

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

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

Научный руководитель: **Дубовый Владимир Климентьевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры бумаги и картона ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Официальные оппоненты: **Вураско Алеся Валерьевна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Иванов Даниил Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии химической переработки биомассы дерева ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва»

Защита диссертации состоится «21» мая 2026 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.385.02 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4, зал заседаний Ученого совета А-233.

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

Отзывы на автореферат в 2 экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д.4. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты, наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п.28 Положения о присуждении ученых степеней).

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор

Махотина Людмила Герцевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. 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 (ЦБП). Одной из основных технологических проблем при переработке макулатуры является наличие большого количества посторонних включений различной природы, подлежащих максимально возможному удалению при производстве качественной макулатурной массы. Ежегодное количество перерабатываемой макулатуры в России составляет более 4,5 млн. тонн. 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 «Караваево». На суточную производительность 60 тонн флютинга и тест-лайнера в гидроразбивателе образуется до 2,5 тонн, а в очистителях и сортировках еще до 1 тонны отходов, суммарно, более 3,5 тонн, в пересчете на сухие отходы. Эта масса отходов, предварительно обезвоженная свободным отеканием воды до 60-65% влажности, примерно 10 тонн в сутки, отправляется на полигон для захоронения. Такой вид утилизации отходов обуславливает существенные финансовые потери. Ужесточение экологических требований и риски закрытия полигонов актуализировали проблему рациональной переработки отходов макулатуры у источника образования. Существенное 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 – это С.Н. Иванов, Д.М. Фляте, А.С. Смолин, В.И. Комаров, Д.А. Дулькин, Дж. Кларк, L. Gottsching, H. Pakarinen и другие.

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 неволоконистых 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 - 10-12 мм), соотношение «песок /сырье» - 40-50/60-50 %, температурные зоны нагрева – 170 °С, 180 °С, зоны плавления - 210, 220 °С, температура прессования - 205 °С, удельное давление прессования, МПа (26,4), время прессования - 2 мин.

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/м²; $G = 1,5$ %; $E = 0,09$ г/см², 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 экспериментальные 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 переработке 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 около 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, макулатурное волокно, 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 «Каравaeво». Экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы при постоянной переработке отходов составит более 14 млн. руб. в год.

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: VII Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП 24-25.11.2025г. СПбГУПТД, Санкт-Петербург (стендовый доклад); IX Всероссийской научно-технической конференция «Леса России: политика, промышленность. наука, образование» 22-24.05.2024 г. СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург; Всероссийской научно-технической конференции «Макулатура и целлюлоза: ресурсы, наука, техника, производство, продукты. экология, перспективы» 30-31.05.2024, ОАО «Каравaeво», д. Каравaeво, Московская обл.; X Всероссийской научно-технической конференции «Леса России: политика, промышленность, наука, образование» 21-23.05.2025 г. СПбГЛТУ 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. ОАО «Каравaeво». д. Каравaeво. Московская обл.; IX научно-технической конференции памяти В.И. Комарова «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов» 11-12.09.2025. САФУ, Архангельск; VII Международной научно-технической конференции ученых и специалистов ЦБП «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективы решения» 24-25.11.2025, СПбГУПТД, Санкт-Петербург.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 трудах автора с соавторами, в том числе, 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Содержание работы изложено на 145 страницах машинописного текста, включающих 26 рисунка и 14 таблиц, и 147 наименований используемых источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи, научная новизна диссертации, обозначена теоретическая и практическая значимость, даны положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен углубленный анализ первоисточников по проблеме переработки макулатуры и связанных с этой технологией образованием, утилизацией и переработкой отходов. Дана критическая оценка зависимости ресурсов отходов от качества макулатуры МС-5Б и МС-6Б, направлений и технологий полезного использования отходов.

Во второй главе определены объекты исследования – отходы макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б, образующиеся в процессах получения из нее кондиционного волокна для производства флютинга и тест-лайнера. В отличие от целевого продукта – целлюлозного волокна, отходы на 77% представлены неволокнистыми материалами. Предметом исследования были технологические факторы и процессы переработки отходов и полимерпесчаные плиты, как целевые продукты. Приведены методики и методы экспериментов и анализов.

В третьей главе изложены результаты решения поставленных задач для достижения цели диссертации, относящиеся к лабораторному и опытно-промышленному исследованию. Обобщение научных данных, практических результатов 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 разделе 3.1. представлены результаты исследования количества и качества отходов при переработке макулатуры марок МС-5Б и МС-6Б. В промышленных условиях ОАО «Каравеево» исследовались отходы от гидроразбивателя, оборудования сортирования и очистки макулатуры. Исследование отчетных данных работы бумажной фабрики за период 2018-2024 г.г, позволило определить количество сдаваемых отходов на полигон и затраты на этот способ утилизации. Данные представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Количество 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 тонн макулатурных отходов в год. Представленные результаты исследования свидетельствуют о том, что цена утилизации отходов из года в год увеличивается и в 2024 году она составила 2460 руб. за 1 тонну, а годовой расход денежных средств - 8,57 млн. руб. В 2025 г количество отходов переработки макулатуры составило около 10 тонн в сутки, влажностью 60-65%, которые сдаются на полигон. Внешний вид отходов, как сумма гетерогенных компонентов по химической природе и размерам, показан на Рисунке 1, в 4-х ракурсах при различном увеличении.



Рисунок 1 - Фотографии отходов с различного ракурса и увеличения

Как видно на фотографиях, отходы — это хорошо отмытые водой смеси с преобладающим содержанием полимерной пленки, мелкого макулатурного волокна, минеральных частиц, металлических включений, щепок древесины и других компонентов.

Для оценки технически осуществимой и экономически целесообразной технологии переработки отходов, наряду с количеством, важна характеристика видового состава отходов. Эта задача решалась разделением сложной смеси отходов на фракции по видам компонентов и их анализ. Главным результатом исследования является установленное массовое содержание основных компонентов, %: синтетические полимеры (СП) - 70, волокно макулатурное (ВМ) – 23; другие компоненты (ДК) – 7, в сумме - 100%. На Рисунке 2, показано распределение компонентов в отходах для абсолютно сухой пробы.

Полимеры при высокой температуре могут и выполняют функцию высокоэффективного связующего, а волокно и минералы – химически активный наполнитель. Химическое происхождение и высокое содержание связующих и наполняющих компонентов, предопределяет технологический принцип возможной переработки отходов – термопрессовочные композиции и на их основе прессованные изделия.

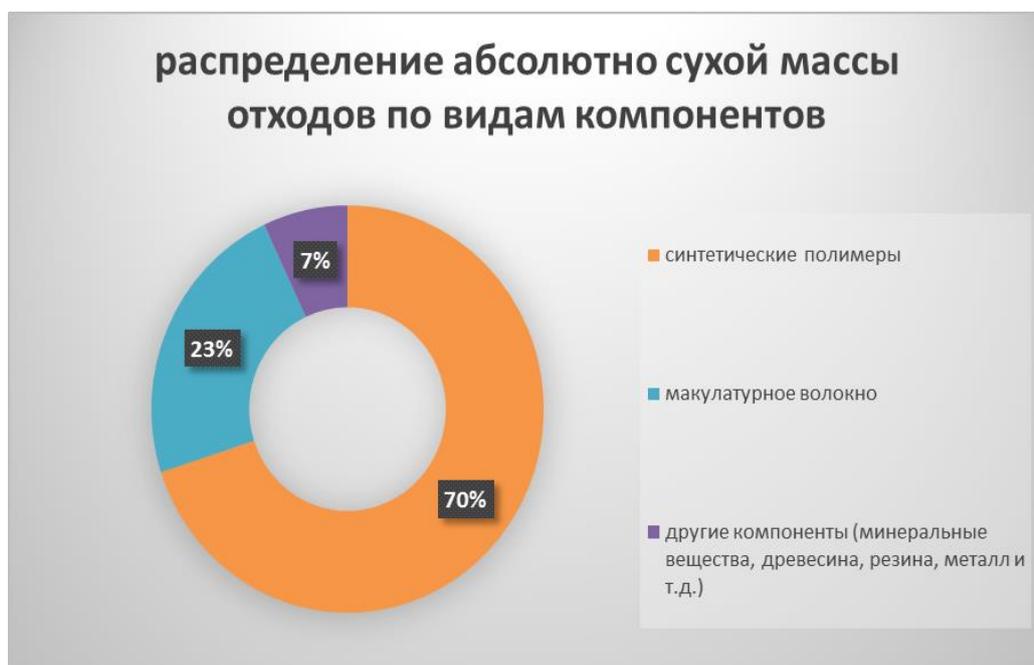


Рисунок 2 - Распределение массы отходов по видам компонентов

Исходя из перспективы применения отходов в изделиях бытового назначения, было исследовано наличие опасных веществ – тяжелых металлов (Pb, Bi, Cd) и фторидов. Результаты исследования представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Данные исследования наличия тяжелых металлов и фторидов в пробе макулатуры

№ п/п	Последовательность воздействия	Длительность воздействия	Результат
1	Подготовка проб отходов макулатуры	-	10 параллельных проб (образцы)
2	Вымачивание в дистиллированной воде	24 часа	Набухание волокна
3	Проба с HCl и HJ на свинец (Pb ²⁺)	Текущее время	Отрицательный
4	Проба с NaOH и H ₂ S на кадмий (Cd ²⁺)	Текущее время	Отрицательный
5	Проба с NaOH на висмут [BiCl ₆] ³⁻	Текущее время	Отрицательный
6	Проба с AgNO ₃ на галоген-ионы	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

По результатам исследования, выдержанные в дистиллированной воде пробы отходов макулатуры, не содержат тяжелые металлы и фториды. Отходы экологически безопасны в отношении наличия тяжелых металлов и фторидов.

Присутствующие в макулатурных отходах компоненты очень неоднородны. С целью установления элементного химического состава неволокнистых макулатурных отходов, были проведены исследования методом электронной сканирующей микроскопии.

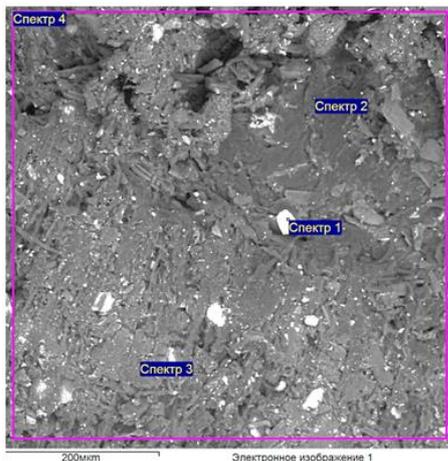


Рисунок 3 – Микрофотография образцов неволокнистых включений отходов: выделены области, для которых определены спектры элементного состава

На Рисунке 3 представлена микрофотография одной из многочисленных проб неволокнистых включений и выделены области, для которых определены спектры элементного химического состава.

В Таблице 3 представлены выявленные химические элементы состава отходов. Результаты исследования, свидетельствуют о том, что состав макулатурных отходов представляет собой широкий спектр химических элементов. Отсутствие повторения массовой доли химических элементов является важной характеристикой отходов.

Это аргументированное подтверждение, что массовая доля органических и минеральных частиц, составляющих отходы макулатуры, меняется от партии к партии, однако, в среднем, за период исследования, минеральный состав частиц близок к постоянству присутствующих химических элементов.

Таблица 3 – Массовое содержание химических элементов макулатурных отходов

Спектр элементов	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
Массовая доля, %												
Спектр 1	70,04	26,03			0,17	0,95		0,30	0,15	0,42	0,12	1,82
Спектр 2	70,28	20,89			0,27	2,52		1,19	0,20	1,73	0,25	2,67
Спектр 3	69,3	24,59	0,18	0,10	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

Таким образом, проведенные исследования подтвердили определенную стабильность химического состава неволокнистых макулатурных отходов, следовательно, может быть обеспечено ожидаемое качество изделий в термопрессовочной технологии.

В разделе 3.2. на основании вышеизложенных результатов исследования обоснована концепция технологии и опытно-промышленной линии для переработки отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты. Макулатурные отходы, представляющие из себя гетерогенную органоминеральную композицию, которые образуются в процессе очистки макулатурной массы, могут быть переработаны по термопрессовочной технологии в полимерпесчаные плиты. Технология включает следующие этапы: сбор и подготовка отходов (обезвоживание до 25% влажности, измельчение до размеров 10-12 мм, смешение компонентов с получением органоминеральной композиции), формование и прессование (термообработка композиции с получением однородной массы, прессование массы в изделие и упаковка).

В разделе 3.3. представлено обоснование и исследование технологических процессов переработки отходов макулатуры в полимерпесчаные плиты, а так же выбор оборудования производственной линии. Исследования позволили определиться с основными процессами и оборудованием термопрессовочной технологии, в которой группе отходов синтетических полимеров отводится роль высокоэффективного связующего. Исходя из физического состояния, органоминерального состава и влажности отходов (сырья), общий технологический процесс переработки в полимерпесчаные плиты представляется следующей последовательностью технологических процессов:

а) обезвоживание сырья до 60-65% свободным отеканием и 25 %, после пресса;

б) измельчение сырья в дробильной машине роторного типа до фракции 10-12 мм;

в) смешение компонентов в смесителе с получением однородной органоминеральной композиции;

г) термообработка в аппарате плавно-нагревательном, имеющем 4 температурные зоны – 170, 180 и 210, 220 °С, с получением прессовочной массы; температурные зоны выбраны, исходя из физико-химических свойств компонентов сырья; основной компонент – смесь различных синтетических полимеров - 70% с интервалом температуры плавления 120–170 °С; второй по содержанию компонент – волокна макулатуры (23 %), которое подсушивается до влажности 10-15 % и при температуре 120–220 °С. Композиция отходов макулатуры последовательно приобретает высокоэластическое и расплавленное состояние. Расплавленные полимеры выполняют роль высокопрочного связующего.

д) прессование массы в изделия в гидравлическом вертикальном прессе с максимальным удельным давлением 26,4 МПа при температуре 205 °С в течении 2-х минут, с последующим охлаждением, упаковкой и складированием.

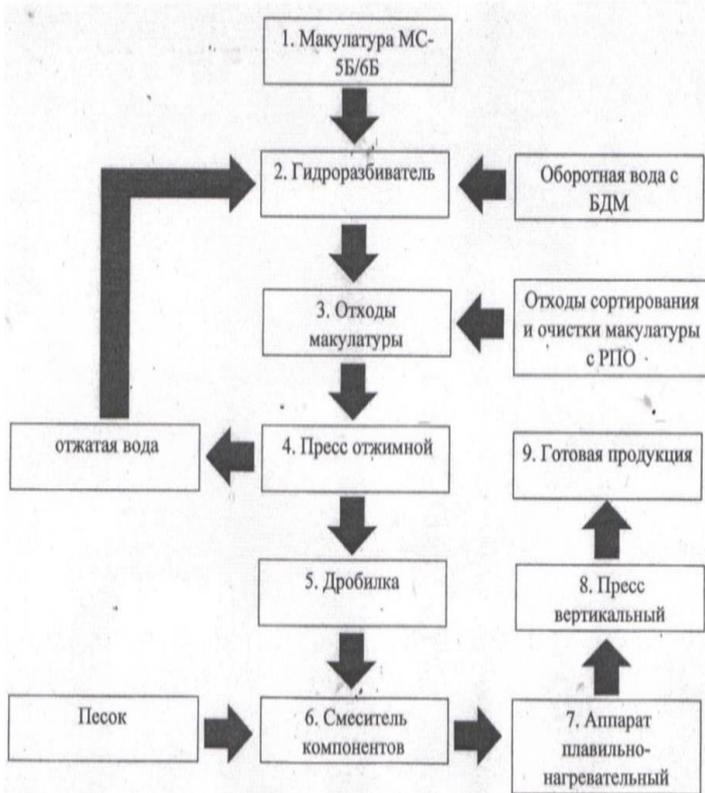


Рисунок 4 - Блок-схема опытно-промышленной установки переработки отходов

На основании необходимых технологических процессов для переработки макулатуры и сырья в полимерпесчаные плиты, была составлена технологическая блок-схема, представленная на Рисунке 4, и подобрано оборудование.

Были проведены все работы по компоновке и монтажу оборудования опытно-промышленной установки в строительном цехе ОАО «Каравеево». Выполнена пусконаладка всех единиц оборудования и, в целом, всей линии. Проведены испытания установки. Исходя из установленного массового содержания компонентов сырья, было признано важным испытание установки по двум вариантам: переработка 100% сырья без использования добавок песка и переработка сырья с добавлением песка.

Полимерпесчаные плиты с 100% содержанием сырья обладают низкими физико-механическими свойствами и наличием трещин. При проведении исследований технологической особенностью прессовочной массы стали добавки песка к исходному сырью, изменяя соотношение компонентного состава и структуру изделий. Так, была испытана установка при исходном составе прессовочной массы - сырье (СП + ВМ + ДК) – 50% и 50% песок. Полученные полимерпесчаные плиты обладают достаточной жесткостью и прочностью. Образцы изготовленных плит представлены на Рисунке 5.



Рисунок 5 – Образцы полимерпесчаных плит

Результатом испытаний установки является:

- подтверждение работоспособности отдельных единиц оборудования и установки;
- подтверждение последовательности и управляемости процессов технологии;
- установление факта возможности получения качественных плит из композиции сырья с песком по предложенной технологии.

В разделе 3.4. представлены результаты углубленного исследования факторов и процессов технологии. Были проведены исследования влияния композиции при разных соотношениях песок/сырье с шагом 10% на потребительские свойства полимерпесчаных плит.

Полимерпесчаные плиты относятся к строительным композиционным материалам, которым присущи положительные необходимые потребительские свойства. Согласно ГОСТ Б.В. 2.7. – 139:2007 и ТУ 23.99.19-001-05015609-2025 такими свойствами являются: плотность кг/м³, истираемость г/см²,

водопоглощение %, прочность при статическом изгибе МПа, предел прочности при динамическом изгибе (ударная вязкость) кДж/м². Обладая многими положительными свойствами, 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 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 для устройства городских и дачных ландшафтов.

Для получения исследуемых образцов плит использовалась технологическая установка ОАО «Караван». Были изготовлены образцы плит размером 330x330x35 мм с учетом объемных пустот, разных композиций, состоящей из песка и отходов макулатуры (сырье).

Все образцы изготавливались при одном и том же температурном режиме в 4-х зонах нагрева последовательно: 1 зона – прогрев до 170 °С, 2 зона – подъем температуры до 180 °С, 3 и 4 зона – расплавление при 210-220 °С, температура прессования 205 °С.

Для достижения поставленной цели были определены количественные параметры потребительских свойств при заданных геометрических размерах образцов полимерпесчаных плит, которые представлены в Таблице 4.

Таблица 4 - Потребительские свойства полимерпесчаных плит ТУ 23.99.19-001-05015609-2025

Свойства	Значение
Плотность	1600 - 2200 кг/м ³
Истираемость	Не более 0,1 г/см ²
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 ²
Толщина плитки, мм	20
Габаритные размеры плитки с учетом объемных пустот	330 x 330 x 35 мм

Результаты исследования влияния соотношения «песок/ сырье» на физико-механические свойства - «прочность при статическом изгибе» - F, «ударная вязкость» - Q, представлены на Рисунке 6.

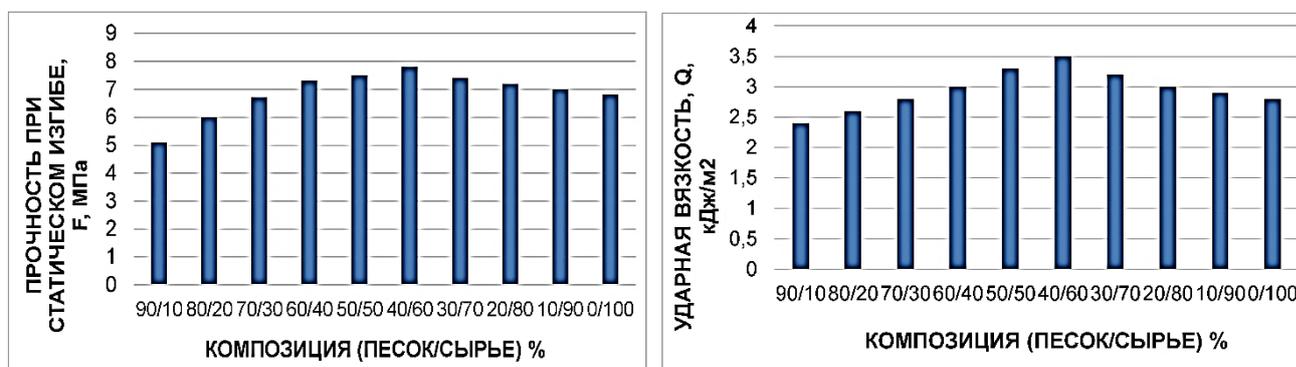


Рисунок 6 – Влияние композиции «песок/сырье» на физико-механические свойства полимерпесчаных плит

На основании полученных результатов определено, что с увеличением содержания отходов макулатуры до 60% в композиции полимерпесчаных плит, предел прочности при статическом изгибе и ударная вязкость возрастают. Дальнейшее увеличение процентного содержания отходов ведет к снижению физико-механических показателей. Водопоглощение и истираемость уменьшаются с увеличением процентного содержания макулатурных отходов.

Результаты исследования влияния соотношения «песок/ сырье» на водопоглощение и истираемость плит - «водопоглощение»-G, и «истираемость» - E, представлены на Рисунке 7. При содержании в композиции более 50% отходов истираемость полимерпесчаных плит снижается не значительно.

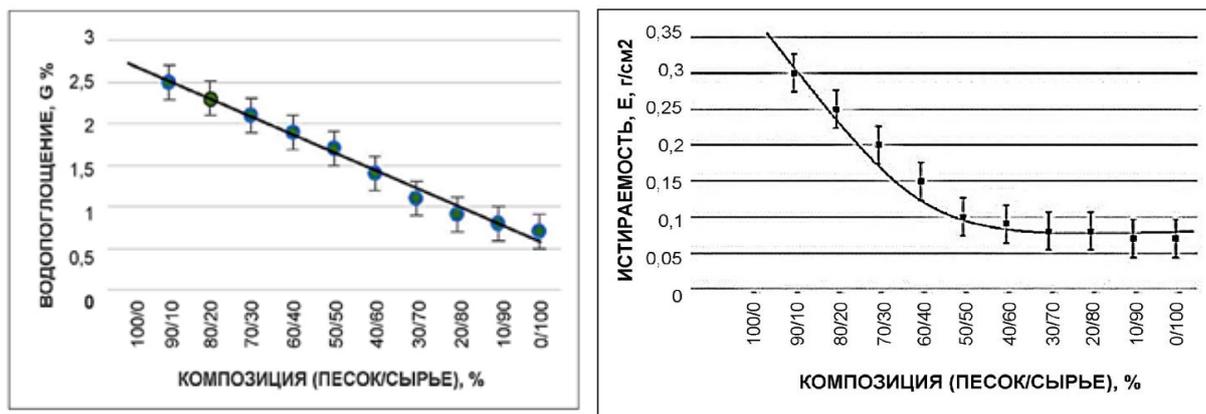


Рисунок 7 – Влияние композиции «песок/сырье» на «водопоглощение»-G, и «истираемость» - E полимерпесчаных плит

С целью получения более наглядной картины влияния синтетических полимеров, как основного компонента макулатурных отходов, 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 в Таблице 5.

Таблица 5 - Физико-механические и водопоглощающие свойства плит полимерпесчаных плит

№ образца	Композиция песок/отходы /полимер, %	Прочность при статическом изгибе, F, МПа	Ударная вязкость, Q, кДж/м ²	Водопоглощение, G, %	Истираемость, E, г/см ²	Плотность, кг/м ³
1	50/50	7,5	3,3	1,7	0,10	2150
2	40/60	7,8	3,5	1,4	0,09	2000
3	50/45/5	10,6	4,9	0,8	0,09	2150
4	50/40/10	11,1	5,4	0,7	0,08	2100

При добавлении в композицию полимерпесчаных плит полипропилена в количестве 5 и 10% физико-механические свойства исследуемых образцов значительно возрастают, при этом водопоглощение снижается почти в 2 раза.

В результате исследования технологических факторов процесса получения плит, была установлена последовательность вариантов сочетания факторов по убыванию качества плит, которая представлена в Таблице 6.

Таблица 6 - 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	

По данным исследования в Таблице 6, режимом, обеспечивающим целевое качество плит, является вариант №1, а близкими по эффективности являются №2 и №3. Остальные варианты могут служить для прогнозирования качества плит. Исходя из анализа экспериментальных данных, был выбран следующий режим: Усилие прессования: ~1500 кН; Удельное давление: ~26,4 МПа; Температура прессования: ~205 °С; Время выдержки: 2 мин.

Зависимость показателей качества плит от доли песка в полимерпесчаной композиции находится в широких пределах. Анализ результатов позволил выбрать интервалы эффективного песчанополимерного состава и показатели качества плит, отвечающие условию минимальной достаточности для эффективного использования ресурсов макулатурных отходов (Таблица 7).

Добавленный в композицию полипропилен, дает существенное улучшение свойств плит, в сравнении с отходами полимеров в сырье.

Таблица 7 – Интервалы эффективного сочетания состава смеси и качества плит

Интервал «песок/полимер», %	Интервал F, МПа	Интервал Q, кДж/м ²	Интервал G, %	Интервал E, %
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)	0,1–0,09 (среднее 0,09)
Относительный прирост за счет вторичного полимера 50/40/10	+3,4	+2,0	-0,8	-0,01

С точки зрения полимерных композитных структур, полимерпесчаная плита, представляет собой сложный многокомпонентный материал. В нем волокна макулатуры выступают в роли армирующего наполнителя, а синтетические полимеры – в качестве связующей матрицы. Таким образом, 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. Свойства материала определяются синергетическим эффектом сил адгезии на многочисленных границах раздела между компонентами. На основании изучения микросрезов полимерпесчаных плит методом электронной микроскопии получено подтверждение структуры и характера распределения компонентов. Микрофотографии полимерпесчаных плит представлены на Рисунке 8.

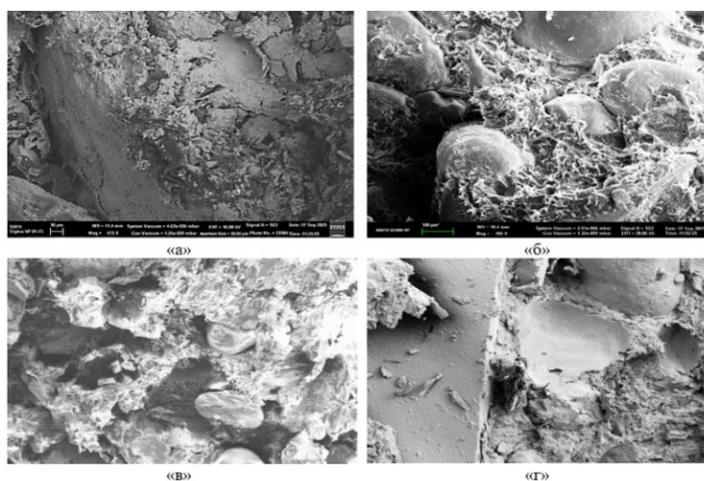


Рисунок 8 – Микрофотографии срезов материала при различном соотношении «песок/сырье»

На Рисунке 8 (а), (б), (в), (г) показаны микрофотографии структуры плиты, при соотношении, %: «песок/сырье» - 10/90, 50/50, 30/70 и «песок/сырье/пропилен» - 50/40/10. На всех микрофотографиях хорошо видны структуры и характер распределения компонентов в полимерпесчаных плитах. Визуально хорошо различимы частицы песка и аморфный полимер. Наличие полипропилена, позиция «г» обуславливает более плотную структуру песчано-полимерной матрицы. Наблюдаемое отличие экспериментально подтверждено более высокими физико-механическими характеристиками полимерпесчаных плит. Структура полимерпесчаной плиты с композицией «песок/сырье» - 50/50 %, обладает достаточной плотностью и равномерным распределением компонентов, а ее потребительские свойства удовлетворяют требованиям, предъявляемым к полимерпесчаным плитам для устройства городских и дачных ландшафтов. На основании полученных результатов исследования факторов и процессов технологии:

- Установлено, что использование в композиции полимерпесчаных плит отходов макулатуры, представляющих собой в основном смесь вторичных волокон древесной целлюлозы и синтетических полимеров, позволяет получить материалы для городских и дачных ландшафтов с заданными свойствами.

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

- Определено, что с увеличением содержания отходов макулатуры до 60% в композиции полимерпесчаных плит, предел прочности при статическом изгибе и ударная вязкость возрастают, при этом водопоглощение и истираемость плит уменьшаются. Дальнейшее увеличение содержания отходов ведет к снижению физико-механических свойств, при этом водопоглощение и истираемость уменьшаются незначительно.

- Установлены пределы содержания отходов макулатуры в композиции полимерпесчаных плит с заданными свойствами, составляющие 50-60%.

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

В разделе 3.5. представлено внедрение технологии и установки производства полимерпесчаных плит с оценкой экономической эффективности использования результатов диссертационного исследования.

По результатам исследований, представленных 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. Производительность линии 5 тонн в сутки оказалась близка к расчетной при выборе оборудования. Следовательно, линия способна перерабатывать всю массу отходов.

В настоящее время технология и установка внедрены в ОАО «Каравеево» согласно Акту внедрения (Приложение Г диссертационной работы). Производительность линии составляет 5 тонн полимерпесчаных плит в сутки.

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

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.

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/м²; $G = 1,5$ %; $E = 0,09$ г/см², 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. Эффективное использование макулатурных отходов снижает экологическую нагрузку на окружающую среду.

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

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

2. Зайцев А.В. Разработка технологии полимерпесчаных плит на основе отходов макулатуры марки МС-5Б/ А.В. Зайцев, В.К. Дубовый, Е.И. Симонова, И.Н. Ковернинский, П.М. Кейзер// Известия Санкт Петербургской лесотехнической академии. – 2024. - №250. С.383-392

3. 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. - №255. – С.428-442.

Публикации в материалах конференций:

4. Зайцев А.В. Разработка технологии полимерпесчаных плит на основе отходов макулатурного производства /А.В. Зайцев, В.К. Дубовый// Стендовый доклад на VII Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективы решения», (Санкт-Петербург, 24-25 ноября 2025 г.). – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025. – URL: <https://vshte.ru/stendovye-doklady-2025/>.

5. Зайцев А.В. Исследование компонентного состава отходов переработки макулатуры МС-5Б в волокнистую массу / Зайцев А.В., В.К. Дубовый // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IX Всероссийской науч.-техн. конференции (Санкт-Петербург, 22-24 мая 2024 г.). – СПб.: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2024. – С.369-372.

6. Зайцев А.В. Переработка твердых отходов от макулатурной массы/ А.В. Зайцев // Макулатура и целлюлоза:ресурсы, наука, техника, производство, продукты, экология перспективы: материалы Всероссийской научн.-техн. конференции (ОАО «Каравеево», 30-31 мая 2024 г. – д. Каравеево, Московская обл., 2024 г. - URL: <https://docs.google.com/document/d/1Colf3nGItdskFM-Zdhe>

7. 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: материалы X Всероссийской науч.-техн. конференции (Санкт-Петербург, 21-23 мая 2025 г.). – СПб.: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2025. – С.292-295.

8. 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 науч.техн. конференции «Экологические и экономические проблемы ЦБП России и пути их решения в современных условиях» (ОАО «Каравеево», 29 мая 2025 г). – д. Каравеево, Московская обл., 2025г. – URL:<https://docs.google.com/document/d/1CseJczkW>

9. Зайцев А.В. Получение высоконаполненных композитных материалов с полимерной матричной системой на основе макулатуры и минеральных наполнителей /А.В. Зайцев, В.К. Дубовый, И.Н. Ковернинский // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы IX Международной научн. техн. конференции памяти профессора В.И. Комарова (Архангельск, 11-12 сентября 2025 г.) – Архангельск: САФУ, 2025 г. С.102-108

10. Зайцев А.В. Разработка технологии получения полимерпесчаных плит на основе отходов макулатурного производства /А.В. Зайцев, В.К. Дубовый// Материалы VII Международной науч.-тех. конференции ученых и специалистов ЦБП «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективы решения», (Санкт-Петербург 24-25 ноября 2025 г.). – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2025, С 41-45.