$f_u = 5 - 1 = 4$$

$$S_u^2 = \frac{(8,1 - 8,14)^2 + (8,3 - 8,14)^2 + (8,1 - 8,14)^2 + (8,0 - 8,14)^2 + (8,2 - 8,14)^2}{4} = 0,0130$$

3) Определение средней квадратичной погрешности отдельного или единичного результата

$$S_u = \sqrt{S_u^2}, \quad (2.12)$$

$$S_u = \sqrt{0,0130} = 0,114$$

4) Проверка результатов на аномальность (на наличие промахов)

Аномальный результат (иначе промах, грубая ошибка) – это резко отклоняющийся результат из серии параллельных определений, полученный в результате грубой ошибки со стороны исследователя.

а) с помощью критерия промаха  $K$  (грубый способ)

$$K = 3S_u, \quad (2.13)$$

$$Y_{cp} - K \leq Y \leq Y_{cp} + K, \quad (2.14)$$

$$K = 3 \cdot 0,114 = 0,342 \approx 0,34; \quad 8,14 - 0,34 \leq Y \leq 8,14 + 0,34; \quad 7,80 \leq Y \leq 8,48$$

Вывод: аномальных результатов не обнаружено\*, так как все результаты параллельных определений попадают в данный интервал.

Примечание: \* Если аномальные результаты будут обнаружены, их следует исключить и расчет начать сначала.

б) с помощью критерия аномальности  $H$  (самый точный способ)

$$H_{\min} = \frac{Y_{cp} - Y_{\min}}{S_u}, \quad (2.15)$$

$$H_{\max} = \frac{Y_{\max} - Y_{cp}}{S_u}, \quad (2.16)$$

Расчетные значения критерия аномальности для минимального и максимального результатов в серии параллельных определений сравнивают с табличным значением, которое определяют в зависимости от уровня значимости  $\alpha$  и числа параллельных определений  $m$

$$H_{табл} = f(\alpha; m), \quad (2.17)$$

где  $\alpha$  – уровень значимости, показывающий допустимую долю (или процент) ошибок; в расчетах чаще всего принимают значение  $\alpha = 0,05$  (или 5 %)

Если аномальных результатов в серии параллельных определений нет, то должны выполняться следующие неравенства:

$$\begin{cases} H_{\min} < H_{табл} \\ H_{\max} < H_{табл} \end{cases} \quad (2.18)$$

Если хотя бы одно неравенство не выполняется, то соответствующий результат  $Y_{\min}$  или/и  $Y_{\max}$  является промахом, его следует исключить и пересчитать все с самого начала.

$$H_{\min} = \frac{8,14 - 8,0}{0,114} = 1,23; \quad H_{\max} = \frac{8,3 - 8,14}{0,114} = 1,40$$

$$H_{табл} = f(0,05; 5) = 1,670 \text{ (приложение 1)}$$

Вывод: так, как оба расчетных значения критерия аномальности (для минимального и максимального результатов) не превышают табличного, то аномальных результатов среди параллельных определений нет.

5) Определение средней квадратичной погрешности среднего арифметического результата

$$S = \frac{S_u}{\sqrt{m}} \quad (2.19)$$

$$S = \frac{0,114}{\sqrt{5}} = 0,051$$

6) Определение табличного значения критерия Стьюдента, который представляет собой нормированную погрешность

$$t = f(\alpha; f_u) \quad (2.20)$$

$$t = f(0,05;4) = 2,776 \text{ (приложение 2)}$$

7) Определение абсолютной максимальной погрешности опыта

$$E_{\max}^{abc} = ts \quad (2.21)$$

$$E_{\max}^{abc} = 2,776 \cdot 0,051 = 0,14$$

8) Определение относительной максимальной погрешности опыта

$$E_{\max}^{отн} = \frac{E_{\max}^{abc}}{Y_{cp}} \cdot 100 \% \quad (2.22)$$

$$E_{\max}^{отн} = \frac{0,14}{8,14} \cdot 100 \% = 1,7 \%$$

Главный вывод: так как относительная максимальная погрешность опыта не превышает 5 %, то аналитическую методику можно считать надёжной, и она может быть использована для определения параметра  $Y$  в последующем эксперименте.

9) Установление доверительного интервала, т.е. интервала, в котором находится истинное значение параметра  $Y$  с вероятностью  $P = 1 - \alpha$

$$Y_{cp} - E_{\max}^{abc} \leq Y \leq Y_{cp} + E_{\max}^{abc} \quad (2.23)$$

$$P = 1 - 0,05 = 0,95 \text{ (95 \%)}; \quad 8,14 - 0,14 \leq Y \leq 8,14 + 0,14 \quad 8,00 \leq Y \leq 8,28$$

10) Установление стабильности параметра  $Y$  по коэффициенту вариации

$$\upsilon = \frac{S_u}{Y_{cp}} \cdot 100 \% \quad (2.24)$$

Если  $\upsilon \leq 5\%$ , то параметр  $Y$  стабилен, т.е. во времени не изменяется. Процесс, у которого все параметры стабильны, называется стационарным.

$$\upsilon = \frac{0,114}{8,14} \cdot 100 \% = 1,4 \%$$

Вывод: так как коэффициент вариации не превышает 5%, то параметр  $Y$  является стабильным, т.е. не изменяется во времени.

11) Установление необходимого числа параллельных определений, для получения результатов, с погрешностью не превышающей 5%:

$$E_{\max}^{отн} \leq 0,05 (5 \%), E_{\max}^{абс} \leq 0,05Y_{cp}; t \leq \frac{0,05Y_{cp}}{S}; t_{табл} = f(\alpha; f_u) \leq t; m = f_u + 1 \quad (2.25)$$

$$t \leq \frac{0,05 \cdot 8,14}{0,051}; \quad t \leq 7,980$$

Подбираем ближайшее к расчетному (в меньшую сторону) табличное значение критерия Стьюдента при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и устанавливаем какому числу степеней свободы  $f_u$  оно соответствует, а затем определяем число параллельных определений

$$t_{табл} = 4,303 = f(0,05; 2) \text{ (приложение 2)} \quad f_u = 2; \quad m = 2 + 1 = 3$$

Вывод: в каждом опыте требуется производить не менее трех параллельных определений.

### **ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

В экспериментальной части работы использованы материалы диссертационного исследования автора, основные результаты которого опубликованы с соавторами в трудах [138–147]. Исследование выполнялось на старейшем промышленном предприятии России - ОАО «Каравачево», целесообразность чего диктовалась возможностью изучения реальных объектов в производственных условиях, и на кафедре технологии бумаги и картона Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. При этом получаемые результаты отличались подобием для макулатуроперерабатывающих производств российской целлюлозно-бумажной отрасли и позволяли обобщить установленные закономерности.

#### **3.1. Исследование количества и качества отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б при переработке во вторичное волокно для флютинга и тест-лайнера**

##### **3.1.1. Исследование источников образования отходов в технологии флютинга и тест-лайнера**

Основным сырьем для производства конструктивных элементов макулатурного тарного картона (тест-лайнера и флютинга), как указывалось выше, является макулатура марки МС-5Б и МС-6Б. Учитывая сложный компонентный состав макулатуры по виду сырья и загрязнениям, переработка макулатуры в кондиционную волокнистую массу проводится по сложной технологической схеме с применением различного оборудования.

Современная технология переработки макулатуры в тарный картон включает следующие основные процессы, которые отражены автором с соавторами в труде [138]: роспуск макулатуры, грубую очистку массы, дороспуск массы и сортирование, фракционирование с дальнейшей отдельной обработкой фракций.

Длинноволокнистая масса подвергается тонкому сортированию, сгущению, размолу и поступает на аккумулярование; коротковолокнистая масса поступает на сгущение и далее на аккумулярование. При подготовке бумажной массы для производства тарного картона основное внимание уделяется качеству массы, обеспечивающей картону заданные характеристики жесткости и прочности. Общая компоновка современной технологической схемы производства тест-лайнера и флютинга, на примере тест-лайнера, представлена на Рисунке 3.1.

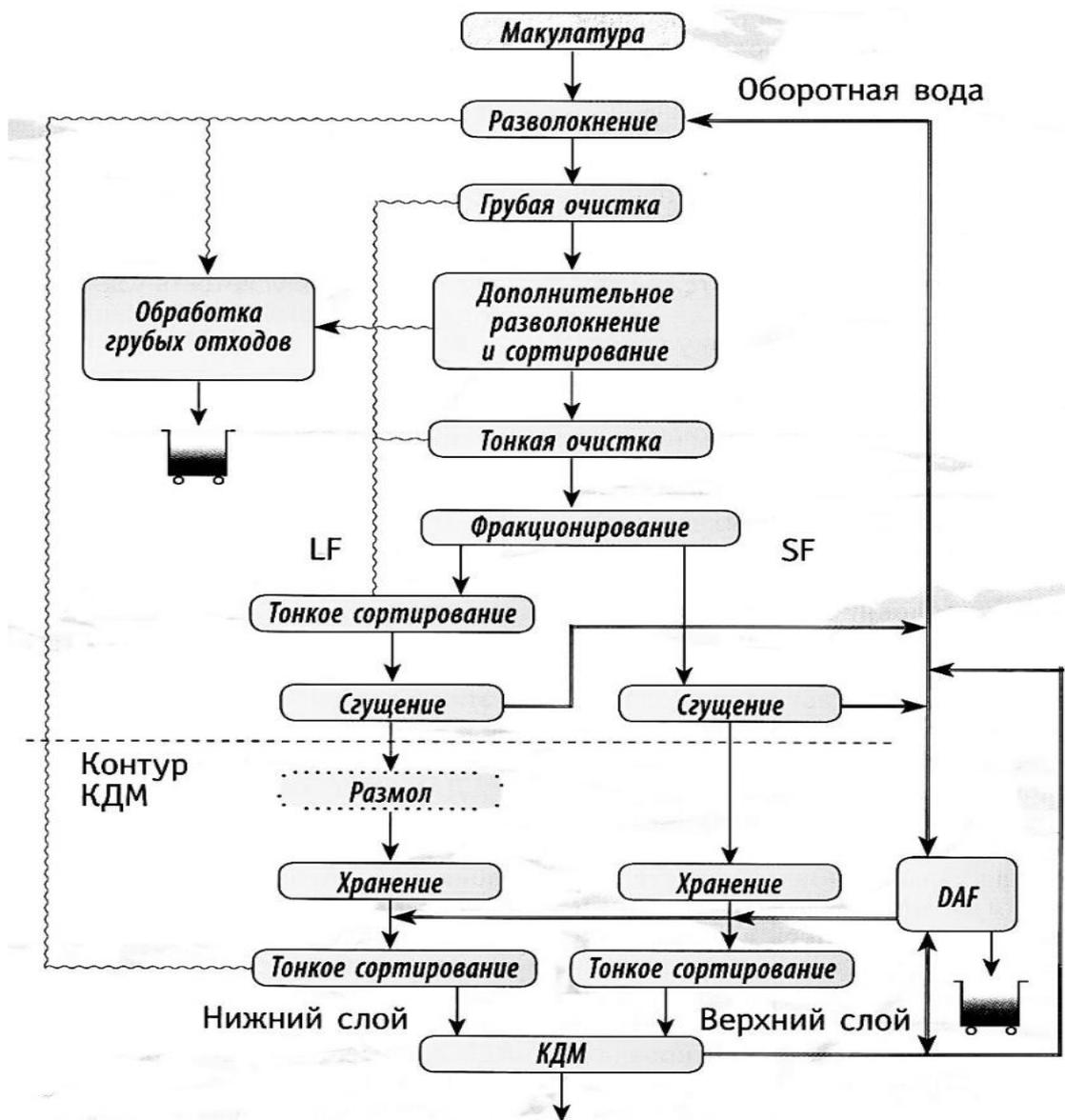


Рисунок 3.1 – Современная технологическая схема производства тест-лайнера

Технологическая схема производства флютинга и тест-лайнера на ОАО «Каравачево» соответствует приведенной на Рисунке 3.1, за исключением процесса фракционирования массы. После тонкой очистки масса без фракционирования направляется в композиционный бассейн, а из него – в машинный бассейн и далее подается на бумагоделательную машину (БДМ). Особенностью БДМ является возможность двухслойного формования бумажных материалов.

Как видно на схеме, основными процессами подготовки массы из макулатуры, в которых образуются отходы, являются разволокнение, грубая очистка, дополнительное разволокнение и сортирование, а также тонкая очистка. По существующей схеме отходы перечисленных процессов аккумулируются в сборнике отходов.

Таким образом, источниками образования отходов в технологии флютинга и тест-лайнера являются процессы роспуска макулатуры в гидроразбивателе (разволокнение), доволокнение в турбосепараторах, грубая очистка в очистителях высокой концентрации и тонкая очистка в напорных сортировках.

### **3.1.2. Исследование видов и количества отходов в макулатуре МС-5Б и МС-6Б**

Объектами исследования были отходы макулатуры, образующиеся в процессах получения из макулатуры кондиционного волокна для производства флютинга и тест-лайнера. В отличие от целевого продукта – целлюлозного волокна, отходы (загрязняющие включения) представлены неволокнистыми материалами. Они ухудшают качество макулатуры, повышают затраты на очистку макулатурной массы и утилизацию отходов.

В Таблице 3.1 приведены данные по содержанию отходов в макулатуре до переработки. Как видно, выделяется 6 групп отходов, к которым относятся схожие по происхождению и свойствам вещества с большим ассортиментом. Например, полимеры (полимерные пленки, ламинаты, лаки, покрытия) представлены полиэтиленом (PE), полипропиленом (PP), поливинилхлоридом (PVC), полиэтилентерефталатом (PET), полимерными УФ-лаками (акрилаты,

полиуретаны), полимерными термокляями, крахмалами и др. Аналогично, многими подобными веществами представлены и другие группы отходов. Подобие свойств групп отходов не требует разделения их на отдельные компоненты, а позволяет находить технические решения для рациональной групповой переработки.

Таблица 3.1 – Распределение неволокнистых включений (отходов) по группам на 1 т макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б

№ п/п	Компоненты макулатуры	Группы отходов	Содержание, кг/т
1	Отходы производства и потребления гофрированного картона, бумаги и картона применяемых в его производстве  Отходы производства и потребления картона всех видов (кроме электроизоляционного, кровельного и обувного) с черно-белой и цветной печатью	Полимеры	1,0-5,0
		Клеи	5,0-10,0
		Красители	5,0-15,0
		Дерево	До 1,0
		Металлы	1,0-5,0
2	Использованные книги, журналы, брошюры, проспекты, каталоги, блокноты, тетради, записные книжки, плакаты и другие виды продукции полиграфической промышленности и бумажно-беловых товаров с однокрасочной и цветной печатью, без переплетов, обложек и корешков, изданные на белой бумаге	Полимеры	5,0-12,0
		Клеи	3,0-7,0
		Красители	4,0-8,0
		Дерево	1,0-3,0
		Металлы	0,5-1,5
	Минералы	1,0-3,0	

Примечание: в строке 2 Таблицы 3.1 приведена характеристика макулатуры марки МС-7Б, которая всегда в значительной массовой доле поступает совместно с макулатурой марки МС-5Б.

В реальных промышленных условиях ОАО «Каравaeво» исследовались отходы, отделяемые от макулатурной массы в гидроразбивателе, турбосепараторе, грубой очистке (в очистителях массы высокой концентрации) и тонкой очистке (в центрифугах).

Исследование отчетных данных работы бумажной фабрики за период 2018-2024 гг., позволило определить количества сдаваемых отходов на полигон. Данные представлены в Таблице 3.2, где также приведены затраты на этот способ утилизации отходов.

Таблица 3.2 – Данные о количестве сдаваемых на полигон отходов в год и затраты на утилизацию

Годы	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Цена утилизации 1 т. отходов, руб. с НДС	1107	1259	1531	1687	2027	2234	2460
Объем отходов, т.	3521	3477	3503	3612	3596	3538	3483
Расходы на утилизацию, млн. руб	3,9	4,38	5,36	6,10	7,29	7,90	8,57

Усредненные результаты по исследованию дали цифру – 3533 т. отходов в год, что составляет около 10 т. отходов в сутки при влажности 60-65%, которые сдаются на полигон. В пересчете на сухие отходы это составляет около 3,5 т. в сутки. Представленные результаты исследования свидетельствуют о том, что цена утилизации отходов из года в год увеличивается и в 2024 году она составила 2460 рублей за 1 тонну, а годовой расход денежных средств исчисляется суммой 8,57 млн. рублей.

Учитывая производительность бумажной фабрики 60 т. бумаги и картона в сутки, количество а.с. отходов составляет около 58 кг/т. продукции. Это реальный выход отходов после всей технологической цепи очистки на данном производстве. Он хорошо коррелируется с данными Таблицы 3.1 и подтверждает объективность оценки содержания отходов в макулатуре.

Внешний вид отходов (как сумма компонентов) показан на фотографиях с разных ракурсов и при разном увеличении (Рисунок 3.2). Как видно на фотографиях, отходы - это хорошо отмытые водой смеси с преобладающим содержанием полимерной пленки, целлюлозного скопа, значительной доли минеральных частиц и мелких металлических включений. Визуально они представляют собой смесь веществ различной природы.

Потеря существенной части вторичного волокна за счет отходов, постоянное удорожание услуг полигонов и риски закрытия полигонов актуализируют решение проблемы переработки отходов у источников их образования.



1



2



3



4

Рисунок 3.2 – Фотографии отходов с различного ракурса и увеличения

Потери финансовых средств, за счет увеличения расхода макулатуры на 1 т продукции, по причине наличия отходов это неизбежные издержки существующей технологии. Оплата вывоза и захоронения отходов на полигоне - это неоправданные потери, обусловленные отсутствием технологии переработки отходов [138].

### 3.1.3. Исследование компонентного состава отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б

Для оценки возможной технически осуществимой и экономически целесообразной технологии переработки отходов, наряду с количеством, важна характеристика видового состава и удельного массового распределения компонентов в отходах. Эта задача решалась разделением (сортированием) сложной смеси отходов на 3 фракции по видам компонентов:

1. полимерные (полимерные пленки, скотч, изолента, резина);
2. волокнистые (не распускаемые на волокна бумажно-картонные материалы, мелкое волокно);
3. другие компоненты:
  - а) минеральные (гравий, цемент, гипс, песок, мел, земля);
  - б) металлические (замки для папок, проволока, металлическая лента, скрепки, гвозди, шурупы).
  - в) деревянные (щепки, костра, опилки, ветки);

Композиция макулатурных отходов достаточно гетерогенная система, поэтому для исследования компонентного состава отбирались пробы суммарной массой 500 кг. в течении 100 дней по 5 кг. в сутки предварительно обезвоженные свободным отеканием воды до 60-65% влажности в летние месяцы года. В дальнейшем образцы отходов высушивали до постоянной массы при температуре 105 °С и вручную на сортировочном столе фракционировали по видам компонентов. Сортирование проводили визуально. Массовое содержание отходов определяли весовым методом. После анализа проб и статической обработки результатов по 10 параллельным опытам, были получены данные компонентного состава макулатурных отходов, которые представлены в Таблице 3.3.

Результаты исследования, представленные в Таблице 3.3, свидетельствуют о том, что композиция макулатурных отходов достаточно гетерогенная, при этом достоверность полученных данных соответствует критерию Стьюдента 0.95.

Таблица 3.3 – Распределение композиции макулатурных отходов по видам компонентов

№ пробы	Масса сухой пробы макулатурных отходов, гр.	Синтетические полимеры, гр.	Волокно макулатурное, гр.	Другие компоненты (минеральные вещества, металлические включения, древесина и др.), гр.
1	1876	1332	413	131
2	1962	1373	458	138
3	1874	1274	474	126
4	1946	1362	448	138
5	1781	1247	409	125
6	1845	1340	403	102
7	1963	1362	461	140
8	1932	1331	463	138
9	1820	1251	431	138
10	1844	1304	401	139
Среднее:	1884	1318	436	131

Средняя масса сухой пробы составила 1884 гр., что соответствует средней влажности 62% в отобранных образцах макулатурных отходов массой по 5 кг. Полученные данные подтвердили соответствие пределов влажности 60-65 %. Основную часть компонентов составляют синтетические полимеры – среднее значение 1318 гр. и волокнистые полуфабрикаты в виде макулатурного волокна - среднее значение 436 гр. Содержание других компонентов в макулатурных отходах незначительное и в среднем составляет 131 гр.

На основании полученных массовых долей компонентов макулатурных отходов была построена диаграмма процентного содержания синтетических полимеров, макулатурных волокон и других компонентов (минеральные вещества, металлические включения, древесина).

Результаты процентного распределения отходов по видам компонентов представлены на диаграмме Рисунок 3.3. Основную массу отходов составляют синтетические полимеры (СП) – 70%, волокна макулатуры (ВМ) – 23 %, остальные ~7 % - это другие компоненты (минеральные, деревянные, металлические и другие включения).



Рисунок 3.3 – Распределение массы отходов по видам компонентов

Синтетические полимеры при высокой температуре выполняют функцию эффективного связующего. Таким образом, высокое содержание синтетических полимеров, также наличие наполняющих компонентов предопределяет технологический принцип возможной переработки макулатурных отходов в термопрессовочные изделия – полимерпесчаные плиты.

#### **3.1.4. Исследование наличия опасных веществ и химического элементного состава отходов макулатуры**

Возможность применения отходов макулатуры в потребительских изделиях определяется не только техническими возможностями оборудования и технологичностью процессов переработки сырья, но и экологической безопасностью сырья, в данном случае – отходов макулатуры. Исходя из перспективы использования отходов в изделиях бытового назначения, было

исследовано наличие опасных веществ – тяжелых металлов (Pb, Bi, Cd) и фторидов. Данные эксперимента представлены в Таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Данные исследования наличия тяжелых металлов и фторидов в пробе макулатуры

№ п/п	Последовательность воздействия	Длительность воздействия	Результат
1	Подготовка пробы макулатуры	–	Две параллельные пробы (образцы)
2	Вымачивание в дистиллированной воде	24 часа	Набухание волокна
3	Проба с HCl и HI на свинец (Pb <sup>2+</sup> )	Текущее время	Отрицательный
4	Проба с NaOH и H <sub>2</sub> S на кадмий (Cd <sup>2+</sup> )	Текущее время	Отрицательный
5	Проба с NaOH на висмут ([BiCl <sub>6</sub> ] <sup>3-</sup> )	Текущее время	Отрицательный
6	Проба с AgNO <sub>3</sub> на галоген-ион	Текущее время	Отрицательный
7	Проба с индикатором катионов металлов «Эриохром Черный Т»: Na, Mg, Mn, Pb, Zn, Bi, Cd, In, Zr, Ca	Текущее время	Тяжелые металлы (Pb, Bi, Cd) не обнаружены

Результаты исследования, представленные в Таблице 3.4 свидетельствуют о том, что в выдержанных в дистиллированной воде пробах отходов макулатуры тяжелые металлы и фториды не обнаружены. Реакция на хлорид-ион оказалась положительной. Хлориды не относятся к опасным веществам, поэтому их содержание допустимо. Таким образом, исследование показало экологическую безопасность отходов макулатуры с точки зрения отсутствия тяжелых металлов.

Присутствующие в отходах неволокнистые компоненты, составляющие примерно 77 % от общей массы, также очень неоднородны. С целью установления химического элементного состава этой доли отходов был проведен анализ проб методом электронной сканирующей микроскопии. Применялись методика и техника, описанные в труде автора с соавторами [138-139, 141-142]. В соответствии с методикой проведено визуальное и элементное исследование неволокнистых включений в образцах отходов подготовки макулатуры. Исследования химического элементного состава и микроструктуры образцов осуществлялись

методом сканирующей электронной микроскопии в центре коллективного пользования НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей». На Рисунке 3.4 представлены микрофотографии проб; выделены области, для которых определены спектры химического элементного состава.

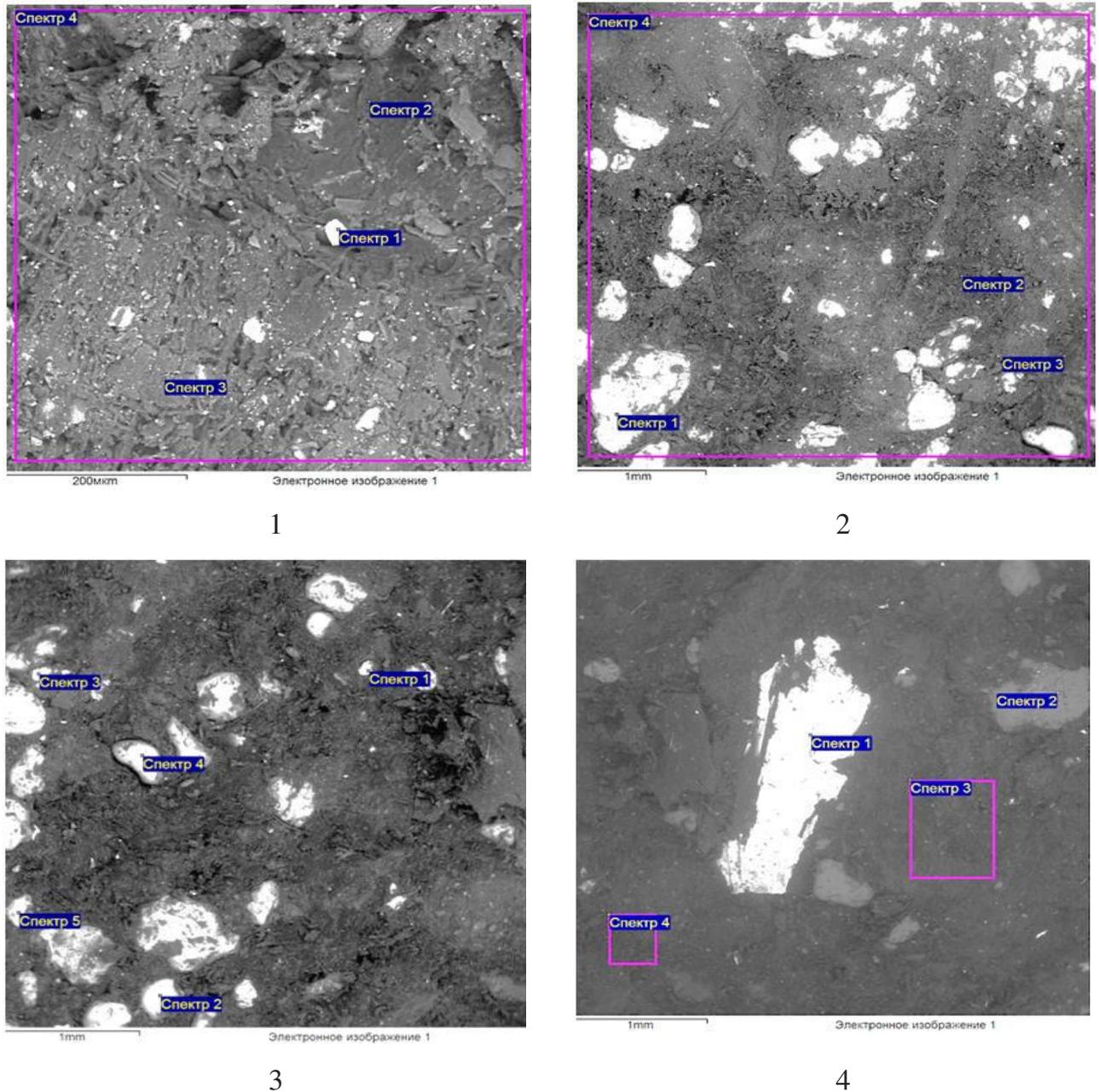


Рисунок 3.4 – Микрофотографии образцов неволокнистых включений отходов: выделены области, для которых сняты спектры элементного состава

Визуализация микроструктуры подготовленных образцов производилась с помощью электронного сканирующего микроскопа TESCAN MIRA3 LMH

(производитель – TESCAN). 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 2–200 нА; разрешение 1,0 нм (при 30 кВ); увеличение до 1 000 000×; детекторы вторичных электронов (SE, In-Beam SE); детектор отраженных электронов (BSE). Анализ выполнен по площади и по точкам.

В Таблице 3.5 представлены результаты исследования химического элементного состава соответственно для фотографий 1, 2, 3 и 4 Рисунка 3.4.

Таблица 3.5 – Данные исследования химического элементного состава

Спектр	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Fe
Рисунок 3.4 – 1. Массовая доля, %														
Спектр 1	70.04	26.03			0.17	0.95		0.3	0.15	0.42	0.12			1.82
Спектр 2	70.28	20.89			0.27	2.52		1.19	0.2	1.73	0.25			2.67
Спектр 3	69.3	24.59	0.18	0.1	0.33	1.28	0.11	0.94	0.13	1.68	0.06			1.28
Спектр 4	71.08	21.49	0.19	0.07	0.32	1.58	0.09	1.13	0.15	1.45	0.11			2.33

Спектр	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	
Рисунок 3.4 – 2. Массовая доля, %													
Спектр 1	38.67	36.67	0,09		0.3	23.01	0.05	0.26	0.13	0.23		0.59	
Спектр 2	65.48	31.59	0.13		0.13	0.57	0.14	0.43	0.05	0.66		0.81	
Спектр 3	81.26	14.17	0.23		0.08	1.04		0.89	0.16	0.77		1.41	
Спектр 4	65.91	24.24	0.17	0.07	0.33	4.93	0.08	0.86	0.25	1.03	0.09	2.05	

Спектр	C	O	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Mn	Fe	
Рисунок 3.4 – 3. Массовая доля, %												
Спектр 1	58.28	4.03		0.46	35.55	0.49	0.19		0.31	0.24	0.43	
Спектр 2	35.58	40.94				23.12	0.14				0.22	
Спектр 3	36.12	19.22	0.11		0.28	1.87	3.31	0.26	0.28		38.55	
Спектр 4	40.08	37.38	0.09	0.06	0.43	20.84	0.25	0.09	0.25		0.54	
Спектр 5	47.17	31.47				20.16	0.31		0.25		0.64	

Спектр	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe
Рисунок 3.4 – 4. Массовая доля, %													
Спектр 1	27.69	5.48				0.55		0.26				0.34	65.68
Спектр 2	42.05	35.19			0.34	20.96		0.32	0.09	0.24			0.79
Спектр 3	70.27	24.24	0.24		0.23	0.91		0.74	0.16	1.45	0.13		1.61
Спектр 4	73.69	21.26	0.15	0.04	0.22	0.68	0.09	0.98	0.11	1.23	0.08		1.46

Таким образом, проведенные исследования подтвердили, что неволокнистые включения в основном имеют органическую природу происхождения (синтетические полимеры), следовательно, может быть обеспечено ожидаемое качество изделий в термопрессовочной технологии. Неорганическая доля

неволокнистых включений имеет широкий спектр химических элементов, но их доля значительно меньше по сравнению с углеродом. Исследования методом электронной сканирующей микроскопии также подтвердили отсутствие в отходах макулатуры тяжелых металлов.

Результаты исследования, представленные в Таблице 3.5, свидетельствуют об отсутствии повторяющихся массовых долей химических элементов в образцах макулатурных отходов. Это аргументированно подтверждает, что массовая доля минеральных частиц в отходах макулатуры, меняется от партии к партии, но в среднем за период исследования минеральный состав частиц близок к постоянному набору присутствующих химических элементов.

### **3.1.5. Общие выводы по разделу 3.1**

Исследование проблемы образования, накопления и переработки отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б позволило сделать выводы:

1. Получены расширенные научные данные о качественном и количественном составе отходов переработки макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б в технологии флютинга и тес-лайнера. Установлено, что выход отходов составляет в среднем 58 кг/т готовой продукции.

2. Доказано, что основными компонентами отходов макулатуры являются, в среднем, %: синтетические полимеры - 70, волокно макулатурное – 23; другие компоненты – 7, в сумме - 100%.

3. Определено, что групповое содержание компонентов (полимеры, волокна, минеральные вещества) формирует связующе-наполняющую композицию, пригодную для переработки по термопрессовочной технологии.

4. Подтверждено, что неволокнистые компоненты отходов обладают относительно стабильным химическим элементным составом, что является предпосылкой для обеспечения стабильного качества изделий.

5. Показано и подтверждено, что основная часть неволокнистых компонентов отходов имеет органическую природу происхождения и может обеспечивать ожидаемое качество изделий в термопрессовочной технологии.

6. Экспериментально подтверждена экологическая безопасность отходов: тяжелые металлы (Pb, Bi, Cd) и фториды не обнаружены.

### **3.2. Обоснование концепции технологии и опытно-промышленной линии для переработки отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты**

#### **3.2.1. Концепция переработки отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б в полимерпесчаные плиты**

Исследование проблемы образования, накопления и утилизации отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б, изложенное в разделе 3.1, позволило установить:

а) удельный выход отходов из макулатуры, в среднем 58 кг/1 т тест-лайнера и/или флютинга.

б) основные виды и массу основных компонентов в отходах – это синтетические полимеры (СП) - 70, волокно макулатурное (ВМ) – 23; другие компоненты (ДК) – 7, в сумме - 100%.

в) групповое содержание компонентов составляет связующе-наполняющую композицию, пригодную для переработки по термопрессовочной технологии.

Учитывая удельную массу и виды отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б, была предложена концепция технологической установки для максимального извлечения всех отходов (очистки макулатурной массы) и переработки их в полимерпесчаные плиты. Следуя концепции, современная технологическая установка для очистки макулатурной массы должна быть основана на принципах многоступенчатой очистки, автоматизации и ресурсосбережения. Макулатура марок МС-5Б и МС-6Б поступает на линию, где происходит удаление крупных посторонних предметов (камни, металл, текстиль) с помощью механических

сепараторов и оптических сортировщиков. Отсортированная макулатура загружается в гидроразбиватель, где под действием воды и механического воздействия происходит роспуск на волокна. Для удаления мелких примесей (песок, глина, клей, краски) применяются многоступенчатые системы очистки: центробежные сепараторы для удаления тяжелых примесей; микрофлотация для удаления мелкодисперсных загрязнений; сортировка по плотности с использованием гидроциклонов. Очищенная масса проходит через вибросита и фильтры тонкой очистки. Отходы, образующиеся в процессе очистки макулатурной массы, могут быть переработаны в полимерпесчаные плиты. Технология включает следующие этапы:

**Сбор и подготовка отходов:**

- обезвоживание сырья до 25% влажности
- измельчение сырья в пределах 10-12 мм
- смешение компонентов с получением органо-миеральной композиции

**Формование и прессование:**

- термообработка композиции с получением однородной массы
- прессование массы в изделия
- охлаждение, упаковка и складирование изделий

**3.2.2. Ожидаемые экологические и экономические результаты**

а) Экологические результаты:

- Снижение объема отходов, направляемых на полигоны, на 90–95 %.
- Уменьшение выбросов CO<sub>2</sub> за счет переработки отходов и производства вторичных материалов.
- Снижение потребления первичных ресурсов за счет использования вторичного сырья.
- Минимизация использования химических реагентов благодаря многоступенчатой очистке.

б) Экономические результаты:

- Снижение затрат на утилизацию отходов за счет их переработки в полезные продукты.

- Получение дополнительного дохода от продажи полимерпесчаных плит.

- Снижение себестоимости производства за счет использования вторичного сырья.

- Повышение конкурентоспособности продукции за счет экологической сертификации и соответствия требованиям устойчивого развития предприятия.

Предложенная научная концепция технологической установки по переработке макулатурных отходов и технологии очистки макулатурной массы позволяет эффективно перерабатывать макулатуру марок МС-5 и МС-6Б, минимизировать отходы и создавать новые продукты с высокой добавленной стоимостью. Это способствует достижению целей циркулярной экономики и устойчивого развития предприятия.

### **3.3. Обоснование и исследование технологических процессов переработки отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты и выбор оборудования производственной линии**

#### **3.3.1. Обоснование выбора способа переработки отходов на основе связующих и наполняющих свойств компонентов**

Учитывая постоянную потребность повышения рентабельности переработки макулатуры, представлялось важным изыскать возможность полезного использования накапливаемых отходов на предприятии. Исходя из свойства термопластичных полимеров во вязкотекучем состоянии, проявлять связующие свойства, было выполнено поисковое исследование. Оно заключалось в получении термопрессовочной композиции (смесь измельченных групп отходов), из которой прессованием получали плитные изделия. Результат стал объективной технической и экономической предпосылкой перспективности исследования данного направления. Суть заключалась в переработке отходов макулатуры в

высоконаполненные композитные материалы с полимерной матричной системой и минеральным наполнителем. Исследование позволило определиться с основными процессами и оборудованием термопрессовочной технологии, в которой группе полимерных отходов отводится роль высокоэффективного связующего.

Отметим, что полимерминеральные материалы являются многотоннажным продуктом, различающимся применяемыми полимерами в качестве связующего вещества и минеральными веществами – наполнителями, а также разнообразием форм и целевым назначением. Они производятся многими предприятиями. Однако отходы макулатуры, как смесь синтетических полимеров, волокна и других компонентов, обладающие связующими и наполняющими свойствами, практически не используются.

Основываясь на положительном результате поискового исследования, был проведен основной этап – обоснование и исследование технологических процессов переработки отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты и выбор оборудования производственной линии.

Таким образом, термопрессовочная технология рассматривается как перспективное направление переработки отходов макулатуры в плитные изделия, сопровождаемое снижением экологической опасности накопления захороняемых отходов и повышением рентабельности производства тест-лайнера и флютинга.

### **3.3.2. Последовательность и характеристика технологических процессов переработки отходов в полимерпесчаные плиты**

Поскольку отходы макулатуры являются сырьем для производства новых изделий, далее будем называть их «сырье». Исследования по данной теме опубликованы в трудах автора с соавторами [139-143]. Исходя из физико-химических свойств и компонентного состава сырья, органоминерального состава и влажности сырья, общий технологический процесс переработки в полимерпесчаные плиты представляется следующей последовательностью технологических процессов:

- а) обезвоживание сырья до 25 % влажности;
- б) измельчение сырья до размеров в пределах 10–12 мм;
- в) составление композиции и смешение компонентов с получением органоминеральной композиции;
- г) термообработка композиции с получением однородной прессовочной массы;
- д) прессование массы в изделия;
- е) упаковка и складирование изделий.

Процесс обезвоживания сырья является первым в технологии и предназначен для снижения его влажности до 25 %, после пресса, что позволяет качественно измельчать сырье и получать композицию прессовочной массы влажностью 25%. После гидроразбивателя (ГР), очистки и сортирования, выгруженные макулатурные отходы выдерживаются для свободного отекания воды. Этот процесс выбран в качестве первой стадии обезвоживания сырья. Как установлено, в этом процессе достигается влажность ~ 60-65% (влагосодержание ~1,67 кг H<sub>2</sub>O/кг. а.с. сырья). Во второй стадии сырье обезвоживается механическим отжимом до конечной влажности 25 % (влагосодержание ~0,33 кг H<sub>2</sub>O/кг. а.с. сырья). Всего удаляется ~1,34 кг. воды на 1 кг. сырья. Поскольку сырье состоит из разнородных минеральных и органических компонентов, для механического обезвоживания был выбран винтовой обезвоживающий пресс. Его особенность в том, что в нем обеспечивается максимальная степень отбора воды от композиции, высокая производительность и надежность. Мокрое сырье загружается в загрузочную воронку и продвигается шнеком к выгрузочному отверстию. По мере продвижения сырья к выходу из пресса увеличивается степень его уплотнения, вода интенсивно удаляется как за счет механического отжима, так и за счет разогрева смеси.

Следующим после обезвоживания следует технологический процесс измельчения сырья. Для измельчения выбрана дробильная машина («дробилка») роторного типа, многоножевая (6 ножей), снабженная подроторной сеткой с ячейками для отбора фракции измельченного сырья 10-12 мм. При исследовании

измельчения сырья в дробилке установлено, что легче и полнее измельчается более сухое сырье. Поэтому для измельчения сырья выбрана влажность 25%, максимально достижимая механическим отжимом в прессе. Важно, что влажность позволяет измельчать сырье до требуемых размеров частиц 10-12 мм.

Визуальное исследование включений при фракционировании отходов макулатуры послужило основанием для экспериментов по измельчению общей смеси, не прибегая к предварительному разделению на отдельные фракции. В результате эксперимента на роторной дробилке был измельчен образец отходов, представленный на Рисунке 3.5 (а), с получением фракции размером 10–12 мм (б).



(а)



(б)

Рисунок 3.5 – Сырье: (а) – исходное, и (б) – измельченное

Составление композиции и смешение компонентов для прессовочной массы явилось следующим технологическим процессом. Смешение производится в смесителе. К достоинствам смесителя следует отнести интенсивность перемешивания разнородных компонентов смеси. В результате образуется однородная сырьевая смесь, пригодная для дальнейшей термической переработки в прессовочную массу. Технологический процесс термической переработки смеси в прессовочную массу следует за составлением композиции и смешением компонентов. Для термической переработки выбран аппарат плавно-нагревательный (АПН). Аппарат имеет загрузочную горловину и по направлению перемещения композиции двумя шнеками с лопатками разделен на 4 температурные зоны – 170, 180, 210 и 220 °С. Шнеки с лопатками интенсивно

перемешивают композицию. Температурные зоны выбраны исходя из физико-химических свойств компонентов сырья. Основной компонент – различные синтетические полимеры - 70% с интервалом температуры плавления 120–160 °С. Второй по содержанию компонент – волокно макулатуры (23 %), которое подсушивается до влажности 10-15 % и при температуре 120–220 °С последовательно приобретает высокоэластичное состояние. Заключительным технологическим процессом стало получение плитных изделий из прессовочной массы. Для прессования изделий выбран гидравлический вертикальный пресс с максимальным давлением 160 т. Прессование прессовочной массы осуществляется при температуре 205 °С.

### 3.3.3. Характеристика опытно-промышленной линии

Для осуществления последовательности процессов была составлена технологическая схема и подобрано оборудование [139, 143]. Блок-схема опытно-промышленной установки переработки сырья в полимерпесчаные плиты представлена на Рисунке 3.6.



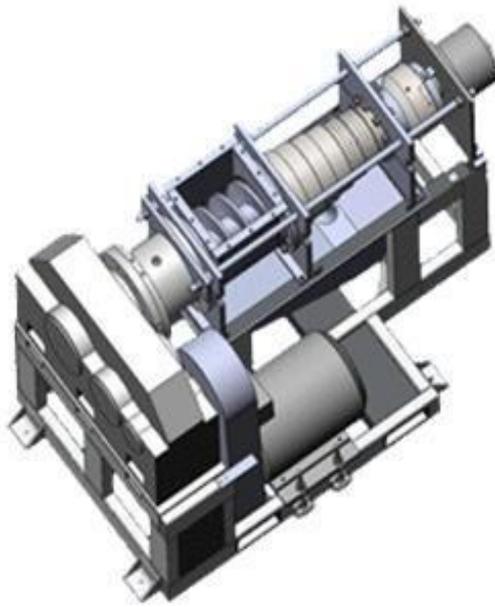
Рисунок 3.6 – Блок-схема опытно-промышленной установки переработки отходов

Общий вид линии представлен на Рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Общий вид производственной линии термопрессовочных изделий

Основные единицы оборудования линии показаны на Рисунке 3.8. Спецификация оборудования опытно-промышленной линии и его характеристики представлены в Приложении А.



(а) – Пресс отжимной



(б) – Дробилка для полимеров



(в) – Смеситель компонентов



(г) – Вертикальный пресс



(д) – Аппарат плавильно-нагревательный (АПН)

Рисунок 3.8 – Основное оборудование производственной линии

Были проведены работы по компоновке и монтажу оборудования опытно-промышленной линии в бумажном цехе ОАО «Караваяево». Выполнена пуско-наладка всех единиц оборудования и в целом всей линии.

### **3.3.4. Испытание опытно-промышленной установки**

Прежде чем приступить к обширному эксперименту, была испытана работоспособность опытно-промышленной установки. Исходя из установленного массового содержания компонентов в отходах макулатуры: СП –70 %, ВМ –23 %, ДК –7 %, было признано важным испытание установки по двум вариантам:

- 1-й вариант: переработка 100 % сырья без использования добавок песка;
- 2-й вариант: переработка сырья с добавлением песка.

В первом варианте технологической особенностью прессовочной массы являлось исходное соотношение композиции (СП + ВМ + ДК). Производились полимерные изделия в виде плиток размером 330×330×35 мм, с учетом объемных пустот. Для исследования потребительских свойств из полученных плит вырезались образцы без учета объемных пустот толщиной 20 мм. По результатам 1-го варианта исследования установлены положительные и отрицательные факторы технологии:

а) положительные факторы технологии:

- визуально – получены сформованные полимерные изделия;
- простота технологии и эксплуатации оборудования;
- надежность работы оборудования;
- низкая себестоимость изделий.

б) отрицательные факторы технологии:

- низкие физико-механические свойства
- наличие трещин в полимерных изделиях.

Во втором варианте исследования технологической особенностью прессовочной массы стали добавки песка к исходному сырью, изменяя соотношение и структуру компонентного состава изделий. Так, была испытана

установка при исходном составе прессовочной массы - 50% песок и 50% сырье (СП + ВМ + ДК).

По результатам 2-го варианта исследования установлены:

а) положительные факторы технологии:

- получена плитка с более высокими физико-механическими свойствами по сравнению с плиткой из 100 % сырья;

б) отрицательные факторы технологии:

- снижение производительности, за счет удлинения времени прессования и увеличения времени охлаждения изделий;

Увеличение времени прессования объясняется формированием полимерно-песчаной структуры за счет активного взаимодействия связующего полимера (матрицы) и песка (наполняющей компоненты). Создаваемая структура отличается большей жесткостью и прочностью по сравнению с плиткой из 100 % сырья. Образцы изготовленных полимерпесчаных плит представлены на Рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Образцы полимерпесчаных плит

Результатом испытаний установки является:

- подтверждение работоспособности отдельных единиц оборудования и установки в целом;

- подтверждение последовательности и управляемости процессов технологии;

- установление факта возможности получения качественных плит из сырья и композиции сырья с песком по предложенной технологии на созданной опытно-промышленной линии;

- акт испытания и введения в эксплуатацию установки – Приложение Б.

### **3.3.5. Общие выводы по разделу 3.3**

1. Разработана технологическая схема переработки сырья (отходов макулатуры), состоящая из процессов: обезвоживания сырья до 25 % влажности, измельчения сырья до размеров 10–12 мм, составления композиции и смешения компонентов для прессовочной массы, термообработки композиции с получением однородной прессовочной массы, прессования массы в изделия.

2. Проведен комплекс работ по компоновке и монтажу оборудования производственной линии в цехе ОАО «Каравачево».

3. Испытана работа оборудования и опытно-промышленной линии при производстве плитки из 100% сырья и из смеси 50% песка и 50% сырья.

4. Подтверждена техническая работоспособность отдельных единиц оборудования и опытно-промышленной линии.

5. Подтверждена возможность получения качественных плит на созданной опытно-промышленной линии.

### **3.4. Исследование технологии полимерпесчаных плит**

В разделе 3.3, и в трудах автора с соавторами [139, 142], описана общая технология полимерпесчаных плит из сырья (отходы макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б) и песка. Задачей данного исследования было углубленное изучение факторов и процессов технологии.

### 3.4.1. Требования к полимерпесчаным плитам

Полимерпесчаные плиты относятся к композиционным материалам, которым присущи положительные необходимые потребительские свойства. Согласно ГОСТ Б.В.2.7-129:2007 и ТУ 23.99.19-001-05015609-2025 (Приложение В): плотность кг/м<sup>3</sup>, истираемость г/см<sup>2</sup>, водопоглощение %, предел прочности при статическом изгибе МПа, предел прочности при динамическом изгибе (ударная вязкость) кДж/м<sup>2</sup>. Имея многие положительные качества, полимерпесчаные плиты имеют недостатки:

а) плитки могут расширяться при воздействии высоких температур и неправильной укладке: важно выдерживать правильный зазор между элементами (не менее 5 мм) и монтировать только на клей, песок, щебень или цемент;

б) высокое содержание полимера, обуславливает возможность деформирования и обугливания при воздействии высоких температур.

Указанные недостатки не существенно влияют на востребованность плит. С учетом свойств, плиты широко применяются в городских и дачных ландшафтах.

Для достижения поставленной цели были определены количественные параметры потребительских свойств при заданных геометрических размерах образцов полимерпесчаных плит, которые представлены в Таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Потребительские свойства полимерпесчаных плит ТУ 23.99.19-001-05015609-2025

Свойства	Значение
Плотность	1600 - 2200 кг/м <sup>3</sup>
Истираемость	Не более 0,1 г/см <sup>2</sup>
Водопоглощение	Не более 2,0 %
Предел прочности при статическом изгибе	Не менее 7,5 МПа
Предел прочности при динамическом изгибе (ударная вязкость)	Не менее 3,3 кДж/м <sup>2</sup>
Толщина плитки	20 мм
Габаритные размеры плитки, с учетом объемных пустот	330 x 330 x 35 мм

Полимерпесчаные плиты, обладающие вышеуказанными потребительскими свойствами, имеют широкое применение в городском и дачном ландшафтном строительстве. Исходя из уровня показателей ожидалось, что основанная на использовании в качестве связующего смеси полимерных отходов из макулатуры, технология позволит получать востребованные плиты высокого качества. Показатели качества, представленные в Таблице 3.6, приняты как целевые для полимерпесчаных плит по разработанной технологии.

### 3.4.2. Факторы технологии полимерпесчаных плит

Для управления процессами технологии выбран ряд факторов и главными являются: свойства сырья (отходы), свойства песка, состав смеси –песок/сырье; температура зон АПН, температура, давление и время прессования. В исследовании изучалось влияние факторов технологии на свойства плит: «Плотность» ( $\rho$ ), «Прочность при статическом изгибе» ( $F$ ), «Ударная вязкость» (прочность при динамическом изгибе) ( $Q$ ), «Водопоглощение» ( $G$ ) и истираемость ( $E$ ).

Характеристика компонентов: песок карьерный просеянный – влажность 2–5 %, фракция не более 2 мм; измельченное сырье – фракция 10-12 мм, влажность 25%;

Температура, °С: 175-235, с шагом 15 °С: 190; 205; 220; 235, °С; это ключевой параметр, определяющий подсушку сырья, расплав и текучесть полимерной составляющей; исходя из технической характеристики АПН: 175 - 235 °С:

Давление прессования, кН (т): 1300-1500, с шагом 100 кН: 1300 (132); 1400 (142); 1500

Расчет удельного давления прессования

Для корректного сравнения давлений, переведем усилие пресса (кН) в удельное давление (МПа), так как именно оно является основным технологическим параметром, определяющим плотность и прочность материала. Размер плиты прессования 710x800 мм.

а) рассчитаем площадь плиты: площадь (S) = длина × ширина = 0,71 м × 0,8 м = 0,568 м<sup>2</sup>

б) рассчитаем удельное давление (Руд.) для каждого варианта усилия: Формула: Руд. (МПа) = Усилие (кН)/Площадь (м<sup>2</sup>) /1000 × 1000 (Поскольку 1 МПа = 1 Н/мм<sup>2</sup> = 10<sup>6</sup> Па, а 1 кН = 1000 Н):

- для 1300 кН: Руд. = 1300 /0,568 /1000 ×1000 ≈ 22,9 МПа

- для 1400 кН: Руд. = 1400 / 0,568 /1000 ×1000 ≈ 24,6 МПа

- для 1500 кН: Руд. = 1500 / 0,568 /1000 ×1000 ≈ 26,4 МПа

Время прессования: было установлено 2 мин.

### 3.4.3. Анализ влияния параметров режимов и прогноз качества плит

Удельное давление (22,9 - 26,4 МПа): данный диапазон является высоким и достаточным для эффективного уплотнения композиции. Повышение давления напрямую влияет на плотность и, как следствие, на прочность и водопоглощение.

22,9 МПа может быть недостаточным для эффективного уплотнения смеси и удаления воздуха, особенно при низких температурах; риск получить завышенное водопоглощение и набухание;

24,6 МПа – это достаточное давление для качественного уплотнения и достижения высокой плотности;

26,4 МПа является несколько избыточным давлением и повышает нагрузку на оборудование.

Диапазон температур 175-235<sup>0</sup>С: 175-190 °С: нижний диапазон для большинства термопластов; возможен неполный расплав, плохое смачивание песка полимером, что приведет к низкой прочности и высокому водопоглощению; 205-220 °С: оптимальный диапазон для полиолефинов; обеспечивает хорошую текучесть, смачивание поверхности песка и формирование однородной структуры; 235 °С: верхний предел; возможна начальная стадия деструкции (разложения) полимера, что может привести к выделению газов, пористости и снижению механических свойств.

Время выдержки (2 мин): 2 минуты – стандартное время, достаточное для прогрева массы по всему объему (при условии оптимальной температуры), протекания необходимых процессов уплотнения и формирования структуры плиты толщиной 20 мм.

На основе анализа влияния основных факторов процессов технологии, сделано прогнозирование качества плит относительно ожидаемого качества, Таблица 3.7.

Таблица 3.7 – Прогнозируемое качество полимерпесчаных плит для различных условий изготовления

Общее усилие, кН	Удельное давление, МПа	Температура, °С	Прогнозируемое качество плиты и комментарии
1500	2.64	205	Оптимальный режим. Идеальный баланс. Давление обеспечивает высокую плотность. Температура достаточная для высокого качества
1500	2.64	190	Хорошее качество. Давление высокое. Температура на нижней границе оптимального значения.
1400	2.46	205	Хорошее качество, близкое к оптимальному. Недостаточность давления компенсируется температурой
1500	2.64	220	Хорошее качество, но есть риск деградации полимера
1400	2.46	190	Удовлетворительное качество. Компромиссный режим.
1300	2.29	205	Удовлетворительное качество. Оптимальная температура компенсирует недостаточное давление.
1400	2.46	235	Рискованный режим. Высокая температура близка к зоне деградации полиолефинов.
1300	2.29	220	Низкое давление не обеспечит плотности. Высокая температура не компенсирует низкое давление
1300	2.29	190	Плохое качество. Недостаточное давление и низкая температура.
1500	2.64	175	Наихудший режим. Высокое давление "спрессует" непрогретую массу.
1400	2.46	175	Очень плохое качество. Аналогично предыдущему.
1300	2.29	175	Очень плохое качество. Аналогично предыдущему.
1300	2.29	235	Несбалансированный режим. Низкое давление и высокая температура деградируют полимер

В результате исследования факторов технологии, была составлена последовательность вариантов сочетания факторов по убыванию качества плит, которая представлена в Таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Последовательность вариантов сочетания факторов давления и температуры прессования по убыванию качества плит

1. 1500 кН / 205 °С (наивысшее)	4. 1500 кН / 220 °С	8. 1300 кН / 220 °С	12. 1400 кН / 175°С
2. 1500 кН / 190 °С	5. 1400 кН / 190 °С	9. 1300 кН / 190 °С	13. 1300 кН / 175°С
3. 1400 кН / 205 °С	6. 1300 кН / 205 °С	10. 1300 кН / 235 °С	(самое низкое)
	7. 1400 кН / 235 °С	11. 1500 кН / 175 °С	

Технологическим режимом, обеспечивающим целевые показатели качества плит, является вариант №1. Близкими к нему по эффективности качества являются варианты №2 и №3. Остальные варианты могут служить для прогнозирования качества плит.

#### 3.4.4. Выбор режима для обеспечения целевого качества плит

Исходя из анализа экспериментальных данных, комбинации с температурой 175 и 190 °С с большой вероятностью будет давать неудовлетворительный материал с низкими показателями прочности и высоким водопоглощением.

Температура 235 °С является рискованной, из-за возможной деструкции полимера. Наиболее близкой к режиму для целевого качества плит — это сочетание температуры 205 и 220 °С и давления 24,6 и 26,4 МПа (1400 и 1500 кН).

Рекомендуемый режим:

Усилие прессования: ~1500 кН

Удельное давление: ~26,4 МПа

Температура прессования: ~205 °С

Время выдержки: 2 мин

Обоснование:

1. Температура 205 °С находится в середине оптимального диапазона для полиолефинов, гарантирует полное плавление и хорошую текучесть без риска термической дегградации.

2. Давление 26,4 МПа является максимальным из предложенных и обеспечит наилучшее уплотнение композиции, что критически важно для достижения высокой плотности ( $1700 \text{ кг/м}^3$ ) и низких показателей водопоглощения и набухания (0,7%).

3. Сочетание высокой температуры и высокого давления наилучшим образом обеспечит выполнение всех заданных показателей качества полимерпесчаных плит.

### **3.4.5. Исследование влияния композиции «песок/сырье» на свойства полимерпесчаных плит**

Исследования влияния композиции «песок/сырье» с использованием выбранного режима проводились на описанной выше опытно-промышленной линии ОАО «Каравеево». Для изучения физико-механических показателей изготавливались полимерпесчаные плиты  $330 \times 330 \times 35$  мм с учетом объемных пустот. Дополнительно изготавливались и испытывались плиты, в состав которых вводился гранулированный полипропилен белого цвета; состав композиции, %: песок/сырье/полипропилен = 50/45/5, 50/40/10.

В данном эксперименте были исследованы композиции исходного сырья и песка в различных процентных соотношениях с шагом 10%. Все образцы изготавливались при одном и том же температурном режиме в 4-х зонах нагрева последовательно: 1 зона – прогрев до  $170^\circ\text{C}$ , 2 зона – подъем температуры до  $180^\circ\text{C}$ , 3 и 4 зона – расплавление при  $210\text{-}220^\circ\text{C}$ , температура прессования -  $205^\circ\text{C}$ .

Результаты исследования влияния композиции «сырье/песок» на физико-механические и водопоглощающие свойства - «прочность при статическом изгибе» - F, «ударная вязкость» - Q, «водопоглощение» - G, и «истираемость» - E, представлены в Таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Влияние композиции песок /сырье на потребительские свойства образцов полимерпесчаных плит

№	Композиция: песок/	Прочность при	Ударная	Водопог-	Истирае-	Плот-
---	-----------------------	------------------	---------	----------	----------	-------

образца	сырье, %	статическом изгибе, F, МПа	вязкость, Q, кДж/м <sup>2</sup>	лощение, G, %	мощь, E, г/см <sup>2</sup>	ность, ρ, кг/м <sup>3</sup>
1	90/10	5,1	2,4	2,5	0,30	2750
2	80/20	6,0	2,6	2,3	0,25	2600
3	70/30	6,7	2,8	2,1	0,20	2450
4	60/40	7,3	3,0	1,9	0,15	2300
5	50/50	7,5	3,3	1,7	0,10	2150
6	40/60	7,8	3,5	1,4	0,09	2000
7	30/70	8,0	3,2	1,1	0,08	1900
8	20/80	8,4	3,0	0,9	0,08	1800
9	10/90	8,9	2,9	0,8	0,07	1700
10	100	10,0	2,8	0,7	0,07	1600
11	50/45/5	10,6	4,9	0,8	0,09	2150
12	50/40/10	11,1	5,4	0,7	0,08	2100

Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что зависимость показателей качества плит от доли песка в полимерпесчаной композиции находится в широких пределах. На основании полученных результатов исследования были построены кривые зависимости свойство-композиция. На Рисунке 3.10 представлена зависимость предела прочности при статическом изгибе от композиции полимерпесчаных плит.

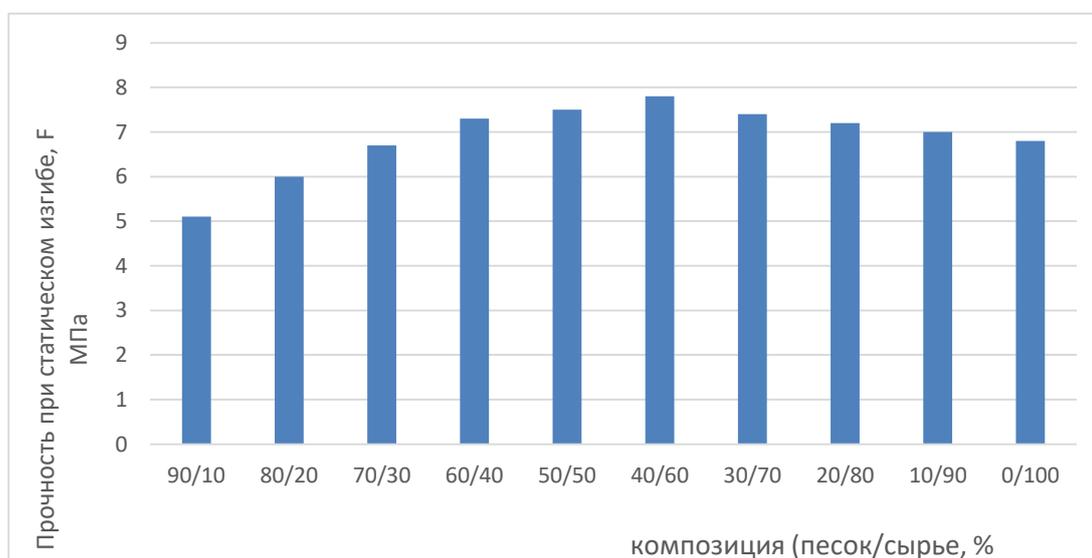


Рисунок 3.10 – Зависимость предела прочности при статическом изгибе от композиции полимерпесчаных плит

С увеличением содержания макулатурных отходов в композиции полимерпесчаных плит до 60% предел прочности при статическом изгибе

возрастает и достигает максимального значения 7,8 МПа. Дальнейшее увеличение процентного содержания макулатурных отходов ведет к снижению предела прочности при статическом изгибе и при 100% композиции отходов составляет 6,8 МПа.

На Рисунке 3.11 представлена зависимость изменения ударной вязкости (предел прочности при динамическом изгибе) от композиции полимерпесчаных плит.

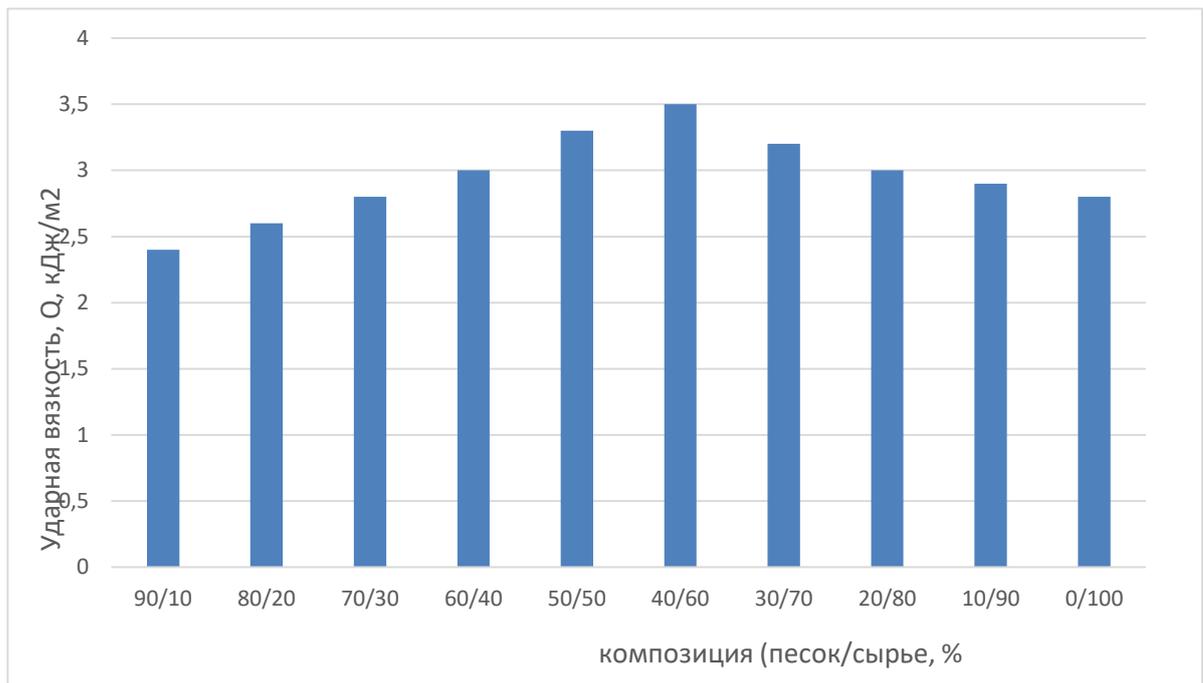


Рисунок 3.11 – Зависимость ударной вязкости от композиции полимерпесчаных плит.

Ударная вязкость увеличивается пропорционально снижению доли песка до соотношения песок/сырье 40/60% и при этом соотношении достигает значения 3,5 кДж/м². Необходимым и достаточным значением ударной вязкости не менее 3,3 кДж/м², обладает также композиция песок/сырье 50/50%. Данная композиция также удовлетворяет требованиям по пределу прочности при статическом изгибе не менее 7,5 МПа. Такой характер зависимостей прочностных свойств объясняется влиянием содержания доли песка, когезионная прочность которого ниже прочности полимера.

На Рисунке 3.12. представлена зависимость водопоглощения от композиции полимерпесчаных плит.

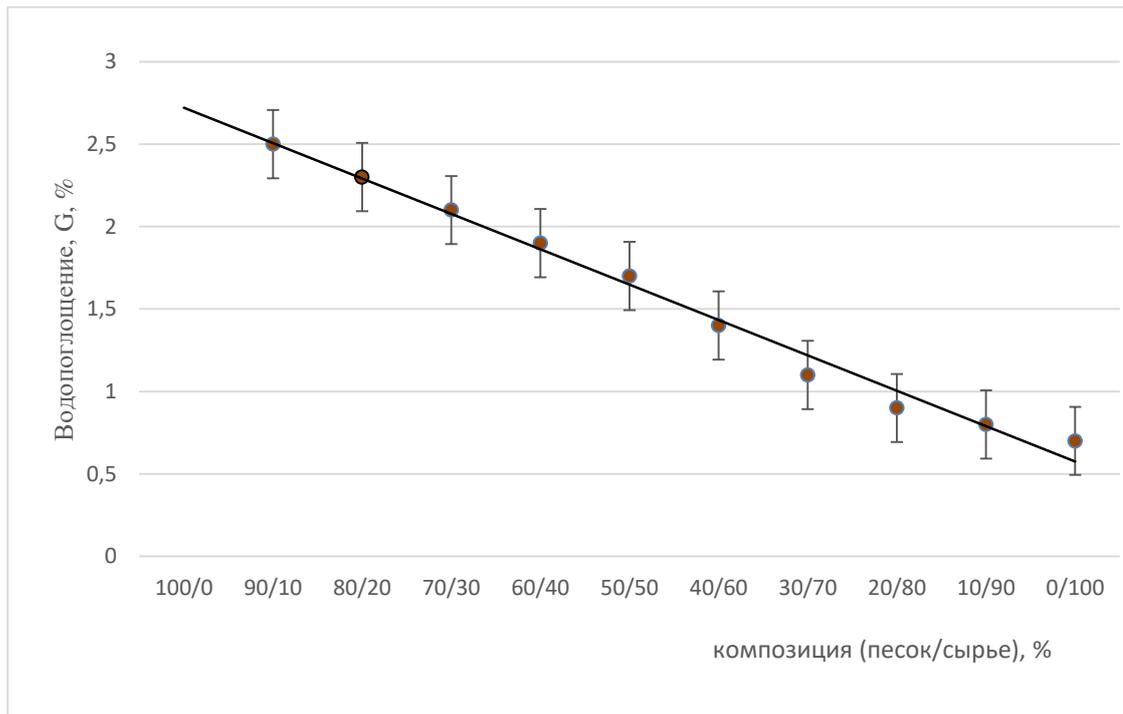


Рисунок 3.12 – Зависимость водопоглощения от композиции полимерпесчаных плит.

Водопоглощение, в диапазоне уменьшения доли песка снижается примерно пропорционально. Установленные пределы водопоглощения характеризуют плиты как высоко гидрофобный материал. Водопоглощение при соотношениях «песок /сырье» = 50/50 % и 40/60 %, соответствует значениям 1,7 и 1,4 %. При данных соотношениях песок/сырье показатель водопоглощения является достаточной эксплуатационной характеристикой.

Набухание плит в диапазоне снижения доли песка от 50% до 40% повышается, примерно, с 0,42% до 0,73%. Эти величины не противоречат кривой зависимости водопоглощения и подтверждают гидрофобность плит. В качестве эксплуатационной нормы для экспериментальных плит принимаем набухание при соотношениях «песок/сырье» равных 50/50% и 40/60%, 0,7%. Таким образом, проведенные испытания экспериментальных плит по основным физико-механическим и водопоглощающим свойствам, подтвердили приемлемое эксплуатационное качество полимерпесчаных плит.

Важным эксплуатационным свойством плит является «Истираемость» (Е).

Чем меньше этот показатель, тем долговечнее плиты.

На Рисунке 3.13 представлена зависимость истираемости от композиции полимерпесчаных плит.

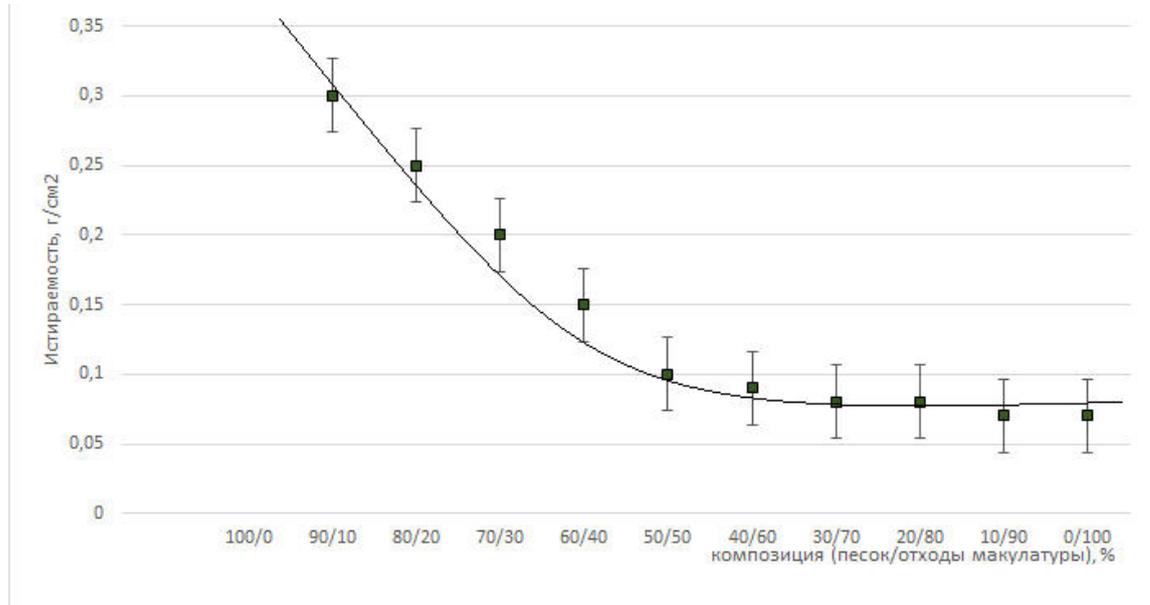


Рисунок 3.13 – Зависимость истираемости от композиции полимерпесчаных плит.

Зависимость истираемости от композиции «песок/сырье» показывает, что с уменьшением содержания песка в композиции, сопротивление истиранию значительно снижается до соотношения 50х50% и составляет 0,1 гр/см<sup>2</sup>. Данное значение истираемости является минимально достаточной эксплуатационной характеристикой. Истираемость композиции песок/сырье 40/60% составляет 0,09 гр/см<sup>2</sup>.

С целью получения более наглядной картины влияния связующего (макулатурные отходы) на физико-механические свойства полимерпесчаных плит были изготовлены и испытаны плиты с композицией, где присутствовал гранулированный полипропилен белого цвета с соотношением компонентов: песок/ сырье /полипропилен - 50/45/5 и 50/40/10. Результаты исследования представлены на Рисунке 3.14.

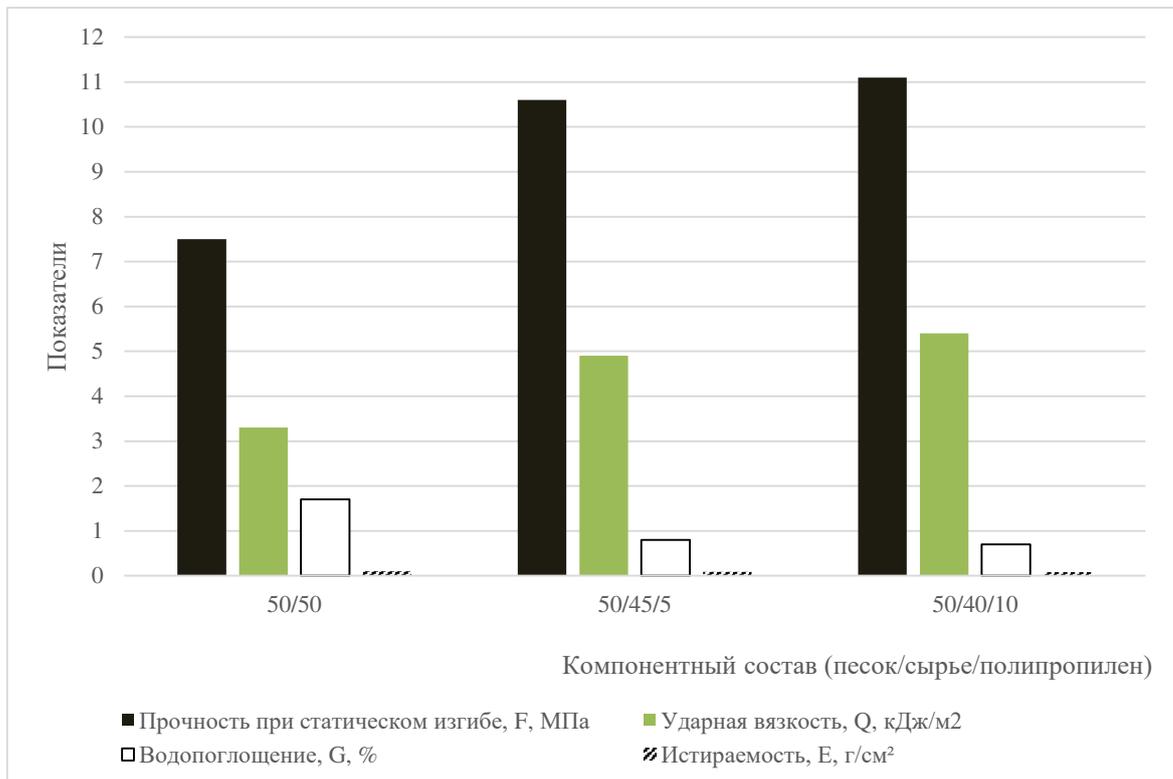


Рисунок 3.14 – Зависимость свойств полимерпесчаных плит от добавок полипропилена

Результаты исследования представленные на Рисунке 3.14. свидетельствуют о том, что с увеличением содержания в композиции полипропилена с 5 до 10%, взамен сырья, показатели качества полимерпесчаных плит значительно улучшаются. По сравнению с показателями для композиции «песок/полимер = 50/50%», F увеличивается с 7,5 до 11,1 МПа, Q увеличивается с 3,3 до 5,4 кДж/м<sup>2</sup>, водопоглощение снижается с 1,7 до 0,7%, истираемость снижается с 0,1 до 0,08 г/см<sup>2</sup>. В данном исследовании важно было сравнить прирост показателей за счет добавок полипропилена и подтвердить существенную роль синтетических полимеров в композиции макулатурных отходов при формировании потребительских свойств полимерпесчаных плит.

В Таблице 3.10 представлены диапазоны песчано-полимерного состава и показатели качества плит, отвечающие условию минимальной достаточности для эффективного использования ресурсов макулатурных отходов. Добавка полипропилена дает существенное улучшение свойств плит, в сравнении с отходами полимеров в сырье.

Таблица 3.10 – Интервалы эффективного сочетания состава смеси и качества плит

Интервал «песок/сырье», %	Интервал F, МПа	Интервал Q, кДж/м <sup>2</sup>	Интервал G, %	Интервал ε, %
40–50 / 50–60	7,5–7,8 (среднее 7,7)	3,3–3,5 (среднее 3,4)	1,7–1,4 (среднее 1,5)	0,10–0,09 (среднее 0,09)
Относительный прирост за счет добавки полипропилена 50/40/10	+3,4	+2,0	-0,8	-0,01

Результаты исследования позволили научно обосновать выбор диапазонов полимерно-песчаного состава и интервалы основных показателей качества плит.

Полученные полимерпесчаные плиты с композициями по соотношениям песок/сырье 50/50 и 40/60% удовлетворяют заданным значениям потребительских свойств и могут использоваться в городских и дачных ландшафтах.

#### 3.4.6. Исследование структуры полимерпесчаных плит

Следующий этап исследований был посвящен изучению структуры полимерпесчаных плит с оценкой роли и характера распределения компонентов.

Полимерпесчаная плита – это многокомпонентный гетерогенный композит, полученный методом термомеханического компаундирования и горячего прессования. Его структура характеризуется жестким минеральным каркасом из песка, пространство между частицами которого заполнено гибридной матрицей на основе смеси рециклированных термопластов, дискретно армированной короткими целлюлозными волокнами, а свойства композиционного материала определяются синергетическим эффектом сил адгезии на многочисленных границах раздела между этими разнородными компонентами.

Структура композита и роль компонентов:

В структуре композита можно выделить несколько ключевых фаз, которые образуют материал:

а) Гибридная полимерная матрица (фракция синтетических полимеров (70%),

будучи наиболее объемной, формирует непрерывную матрицу. Состав полимеров: в основном это полиолефины (ПЭ, ПП), полистирол (ПС), ПЭТ-тара из упаковки, а также возможны другие полимеры, присутствующие в макулатуре, например, покрытия, клеи.

Роль: синтетические полимеры выполняют роль связующего (матрицы). При термообработке они переходят в вязкотекучее и расплавленное состояние, обволакивают все остальные компоненты и, при охлаждении под давлением, формируют сплошную фазу, которая связывает композит в монолитный материал. Высокое содержание полимеров указывает на то, что матрица является доминирующей фазой. Матрица определяет основные механические свойства материала на растяжение и изгиб, а также его долговечность и устойчивость к влаге.

б) Армирующее целлюлозное волокно (23%). Волокна целлюлозы из макулатуры служат дисперсным армирующим наполнителем. Они распределены в полимерной матрице и работают на увеличение прочности и жесткости композита. Однако важно отметить, что при каждой переработке целлюлозное волокно необратимо деформируется и теряет способность к образованию прочных связей, что может ограничивать его армирующий потенциал.

Роль: целлюлозные волокна выполняют две ключевые функции:

1. Армирующий элемент: короткие волокна целлюлозы, диспергированные в полимерной матрице, создают наполненный пластик. Они повышают жесткость и прочность на разрыв по сравнению с чистой полимерной пленкой, работая как дискретное армирование.

2. Структурообразующий каркас: длинные волокна бумажной массы формируют подобие сетчатого каркаса, пронизывающего полимерную матрицу, что дополнительно увеличивает трещиностойкость и ударную вязкость. Кроме того, целлюлоза является наполнителем, снижая общую стоимость материала.

в) Минеральные частицы (в отходах и песок (50-40%): жесткий минеральный наполнитель и скелет композита, действуют как наполнитель, увеличивающий твердость, износостойкость и, что критически важно, снижает общую стоимость материала. Они также могут уменьшать усадку материала при термообработке.

Роль: песок (в основном диоксид кремния,  $\text{SiO}_2$ ) является основным наполнителем, формирующим жесткий минеральный скелет композита. Частицы песка создают объем и резко повышают модуль упругости (жесткость) и прочность на сжатие материала. Минеральные частицы из макулатуры (каолин, тальк, карбонат кальция) заполняют микропоры и влияют на реологию расплава при переработке.

г) Водная фаза: пластификатор и агент протекания реакций

Роль: на этапе смешения, вода пластифицирует целлюлозные волокна, делая их более гибкими. При термопрессовании вода испаряется, но может способствовать протеканию реакций на границах раздела фаз.

Морфология композита после термопрессования

В результате термопрессования формируется сложная многоуровневая структура, морфологически которую можно определить «композит в композите». Фактически, структура представляет собой песчаный агломерат, скрепленный полимерно-целлюлозным связующим. В таком варианте определение «композит в композите» следует понимать так, что формируется композит, где в качестве матрицы для песка выступает уже другой композит - полимер, наполненный целлюлозными волокнами.

Основными морфологическими единицами композита являются границы раздела фаз и пористость:

а) границы раздела фаз – это критически важные характеристики для свойств материала; назовем границы – «полимер-целлюлоза» (адгезия средней силы), «полимер-песок» (адгезия может быть более сильной, из-за шероховатости поверхности песка), «полимер-полимер» (адгезия между разными типами полимеров, отличающаяся высокими значениями). Адгезия между компонентами фаз очень важна, так как определяет все механические свойства и набухание.

б) пористость композита: несмотря на прессование, в материале могут присутствовать закрытые и открытые поры, образованные испаряющейся влагой, воздухом и неполной консолидацией компонентов. Это снижает плотность и механические свойства и обуславливает впитываемость воды.

Структура материала обуславливает высокую жесткость и прочность на сжатие (благодаря песку), хорошую ударную вязкость и прочность на изгиб (благодаря полимерно-целлюлозной составляющей), а также низкое водопоглощение и высокую устойчивость к атмосфере и истиранию.

Рассмотренное теоретическое объяснение структуры и свойств плит, объективно получено исследованием физико-механических и впитывающих свойств. Подтверждение структуры и характера распределения компонентов получено методом электронной микроскопии и изучением микросрезов плиты при разных соотношениях, %: «песок/сырье», микрофотографии которых представлены на Рисунках 3.15-3.19.

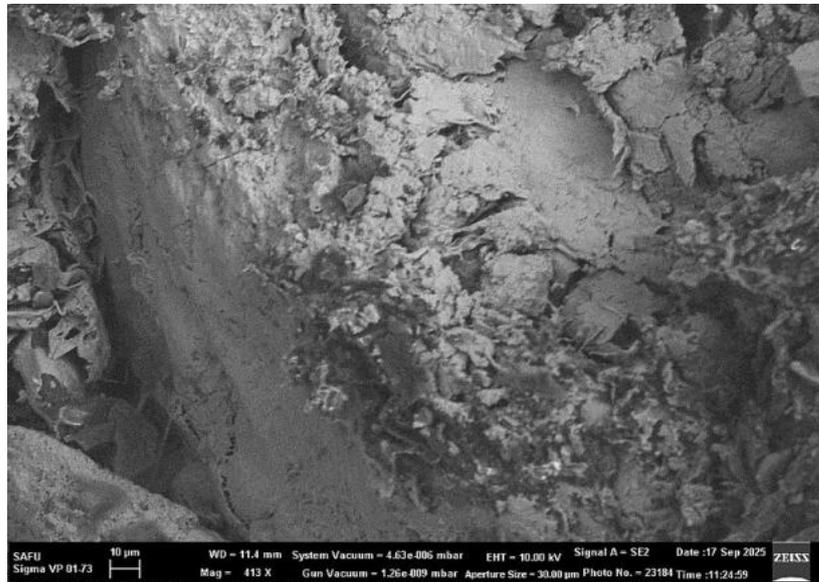


Рисунок 3.15 – Микрофотография структуры плиты на микросрезе, при соотношении, %: «песок/сырье» = 10/90.

На Рисунке 3.15, отчетливо выделяется волокно (фрагмент темного цвета с гладкой поверхностью) и песчано-полимерная матрица, занимающая большую часть поля среза, находящаяся на поверхности волокна. Почти все поле среза занимает песчано-полимерная матрица, которая расположена на волокне (видны темные гладкие поля) Такая структура компонентов ожидаемая, так как почти сплошным компонентом является сырье (90%).

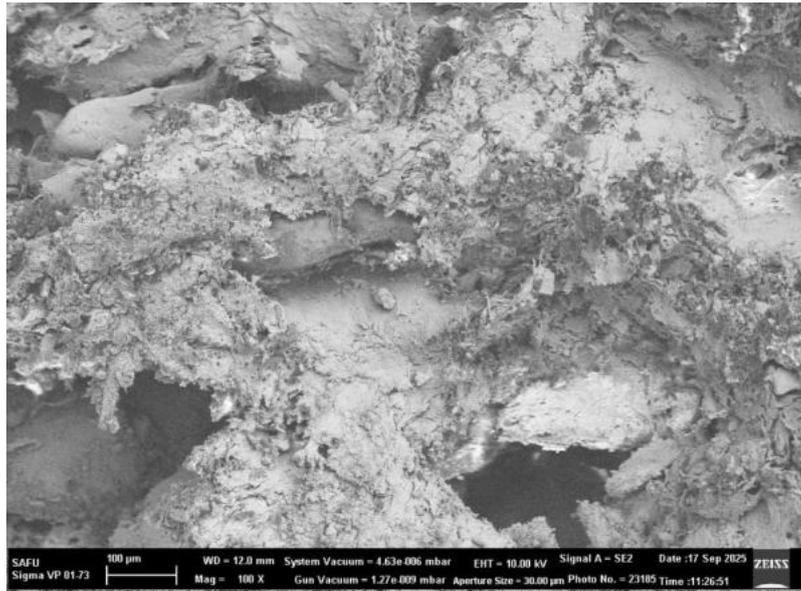


Рисунок 3.16 – Микрофотография структуры плиты на микросрезках, при соотношении, %: «песок/сырье» = 70/30.

На Рисунке 3.16, хорошо просматриваются поля поверхности волокна со сформированной структурой песчано-полимерной матрицы, которая относительно меньше покрывает площадь волокна. Это объясняется тем, что содержание песка здесь 70%.

На Рисунках 3.17 (а) и 3.17 (б), показана структура плиты на микросрезках, при соотношении, %: «песок/сырье» = 30/70.

На Рисунках 3.17 хорошо различима песчано-полимерная матрица на волокне с четко просматриваемыми частицами песка и полимера.

На всех рисунках видны волокна с большой массовой долей полимерно-песчаной составляющей на поверхности. При сравнении микрофотографий, рисунок 3.15 и 3.16 с Рисунками 3.17, можно видеть существенно меньшую долю частиц песка, относительно доли полимера.

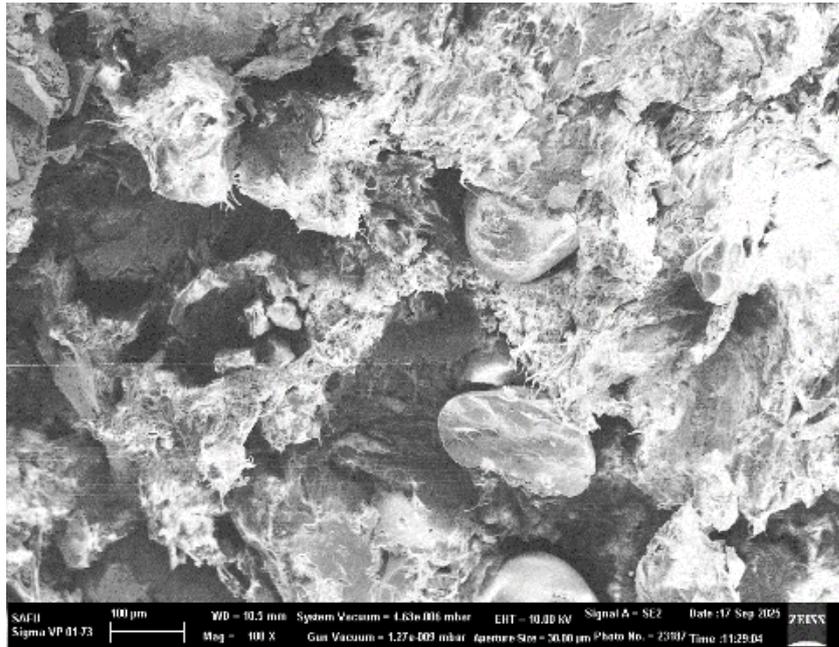


Рисунок 3.17 (а) – Структура плиты на микросрезах, при соотношении, %:  
«песок/сырье» = 30/70.

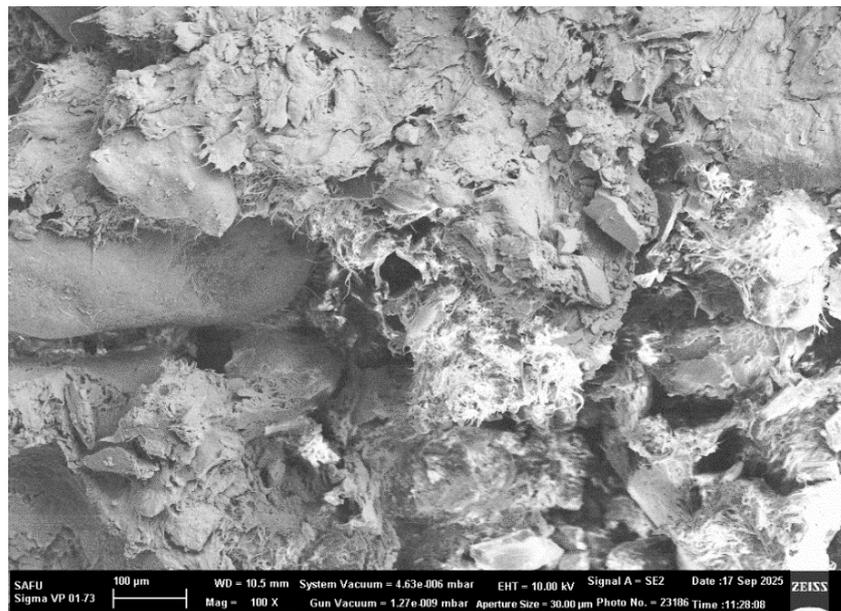


Рисунок 3.17 (б) – Структура плиты на микросрезах, при соотношении, %:  
«песок/сырье» = 30/70.

На Рисунках 3.18 (а), (б), (в) и (г) показана структура плиты на микросрезах, при соотношении, %: «песок/сырье/полимер» = 50/40/10. А на рисунках 3.19 (а), (б), показана структура микросрезков при соотношении, %: «песок/сырье» - 50/50.

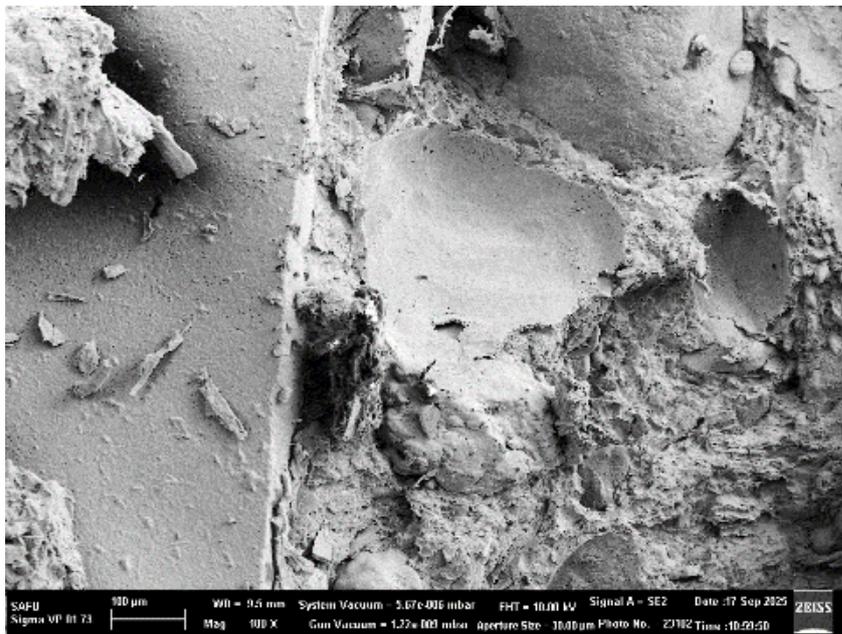


Рисунок 3.18 (а) – Структура плиты на микросрезах, при соотношении, %:  
«песок/сырье/полимер» = 50/40/10.

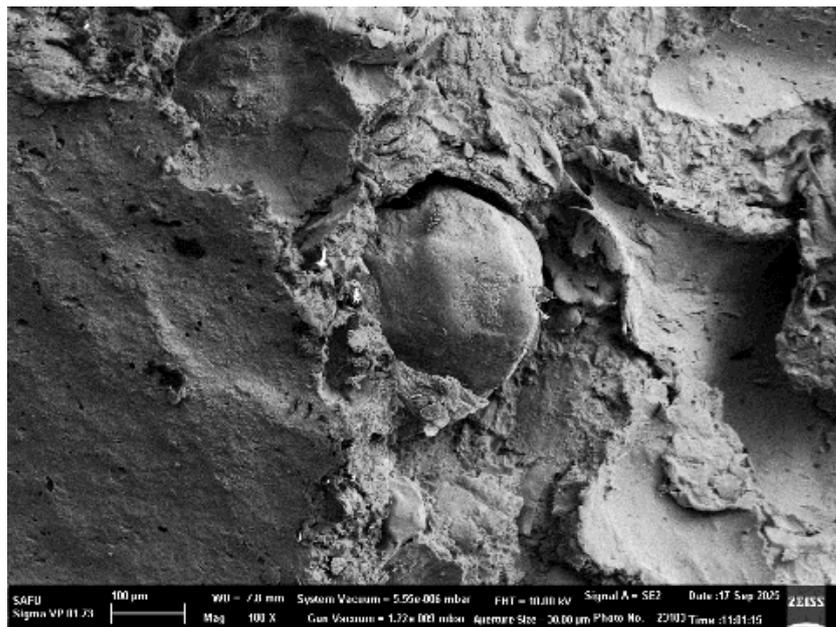


Рисунок 3.18 (б) – Структура плиты на микросрезах, при соотношении, %:  
«песок/сырье/полимер» = 50/40/10.

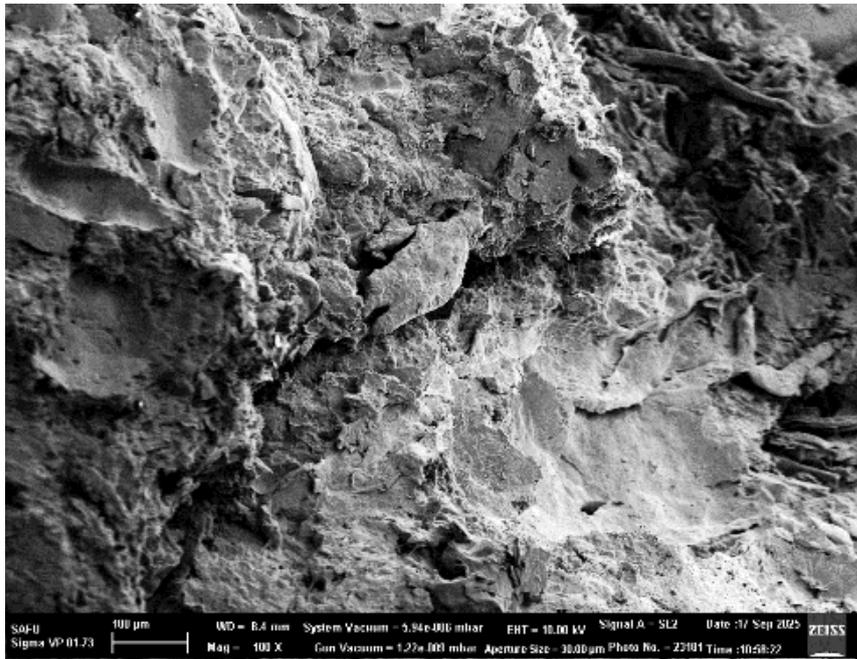


Рисунок 3.18 (в) – Структура плиты на микросрезках, при соотношении, %:  
«песок/сырье/полимер» = 50/40/10.

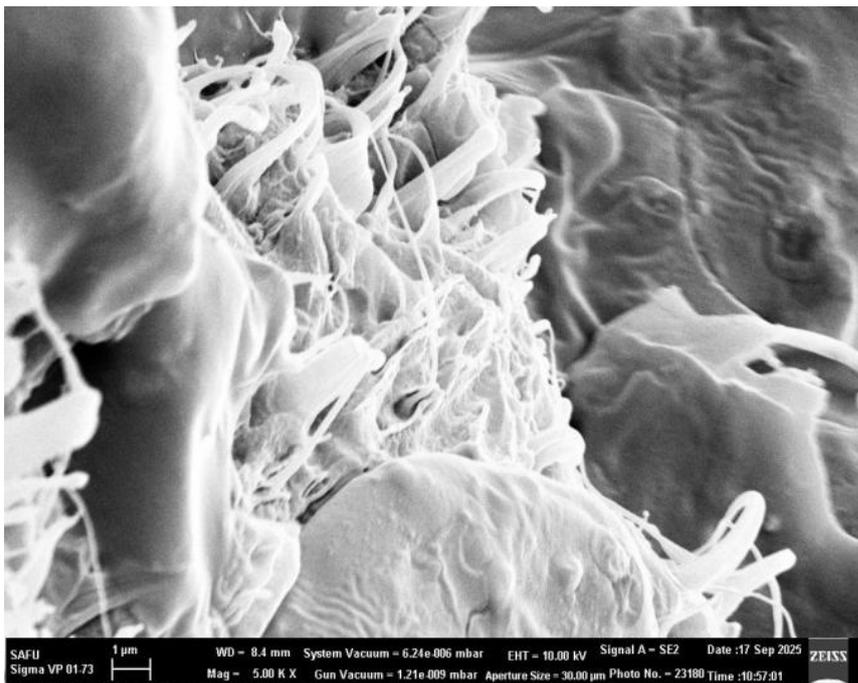


Рисунок 3.18 (г) – Структура плиты на микросрезках, при соотношении, %:  
«песок/сырье/полимер» = 50/40/10.

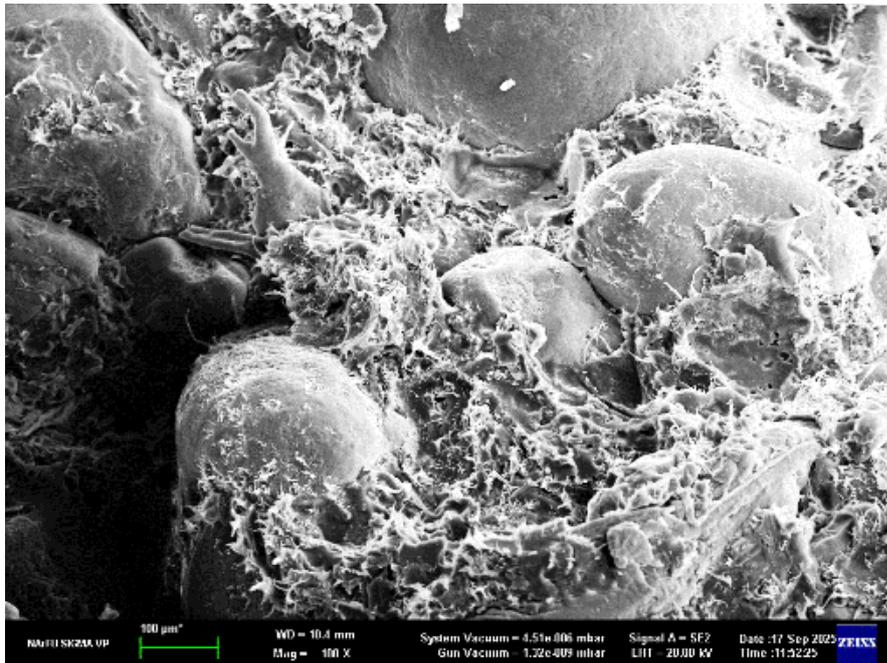


Рисунок 3.19 (а) – Структура плиты на микросрезах, при соотношении, %:  
«песок/сырье/полимер» = 50/50



Рисунок 3.19 (б) – Структура плиты на микросрезах, при соотношении, %:  
«песок/сырье/полимер» = 50/50

На всех рисунках, видимым компонентом является песчано-полимерная матрица. Отличие в содержании песка – 50 и 70%, очевидно – на рисунках 3.15 и 3.16, его практически не видно (преобладает полимер), а на рисунках 3.19 (а) и (б),

частицы песка хорошо видны в структуре полимера, с практически равномерным распределением в нем.

Визуально можно оценить отличие структуры песчано-полимерной матрицы. При добавках полипропилена, рисунки 3.18 (а), (б), (в), (г), матрица более плотная. Следствием и подтверждением является большая прочность плит с содержанием в песчано-полимерной матрице полипропилена. Структура полимерпесчаной плиты с композицией «песок/сырье» - 50/50 %, представленная на рисунках 3.19 (а) и (б) обладает достаточной плотностью и равномерным распределением компонентов, а ее потребительские свойства удовлетворяют требованиям, предъявляемым к полимерпесчаным плитам для устройства городских и дачных ландшафтов.

#### **3.4.7. Выводы по разделу 3.4**

1. Установлено, что использование в композиции полимерпесчаных плит отходов макулатуры, представляющих собой в основном смесь вторичных волокон древесной целлюлозы и синтетических полимеров, дает возможность получить широкий спектр материалов для городских и дачных ландшафтов с заданными физико-механическими свойствами.

2. Показано существенное влияние макулатурных отходов, как связующего, в композиции полимерпесчаных плит на их потребительские свойства.

3. Определено, что с увеличением содержания отходов макулатуры в композиции полимерпесчаных плит до 60%, предел прочности при статическом изгибе и ударная вязкость возрастают, при этом водопоглощение и истираемость плит уменьшаются.

4. Установлен предел содержания отходов макулатуры в композиции полимерпесчаных плит с заданными физико-механическими свойствами, составляющий 50-60 %.

5. Определено, что добавка полипропилена в количестве 5-10 % способствует существенному улучшению качественных характеристик полимерпесчаных плит.

6. Полимерпесчаная плита представляет собой многокомпонентный гетерогенный композит, полученный методом термомеханического компаундирования и горячего прессования.

7. Структура композита характеризуется жестким минеральным каркасом из песка, пространство между частицами которого заполнено гибридной матрицей на основе смеси рециклированных термопластов, дискретно армированной короткими целлюлозными волокнами.

8. Конечные свойства композита определяются синергетическим эффектом и силой адгезии на многочисленных границах раздела между разнородными компонентами – полимером, волокном и песком.

9. Композит сочетает жесткость (от песка), упругость (от волокон) и пластичность (от полимерной матрицы). Высокое содержание песка (50%) и минеральных частиц указывает на целесообразность применения в сферах благоустройства территорий и строительстве.

10. Композит является типовым примером рециклинга и апсайклинга (преобразование в новые ценные продукты) отходов, что соответствует принципам экономики замкнутого цикла. Использование отходов в качестве ресурса снижает себестоимость продукции и нагрузку на окружающую среду.

### **3.5. Внедрение технологии и установки производства полимерпесчаных плит с оценкой экономической эффективности использования результатов диссертационного исследования**

По результатам исследования, представленным в диссертации, автором разработаны технология и опытно-промышленная установка переработки отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б в полимерпесчаные плиты. Технология и установка испытаны в опытно-промышленном производстве полимерпесчаных плит. Полимерпесчаные плиты производились с габаритными размерами 330×330×35 мм включая объемные пустоты. При массе плиток 3,1–3,5 кг/шт. производительность линии около 2,5 т в смену (8 часов) оказалась близка к

расчетной при выборе оборудования. Следовательно, линия способна перерабатывать всю массу отходов предприятия (~3,5 т/сут).

### 3.5.1. Расчет себестоимости полимерпесчаных плит

Характеристики материала:

- размер 330\*330\*35 мм;
- масса плитки - 3,1 кг.;
- количество штук в одном м<sup>2</sup> - 9 плиток;
- вес 1м<sup>2</sup> - 27,9 кг.

Фонд оплаты труда:

Для работы участка достаточно трех человек - управляющего (60 000 руб), оператора АПН (50 000 руб), подсобного рабочего (44 000 руб). Фонд оплаты труда составляет 154 000 рублей в месяц за одну смену и 308 000 руб. из расчета 2-х смен по 12 часов.

Объем готовой продукции за месяц: за 2 смены = 160 м<sup>2</sup>, 24 дня = 3840 м<sup>2</sup> в месяц.

Фонд оплаты труда за месяц 308 000 руб.: 3840 м<sup>2</sup> = расходы по зарплате на 1м<sup>2</sup> составляет 80,58 руб.

ЕСН - 30%, дает 24,06 руб. в стоимость 1м<sup>2</sup> готовой продукции.

Необходимые производственные площади.

Для размещения оборудования и зон хранения сырья и продукции необходимо предусмотреть порядка 200 м<sup>2</sup> производственных площадей и 100 м<sup>2</sup> склад (всего 300 м<sup>2</sup>). Производственное помещение не обязательно должно быть отапливаемым, обогрев происходит за счет выделяемого оборудованием тепла. Готовая продукция складировается в цеху, а затем перемещается на склад. При ставке арендной платы 300 руб за кв.м. стоимость аренды производственных площадей 90 000 руб. Таким образом, стоимость аренды на 1м<sup>2</sup> изделия составляет 23,44 руб.

Стоимость энергоносителей и материалов.

Сырье для производства плитки:

- полимер в гранулах;
- песок карьерный;
- пигмент красящий.

Состав полимерпесчаной смеси:

- 50% - песок,
- 0,42% - пигменты,
- 49,58% - отходы производства.

Средняя по России цена:

- песок – 0,5 руб. за кг,
- пигмент – 100 руб. за кг.

Итого, стоимость сырья (полимер+песок+пигмент) за одну тонну составляет 670 руб. (2990 руб на сутки). Таким образом, стоимость сырья на 1м<sup>2</sup> плитки составляет 18,69 руб. На 1 штуку 2,08 руб.

Потребление электроэнергии за смену:

**Дробилка** производительностью 500 кг\ч потребляет 18,5 кВт\ч. Потребление энергии 61,42 кВт за сутки или 30,71 кВт в смену.

**АПН** — 40 кВт/час при разогреве (1-1,5 ч на разогрев), при работе круглосуточно при разогретом АПН потребление уменьшается в 3 раза, т.е. расчет: 13,3 кВт x 24 часа = 319 кВт/сутки. (360 кВт/сутки при холодном). 360/2 = 180 кВт в смену.

**Пресс гидравлический** – 7,5 кВт/час. При формовке изделия программа на прессах рассчитана на потребление эл. энергии в режиме подъема и опускания верхнего пуансона, при формовке эл. энергия не потребляется. Потребление за сутки 67,5 кВт. или 67,5/2 = 33,75 кВт/смену.

**Смеситель + транспортер** — Потребление электроэнергии за сутки 12,54 кВт.

Потребление в смену составит 6,27 кВт.

Освещение – 5 кВт/час в смену.

Итого потребление электроэнергии за сутки составит 511,46 кВт/сутки, в смену за 12 часов 255,73 кВт.

Стоимость электроэнергии за 1кВт/ч - 8,1 руб. Таким образом, стоимость электроэнергии составляет 2071,41 руб. за 12 часов. Расход на 1 плитку составит 2,88 руб. или 25,89 на 1 м<sup>2</sup>.

Амортизация оборудования устанавливается предприятием самостоятельно.

Себестоимость 1 м<sup>2</sup> плитки тротуарной:

Вид затрат на 1 м<sup>2</sup>:

Сырье	18,69	руб.
Электроэнергия	25,89	руб.
Оплата труда	80,58	руб.
ЕСН, 30%	24,06	руб.
Аренда помещения	23,44	руб.
Амортизация оборудования		
ИТОГО:	172,66	руб.

ИТОГОВЫЕ ДАННЫЕ:

Наименование:	Плитка полимерпесчаная для ландшафтного строительства 330х330х35мм		
Себестоимость 1 м <sup>2</sup>		172,66	руб.
Накладные расходы (3%)		5,18	руб.
Рыночная цена м <sup>2</sup>		500	руб.
Прибыль до налогообложения на 1 м <sup>2</sup>		327,34	руб.
Налог на прибыль (22%)		72,01	руб.
Прибыль с 1 м <sup>2</sup>		255,33	руб.
Прибыль в день всего		40 852,8	руб.
Рентабельность, %		51,06	

Чистая прибыль за сутки 40 852,8 руб.

Валовая выручка за сутки  $500 \text{ руб.} \times 160 \text{ м}^2 = 80\,000 \text{ руб.}$

Чистая прибыль / Валовая выручка  $\times 100$  Рентабельность равна 51,06 %

В настоящее время технология и установка внедрены в ООО «Каравачево» и функционируют. (Акт внедрения прилагается – Приложение Г).

Производительность линии  $160 \text{ м}^2$  (5 т) оказалась близка к расчетной, которая определена при выборе оборудования и испытании линии.

Исходя из производительности установленной БДМ (60 т флотинга и тест-лайнера в сутки), образуется отходов до 10 т в сутки, влажность 60-65% (3,5 т а.с. отходов). Экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы при постоянной переработке отходов составит свыше 14 млн. руб. в год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Научно подтверждены данные о преобладающих компонентах состава отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б: это синтетические полимеры (70 %), волокно (23 %), а остальную долю (7 %) составляют другие компоненты (минеральные вещества, металлы, древесина и др.). Превалирующее групповое содержание синтетических полимеров и волокна позволяет применить отходы для термопрессовочной переработки.

2. Методом электронной сканирующей микроскопии определен массовый химический элементный состав неволокнистых макулатурных отходов, а также переменность состава и массовой доли элементов во времени и от партии к партии макулатуры, при сохранении постоянства содержания большинства элементов с отсутствием содержания тяжелых металлов (Pb, Bi, Cd) и фторидов.

3. Обоснована концепция технологии, состоящая из процессов обезвоживания сырья до 25 % влажности, измельчения сырья до размеров 10–12 мм, составления композиции и смешения компонентов, термообработки композиции, прессования массы в изделия, выбора оборудования и компоновки опытно-промышленной установки для термопрессовочной переработки отходов в полимерпесчаные плиты. Испытан режим производства полимерпесчаной плитки с габаритными размерами 330×330×35 мм для устройства городских и дачных ландшафтов.

4. Научно обоснованы пределы основных технологических факторов при переработке отходов в полимерпесчаные плиты: влажность отходов (не более 25 %), размеры частиц сырья (10–12 мм), соотношение «песок/сырье» (50–50 %/40–60 %), температурные зоны нагрева и плавления (170–180 и 210–220 °С), температура прессования (205 °С), время прессования 2 мин.

5. Установлены экспериментальные зависимости влияния соотношения макулатурных отходов и минерального наполнителя на свойства полимерпесчаных плит. При соотношениях песок/сырье = 50/50 % и 40/60 %, получены плиты со следующими средними значениями основных показателей качества:  $F = 7,7$  МПа;

$Q = 3,4$  кДж/м<sup>2</sup>;  $G = 1,5$  %;  $E = 0,09$  г/см<sup>2</sup>, что отвечает условию эффективного использования ресурсов макулатурных отходов и потребительским характеристикам полимерпесчаных плит.

6. Определено, что полимерпесчаная плита представляет собой многокомпонентный гетерогенный композит, полученный методом термомеханического компаундирования и горячего прессования. Структура композита характеризуется жестким минеральным каркасом из песка, пространство которого заполнено гибридной матрицей на основе смеси синтетических полимеров, дискретно армированной целлюлозными волокнами.

7. Полученные полимерпесчаные плиты являются типовым примером рециклинга с повышением ценности переработки (апсайклинга) отходов, что соответствует принципам экономики замкнутого цикла. Использование отходов в качестве сырьевого ресурса снижает себестоимость продукции и нагрузку на окружающую среду.

8. Технология полимерпесчаных плит и опытно-промышленная установка внедрены в ОАО «Каравачево». Экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы при постоянной переработке отходов составит более 14 млн. руб. в год.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Есафов В.И. Индустрия бумаги СССР/Есафов В.И., Румянцев Н.М., Чистяков Н.Н. и др. -М. Лесная пром-сть, 1985. 223 с.
2. Papermaking Science and Technology. Book 7. Recycled Fiber and Deinking. Book editor Gottsching L. Pakarinen H. – Jyvaskyla, Finland, 2000. – 649 p.
3. Дулькин Д.А. Современное состояние и перспективы использования вторичного волокна из макулатуры в мировой и отечественной индустрии бумаги / Д.А. Дулькин В.А. Спиридонов, В.И. Комаров. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. – 1118 с.
4. Дулькин Д.А. Мировые тенденции в развитии техники и технологии переработки макулатуры / Д.А. Дулькин, И.Н. Ковернинский, В.И. Комаров, В.А. Спиридонов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. – 108 с.
5. Дулькин Д.А. Использование макулатуры – направление сокращения зависимости целлюлозно-бумажной промышленности от обеспеченности первичным волокнистым сырьем/Д.А. Дулькин, Л.А. Южанинова, В.Г. Миронова, О.И. Блинущова // Технология переработки макулатуры: науч. тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. – Караваево-Правда, 2005. – С. 100–112.
6. Смоляницкий Б.З. Переработка макулатуры. – М.: Лесная пром-сть, 1980. – 176 с.
7. Яблочкин Н.И. Макулатура в технологии картона/Н.И. Яблочкин, В.И. Комаров, И.Н. Ковернинский. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. – 252 с.
8. Смолин А.С. Современное состояние и проблемы использования вторичного волокна в производстве бумаги и картона//А.С. Смолин, В.К. Дубовый// Современные научные основы и инновационные технологии бумажно-картонных материалов с использованием вторичного волокна из макулатуры: матлы 7-й Междунар. науч.-техн. конф. –Караваево, 2006. –С.6-7.
9. Дулькин Д.А. Ресурсы и качество макулатуры для производства бумаги и картона/Д.А. Дулькин, А.Н. Панов, И.Н. Ковернинский, В.А. Спиридонов // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2006. – № 5. – С. 28–37.

10. Чижов Г.И. Бумагообразующие свойства волокон макулатуры из различных полуфабрикатов/Г.И. Чижов, В.К. Дубовый, В.В. Хованский // Создание конкурентоспособного оборудования и технологий для изготовления бумажно-картонной продукции из вторичного волокнистого сырья: науч. тр. 3-й Междунар. науч.-техн. конф. – Караваево-Правдинский, 2002. – С. 97–103.

11. Макаренко, А.А. Улучшение бумагообразующих свойств вторичного волокна/ А.А. Макаренко, А.В. Яхно//Целлюлоза, бумага и картон. – 1988. – № 3-4. – С. 29–31.

12. Ковалева, О.П. Особенности подготовки макулатурной массы для приготовления флютинга и тест-лайнера/ О.П. Ковалева//Новое в технологии и оборудовании для производства гофрокартона и гофротары: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. ГОУ ВПО ГТУРП, С.-Пб., 2007, - С. 62-64.

13. Мороз В.Н. Повышение степени использования полуфабрикатов в производстве упаковочных видов бумаги и картона/ В.Н. Мороз, Г.М. Богомол, Л.И. Рудыка //Целлюлоза. Бумага. Картон. – 1981.– Вып. 30. – С. 10–13.

14. Мороз В.Н. Принципы подбора сырья при изготовлении тары для конкретных видов продукции/В.Н. Мороз, Г.И. Долинская//Производство гофрированного картона и гофротары. Ч.2: сб. тр. 1-й междунар. науч.-тех. конф. - Киев, 2006. - С. 19-23.

15. Осипов П.С. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т.1.Сырье и производство полуфабрикатов. Ч.3. Производство полуфабрикатов/Пузырев С.С., Виролайнен, Э.В., Поляков Ю.А., Кряжев, А.М. - СПб. «Политехника, 2004. - 316 с.

16. Яблочкин Н.И. Фракционирование и новый фракционатор для повышения эффективности использования вторичного волокна [Текст] / Н.И. Яблочкин, Д.А. Дулькин, И.Н. Ковернинский //Теория и технология бумажно-картонной продукции из вторичного волокнистого сырья: сб. науч. тр. 5-ой Межд. науч.-техн. конф. ОАО ЦНИИБ, ОАО «Караваево» и ОАО «Вторресурсы – Караваево». – Правда-Караваево, - 2004. – 100 с.

17. Иванов С.Н. Технология бумаги. Изд. 3-е/ С.Н. Иванов. Школа бумаги. – М., 2006. - 696 с.
18. Данные ФАО ООН// European Papermaker. –1996. –№1. –С.24.
19. Дулькин Д.А. Макулатурная масса для производства писче-печатных видов бумаги. Дисс. ...канд. техн. наук/ Д.А. Дулькин. – Архангельск, 2002. – 149 с.
20. Дулькин Д.А. Развитие научных основ и совершенствование процессов технологии бумаги и картона из макулатуры. Дисс. ...докт. техн. наук [Текст] / Д.А. Дулькин. – Архангельск, 2008. – 352 с.
21. Яблочкин Н.И. Повышение качества тест-лайнера. Дисс. ...канд. техн. наук/ Н.И. Яблочкин. – Архангельск, 2005. – 176 с.
22. Ковалева О.П. Переработка вторичного волокнистого сырья – макулатуры: проблемы настоящего и будущего/ О.П. Ковалева // Технология переработки макулатуры: науч. тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. – Караваево–Правда, 2005. – С. 22–24.
23. Медоуз Д. Перспективы развития технологии производства волокнистых полуфабрикатов в 21 веке / Д. Медоуз // ТАППИ. – 1998. – № 12. – С. 51–54.
24. Пейн М. Современное состояние и перспективы использования макулатуры в мировом масштабе / М. Пейн // Pulp & Paper International. –1997. –№ 8. –С. 34–37.
25. Дулькин Д.А. Усиление научного обоснования – путь повышения эффективности использования вторичного волокна/ Д.А. Дулькин, В.Г. Миронова, Л.А. Южанинова//Теория и технология бумажно-картонной продукции из вторичного волокнистого сырья: науч. тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. – Правда-Караваево, 2004. –С. 23–27.
26. Ковернинский И.Н. Комплексная химическая переработка древесины: учебник для вузов/Ковернинский И.Н., Комаров В.И., Третьяков С.И. и др. – Архангельск, 2002. -347 с.
27. Фляте Д.М. Технология бумаги: учеб. для вузов / Д.М. Фляте. – М.: Лесн. пром-сть, 1988. – 440 с.
28. Блинусова О.И. Совершенствование технологии тест-лайнера Дисс. ...канд. техн. наук/ О.И. Блинусова. –Архангельск, 2009. – 176 с.

29. Мороз В.Н. Повышение степени использования полуфабрикатов в производстве упаковочных видов бумаги и картона/ В.Н. Мороз, Г.М. Богомол, Л.И. Рудыка // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 1981.– Вып. 30. – С. 10–13.
30. Brecht W. Grundsätzliche Studien über die Spaltfestigkeit von Kartons/ W. Brecht, H.-J. Knittweis // Zellstoff und Papier. – 17 (1968) 9. – S. 274–276.
31. Seifert, P. Fiber fractionation – methods and applications/ P. Seifert, K. Long // TAPPI. – 1974. – N 57. – P. 69–72.
32. Altpapier. Faserstoff für Papier – erzeugung. Blechschmidt Opferten/
33. Пузырев С.С. Переработка вторичного волокнистого сырья/С.С.Пузырев, Е.Т.Тюрин, В.А.Волков, О.П.Ковалева. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2007.- 467 с.
34. Медоуз Д. Перспективы развития технологии производства волокнистых полуфабрикатов в 21 веке / Д. Медоуз // ТАППИ. – 1998. – № 12. – С. 51–54.
35. Дулькин Д.А. Системный анализ – основа оптимизации процесса приготовления макулатурной массы/ Д.А. Дулькин, В.А. Спиридонов // Развитие ресурсосберегающих технологий производства бумаги и картона из вторичного волокнистого сырья: науч. тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. – Караваево. –2003. –С. 49–54.
36. Яблочкин Н.И. Фракционирование вторичного волокна в центробежно-гидродинамическом фракционаторе/ Н.И. Яблочкин, В.И. Комаров, И.Н. Ковернинский, Д.А. Дулькин // Изв. вузов. Лесн. журн. –2004. –№ 6. –С. 62–89.
37. Яблочкин Н.И. Улучшение качества приготовления бумажной массы из макулатуры с использованием фракционирования волокнистого материала/ Н.И. Яблочкин, И.Н. Ковернинский, М.Д. Овчинников, Д.А. Дулькин // Технология переработки макулатуры: науч. тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. -Караваево-Правда, 2005. –С.67-71.
38. Дулькин Д.А. Анализ эффективности технологических схем производства макулатурной массы/ Д.А. Дулькин, В.А. Спиридонов, В.Г. Миронова, В.В. Верещак // Развитие ресурсосберегающих технологий

производства бумаги и картона из вторичного волокнистого сырья: сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. – Каравасево, 2003. – С. 54–59.

39. Примаков С.П., Барбаш В.А. Технологія паперу і картону/[Текст]. -Киев, ЕКМО. -2002. -396 с.

40. Пузырев С.С. Переработка вторичного волокнистого сырья/С.С. Пузырев, Е.Т. Тюрин, В.А. Волков, О.П. Ковалева. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2007. 467 с.

41. Ванчаков М.В. Технология и оборудование для переработки макулатуры: учеб. Пособие. – 2 –е изд., испр. и доп./М.В. Ванчаков, В.К. Дубовый, А.В. Кулешов, Г.Н. Коновалова/СПб ГТУРП. – СПб., 2011. -182 с.

42. Колпаков В.А., Кудрявцев М.Д. Анализ структуры поставок и качества макулатуры в России // Целлюлозно-бумажная промышленность, 2019, №4, с. 5–12.

43. Иванов И.П., Сидоров П.Н. Снижение содержания клеевых включений в макулатуре методом многостадийной флотации // Бумажная промышленность, 2020, №2, с. 18–24.

44. Pettersson F., Dalhammar G. Industrial Paper Recycling: Assessment of Contaminants and Process Efficiency // TAPPI Journal, 2018, vol. 17(3), pp. 40–47.

45. ГОСТ 10700-2019. Макулатура. Общие технические условия. — М.: Стандартинформ, 2019.

46. ГОСТ 10701.1-2013 — ГОСТ 10701.7-2013. Тара и упаковка. Общие технические условия (серия стандартов). — М.: Стандартинформ, 2013.

47. ГОСТ 7933-89. Бумага. Методы определения зольности, влажности и механических примесей. — М.: Стандартинформ.

48. EN 643. European List of Standard Grades of Paper and Board for Recycling. — CEN, 2014.

49. CEPI. Confederation of European Paper Industries. Annual Statistics 2021–2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cepi.org>.

50. ISRI. Scrap Specifications Circular 2021. Institute of Scrap Recycling Industries. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.isri.org>.

51. Novotny M., Fišerová M. Stickies Problems in Recycled Paper Mills: A Review // *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2017, vol. 32(1), pp. 120–128.
52. Распопов В.С., Хоменко, А.Н. Обзор методов удаления полимерных включений при переработке макулатуры // *Лесная промышленность*, 2018, №5, с. 28–33.
53. Heise S., Amann, O. Advanced Sorting Technologies to Reduce Contaminants in Mixed Recovered Paper // *Paper Technology*, 2019, vol. 60(4), pp. 22–29.
54. Тихонов А.Б. Биотехнологические аспекты переработки макулатуры и удаления органических загрязнений // *Вестник МГТУ леса (Лесной вестник)*, 2021, №1, с. 67–74.
55. Богданов В. С. Технология бумажной массы из вторичного сырья. — М.: ЦБП, 2003. — 312 с.
56. Jahan M. S., et al. “Recycled fiber and deinking”. *Progress in Paper Recycling*, 22(4), 2013, pp. 7–16.
57. Ярыгин Г. В. Машины и аппараты целлюлозно-бумажной промышленности. — СПб.: Химиздат, 2005. — 384 с.
58. Механическая и химическая очистка 1. Scott, W. E. *Principles of Wet End Chemistry*. — Atlanta: TAPPI Press, 2004. — 270 p.
59. Цветков В. Г. Очистка и сортирование волокнистых масс. — Петрозаводск: ПетрГУ, 2010. — 196 с.
60. Douek M., Carré B., Galland G. (2002). Sticky control in paper recycling. *Progress in Paper Recycling*, 12(1), 42–52.
61. Hubbe M. A., Nazhad M., Paice M. (2007). What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? A review. *Bioresources*, 2(4), 739–788.
62. Voith (каталог оборудования). BlueLine: Pulper Systems. (Доступно на сайте Voith).
63. ANDRITZ (каталог). HydraPulper Systems for waste paper. (официальный сайт ANDRITZ).
64. Kereke R. J. (2005). Characterization of pressure screening. *Tappi Journal*, 4(11), 3–8.

65. Ombye C., Venkatesh, V. (2010). Analysis of screening efficiency in paper recycling lines. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 25(2), 220–227.
66. Dorris G. M., Allen, L. H., Blache J. (2009). Enhancing the removal of stickies by cleaning devices. *Pulp & Paper Canada*, 110(6), 27–34.
67. Bajpai P. (2022). *Innovation in Pulp and Paper Manufacturing and Its Impact on the Environment*. Springer.
68. Nanko H., Button, J., Hillman, D. (2005). The microstructure of stickies. *Progress in Paper Recycling*, 14(3), 28–35.
69. Stockmann U. et al. (2017). Foam fractionation as a deinking process: A pilot study. *Separation and Purification Technology*, 187, 137–143.
70. Hubbe M. A., Venditti R. A., Rojas, O. (2020). What is “green” about papermaking. A review. *Bioresources*, 15(3), 4633–4790.
71. Gutiérrez A., Rojas O. (2021). Advances in enzymatic removal of adhesives from recycled paper. *Bioresources*, 16(2), 3203–3218.
72. Heise K., Wagner J. (2015). Enzymatic reduction of stickies in a deinking plant: Industrial case study. *Tappi Journal*, 14(5), 335–343.
73. Hubbe M. A., Gill R. A., Venditti R. A. (2013). Flotation technology in deinking. *Bioresources*, 8(3), 3450–3522.
74. Li A., Tabil L. G., Panigrahi S. (2007). De-inking sludge and its applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(4), 770–781.
75. Singh S., Chandra R. (2019). Enzymatic deinking of waste paper: A review. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100247.
76. Ombye C., Venkatesh V. (2010). Analysis of screening efficiency in paper recycling lines. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 25(2), 220–227.
77. Dorris G. M., Allen L. H., Blache J. (2009). Enhancing the removal of stickies by cleaning devices. *Pulp & Paper Canada*, 110(6), 27–34.
78. Miranda R., Monte M. C., Blanco A. (2013). Environmental impact of pulp and paper mill wastes on land application. *Applied Environmental Biotechnology*, 2(2), 11–22.

79. Tsai W. T. (2013). Current status and development policies on circular economy and waste management in Taiwan: The case of paper deinking sludge reuse. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 744–748.
80. Monte M. C., Fuente E., Blanco A., Negro, C. (2009). Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management*, 29(1), 293–308.
81. Hubbe M. A., Venditti R. A., Rojas, O. J. (2020). What is “green” about papermaking? A review. *Bioresources*, 15(3), 4633–4790.
82. Miranda R., Blanco A., Negro C. (2015). Sludge from the treatment of paper mill wastewater: A review. *Water Research*, 65, 324–336.
83. Патент РФ № 2664125. Способ обезвреживания липких включений в макулатурной массе.
84. GL&V (каталог). *Cleaning & Screening Solutions for Pulp and Paper*. (Официальный сайт GL&V).
85. Jokinen H. et al. (2016). Recovering valuable fibers from paper mill sludge. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 31(2), 262–269.
86. Morone P., Papendiek F., Tartiu V. E. (2017). Food waste reduction and valorisation: Sustainability assessment of different biowaste management pathways. Palgrave Macmillan. (Обобщение по управлению органическими отходами, в т.ч. в ЦБП).
87. Hubbe M. A., Nazhad M., Paice M. (2007). What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling. A review. *Bioresources*, 2(4), 739–788.
88. Pera J., Coutaz L., Ambroise J., Chababbet M. (1997). Use of paper sludge in construction materials. *Waste Management*, 17(4), 217–223.
89. Игошина Н. Н., Кудрявцева А. В. (2018). Использование отходов ЦБП в производстве строительных материалов. *Целлюлоза. Бумага. Картон*, 4, 15–22.
90. Bajpai P. (2016). *Anaerobic Technology in Pulp and Paper Industry*. Springer.
91. Mahmoud, N., Zeeman, G., Gijzen, H., Lettinga, G. (2003). Solids removal in upflow anaerobic reactors. *Bioresource Technology*, 90(1), 1–7.
92. Monte M. C. et al. (2011). Dewatered paper sludge for agricultural use. *Industrial Crops and Products*, 34(2), 1177–1186.

93. Ruiz J. A., Juárez M. C., Morales M. P., Muñoz P., Mendivil M. A. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174–183.

94. Балугев М. А., Лисицкий В. А., Толстогузов О. В. Пиролизные установки для утилизации отходов целлюлозно-бумажной промышленности. *Известия вузов. Лесной журнал*, 5, 22–30.

95. Nasser M. S., James A. E. (2006). Utilization of wastepaper sludge in fiber-cement composite materials. *Colloids and Surfaces A*, 289(1–3), 177–184.

96. Li A., Tabil L. G., Panigrahi S. (2007). De-inking sludge and its applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(4), 770–781.

97. Gutiérrez D., Renaud M., Van Damme H. (2012). Mineral pigment recovery from paper deinking sludge. *Journal of Cleaner Production*, 31, 45–54.

98. Патент РФ № 2648472. Способ выделения пигментных остатков из отходов обезчернения макулатуры.

99. Anastasiadou K. et al. (2013). Composite building materials from paper deinking sludge and fly ash. *Construction and Building Materials*, 47, 1201–1209.

100. Douek M., Carré B., Galland G. (2002). Sticky control in paper recycling. *Progress in Paper Recycling*, 12(1), 42–52.

101. Hubert J.C. (2011). Processes for removing plastic contaminants from recycled paper pulp. *TAPPI Journal*, 10(4), 7–14. 3. Gutiérrez, A., Rojas, O. (2021). Advances in enzymatic removal of adhesives from recycled paper. *Bioresources*, 16(2), 3203–3218.

102. Ragaert K., Delva L., Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58.

103. Патент РФ № 2654015. Способ приготовления твердого топлива из отходов бумажно-картонного производства.

104. Arena U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management*, 32(4), 625–639.

105. Mahmoud N., Zeeman G., Gijzen H., Lettinga G. (2003). Solids removal in upflow anaerobic reactors. *Bioresource Technology*, 90(1), 1–7.

106. Monte M. C. et al. (2011). Dewatered paper sludge for agricultural use. *Industrial Crops and Products*, 34(2), 1177–1186.
107. Абдурахманова Г. И., Волкова П. В. (2016). Исследование возможности компостирования целлюлозных отходов с органическими добавками. *Вестник Казанского технологического университета*, 19(7), 64–68.
108. Gutiérrez A., Rojas O. (2021). Advances in enzymatic removal of adhesives from recycled paper. *Bioresources*, 16(2), 3203–3218.
109. Singh S., Chandra R. (2019). Enzymatic deinking of waste paper: A review. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100247.
110. ГОСТ 13523-78. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод кондиционирования образцов.
111. ГОСТ 14363.4-89. Целлюлоза. Метод подготовки проб к физико-механическим испытаниям. Введен 01.01.91.
112. ГОСТ 13199-88. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения массы продукции площадью 1 м<sup>2</sup>.
113. Чавчадзе Е.С. Атлас древесины и волокон для бумаги [Текст] / Е.С. Чавчадзе [и др.] – М.: Ключ, 1992. – 336 с.
114. Лабораторное оборудование для испытания целлюлозы, бумаги и картона. Фирма FRANK-PTI, 2009-2010. -224 с.
115. Анализатор волокна для промышленных предприятий «Kajaani FS 300». Компания «Metso automation», 2007. -4 с.
116. Приборы для контроля качества целлюлозы, бумаги и картона. Каталог. Фирма «Сигма Микрон». СПб., 2007. -34 с.
117. Калинина Э.В. Оптимизация качества. Сложные продукты и процессы [Текст]/ Э.В. Калинина, А.Г. Лапига, В.В. Поляков и др. – М.: Химия, 1989. – 256 с.
118. Комаров В.И., Ленюк Н.А. Статистические методы контроля и управления качеством на предприятиях ЦБП: Учебное пособие [Текст] / – Л.: ЛТА, 1987. – 76 с.

119. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике. М.: Госстандарт России, 2002. -50 с.
120. ГОСТ 14363.4-89. Целлюлоза. Метод подготовки проб к физико-механическим испытаниям. М.: Госстандарт СССР, 1989. -14 с.
121. Дубовый В.К. Лабораторный практикум по технологии бумаги и картона/В.К. Дубовый, А.В. Гурьев, Я.В. Казаков, В.И. Комаров, Г.Н. Коновалова, А.С. Смолин, В.В. Хованский. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. -230 с.
122. ПНД Ф 14.1;2.110-97. Методика выполнения измерений содержаний взвешенных веществ и общего содержания примесей в пробах природных и очищенных сточных вод. –М.: -1997. -20 с.
123. ГОСТ 6722-75 Картон фильтровальный технический. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 2006. - 6 с.
124. ГОСТ 12602-93 Бумага и картон. Определение капиллярной впитываемости. Метод Клемма/Межгосударственный стандарт. -Минск,
125. ГОСТ 13523-78. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод кондиционирования образцов. М.: Госстандарт России, 1999. -4 с.
126. ГОСТ 16932-93. Целлюлоза. Определение содержания сухого вещества. М.: Госстандарт России, 1995. -8 с.
127. ГОСТ 27015-86 Бумага и картон. Методы определения толщины, плотности и удельного объема. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. - 4 с.
128. ГОСТ 13525.1-79 Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Методы определения прочности на разрыв и удлинения при растяжении. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2007. - 5 с.
129. ГОСТ 13525.8-86 Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения сопротивления продавливанию. - М.: Стандартиформ, 2007.- 6 с.
130. ГОСТ 10711-97. Бумага и картон. Метод определения разрушающего усилия при сжатии кольца (RCT) / Межгосударственный стандарт. - Минск, 2003. – 8 с.

131. ГОСТ 20682-75 Бумага для гофрирования. Метод определения сопротивления плоскостному сжатию гофрированного образца (СМТ). - М.: Изд-во стандартов, 1989. - 6 с.

132. ГОСТ 28686-90. Бумага для гофрирования. Метод определения сопротивления торцовому сжатию (ССТ) гофрированного образца. - М.: Изд-во стандартов, 1989. - 6 с.

133. ГОСТ 7933-89. Картон для потребительской тары. Общие технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1990. - 10 с.

134. ГОСТ 12605-97 Бумага и картон. Метод определения поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба) / Межгосударственный стандарт. - Минск, 2001. - 8 с.

135. Цаплина С.А. Методы математического моделирования: учебное пособие. - Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2007. - 88 с.

136. Пен Р.З. Планирование эксперимента в Statgraphics. [Текст] / Пен Р.З. – Красноярск: СибГГТУ. – Кларетианум, 2003. – 246 с.

137. Шерышев М. А. Технология переработки полимеров: изделия из полимерных листов и пленок: учебник для вузов / М. А. Шерышев. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: Издательство Юрайт, 2025. — 644 с.

138. Зайцев А.В. Исследование количества и качества отходов макулатуры в производстве тарного картона/Зайцев А.В., Дубовый В.К., Симонова Е.И., Ковернинский И.Н.//Химия растительного сырья. 2025. №2. С. 383-390.

139. Зайцев А.В. Разработка технологии полимерпесчаных плит на основе отходов макулатуры марки МС-5Б/Зайцев А.В., Дубовый В.К., Симонова Е.И., Ковернинский И.Н., Кейзер П.М.//Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып.250. С.383-392.

140. Зайцев А.В. Исследование качества полимерпесчаных плит с использованием отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б как эффективного связующего/А.В. Зайцев, В.К. Дубовый, И.Н. Ковернинский, Е.И. Симонова//Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып.255. С.428-442.

141. Зайцев А.В. Исследование компонентного состава отходов переработки макулатуры МС-5Б в волокнистую массу/Дубовый В.К.// Леса России: политика, промышленность, наука, образование. IX Всероссийская научно-техническая конференция, 22-24 мая 2024 г. СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, 2024. С.369-372.

142. Зайцев А.В. Разработка технологии полимерпесчаных плит на основе отходов макулатурного производства/А.В. Зайцев, В.К. Дубовый// Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективы решения. V Международная научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов ЦБП, 13 – 14 ноября 2023 г. ВШТЭ СПбГУПТД, Санкт-Петербург.

143. Зайцев А.В. Исследование влияния компонентного состава полимерпесчаных плит с использованием в качестве связующего отходов макулатуры Мс-5Б и МС-6Б на их физико-механические свойства/А.В. Зайцев, В.К. Дубовый Е.И. Симонова И.Н. Ковернинский//Леса России: политика, промышленность, наука, образование. IX Всероссийская научно-техническая конференция 21-23 мая 2025 г. СПбГТУ им. С.М.Кирова, Санкт-Петербург, 20-25. С.292-295.

144. Зайцев А.В. Получение высоконаполненных композитных материалов с полимерной матричной системой на основе макулатуры и минеральных наполнителей/А.В. Зайцев, В.К. Дубовый// Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: матер. 1X науч.-техн. конф. им. проф. В.И. Комарова. 11-12.09.2025. Архангельск. С.102-108.

145. Зайцев А.В. переработка твердых отходов от макулатурной массы /Зайцев, А.В.//Макулатура и целлюлоза: ресурсы, наука, техника, производство, продукты, экология, перспективы: матер. Всеросс. науч.-техн. конф. Караваево, Московская обл. 30-31.05.2024.

146. Зайцев А.В. Исследование влияния компонентного состава полимерпесчаных плит с использованием в качестве связующего отходов макулатуры МС-5Б и МС-6Б на их физико-механические свойства/А.В. Зайцев, В.К. Дубовый// Материалы Всероссийской научно-технической конференции

«Экологические и экономические проблемы ЦБП России и пути их решения в современных условиях» 29 .05.2025

147. Зайцев А.В. Разработка технологии получения полимерпесчаных плит на основе отходов макулатурного производства/А.В. Зайцев, В.К. Дубовый// Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективы решения VII Международной научно-технической конференции ученых и специалистов ЦБП, 24-25 ноября 2025, Санкт-Петербург, С 41-45.



	тальный универсальный	г.Курск	Число оборотов двигателя- 970 об/мин Тип — Лопастной Двухвальный; Непрерывного действия; Максимальная насыпная плотность смешиваемого состава — 1,6 т/м <sup>3</sup> ; Выгрузка шнековым транспортером; Диаметр шнека — 133 мм; Мощность двигателя выгрузного шнека - 1,5кВт; Наличие частотного преобразователя для регулировки числа оборотов в минуту.		
4	Аппарат плавления - нагревательный (двухшнековый)	АПН г.Орск	Производительность: до 600 кг/час Габариты: 4300 x 1300 x 1470 мм; масса — не более 1800 кг; Количество нагревательных элементов: 10 по 4 кВт каждый; Характеристика силовой установки (основной): N двигателя-10,5 кВт; n оборотов двигателя- 1000 об/мин; Напряжение питания -380 В; ток переменный 50 Гц Оснащен частотным преобразователем. Характеристика силовой установки (вспомогательной): N двигателя-5,5 кВт; n оборотов двигателя- 1000 об/мин; Напряжение питания -380 В; Частота вращения шнека: 16,5 об/мин Количество зон нагрева: 4 шт		
5	Пресс гидравлический	ДГ 2432 г. Оренбург	Номинальное усилие пресс,кН(тс) -1600 (160т); Наибольший ход штока (ползуна),мм — 630 ; Наибольшее расстояние между столом и ползуном-открытая высота прессы,мм-1000; Размеры стола, мм -800 x 710; Скорость холостого хода ползуна вверх/вниз, мм/сек -70/200; Номинальное усилие нижнего выталкивателя вверх,кН -315 (31,5т); Ход нижнего выталкивателя,мм -250; Скорость рабочего хода выталкивателя (при ходе вверх),мм/сек -200; Скорость возвратного хода выталкивателя (при ходе вниз),мм/сек -70; Максимальная выдержка под		

			<p>давлением,с (мин)-1...1000 (16); Температура нагрева прессформ,К — 375...523; Точность поддержания заданной температуры нагрева прессформ,К <math>\pm</math> 0,4; Цикл работы пресса — полуавтомат; Электродвигатель насоса гидростанции: N двигателя-7,5 кВт; n оборотов двигателя- об/мин; Габариты пресса (длина, ширина, высота),мм: 2200 x 1320 x 3800; Масса станка, кг - 5750</p>		
--	--	--	---	--	--

**Акт испытания и введения в эксплуатацию установки****АКТ**

испытания и введения в эксплуатацию установки переработки отходов  
макулатуры МС-5Б и МС-6Б в полимерпесчаные плиты

Мы, нижеподписавшиеся, Зайцев А.В. - аспирант СПбГУПТД ВШЭ, Юнаковский В.В.- главный механик, Власов А.В. - начальник бумажного цеха, составили настоящий акт в том, что в ОАО «Каравеево» создана, производственная установка для выпуска опытно-промышленных партий полимерпесчаных плит из отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б.

Производительность установки – до 160м<sup>2</sup> качественных полимерпесчаных плит в сутки, размером 330х330х35мм (с учетом объемных пустот). В настоящее время технология и установка внедрена в ОАО «Каравеево». Она используется по мере накопления определенных партий отходов макулатуры. С учетом физического состояния, органоминерального состава и влажности сырья, общий технологический процесс его переработки в полимерпесчаные плиты состоит из следующих технологических процессов и оборудования:

Технологические процессы:

- а) обезвоживание сырья до 25% влажности;
- б) измельчение сырья до размеров 10-12 мм;
- в) составление композиции и смешение компонентов с получением органоминеральной композиции;
- г) термообработка композиции с получением однородной прессовочной массы;

д) прессование массы в изделия;

е) упаковка и складирование.

Оборудование:

*Процесс обезвоживания сырья* - предназначен для снижения влажности макулатурных отходов до 25. Для обезвоживания используется пресс обезвоживающий – «а».

*Процесс измельчения сырья* – предназначен для получения фракции измельченного сырья 10-12 мм. Применяется дробилка для полимеров – «б».

*Составление композиции и смешение компонентов для прессовочной массы.* Применяется смеситель компонентов – «в».

*Термическая обработка композиции в прессовочную массу.* Применяется аппарат плавления-нагревательный-плавиный (АПН) – «д»

*Прессование плитных изделий из прессовочной массы.* Применяется гидравлический вертикальный пресс с максимальным давлением 160 т – «г».



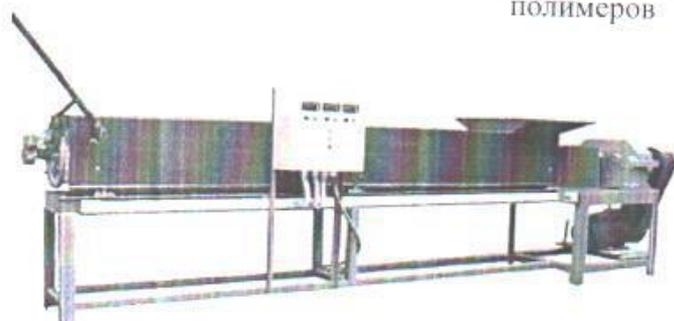
а) пресс отжимной



б) дробилка для полимеров



в) смеситель компонентов



г) аппарат плавилисьно-нагревальнй (АПН)

д) пресс  
вертикальный

Установка испытана в двух вариантах – производство полимерпесчаных плит со 100% отходов макулатуры:

- содержание компонентов– синтетические полимеры (70%), макулатурное волокно (23%), другие компоненты (7%)
- производство полимерпесчаных плит с добавлением карьерного просеянного песка. Были исследованы композиции макулатурных отходов и песка в следующих соотношениях, %: 50/50 и 60/40;

В результате испытаний при использовании в композиции 40-50% песка получены плиты, отличающиеся высокой прочностью и технологичностью производства.

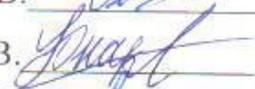
Заключение:

Установка позволяет эффективно перерабатывать отходы макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б производства тароупаковочных видов бумаги и картона в высококачественные полимерпесчаные плиты и рекомендуется к введению в эксплуатацию в бумажном цехе ОАО «Каравеево».

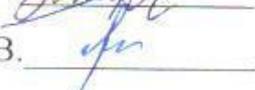
Аспирант СПбГУПТД ВШТЭ

Зайцев А.В. 

Главный механик

Юнаковский В.В. 

Начальник бумажного цеха

Власов А.В. 

## Технические условия. Плиты полимерпесчаные



УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «Каравеево»

/Л.Ю.Эрстенюк/

«22» 02 2025 г.

**ПЛИТЫ ПОЛИМЕРПЕСЧАНЫЕ**

Технические условия

ТУ 23.99.19-001-05015609-2025

Вводится впервые

Дата введения в действие: 22.02.2025 г.

РАЗРАБОТАНО ООО «КАРАВАЕВО»

Главный технолог

/Дубровина Т.В./

«22» 02 2025 г.

Каравеево - 2025 г.

## 1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1. Настоящие Технические условия (ТУ) распространяются на плиты полимерпесчаные (далее – плиты), изготавливаемые методом горячего прессования из сырья на основе термопластичных полимеров (вторичного сырья) и кварцевого песка с применением красителей.

1.2. Плиты предназначены для устройства покрытий пешеходных зон, тротуаров, площадок, территорий дворов, садово-парковых дорожек (Тип плит «Т» - Тротуарные).

1.3. ТУ устанавливают технические требования к плитам, правила приемки, методы контроля, транспортирования и хранения, гарантии изготовителя.

## 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

### 2.1. Общие требования

Плиты должны изготавливаться в соответствии с требованиями настоящих ТУ по технологическому регламенту, утвержденному в установленном порядке ОАО «Караваяево».

### 2.2. Требования к внешнему виду

2.2.1. Лицевая поверхность должна быть однородной по цвету, без резких переходов. Допускаются незначительные цветовые отклонения, не образующие пятен.

2.2.2. Не допускаются: сквозные трещины, сколы на лицевой поверхности глубиной более 1 мм и длиной более 5 мм, раковины диаметром более 3 мм и глубиной более 1,5 мм.

2.2.3. Допускается не более одного включения посторонней частицы размером до 2 мм на 1 дм<sup>2</sup> поверхности.

### 2.3. Требования к сырью и материалам

2.3.1. Полимерное сырье: Вторичные термопластичные полимеры (полиэтилен, полипропилен и др.).

2.3.2. Песок: карьерный просеянный, фракцией не более 2,0 мм, влажностью не более 5%, без глинистых и органических примесей.

2.3.3. Все сырье должно иметь документы, подтверждающие его качество и безопасность.

### 2.4. Физико-механические показатели

2.4.1. Плиты должны соответствовать нормам, указанным в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические показатели плит

№ п/п	Наименование показателя	Норма показателя	Метод испытания,
1	Внешний вид	Квадратные, прямоугольные	Визуально
2	Габоритные размеры, мм	330x330x35 с учетом объемных пустот	Измерительные инструменты
3	Толщина плитки, мм	20	Измерительные инструменты
4	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1600-2200	ГОСТ 15139
5	Истираемость, г/см <sup>2</sup> , не более	0,1	ГОСТ 13087
6	Водопоглощение, %, не более	2,0	ГОСТ 4650-2014
7	Предел прочности при статическом изгибе, МПа, не менее	7,5	ГОСТ 10635-1988
8	Предел прочности при динамическом изгибе (ударная вязкость), кДж/м <sup>2</sup> , не менее	3.3	ГОСТ 4647-2015

### 3. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

3.1. Плиты должны быть изготовлены из материалов, санитарно-эпидемиологическая безопасность которых подтверждена заключением Роспотребнадзора.

3.2. Содержание тяжелых металлов и токсичных веществ в готовых плитах не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных гигиеническими нормативами.

### 4. ТРЕБОВАНИЯ К МАРКИРОВКЕ И УПАКОВКЕ

4.1. Каждая транспортная упаковка (поддон) должна иметь маркировку, содержащую:

- 4.1.1. Наименование и адрес изготовителя (ООО «Каравачево»).
- 4.1.2. Наименование продукции и тип.
- 4.1.3. Количество плит в штуках и квадратных метрах.
- 4.1.4. Номер партии и дату изготовления.
- 4.1.5. Обозначение настоящих ТУ.

4.2. Плиты должны упаковываться на поддоны и обвязываться стрейч-пленкой или термоусадочной пленкой, обеспечивающей сохранность при транспортировке.

## 5. ПРАВИЛА ПРИЕМКИ

5.1. Плиты принимают партиями. Партией считают количество плит одного типа, цвета и размера, изготовленных по одной технологии в течение одной смены и оформленных одним документом о качестве.

5.2. Для контроля качества от партии делают случайную выборку 10 плит для проверки внешнего вида и геометрии, и 3 плиты – для проведения лабораторных испытаний.

5.3. При неудовлетворительных результатах хотя бы по одному показателю проводят повторные испытания по удвоенной выборке. Результаты повторных испытаний являются окончательными.

## 6. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

6.1. Внешний вид и геометрические размеры контролируют визуально и с помощью измерительного инструмента (штангенциркуль, металлическая линейка, угольник).

6.2. Физико-механические показатели определяют по методам, ссылки на которые даны в таблице 1 настоящих ТУ.

## 7. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ

7.1. Плиты транспортируют всеми видами транспорта в соответствии с правилами перевозки грузов.

7.2. При погрузке, разгрузке и складировании необходимо исключать удары и падения поддонов.

7.3. Хранить плиты следует в крытых складских помещениях или под навесом, на ровной поверхности, в штабелях высотой не более 5 поддонов. Складирование под открытым небом без защиты от прямых солнечных лучей более 3 месяцев не рекомендуется.

## 8. ГАРАНТИИ ИЗГОТОВИТЕЛЯ

8.1. Изготовитель гарантирует соответствие плит требованиям настоящих ТУ при соблюдении условий транспортирования, хранения и монтажа.

8.2. Гарантийный срок эксплуатации плит (тротуарных) – 10 лет с даты изготовления.

## Акт внедрения в производство результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ:  
 Директор ОАО «Каравеево»  
 Эрстеник Л.Ю.  
 18 февраля 2025 г.



### АКТ

#### внедрения в производство результатов диссертационной работы «СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ МАКУЛАТУРЫ МС-5Б И МС-6Б ПРОИЗВОДСТВА ТАРОУПАКОВОЧНЫХ ВИДОВ БУМАГИ И КАРТОНА»

Мы, нижеподписавшиеся, Зайцев Артем Валерьевич – аспирант СПбГУПТД ВШЭ, Дубровина Татьяна Владимировна – главный технолог ОАО «Каравеево», составили настоящий акт в том, что по результатам экспериментальных исследований, содержащихся в диссертации Зайцева А.В., автором разработана технология и производственная установка выпуска опытно-промышленных партий полимерпесчаных плит из отходов макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б. Работоспособность установки и эффективность технологии подтверждена в процессе производства опытно-промышленных партий плит из отходов макулатуры.

Производительность установки – до 160 м<sup>2</sup> (5 т) качественных полимерпесчаных плит в сутки, размером 330х330х35 мм. В настоящее время технология и установка внедрена в ОАО «Каравеево».

Исходя из производительности установленной БДМ 60 т в сутки, образуется отходов макулатуры в среднем 58 кг на 1 т бумаги, что составляет 3,5 т в сутки в пересчете на сухие отходы, что составляет более 1200 т в год. В пересчете на количество плит – это около 56000 м<sup>2</sup> плит.

Цена реализации полимерпесчаных плит составляет 500 руб. за 1 м<sup>2</sup>. Годовая выручка составит – 500х56000=28 млн. руб. в год. При рентабельности производства 50% экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы при постоянной переработке отходов составит 14 млн. руб. в год.

Аспирант СПбГУПТД ВШЭ

Зайцев А.В. 

Главный технолог ОАО "Каравеево" Дубровина Т.В. 