

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»



На правах рукописи

ГОРЯГИН ПАВЕЛ ЮРЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО
АГРЕГАТА КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ
ТЕХНОГЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р. техн. наук, проф.

Севостьянов В.С.

Белгород – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРОИЗВОДСТВА ИЗ НИХ ИЗДЕЛИЙ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	13
1.1 Экологические проблемы при комплексной переработке и утилизации техногенных полимерных материалов.....	13
1.2 Существующие технологии и способы переработки техногенных полимерных материалов.....	17
1.3 Физические особенности измельчения полимерных отходов.....	23
1.4 Характеристика современных технических средств и специального оборудования для переработки техногенных полимерных материалов.....	26
1.5 Анализ теоретических исследований процессов измельчения техногенных полимерных материалов	33
1.6 Цель и задачи исследования.....	37
1.7 Выводы.....	38
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОМ АГРЕГАТЕ.....	40
2.1 Теоретические предпосылки создания роторно-центробежного агрегата комбинированного действия для постадийной переработки техногенных полимерных материалов.....	40
2.2 Конструктивно-технологические особенности и принцип действия роторно-центробежного агрегата комбинированного действия.....	42
2.3 Исследование процесса предварительной деформации техногенных полимерных материалов в пресс-валковом уплотнителе.....	45
2.3.1 Анализ процесса уплотнения техногенных полимерных материалов с низкой объёмной плотностью.....	47

2.3.2	Расчёт основных конструктивно-технологических и энергосиловых параметров пресс-валкового уплотнителя.....	48
2.4	Теоретические исследования условий деформационно-силового воздействия рабочих органов в первой камере роторно-центробежного агрегата.....	51
2.4.1	Исследования геометрических параметров роторно-центробежного агрегата и кинетических параметров процесса измельчения в первой камере при деформационно-силовом воздействии.....	51
2.4.2	Графоаналитические исследования процесса измельчения полимерных материалов на его первой стадии.....	57
2.4.3	Расчёт усилий разрушения материала при разрезающем воздействии дисковых фрез.....	59
2.4.4	Анализ процесса высокоскоростного воздействия рабочих органов на материал с учётом его упругопластических характеристик.....	66
2.4.5	Определение силового воздействия иглофрезерных рабочих органов на измельчаемые полимерные материалы.....	68
2.4.6	Расчёт производительности роторно-центробежного агрегата и мощности его привода.....	70
2.5	Выводы.....	74
3	РАЗРАБОТКА СТЕНДОВЫХ УСТАНОВОК, МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	76
3.1	Пресс-валковый уплотнитель для предварительного уплотнения и деформирования техногенных полимерных материалов.....	76
3.2	Конструктивно-технологические особенности роторно-центробежного агрегата комбинированного действия с дисковыми и иглофрезерными рабочими органами	78
3.3	Физико-механические характеристики исследуемых материалов.....	84

3.4 Методики проведения экспериментальных исследований и обработки полученных результатов, характеристика используемого оборудования.....	86
3.5 Выводы.....	93
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО АГРЕГАТА КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ.....	94
4.1 Экспериментальные исследования процессов постадийной переработки техногенных полимерных материалов.....	94
4.2 Многофакторное планирование экспериментов при исследовании функциональных зависимостей $P_{изм}, Q_{пр} = f(n_{ф}, V_{у.ф.}, \delta, L_{фут})$	98
4.3 Анализ графических зависимостей и установление рациональных режимов работы агрегата.....	101
4.4 Сравнительный анализ полученных результатов исследований.....	109
4.5 Выводы.....	111
5 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО АГРЕГАТА В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	112
5.1 Реализация научно-технических разработок в производственных условиях ООО «ТК «Экотранс».....	112
5.2 Технологическая линия переработки техногенных полимерных материалов и производства гранулята.....	116
5.3 Технологический модуль для производства труб технического назначения.....	120
5.4 Инженерная методика проектирования роторно-центробежного агрегата комбинированного действия.....	122
5.5 Техничко-экономическая эффективность использования научно-технических разработок.....	125
5.6 Выводы.....	131

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	167

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития науки и техники, во многих отраслях промышленности производится большое количество изделий из полимерных материалов. Каждое такое производство, а также использование изделий, сопровождаются образованием большого объема техногенных полимерных материалов (ТПМ). В связи с этим актуальной задачей является их комплексная переработка с развитием отечественных ресурсосберегающих технологий и технических средств для их реализации. Наиболее рациональным способом переработки ТПМ является производство востребованных материалов и изделий из техногенного сырья.

Проблема комплексной переработки техногенных материалов, в том числе ТКО, является одной из важнейших государственных задач в мире не только с позиции защиты нашей планеты от загрязнений, но и с точки зрения необходимости создания ресурсоэнергосберегающих технологий с использованием вторичного минерального и органического сырья, а также обеспечения стран альтернативными источниками энергии.

Актуальность решения данной проблемы в нашей стране подтверждается реализацией Федеральных проектов «Экологическое благополучие» и «Экономика замкнутого цикла» на период до 2030 года, утверждённых Указом Президента РФ В. В. Путина № 309 от 7 мая 2024 г.

Одной из энергоемких стадий переработки ТПМ является процесс их измельчения, от которого во многом зависят технологические условия изготовления изделий, а также области использования товарной продукции. При этом, существуют следующие проблемные задачи: несовершенство техники и технологий для постадийной переработки ТПМ различных видов, высокая энергоёмкость процессов, невозможность получения измельчённых материалов различной гранулометрии, отсутствие в технологических модулях отдельных блоков, работающих как в комбинированном, так и в автономных режимах, и др.

При выполнении диссертационной работы использовались научные труды отечественных и зарубежных ученых, в работах которых отражены проблематика и вопросы повышения эффективности процесса измельчения полимерных материалов, таких как: Быстров Г.А., Никольский В.Г., Ениколопов Н.С., Гиберов З.Г., Севостьянов В.С., Сиваченко Л.А., Чапалда Д.И., Лозовая С.Ю., Marquez С., Vincent G.A. и другие.

Научные работы указанных ученых способствовали определению основных теоретических положений кинетики измельчения полимеров, методов повышения эффективности измельчительного оборудования, а также необходимых технологических стадий комплексной переработки ТПМ.

Одним из перспективных направлений переработки отходов пластмасс является получение порошкообразных полимерных материалов. Это обеспечивает достижение положительных технологических и экономических результатов: получение высококачественных композиционных смесей, уменьшение температуры плавления ТПМ, возможность расширения номенклатуры производимых изделий различного технологического назначения и др.

Всё вышеуказанное подтверждает необходимость дальнейших научно-технических разработок и актуальность настоящих диссертационных исследований.

Диссертация выполнена в рамках: Федерального проекта НОЦ (2020-2023 гг.) № 10089447, проекта 15298ГУ/2020 программы УМНИК (2020-2022 гг.), а также государственных заданий: FZWN-2021-0014 «Разработка, исследование и опытно-промышленное освоение ресурсоэнергосберегающих инновационных технологий для производства товарной продукции и снижения экологической нагрузки на окружающую среду» (2021-2023 гг.) и FZWN-2024-0002 «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологий и технических средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органоминеральных компонентов» (2024-2026 гг.).

Объектом исследования является роторно-центробежный агрегат комбинированного действия (РЦА КД), предназначенный для измельчения термопластичных техногенных полимерных материалов.

Предметом исследования являются процессы постадийного измельчения ТПМ специальными рабочими органами, реализующими предварительную деформацию, объёмно-пространственное воздействие.

Цель работы: разработка роторно-центробежного агрегата комбинированного действия для повышения эффективности процесса измельчения термопластичных техногенных полимерных материалов с различными физико-механическими характеристиками, методики расчёта его конструктивно-технологических и энергосиловых параметров.

Задачи исследования:

1. На основании анализа современных технологий и технических средств определить перспективные направления конструктивно-технологического совершенствования оборудования для измельчения ТПМ.

2. Провести теоретические исследования кинетики процесса деформационно-силового воздействия на измельчаемые ТПМ и разработать конструктивно-технологические условия для его реализации.

3. Получить аналитические выражения для расчёта конструктивно-технологических и энергосиловых параметров РЦА КД.

4. Разработать стендовые установки и провести физическое моделирование процессов постадийного измельчения ТПМ с учётом конструктивного исполнения рабочих органов.

5. Разработать патентозащищённую конструкцию РЦА КД для измельчения ТПМ с учётом их специфических физико-механических характеристик.

6. Провести комплексные экспериментальные исследования по установлению рациональных режимов измельчения ТПМ в РЦА КД и получению продукции из вторичных полимерных материалов различного технологического назначения.

7. С использованием разработанной методики расчёта конструктивно-технологических и энергосиловых параметров спроектировать и изготовить опытно-промышленный РЦА КД, определить технико-экономическую эффективность его использования для переработки ТПМ.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.5.21 по областям исследования:

1. Разработка научных и методологических основ, технических и технологических требований к проектированию и созданию новых машин, агрегатов и технологических процессов.

9. Разработка научных и методологических основ проектирования и практической реализации технологических процессов и способов получения и обработки материалов, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, формирующих комплекс свойств, качество и расширяющих номенклатуру изготавливаемой продукции.

Научная новизна:

1. С учётом кинетических закономерностей деформационного, упругопластического и истирающего силового воздействия разработаны теоретические положения процессов постадийного измельчения ТПМ.

2. Теоретически обоснована и экспериментально доказана необходимость предварительного уплотнения ТПМ с низкой плотностью и удаления из них воздушной фазы.

3. В результате теоретических исследований получены выражения для определения кинетических параметров деформационно-силового воздействия на ТПМ в сужающейся рабочей зоне первой камеры измельчения РЦА КД.

4. Получены аналитические выражения, описывающие процесс измельчения ТПМ в технологических зонах камеры с дисковыми фрезами.

5. На основании проведённых теоретических и экспериментальных исследований получены уравнения для расчёта кинетических параметров рабочих органов агрегата при различных режимах их работы.

6. Определены выражения для расчёта усилий разрушения полимерных материалов иглофрезерными рабочими органами.

7. Разработаны методы расчёта основных конструктивно-технологических и энергосиловых параметров роторно-центробежного агрегата, учитывающие особенности процесса измельчения полимерных материалов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

– Определены основополагающие теоретические положения постадийных процессов переработки техногенных полимерных материалов.

– Получены математические выражения, описывающие процессы постадийного измельчения полимеров в разработанном роторно-центробежном агрегате.

– Разработаны конструктивно-технологические исполнения рабочих органов РЦА КД для измельчения ТПМ с различными физико-механическими характеристиками.

– Спроектирована и изготовлена патентозащищенная конструкция РЦА КД для переработки техногенных полимерных (патенты РФ 2724667, 2755436, 213199, 2834371).

– Разработана методика расчета основных конструктивно-технологических и энергосиловых параметров РЦА КД.

– В производственных условиях ООО «ТК «Экотранс» проведены опытно-промышленные испытания малотоннажного технологического модуля, включающего РЦА КД, для комплексной переработки ТПМ и получения из них различных видов продукции.

– Выполненные научно-технические разработки используются при подготовке специалистов кафедр «Технологические комплексы, машины и механизмы», промышленной экологии БГТУ им. В.Г. Шухова.

Методы исследования. При выполнении научных исследований использовались следующие методы: теория подобия, математическое и физическое моделирование, многофакторное планирование эксперимента, использование математической статистики, системы автоматизированного

проектирования, испытания стендовых агрегатов и др.

Автор защищает:

1. Теоретические положения постадийных процессов переработки техногенных полимерных материалов.

2. Аналитические выражения для определения параметров процесса переработки ТПМ в технологических зонах камеры измельчения с дисковыми фрезами.

3. Теоретические зависимости для расчёта кинетических, конструктивно-технологических и энергосиловых параметров РЦА КД.

4. Результаты моделирования процессов постадийного измельчения техногенных полимерных материалов с реализацией комбинированного воздействия на перерабатываемые материалы.

5. Результаты комплексных экспериментальных исследований процесса измельчения, установленные рациональные технологические режимы работы агрегата для получения полимерных материалов различного фракционного состава.

6. Конструктивно-технологические решения патентозащищённой конструкции РЦА КД (патенты РФ 2724667, 2755436, 213199, 2834371).

7. Результаты опытно-промышленной апробации РЦА КД при получении измельчённых ТПМ в производственных условиях.

Реализация результатов работы. С использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований был изготовлен и испытан опытно-промышленный роторно-центробежный агрегат комбинированного действия для переработки ТПМ, проведена его опытно-промышленная апробация в условиях производства ООО «ТК «Экотранс» (г. Белгород). Экономический эффект при производстве гранул из измельченных в агрегате ТПМ составляет 1,7 млн руб.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Международных и Всероссийских научно-практических конференциях: «Digital Technologies in Construction Engineering», Белгород,

2022 г.; «Современные технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности», Казань, 2023 г.; «Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения)», Белгород, 2023 г.; «Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова», Белгород, 2025 г. и др.

Публикации. По результатам работы опубликована 21 научная работа, в том числе 5 – в изданиях Scopus, 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; получено 3 патента РФ на изобретения, 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Общий объем работы составляет 158 страниц, в том числе: 62 рисунка, 14 таблиц, список литературы из 178 наименований. Приложения на 13 страницах.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Экологические проблемы при комплексной переработке и утилизации техногенных полимерных материалов

На сегодняшний день увеличение объёмов промышленных и твёрдых коммунальных отходов (ПиТКО) является одной из ключевых проблем экологической, технологической и экономической сфер [1-3]. В связи с этим, создание эффективной системы рационального природопользования предполагает реализацию комплекса мероприятий, направленных на переработку и утилизацию техногенных материалов с различными физико-механическими характеристиками [4-6].

Реализация Федеральных проектов «Экологическое благополучие» и «Экономика замкнутого цикла» (на период до 2030 года), утверждённых Указом Президента РФ В. В. Путина № 309 от 7 мая 2024 г. [7], обуславливает актуальность реализации комплексной переработки ПиТКО в России.

На сегодняшний день в России накоплено свыше 60 млрд тонн ПиТКО и ежегодно в стране образуется более 8,5 млрд тонн [8]. В Белгородской области ежегодно образуется около 4 млн м³ отходов (рис. 1.1), которые подвергаются частичной переработке и утилизации [9].



Рисунок 1.1 – Морфологический состав ТКО в Белгородской области (по данным ООО «ТК «Экотранс»)

Частичная сортировка техногенных материалов с последующим захоронением не утилизируемых остатков («хвостов») на полигонах характеризуются низкой эффективностью в качестве метода утилизации. Существующие технологии термической переработки отходов сопряжены с риском загрязнения окружающей среды токсичными веществами – диоксинами и фуранами [10-11]. При этом техногенные полимерные материалы (ТПМ) занимают первое место по скорости накопления в структуре ПиТКО (рис. 1.2) [12].

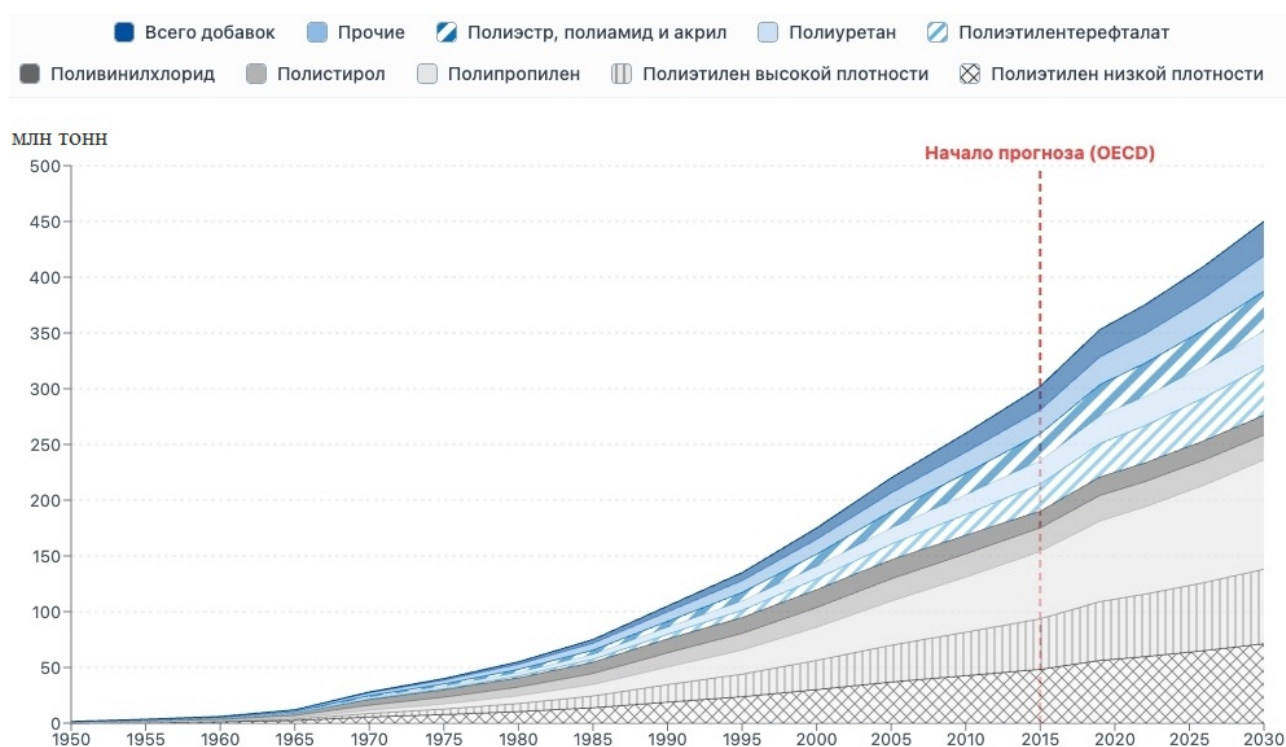


Рисунок 1.2 – Динамика накопления полимерных отходов

Более 50% совокупного объёма ТПМ приходится на изделия из полиэтилена и полипропилена. Это обусловлено широкой сферой применения этих полимеров: они востребованы при производстве упаковочных материалов, строительных материалов, автомобилестроении и других товаров (рис. 1.3) [13-16]. Образование ТПМ происходит как в производственных процессах, так и при эксплуатации полимерсодержащих материалов и изделий.

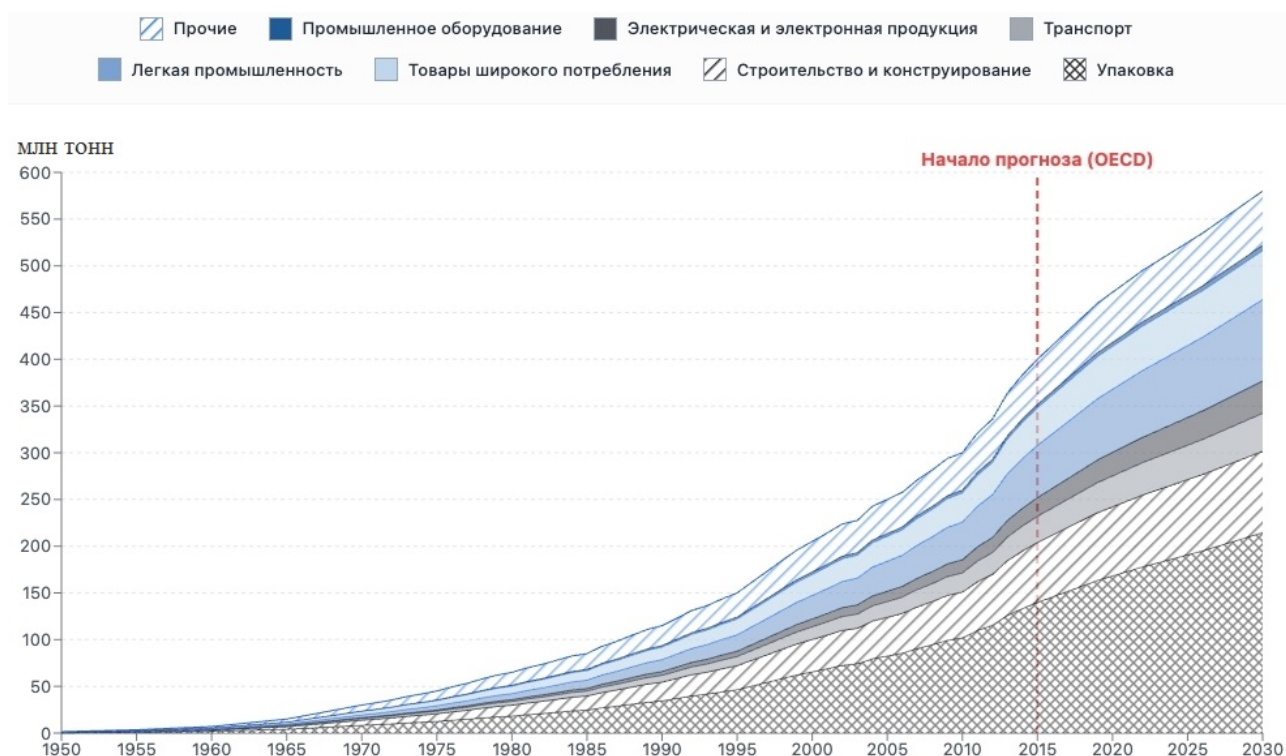


Рисунок 1.3 – Мировое производство пластмасс по секторам экономики

Существующие технологии и технические средства не обеспечивают утилизацию ТПМ, соответствующую темпу их накопления (рис. 1.4). В связи с этим, актуальной задачей является разработка ресурсосберегающих технологий и оборудования для комплексной переработки полимерсодержащих отходов.



Рисунок 1.4 – Прогноз динамики объёмов техногенных полимерных материалов и способов их переработки и утилизации

На сегодняшний день существуют многочисленные способы переработки и утилизации техногенных материалов [17-19]. На основании приоритета реализации (рис. 1.5) система комплексной переработки и утилизации полимерных отходов включает: предотвращение или минимизацию образования, повторное использование, механическую переработку, термическую обработку (с генерацией тепловой и электрической энергии), захоронение и др.



Рисунок 1.5 – Иерархия направлений комплексной переработки и утилизации техногенных полимерных материалов

С учётом экономического потенциала переработка ТПМ с последующим производством из них изделий различного назначения является одним из перспективных методов утилизации. Комплексная переработка ТПМ, в зависимости от вида полимерных отходов, может быть механической, термической, химической и др. [20-21].

К числу термопластичных ТПМ, пригодных для вторичной переработки, относят: полиэтилентерафталат (ПЭТ), полиэтилен низкого давления и высокого давления (ПЭНД и ПЭВД), полипропилен (ПП), полистирол (ПС) и др. [16, 22-26].

В связи с этим, одной из проблемных задач является разработка энергоэффективного специализированного оборудования для получения мелкокусковых, порошкообразных или полидисперсных полимерных материалов из техногенного сырья.

1.2 Существующие технологии и способы переработки техногенных полимерных материалов

Полимерные материалы – это химические высокомолекулярные соединения, которые состоят из многочисленных маломолекулярных мономеров (звеньев) одинакового строения [22].

Для получения полимеров с необходимыми свойствами в технике зачастую используют не «чистые» вещества, а их сочетания с органическими или неорганическими компонентами. Примером служат полимерные строительные материалы: металлопласты, пластмассы, стеклопластики, полимербетоны [27].

ТПМ имеют широкий диапазон физико-механических характеристик и физико-химических свойств, которые зависят от их вида и структуры. Большое влияние на физико-механические характеристики ТПМ оказывают внешние факторы в процессе переработки [28]. К ним относятся: вид, период, частота и скорость силового воздействия рабочих органов на материал, термообработка и др. По сравнению с металлами, физико-механические характеристики ТПМ характеризуются относительно высокой прочностью при малой жесткости.

Модуль упругости характеризует противодействие полимера изменению размера и формы под действием внешней силы [29]. С этой точки зрения полимеры делятся на жесткие с модулем упругости – $E > 10^3$ МПа (волокнистые, плёночные и другие полимерные материалы) и мягкие высокоэластичные вещества ($E < 10^2$ МПа) – резины. Механизмы и закономерности разрушения данных материалов различаются. Для полимерных материалов характерны ярко выраженная анизотропия свойств, а также снижение прочности, развитие ползучести при условии длительного нагружения. Вместе с этим, они обладают

довольно высоким сопротивлением усталости. По сравнению с металлами, они отличаются более резкой зависимостью механических свойств от температуры. Одной из главных характеристик полимерных материалов является деформируемость (податливость). По этому параметру в широком температурном интервале принято оценивать их основные эксплуатационные и технологические свойства.

Около 50 % всего объёма полимеров используется для производства упаковочной тары [30-31]. Широкое применение полимерных материалов в этой сфере обусловлено не только их эстетическими свойствами, позволяющими улучшить внешний вид продукта, но и функциональными преимуществами – сохранностью продукции в герметичной упаковке.

Объём образующихся ТПМ достигает 3,3-3,6 млн тонн в год. При этом ежегодный прирост данного показателя составляет более 5 % [32].

Распределение основных категорий ТПМ представлено на рисунке 1.6.

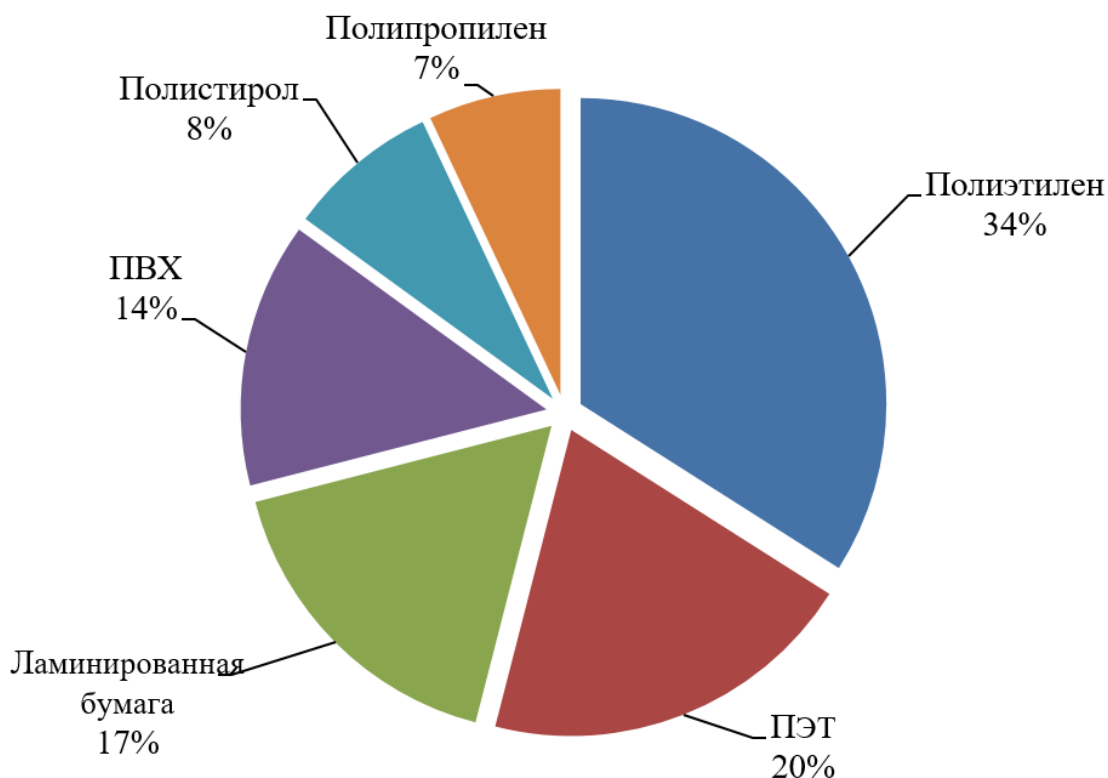


Рисунок 1.6 – Процентное соотношение основных видов полимерных отходов

В настоящее время основной объем ТПМ утилизируется способами захоронения в почву или сжигания [33-37]. С экологической точки зрения, данные способы являются нерациональными. Захоронение приводит к загрязнению почвы – это обусловлено присутствием в составе пластика токсичных компонентов. Сжигание несёт серьёзную угрозу окружающей среде: в ходе этого процесса в атмосферу попадают опасные соединения, которые в дальнейшем оказывают негативное воздействие на живые организмы. В связи с этим, на современном этапе развития экономики и производства, весьма актуальным стоит вопрос о рациональной утилизации ТПМ, т.е. переработки и возможности повторного использования их в производстве.

Переработка ТПМ – это комплекс технологических операций [38-42], в результате которых из вторичного сырья производят материалы и изделия с заданными физико-механическими характеристиками, определённой конфигурацией и требуемыми эксплуатационными свойствами.

Для обеспечения высокого качества вторичного сырья технологический процесс переработки ТПМ должен включать следующие основные стадии [43-46]: предварительную сортировку сырья, постадийное измельчение, мойку, экструдирование и др.

При механической переработке ТПМ перед производством изделий необходима предварительная подготовка вторичного сырья [47]. В рамках подготовительного этапа осуществляют классификацию, мойку и сушку ТПМ, определяют их гранулометрический состав.

Технологический комплекс для переработки ТПМ включает набор специализированного оборудования [42], обеспечивающего полный цикл обработки: шредеры (первая ступень измельчения), линию для мойки, дробилки (вторая ступень измельчения), смесители, дозаторы, агломераторы, экструдер, сушилку, пресс, транспортеры, и др.

К числу основных способов изготовления полимерных изделий относятся [48-51]:

- прессование (на завершающей стадии требуется удаление грата с готового изделия);
- литье под давлением – наиболее производительная технология, позволяющая производить изделия, не нуждающиеся в дополнительной обработке;
- экструзию – способ, обеспечивающий выпуск изделий разнообразной конфигурации за счёт непрерывности технологического процесса;
- пневмовакуумное формование – технология, основанная на нагреве полимера до состояния вязкотекучести с последующим приданием ему заданной формы под действием внешнего давления.

Методы прессования, экструзии и литья под давлением требуют изготовления дорогостоящей оснастки (пресс-форм, экструзионных головок). В связи с этим, применение данных методов на мелкосерийных производствах экономически нецелесообразно. В данном случае реализуют технологии сварки, склейки, штамповки и др. Помимо базовых технологий, выделяют ряд специализированных методов переработки полимеров [52–53]: прокатку, намотку, литьё без давления, ориентацию, пропитку и протягивание.

Ключевым критерием эффективности технологического процесса переработки ТПМ является достижение оптимального качества выпускаемой продукции и максимальной производительности используемого оборудования [54–55]. В связи с этим в современном производстве требуется комплексное решение ряда важнейших задач:

- 1) материаловедческая задача – заключается в обоснованном выборе полимерного материала для конкретного изделия;
- 2) технологическая задача – включает подбор оптимальных методов переработки ТПМ, проектирование и изготовление необходимого технологического оборудования, формирующих инструментов, оснастки и др.;
- 3) научно-организационная задача – определяет системную координацию научных исследований и производственных процессов для обеспечения устойчивого развития отрасли.

Проведенный анализ существующих технологий и способов переработки ТПМ показывает, что в современных условиях к ключевым методам утилизации полимерных отходов относят термоутилизацию, сопровождающуюся генерацией тепловой и электрической энергии, механотермическую переработку (в том числе пиролиз, термолиз и другие технологические способы), а также переработка с последующим производством товарной продукции.

В структуре комплексной переработки ТПМ особое значение имеет пиролиз [56]. Несмотря на технологические ограничения, этот способ обладает существенным преимуществом по сравнению со сжиганием. Пиролизная технология позволяет получать промежуточные материалы, используемые для дальнейшей переработки. Термолиз [57] представляет собой разновидность термической переработки ТПМ, характеризующуюся деструкцией сырья при относительно невысоких температурах ($T_d = 400 \div 500$ °C). В ряде случаев указанный температурный диапазон обеспечивает возможность выделять мономеры из ТПМ. При этом, повышение эффективности процесса обуславливает необходимость предварительной модификации отходов.

Технологический цикл термолизной переработки ТПМ подразделяется на две последовательные стадии – подготовительную и основную [58-60]. На подготовительной стадии осуществляется обработка сырья с целью достижения регламентированных характеристик: фракционного состава, насыпной плотности, сыпучести, влажности и степени загрязнённости. Основная стадия заключается в термической деструкции материала при воздействии заданной температуры.

Продуктами термической переработки полимерных отходов являются углеводородное топливо, технический углерод, термолизный газ. Количественные и качественные показатели этих продуктов определяются характеристиками исходного сырья.

Наиболее востребованной технологией переработки ТПМ и производства из них товарной продукции является экструзия [61]. Суть способа состоит в непрерывном продавливании расплавленного сырья через специальную

формирующую головку. Профиль производимой продукции определяется геометрией выходного канала (фильеры).

Экструзионная переработка обеспечивает эффективное применение вторичных ТПМ для производства широкой номенклатуры изделий различного назначения [61-63].

Для реализации технологии экструдирования полимерного сырья применяют специальное оборудование – червячный экструдер. С его помощью из вторичных ТПМ производят различную товарную продукцию: многослойные погонажные изделия, сайдинг, трубы, шланги, изоляцию для проводов и другие виды изделий.

Экструзия используется не только для выпуска готовых изделий, но и для получения компактированного полимерного материала (рис. 1.7) или полимерсодержащих композитов для последующего производства изделий другими способами.



Рисунок 1.7 – Экструдированные техногенные полимерные материалы

Компактирование ТПМ позволяет повысить эффективность использования вторичного сырья в различных отраслях промышленности. Также компактирование готовых композиционных смесей позволяет достичь [64-67]:

- уменьшение объема с целью снижения расходов на хранение и транспортировку;
- отсутствие явления сегрегации;
- превращение сырья в товар (достигаются заданные стандартом физико-механические характеристики продукции);
- лучшая сохранность полезных свойств сырья при длительном хранении;
- реализация композиционных свойств продукции в гомогенизированном и спрессованном состоянии;
- большая безопасность хранения, в т.ч. пожарная, биологическая, экологическая и др.

Анализ показал, что для развития технологий переработки ТПМ необходимы улучшения различных мероприятий по сбору, а также сортировке отходов. Улучшению качества сортировки может способствовать предварительное разделение отходов в целях избегания смешения разных типов пластика.

1.3 Физические особенности измельчения полимерных отходов

Перечень ТПМ включает разнообразные виды отходов с различными физико-механическими характеристиками и физико-химическими свойствами. Специфические характеристики и свойства ТПМ определяют необходимое количество и типы стадий их комплексной переработки.

ТПМ классифицируются по трём основным группам [68-69]:

а) технологические отходы производства, возникающие при синтезе и переработке термопластов; их подразделяют на неустраняемые и устраняемые (брак) техногенные материалы;

б) отходы производственного потребления – образуются после утраты изделиями своих эксплуатационных свойств в различных отраслях (тара и упаковка, детали машин, плёночные материалы и др.), отличаются

однородностью и незначительным наличием включений, пригодны для эффективной вторичной переработки;

в) отходы общественного потребления, которые образуются в процессе бытового использования полимерных изделий.

С целью повышения производительности оборудования для измельчения ТПМ и достижения требуемой степени их измельчения требуется разработка технологических решений, состоящих из следующих основных этапов: предварительной подготовки полимеров, постадийного деформационно-силового разрушения материала, создания комбинированного воздействия на измельчаемый материал с реализацией сжимающих и истирающих напряжений, внутреннего и внешнего рециклинга, а также классификации перерабатываемых ТПМ.

Перспективным направлением переработки полимерных отходов является получение мелкокусковых и порошкообразных материалов [70-74]. Реализация данного направления обеспечивает ряд экономических и технологических преимуществ: расширение ассортимента выпускаемой товарной продукции различного технологического назначения, производство высококачественных композиционных смесей и материалов, снижение температуры механотермической переработки ТПМ и др.

Измельчение ТПМ при комбинированном воздействии на них рабочим органом происходит в несколько стадий [75-76], включая упругую и пластическую деформацию.

На стадии упругой деформации макромолекулярные цепи растягиваются и изгибаются, но сохраняют межмолекулярные связи. Деформация ТПМ обратима – после снятия нагрузки материал возвращается к исходной форме. При этом, напряжение пропорционально деформации (выполняется закон Гука).

При достижении предела текучести ТПМ упругая деформация преобразуется в пластическую. Начинается необратимое смещение макромолекул относительно друг друга. Причём, активируются механизмы пластического течения – скольжение молекулярных слоёв, перегруппировка надмолекулярных

структур. В материале накапливаются необратимые изменения структуры; модуль упругости снижается.

На стадии пластической деформации со срезом формируются сдвиговые полосы – зоны локализованной пластической деформации. Происходит микросрез – разрываются межмолекулярные связи и слабые химические связи между макромолекулами, развиваются микротрещины вдоль плоскостей сдвига. При этом, микротрещины сливаются, образуя магистральную трещину. Далее происходит окончательный разрыв материала по плоскости, перпендикулярной направлению растягивающих напряжений.

Анализ литературных источников [33, 36, 77-81] показал, что измельчение – один из энергоёмких процессов при комплексной переработке ТПМ. С целью снижения удельных энергозатрат процесса разрушения полимерных частиц используются методы криогенного или высокоскоростного измельчения. При криогенной обработке материал охлаждают с помощью сжиженного азота до температуры $T = -70 \div -80$ °С. Параметр T ниже температур стеклования термопластичных полимерных материалов: ПЭТ – $T_c = 70 \div 80$ °С; ПЭНД – $T_c = -50 \div -70$ °С; ПП – $T_c = -10$ °С; ПС – $T_c = 90 \div 100$ °С. Учёт данного параметра обеспечивает эффективность силового воздействия на измельчаемый материал за счёт увеличения хрупкости перерабатываемых полимеров.

При высокоскоростном измельчении частота воздействия элементов рабочего органа на частицы материала должна превышать период релаксации напряжений [82-84]. В этих условиях в структуре полимера нарастают внутренние напряжения, что существенно снижает энергозатраты на разрушение частиц.

Использование ТПМ как вторичного сырья обеспечивает уменьшение доли размещаемых на полигонах отходов, а также значительное сокращение потребляемой электроэнергии при реализации технологических процессов комплексной переработки по сравнению с синтезом первичных полимеров.

Спектр применения композиционных смесей на основе техногенных полимерных материалов неограничен. Полученные смеси используются во многих отраслях промышленности: строительной, химической, машиностроении

и др. Также полимерсодержащие смеси востребованы как наполнители при производстве конструкционных, отделочных и других композиционных материалов.

1.4 Характеристика современных технических средств и специального оборудования для переработки техногенных полимерных материалов

Как указано ранее, процесс измельчения ТПМ относится к числу наиболее энергоёмких операций в технологиях их комплексной переработки. С целью определения перспективных направлений конструктивно-технологического совершенствования оборудования для измельчения полимерных материалов выполнен анализ существующих патентозащищённых технических решений.

При проектировании энергоэффективного измельчительного оборудования важно учитывать специфические физико-механические характеристики ТПМ, такие как: низкая насыпная плотность, упругость, пластичность, предел прочности (на разрыв, сжатие), исходное состояние материалов (форма, размеры, плотность и др.), температура плавления, наличие посторонних включений и др.

В результате анализа отечественных и зарубежных патентозащищённых конструкций устройств для измельчения ТПМ определены основные направления конструктивно-технологического совершенствования измельчительного оборудования, обеспечивающего:

- возможность деформирования и измельчения ТПМ с различными физико-механическими характеристиками и физико-химическими свойствами [47, 78, 85-88];
- реализацию постадийного процесса измельчения с использованием комбинированного воздействия (сжимающего, ударного, истирающего и др.) рабочих органов на перерабатываемый материал [47, 78, 85-95];
- организацию внутреннего и внешнего рециклинга материальных потоков [86-87, 96-99];

- совмещение технологических операций (например, измельчения и смешения) [86-89, 100-101];
- возможность введения в агрегат дополнительных компонентов (добавок) сырьевых материалов [20, 73, 86-87, 92];
- предварительное уплотнение, перфорацию и деформацию техногенных материалов, улучшение условий захвата и нагнетания материала в рабочую камеру измельчительного оборудования [86-87, 91-93, 102-104];
- уменьшение ремонтосложности за счет оснащения устройств съемными элементами [86-87, 105-106];
- исключение попадания в ТПМ недробимых тел для повышения эксплуатационной надежности технологического оборудования за счет его оснащения вспомогательными устройствами [91-93].

Проведённый анализ патентозащищённого оборудования показал, что применение рабочих органов с развитой рабочей поверхностью является перспективным направлением конструктивно-технологического проектирования измельчительного оборудования, направленным на снижение энергоемкости процесса измельчения. На сегодняшний день разработаны конструкции многофункциональных агрегатов с иглофрезерными рабочими органами. Такой вид рабочего органа обеспечивает комбинированное воздействие на измельчаемые материалы. Дополнительно при переработке упругопластичных материалов на них осуществляется высокоскоростное воздействие стержневых элементов. За счёт этого обеспечивается энергоэффективное разрушение техногенных материалов [107]. При этом, данное направление имеет большой потенциал проектирования оборудования с комбинированными иглофрезерными рабочими органами для дальнейшей интенсификации процесса измельчения.

Конструктивное исполнение рабочих органов существующих измельчителей позволяет получать из ТПМ различные виды продукции: пластинчатые или спиралевидные фибронаполнители, порошкообразные или полидисперсные смеси и другие.

Основные технологические задачи при переработке полимерных отходов: измельчение крупногабаритного сырья, подготовка отходов к разделению (флотацией или воздушной сепарацией), повышение насыпной плотности материалов, сухая очистка – в процессе дробления под действием ударной силы отделяется загрязнение и др.

В случае переработки крупногабаритных ТПМ, их предварительно дробят на мелкие куски, которые могут быть переработаны на стандартном оборудовании. В основном для этого применяют шредеры, дисковые фрезы и др. Для повышения эффективности измельчительного оборудования в случае переработки ТПМ с низкой объёмной плотностью необходимо их предварительное уплотнение.

На большинстве перерабатывающих предприятиях для измельчения ТПМ используют оборудование (рис. 1.8), реализующее разрывающее и высокоскоростное ударное воздействие на перерабатываемый материал.

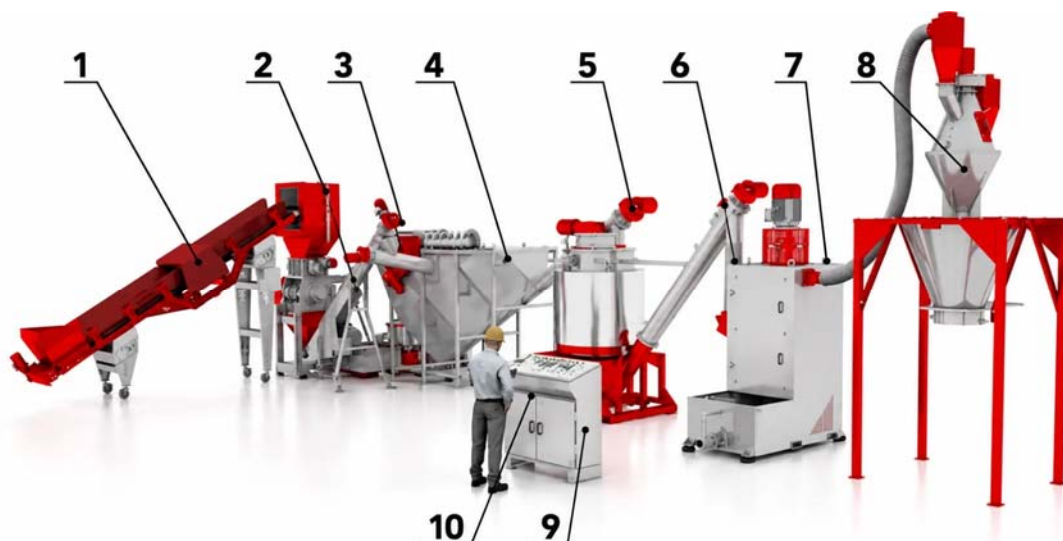


Рисунок 1.8 – Технологический комплекс «Stanko Polimer» для переработки пластмасс:
1 – ленточный транспортер; 2 – роторная дробилка; 3, 6 – шнековый питатель; 4 – ванна флотации; 5 – горячая мойка; 7 – центрифуга; 8 – аэросепаратор; 9 – пульт управления; 10 – оператор

Для первичного измельчения ТПМ до размеров частиц $d_{ш} = (5 \div 20) \cdot 10^{-3}$ м используются шредеры (рис. 1.9). Существуют однороторные, двухроторные и четырехроторные шредеры. Однороторные шредеры оснащены прижимной

плитой с ручным или гидравлическим управлением. В шредере возможно измельчение ТПМ различных видов и конфигураций, а также с широким диапазоном физико-механических характеристик. Это обеспечивается благодаря высоким значениям крутящего момента и конструктивным особенностям оборудования [108].

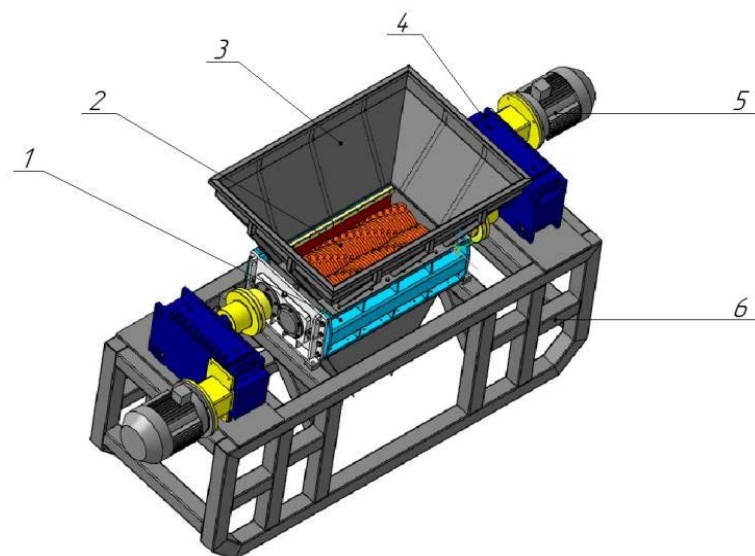


Рисунок 1.9 – Двухроторный шредер: 1 – блок измельчения; 2 – ротор с режущими ножами; 3 – загрузочное окно; 4 – редуктор; 5 – электродвигатель; 6 – рама

Роторные дробилки (рис. 1.10) (относятся ко второй ступени измельчителей) применяются после использования шредера для измельчения ТПМ до размеров частиц $d_d = (2 \div 5) \times 10^{-3}$ м.

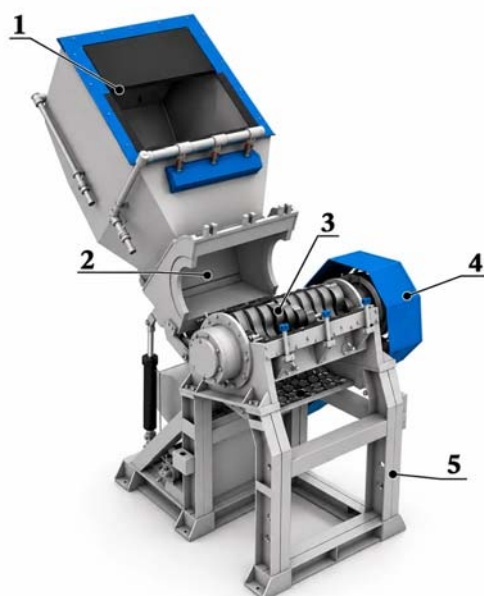


Рисунок 1.10 – Роторная дробилка: 1 – загрузочный бункер; 2 – корпус; 3 – ротор; 4 – привод; 5 – рама

Существуют дробилки с прямым (рис. 1.11 а), *V*-образным (рис 1.11 б), сегментным (рис. 1.11 в), косым (рис 1.11 г), ножничным (рис 1.11 д) резами.

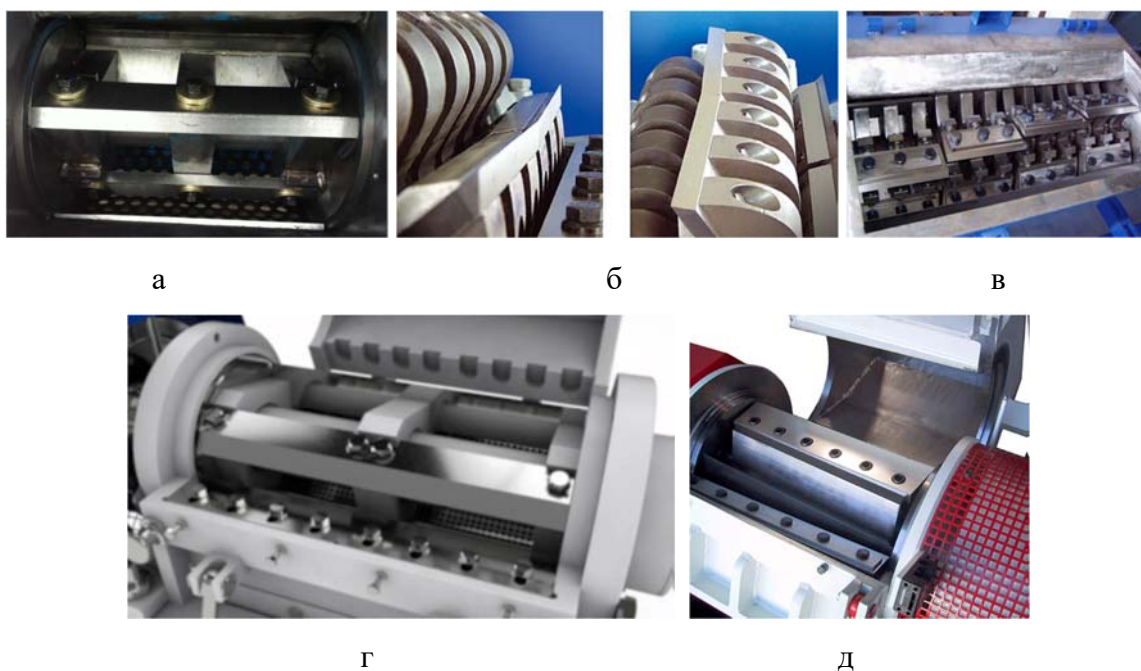


Рисунок 1.11 – Конструктивно-технологические особенности рабочих органов роторных дробилок: а – прямой рез; б – *V*-образный рез; в – сегментный рез; г – косой рез; д – ножничный рез

Вышеуказанное измельчительное оборудование обладает совокупностью технологических ограничений: одностадийность процесса измельчения, низкая степень измельчения, отсутствие возможности варьирования конструктивно-технологических параметров, измельчения ТПМ с различными физико-механическими характеристиками и др.

Анализ литературных источников [86-107] показал, что для повышения эффективности измельчительного оборудования используют следующие методы воздействия на ТПМ: резание, истирание, ударное воздействие (после криогенной обработки), высокоскоростное измельчение. В настоящее время разработано различное оборудование для измельчения ТПМ. При выборе того или иного измельчителя необходимо учитывать: вид и характер ТПМ, их размеры и количество, необходимую степень измельчения и конечный размер измельченного материала и др.

Таким образом, проведенный анализ существующих технических средств показал, что к числу наиболее эффективному оборудованию для измельчения ТПМ относятся агрегаты, реализующие комбинированное и высокоскоростное силовое воздействие рабочих органов на материал, имеющие роторы с развитой рабочей поверхностью и др.

Для повышения производительности измельчительных установок, предназначенных для переработки ТПМ, и увеличения степени измельчения сырья требуется разработать комплексные технологические решения.

Специализированное оборудование должно учитывать различные технологические условия переработки ТПМ, реализовывать постадийность процесса их измельчения, иметь возможность изменения соотношения разрывающего и сдвигового силового воздействия, использования рабочих органов с развитой рабочей поверхностью, обеспечивать контроль температуры измельчаемого материала и рабочих органов, высокую долговечность наиболее изнашиваемых узлов и деталей.

Инновационным решением вышеуказанных задач по повышению эффективности измельчителей полимеров является разработка оборудования с рабочим органом на основе иглофрезерных элементов. Иглофрезы консольными концами своих стержневых элементов реализуют избирательное комплексное воздействие на измельчаемые материалы. При этом реализуется энергоэффективные механизмы разрушения ТПМ [107, 109-111].

При проектировании оборудования, оснащённого иглофрезерными рабочими органами также необходимо учитывать различные физико-механических характеристик ТПМ, особенности иглофрезерных рабочих элементов в зависимости от решаемых технологических задач. Варианты силового воздействия стержневых элементов на измельчаемые материалы представлены на рисунке 1.12 [66-67].

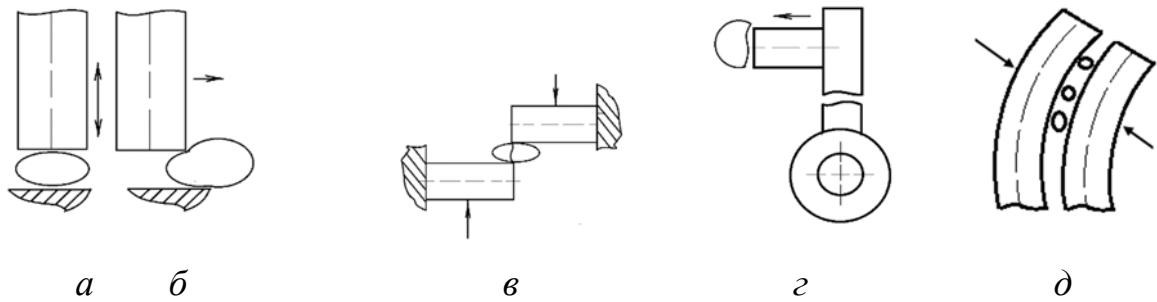


Рисунок 1.12 – Варианты силового воздействия стержневых элементов на измельчаемые материалы: а – ударно-раздавливающее разрушение; б – истирание; в – срез; г – свободный удар; д – сжатие по образующим стержней

Для измельчения полимерных материалов оптимальными являются виды воздействия стержневых элементов, представленные на схемах «б» и «в».

В случае измельчения материала при истирающем воздействии (рис. 1.12, схема «б»), многочисленные режущие кромки иглофрезерных элементов формируют большое количество линейных дефектов на поверхности частиц. Возникновение указанных дефектов предопределяет поэтапное разрушение частиц за счёт накопления повреждений в их структуре.

Разрушение материалов сдвиговым воздействием (рис. 1.12, схема «в») характеризуется высокой интенсивностью процесса. Данный эффект обусловлен наличием второй рельефной опорной поверхности, а также возможностью относительного перемещения двух иглофрезерных элементов конструкции. Это способствует увеличению частоты и силы контактных взаимодействий.

В основу разрабатываемых конструктивно-технологических решений положены варианты воздействия стержневых элементов на материал торцевыми поверхностями – посредством истирания, среза и высокоскоростного ударного воздействия. Такой комбинированный подход повышает уровень контактных напряжений в зоне разрушения при одновременном снижении удельной энергоёмкости процесса измельчения.

Среди многообразия технических решений, предусматривающих использование стержневых элементов иглофрезерных рабочих органов широкое распространение получили конструкции следующих типов: цилиндрические, дисковые, плоские, пальцевые и др. (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 – Разновидности иглофрезерных элементов

В качестве конструкционного материала для иглофрезерных рабочих элементов целесообразно применять стальную проволоку круглого сечения по ГОСТ 2333-80, с диапазоном диаметров от 0,1 мм до 10,0 мм. При измельчении ТПМ рекомендуется использовать проволоку стальную углеродистую пружинную по ГОСТ 9389-75. При проектировании крупногабаритных помольных агрегатов в качестве стержневых элементов иглофрезерных рабочих органов рекомендуется применение отрезков стальных канатов, обеспечивающих повышенную механическую стойкость и устойчивость к динамическим нагрузкам.

Иглофрезерные рабочие органы реализуют многократное взаимодействие стержневых элементов с измельчаемым материалом. При этом, происходит интенсификация процесса измельчения ТПМ за счёт большого количества единичных актов силового воздействия, а также равномерного распределения разрушающих напряжений по всему объёму обрабатываемой среды.

1.5 Анализ теоретических исследований процессов измельчения техногенных полимерных материалов

Теоретически процесс разрушения ТПМ можно представить в виде классических аналитических выражений, описывающих энергозатраты на измельчение.

Общее выражение энергетических затрат на сокращение крупности имеет вид [112]:

$$dE = -k \frac{dx}{x^n}, \quad (1.1)$$

где E – удельная энергия, сообщенная единице объема разрушаемого тела, необходимая для образования новой поверхности; k – коэффициент пропорциональности; x – средний размер частиц материала, м; n – коэффициент, зависящий от крупности частиц материала и способа их измельчения.

Согласно закону Кирпичёва-Кика, величина энергии, затрачиваемой на деформацию материала, прямо пропорциональна объему деформируемого тела. Данный закон позволяет определить предельный уровень энергии упругой деформации. При максимальных значениях упругое деформирование сменяется необратимыми структурными изменениями, завершающимися разрушением материала. Напряжение, соответствующее указанному переходу, принято обозначать как предельное (критическое) или разрушающее [113]. Работа, затрачиваемая на разрушение материала, пропорциональна объёму его частиц:

$$A = k_{KK} \cdot \Delta V, \quad (1.2)$$

где A – работа, затрачиваемая на измельчение материала, Дж; k_{KK} – коэффициент Кирпичёва-Кика, Дж/м³; ΔV – изменение объёма материала, м³. Уравнение (1.2) получено из уравнения (1.1), путем его интегрирования при $n = 1$.

Согласно закону Реттингера энергия разрушения пропорциональна вновь образованной поверхности [114]:

$$A = k_R \cdot \Delta F, \quad (1.3)$$

где k_R – коэффициент Риттингера, зависящий от свойств материала, Дж/м²; ΔF – изменение поверхности материала, м².

Уравнение (1.3) получено из уравнения (1.1), путем его интегрирования при $n = 2$.

Энергетический баланс хрупкого разрушения выражается уравнением Ребиндера [115]:

$$E_{\text{общ}} = E_y + E_s, \quad (1.4)$$

где $E_{\text{общ}}$ – подведенная к телу энергия, Дж; E_y и E_s – критическая энергия упругой деформации и энергия образованной поверхности, Дж.

Предельная энергия упругой деформации E_y определяется соотношением [116]:

$$E_y = \frac{\sigma^2 V}{2E}, \quad (1.5)$$

где σ – предел прочности, Па; V – объём тела, м³; E – модуль Юнга, Па.

В связи с упругопластическими характеристиками ТПМ процесс их измельчения обладает следующими особенностями [117].

Упруго-деформационное измельчение (по Н.С. Ениколопову) основано на накоплении энергии при приложении давления и её реализации в образовании новой поверхности под действием сдвиговой деформации. В этом случае энергия, запасённая в материале, резко высвобождается, приводя к множественному разрушению.

Неоднородности в материале (дефекты структуры, включения) могут снижать критические значения напряжений и деформаций, необходимые для образования микродефектов, ускоряя процесс множественного разрушения.

Температура ТПМ влияет на соотношение в нём упругих и пластических деформаций. При температурах ниже температуры стеклования ТПМ доминирует хрупкое разрушение. При повышении температуры возрастает доля пластических деформаций.

Увеличение скорости деформаций приводит к росту механических напряжений в ТПМ [118]. При этом, для реализации высокоскоростного измельчения ТПМ частота воздействия рабочих органов на материал должна превышать период релаксации перерабатываемых полимеров.

Базовое уравнение релаксации напряжений [119]:

$$-d\sigma/d\tau = k \cdot \sigma, \quad (1.6)$$

где σ – напряжение в момент времени τ , Па; k – относительная скорость убывания напряжения (скорость релаксации), с⁻¹.

После преобразования выражение примет вид

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-k\tau), \quad (1.7)$$

где σ_0 – начальное напряжение, Па.

Уравнение Аррениуса для определения скорости релаксации [120]:

$$k = k_0 \cdot \exp(-E_a/(RT)), \quad (1.8)$$

где k_0 – константа скорости релаксации, с^{-1} ; E_a – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж/(моль·К); T – температура ТПМ, К.

При механическом воздействии ТПМ нагреваются. Температура нагрева определяется по формуле [121]:

$$T = T_0 + \frac{A_T}{c \cdot m}, \quad (1.9)$$

где T_0 – начальная температура, К; A_T – энергия, преобразовавшаяся в тепло, Дж; c – удельная теплоёмкость ТПМ, Дж/(кг·К); m – масса ТПМ, кг.

Модуль упругости ТПМ зависит от их температуры [122]:

$$E(T) = E_0(1 - \alpha(T - T_0)), \quad (1.10)$$

где E_0 – модуль упругости при температуре T_0 , Па; α – температурный коэффициент, К^{-1} .

Потребляемая мощность ножевых дробилок при измельчении ТПМ определяется по формуле [123]:

$$P_{\text{др}} = \frac{F_{\text{изм}} \cdot v_p \cdot z}{\eta} = \frac{\tau_{\text{ср}} \cdot S \cdot v_p \cdot z}{\eta} = \frac{\tau_{\text{ср}} \cdot \delta \cdot b \cdot \pi \cdot D_p \cdot n_p \cdot z}{\eta}, \quad (1.10)$$

где $F_{\text{изм}}$ – сдвиговое усилие ножа ротора, Н; v_p – окружная скорость вращения ротора, м/с; z – число ножей ротора, шт.; η – КПД привода дробилки; $\tau_{\text{ср}}$ – напряжения сдвига в ТМП, Н/м^2 ; S – площадь среза, м^2 ; δ – толщина среза, м; b – ширина ножа, м; D_p – диаметр ротора, м; n_p – частота вращения ротора, с^{-1} .

Производительность ножевых дробилок определяется исходя из скорости прохождения материала через классифицирующую решётку по формуле [124]:

$$Q_{\text{др}} = v_{\text{пр}} \cdot S_{\text{отв}} \cdot \varphi \cdot \rho_{\text{изм}}, \quad (1.11)$$

где $v_{\text{пр}}$ – скорость прохождения измельчённых ТПМ через отверстия решётки, м/с; $S_{\text{отв}}$ – суммарная площадь отверстий решётки, м²; φ – коэффициент заполнения отверстий решётки материалом, $\varphi = 0,5 \div 0,8$; $\rho_{\text{изм}}$ – насыпная плотность измельчённых ТПМ, кг/м³.

Также производительность ножевых дробилок определяется по формуле [125]:

$$Q_{\text{др}} = D_{\text{р}}^2 \cdot B_{\text{р}} \cdot \rho_{\text{изм}} \cdot n_{\text{р}} \cdot k, \quad (1.12)$$

где $B_{\text{р}}$ – ширина ротора, м; k – эмпирический коэффициент, зависящий от типа ТПМ и конструкции дробилки.

Представленные методики расчёта основных параметров процессов измельчения полимерных материалов используются при разработке оборудования для их комплексной переработки. Однако, аналитические выражения не учитывают в полной мере особенности процесса измельчения ТПМ со специфическими физико-механическими характеристиками. В связи с этим необходимо проведение аналитических исследований процесса измельчения ТПМ, а также разработка специальных методик расчёта конструктивно-технологических и энергосиловых параметров агрегатов, оснащённых роторами с развитой рабочей поверхностью.

1.6 Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка роторно-центробежного агрегата комбинированного действия для повышения эффективности процесса измельчения термопластичных техногенных полимерных материалов с различными физико-механическими характеристиками, методики расчёта его конструктивно-технологических и энергосиловых параметров.

Задачи исследования:

1. На основании анализа современных технологий и технических средств определить перспективные направления конструктивно-технологического совершенствования оборудования для измельчения ТПМ.
2. Провести теоретические исследования кинетики процесса деформационно-силового воздействия на измельчаемые ТПМ и разработать конструктивно-технологические условия для его реализации.
3. Получить аналитические выражения для расчёта конструктивно-технологических и энергосиловых параметров РЦА КД.
4. Разработать стендовые установки и провести физическое моделирование процессов постадийного измельчения ТПМ с учётом конструктивного исполнения рабочих органов.
5. Разработать патентозащищённую конструкцию РЦА КД для измельчения ТПМ с учётом их специфических физико-механических характеристик.
6. Провести комплексные экспериментальные исследования по установлению рациональных режимов измельчения ТПМ в РЦА КД и получению продукции из вторичных полимерных материалов различного технологического назначения.
7. С использованием разработанной методики расчёта конструктивно-технологических и энергосиловых параметров спроектировать и изготовить опытно-промышленный РЦА КД, определить технико-экономическую эффективность его использования для переработки ТПМ.

1.7 Выводы

1. На основании проведённого анализа источников образования и видов техногенного сырья определены приоритетные направления комплексной переработки ТПМ с различными физико-механическими характеристиками. С учётом технологического, экологического и экономического потенциала

перспективным способом утилизации ТПМ является их переработка с последующим производством изделий различного назначения.

2. Установлены существующие экологические и механо-технологические проблемные задачи при переработке и утилизации ТПМ. Для их решения необходимо совершенствование измельчительного оборудования и технологий получения вторичного сырья из ТПМ.

3. При изучении физических особенностей процессов измельчения ТПМ выявлено, что для эффективного разрушения полимеров необходимо использование роторов с развитой рабочей поверхностью.

4. Определены основные направления конструктивно-технологического совершенствования измельчительного оборудования для повышения его эффективности и расширения видов товарной продукции, получаемой из ТПМ.

5. Поставлена цель и определены задачи исследований диссертационной работы.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РОТОРНО- ЦЕНТРОБЕЖНОМ АГРЕГАТЕ

2.1 Теоретические предпосылки создания роторно-центробежного агрегата комбинированного действия для постадийной переработки полимерных отходов

Для увеличения эффективности измельчителей термопластичных ТПМ необходима разработка специального оборудования, конструктивные и технологические параметры которого адаптированы к различным технологическим условиям переработки упругопластичных материалов.

В результате анализа существующих конструкций оборудования для переработки ТПМ определены основные направления их конструктивно-технологического совершенствования. Для повышения эффективности измельчительного оборудования необходимо реализовать постадийность технологических процессов, возможность варьирования разрывающего и сдвигового силового воздействия, обеспечить повышенные напряжения в структуре перерабатываемого материала и применение роторов с развитой рабочей поверхностью.

В связи с вышеуказанным, при разработке и исследовании оборудования для измельчения ТПМ необходимо учитывать как специфические физико-механические характеристики полимерных материалов (исходное состояние – форму, размеры, плотность, сыпучесть; прочностные характеристики), так и перспективные патентозащищённые технические решения при их дальнейшем совершенствовании [126-127].

Предпосылками для создания роторно-центробежного агрегата являются теоретические и конструктивно-технологические положения процессов постадийной переработки техногенных полимерных материалов и получения различных видов продукции [29, 54, 66-67, 107, 119-125].

Данные положения предусматривают следующие стадии и механизмы силового воздействия:

- предварительная подготовка ТПМ перед их измельчением (предразрушение, удаление просыпи, классификация материалов по фракциям (при необходимости) и др.);
- предварительное уплотнение и соответствующее удаление воздушной фазы из мелкокусковых материалов;
- эффективное нагнетание ТПМ в рабочую зону и их захват рабочим органом;
- рациональное соотношение и стабилизация нормальных и касательных напряжений в зоне предразрушения;
- интенсивное и энергоэффективное разрушение ТПМ при упругопластических разрывающих напряжениях;
- снятие упругопластических напряжений (деформаций) в зоне релаксации ТПМ;
- реализация внутреннего рециклинга измельчаемых ТПМ при знакопеременных силовых нагрузках;
- эффективное использование внутренних энергетических ресурсов (энергоносителей) для последующей переработки и транспортировки ТПМ;
- создание энергонапряженных зон деформационно-истирающего воздействия на мелкозернистые ТПМ;
- реализация точечного многократного энергосилового воздействия на измельчаемые ТПМ при их внутреннем рециклинге;
- обеспечение конструктивно-технологических условий замкнутого цикла измельчения с реализацией внешнего рециклинга воздушно-материальных потоков;
- дальнейшая реализация технологических процессов (операций) с целью получения различных видов товарной продукции: приготовление порошкообразных наполнителей или пластинчатых армирующих фибр из

полимерсодержащих отходов, производство композиционных смесей различных составов или композиционных материалов в виде экструдированного гранулята и др.

Основной задачей научно-технической разработки РЦА КД является расширение его технологических возможностей [128-130] для реализации постадийного измельчения ТПМ с получением различных видов вторичного сырья и дальнейшего производства полимерсодержащей товарной продукции:

1. Стадия I – получение в первой камере РЦА КД крупнозернистых или пластинчатых ТПМ ($d_{\text{ср}} = (5 \div 10) \cdot 10^{-3}$ м, $l = (15 \div 20) \cdot 10^{-3}$ м). Данный вид сырья является основной массой для термомеханической переработки в двухкамерном термосмесителе [131].

2. Стадия II – получение полифракционных тонкоизмельченных ТПМ ($d_{\text{ср}} = (0,5 \div 5) \cdot 10^{-3}$ м) во второй камере РЦА КД и последующая их гомогенизация с гетерогенными техногенными компонентами (фибронаполнителями из базальтовых волокнистых отходов, техническим углеродом, пластификатором и др.) в рециркуляционном смесителе [132-133]. В дальнейшем композиционная смесь добавок экструдируется в пресс-валковом экструдере с плоской матрицей [134]. Полученный гранулят подается через шнековый питатель во вторую камеру термосмесителя.

3. Тонкоизмельченные ТПМ, полученные в технологическом модуле с РЦА КД, работающем по замкнутому циклу измельчения с классификатором или сепаратором [135, 136], используются в качестве наполнителя сухих строительных смесей для получения строительных изделий.

2.2 Конструктивно-технологические особенности и принцип действия роторно-центробежного агрегата комбинированного действия

Развитие научно-технического направления создания агрегатов, оснащённых роторами с развитой рабочей поверхностью, является основой для

разработки роторно-центробежных агрегатов комбинированного действия (РЦА КД) [137-142].

В РЦА КД, представленном на рисунке 2.1, реализован принцип постадийного измельчения ТПМ с различными физико-механическими характеристиками. При этом на перерабатываемый упругопластический материал осуществляется комбинированное силовое воздействие. Это расширяет технологические возможности измельчительного оборудования, а также обеспечивает снижение энергозатрат на процесс измельчения.

Агрегат состоит из двух цилиндрических камер измельчения 1 и 2. Камеры соединены последовательно и оснащены роторами 7 и 8. В первой камере измельчения ротор 7 составлен из набора дисковых фрез 9.

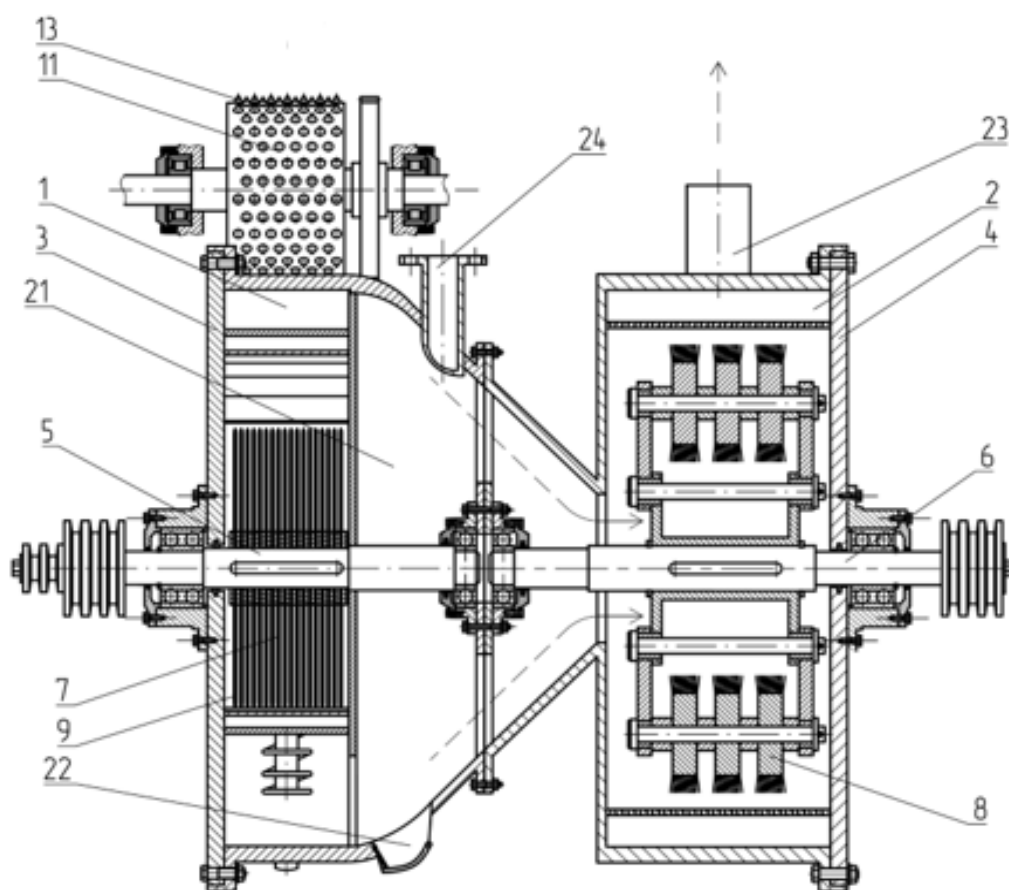


Рисунок 2.1 – Роторно-центробежный агрегат комбинированного действия:
 1, 2 – камеры измельчения; 3, 4 – крышки; 5, 6 – валы; 7, 8 – роторы; 9 – дисковые фрезы;
 11 – шипованные валки; 13 – конические шипы; 21 – межкамерное пространство;
 22 – карман-уловитель; 23 – выгрузочный патрубок; 24 – патрубок для введения добавок

В верхней части первой камеры РЦА КД (рис. 2.2) установлен пресс-валковый уплотнитель с двумя шипованными валками 11. На рабочей поверхности валков изготовлены конические шипы 13. Как показали исследования, данная форма шипов обеспечивает рациональные условия предварительного перфорирования, уплотнения и захвата, а также предотвращает залипание ТПМ на поверхности валков.

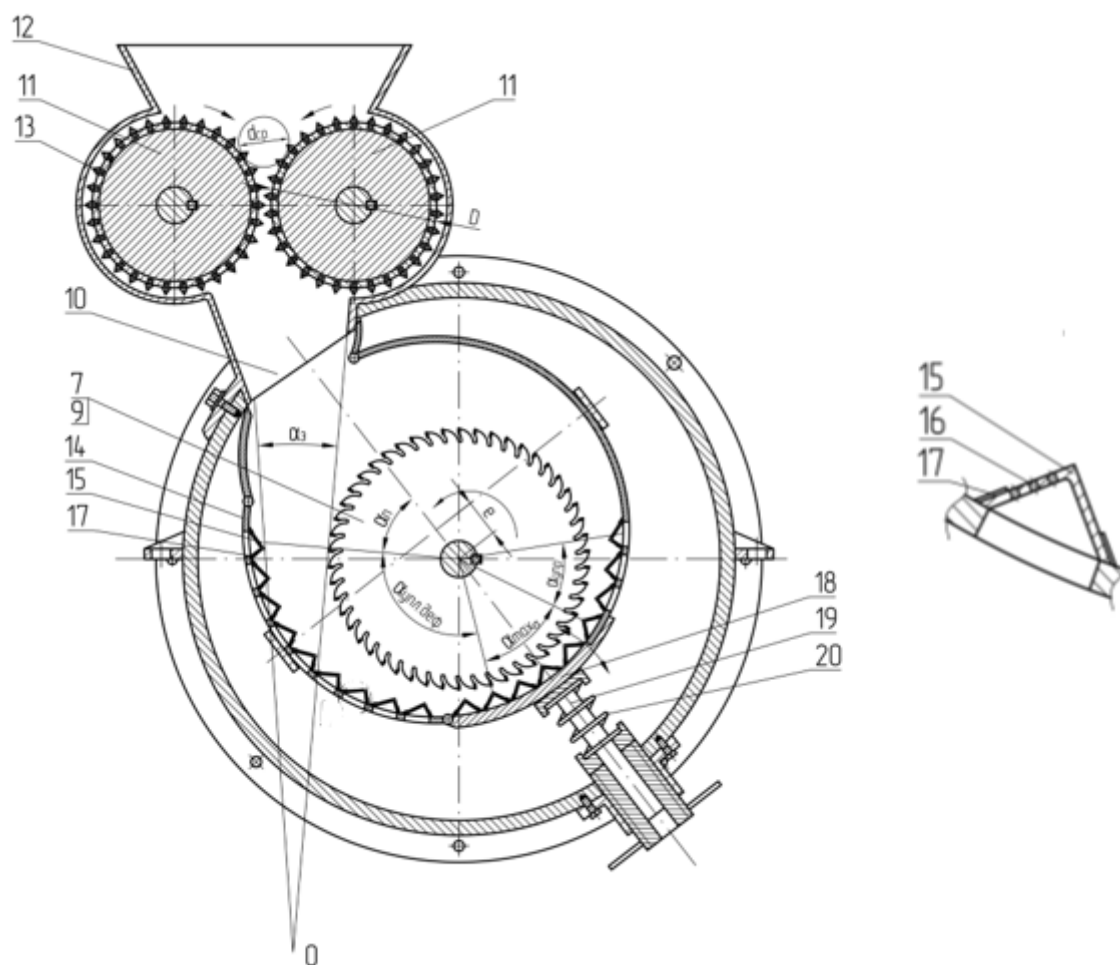


Рисунок 2.2 – Камера измельчения с дисковыми фрезами:

- 7 – ротор; 9 – дисковые фрезы; 10 – загрузочное отверстие; 11 – шипованные валки;
 12 – приёмный бункер; 13 – конические шипы; 14 – бандаж;
 15 – съёмные элементы; 16 – классифицирующие отверстия; 17 – направляющие;
 18 – дугобразная пластина; 19 – демпфирующее устройство; 20 – пружина

Внутри первой камеры измельчения установлен бандаж 14. Бандаж имеет возможность смещение на величину эксцентриситета e для создания рациональных условий захвата и деформационно-силового воздействия на

материал дисковыми фрезами. На внутренней поверхности бандажа установлены съемные элементы 15. На торцевой поверхности съемных элементов выполнены классифицирующие отверстия 16.

Во второй камере измельчения РЦА КД установлен ротор 8, оснащённый иглофрезерными рабочими органами. Для получения измельчённого материала заданного фракционного состава во второй камере установлена классифицирующая сетка.

РЦА КД работает следующим образом. Исходные ТПМ подаются в приёмный бункер 12. Вращаясь навстречу друг другу шипованные валки 11 захватывают материал и осуществляют его предварительную деформацию. Далее материал поступает в рабочую зону первой камеры измельчения 1 где измельчается дисковыми фрезами. Измельченный материал через классифицирующие отверстия 16 поступает в рабочую зону второй камеры измельчения 2. Внутри второй камеры происходит окончательное измельчение материала иглофрезерными рабочими органами до заданного размера частиц. Далее материал выводится через выгрузочный патрубок 23.

Разработанная конструкция РЦА КД характеризуется повышенной энергоэффективностью, обеспеченной за счёт рационального соотношения деформационного и истирающего воздействия, реализации сжимающих, ударных, раскалывающих и разрывающих напряжений в зонах контакта с измельчаемым материалом.

2.3 Исследование процесса предварительной деформации техногенных полимерных материалов в пресс-валковом уплотнителе

Техногенные полимерные материалы имеют низкую исходную плотность $\rho_n = 210 \div 530$ (кг/м³) [143]. Полимерсодержащие отходы рекомендуется предварительно деформировать и уплотнять в пресс-валковом уплотнителе (ПВУ) [144-145] для повышения эффективности последующего измельчения ТПМ,

производительности технологического оборудования, улучшения условий нагнетания материала в зону измельчения.

При установлении расчетных зависимостей, описывающих основные кинетические и энергосиловые параметры ПВУ, необходимо обеспечивать повышенный коэффициент трения материала о рабочую поверхность. Данный коэффициент зависит от конструктивно-технологического исполнения разработанных устройств. В связи с этим, в разработанном ПВУ использованы пластинчатые, параллельно расположенные вдоль горизонтальных осей, выступы – рифли (рис. 2.3, а); конусообразные шипы, закрепленные на рабочей поверхности валков в шахматном порядке (рис. 2.3, б); направляющие шевроны (рис. 2.3, в) и др.).

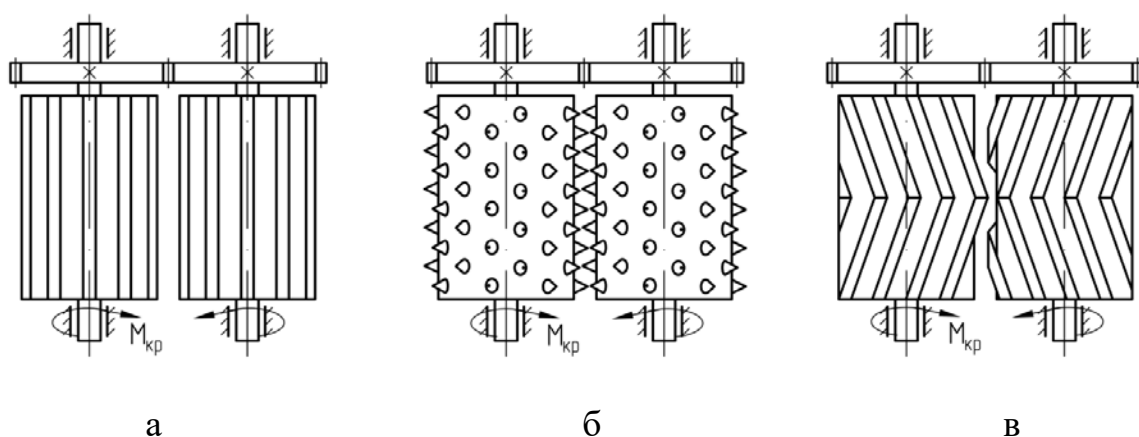


Рисунок 2.3 – Пресс-валковые уплотнители с развитой рабочей поверхностью валков:
а – с параллельными пластинами; б – с коническими шипами; в – с шевронными выступами

Выбор устройств и схем их установки обусловлен исходным состоянием, геометрической формой и размерами перерабатываемых ТПМ. При переработке различных видов ТПМ использованы следующие технические решения (рис. 2.3). Так, для переработки пластинчатых полимерных материалов используется схема «а»; при переработке пустотелых объемных ТПМ (например отработанных полимерных ёмкостей), требующих при уплотнении удаления воздушной фазы и обеспечения максимально возможной плотности с целью их последующего энергоэффективного измельчения – схема «б». В случае диспергирования мелкокусковых или компактированных зернистых полимерных материалов,

обладающих большей сыпучестью по сравнению с вышеуказанными видами ТПМ – схема «в». Для этого необходимо обеспечивать равномерное распределение перерабатываемого материала по ширине валков.

Учитывая большое разнообразие видов ТПМ, их геометрии и форм, а также прочностных характеристик, целесообразно осуществлять предварительное дробление и классификацию, что позволяет стабилизировать энергосиловые характеристики процесса измельчения и технологические режимы работы РЦА КД. Кроме того, при этих условиях обеспечивается равномерное распределение ТПМ по рабочей поверхности ПВУ, что повышает его производительность. При реализации конструктивно-технологических решений «а» и «в» (рис. 2.3) достигается заполнение полимерными материалами межпластинчатого и межшеvronного пространства.

2.3.1 Анализ процесса уплотнения техногенных полимерных материалов с низкой объёмной плотностью

ТПМ, в том числе полимерные отходы потребления, характеризуются низкой объёмной плотностью, сложной геометрической формой, наличием внутренних пустот.

При осуществлении предварительной деформации и уплотнения ТПМ приобретают одноразмерность и повышенную плотность, что создает их наиболее благоприятное физическое состояние для дальнейшего измельчения.

В связи с этим основной задачей процесса предварительного уплотнения ТПМ перед измельчением является увеличение их плотности за счет удаления газообразной фазы из внутренних полостей объемных тел, а также снижение пустот (порового пространства) между отдельными конгломератами.

При деформации ТПМ в пресс-валковом уплотнителе (ПВУ) количество удаляемой газообразной фазы определяется на основании закона сохранения массы [146]:

$$Q_m = Q_{V0} \cdot \rho_0 = Q_V \cdot \rho_{\text{упл}}, \quad (2.1)$$

где Q_m – массовая производительность ПВУ, кг/с; Q_{V_0} – объемная производительность ПВУ по пустотелым ТПМ, м³/с; Q_V – объемная производительность ПВУ по уплотненным ТПМ, м³/с; ρ_0 – исходная плотность пустотелых ТПМ, кг/м³; $\rho_{упл}$ – плотность уплотненных ТПМ, кг/м³.

При этом, производительность ПВУ:

$$Q_{ПВУ} = Q_{V_0} - Q_V = Q_m \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_{упл}} \right) = Q_V \left(\frac{\rho_{упл}}{\rho_0} - 1 \right). \quad (2.2)$$

Объемная производительность ПВУ (в классическом представлении) по уплотненным ТПМ определяется из следующего выражения:

$$Q_V = B \cdot b \cdot \vartheta_B, \quad (2.3)$$

где B – ширина валков, м; b – величина зазора между валками, м; ϑ_B – окружная скорость валков, м/с, $\vartheta_B = \pi \cdot D_B \cdot n_B$; $D_B = 2R_B$ – диаметр валков, м; n_B – частота вращения валков, с⁻¹.

Из выражений (2.2) и (2.3) следует:

$$\vartheta_B = \frac{Q_V}{B \cdot b} = \frac{Q_{ПВУ}}{B \cdot b \cdot \left(\frac{\rho_{упл}}{\rho_0} - 1 \right)}. \quad (2.4)$$

Процесс уплотнения ТПМ в ПВУ характеризуется значениями коэффициентов сжатия $\kappa_{сж} = \frac{H_0}{b}$ и уплотнения $\kappa_{упл} = \frac{\rho_{упл}}{\rho_0}$, где H_0 – толщина слоя ТПМ до уплотнения в ПВУ, м.

2.3.2 Расчёт основных конструктивно-технологических и энергосиловых параметров пресс-валкового уплотнителя

Значение производительности пресс-валкового уплотнителя с гладкими валками находим $Q_{ПВУ}$ (кг/с) по следующей формуле [147]:

$$Q_{ПВУ} = B \cdot b \cdot R_B \cdot \rho_{упл} \cdot \omega_B \cdot f_{тр} \cdot k_{\rho_0}, \quad (2.5)$$

где R_B – радиус валков, м; ω_B – угловая скорость валков, рад/с; $f_{тр}$ – коэффициент трения, учитывающий геометрическую поверхность валков; k_{ρ_0} – коэффициент, учитывающий форму и размеры перерабатываемых

ТПМ [125], $k_{\rho_0} = 0,7 \div 0,9$ (для крупнокусковых ТПМ), $k_{\rho_0} = 0,3 \div 0,6$ (для пластинчатых и волокнистых частиц).

При расчете производительности ПВУ с шипованными валками следует учитывать геометрический профиль и количество шипов (рис. 2.4), а также реальное пространство (между пластинами, шевронами) и объёмную плотность деформируемых ТПМ.

В связи с вышеуказанным выражение для определения производительности ПВУ примет вид:

$$Q_{\text{ПВУ}} = (B \cdot b \cdot R_{\text{в}} - \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r_{\text{к}}^2 \cdot h_{\text{к}} \cdot i_{\text{к}}) \cdot \rho_{\text{упл}} \cdot \omega_{\text{в}} \cdot f_{\text{тр}} \cdot k_{\rho_0}, \quad (2.6)$$

где $r_{\text{к}}$ – радиус конических шипов, м, $r_{\text{к}} = D_{\text{к}}/2$; $h_{\text{к}}$ – высота конических шипов, м; $i_{\text{к}}$ – количество конических шипов, шт.

Необходимый для преодоления сопротивлений вращению максимальный крутящий момент $M_{\text{вр.мах}}$, определяется значением вертикальной проекции силы $P_{\text{мах}}$ (рис. 2.4):

$$M_{\text{вр.мах}} = P_{\text{мах}} \cdot \sin \alpha_{\text{н}} \cdot R_{\text{в}}. \quad (2.7)$$

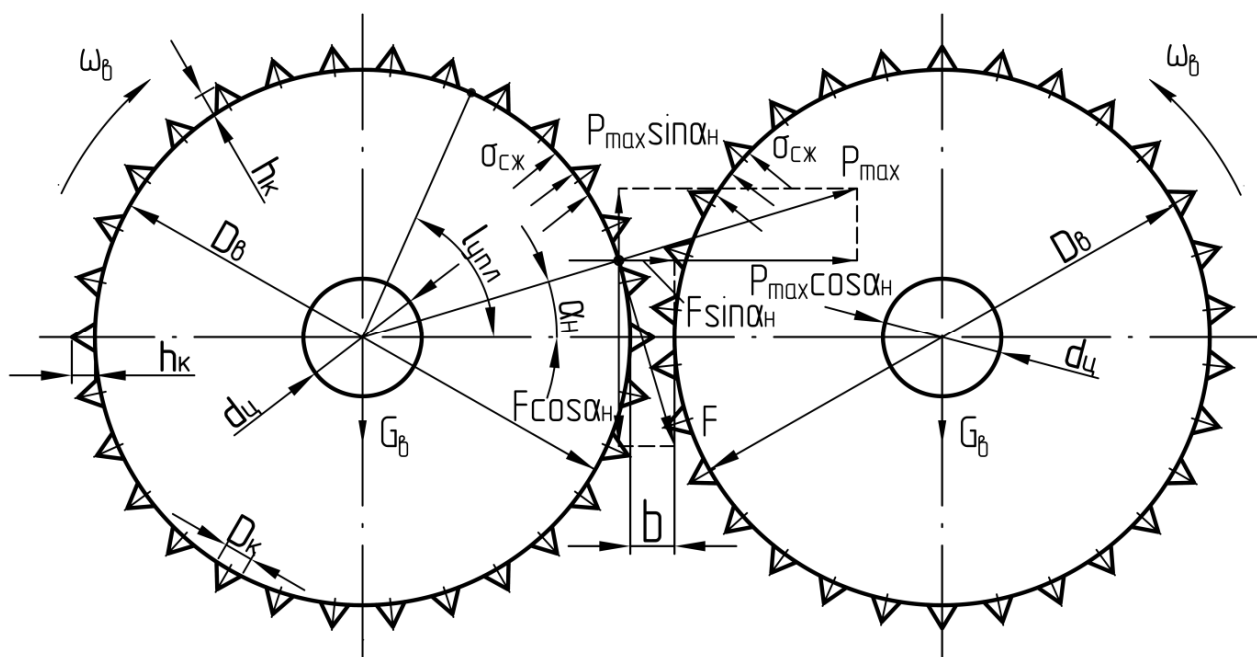


Рисунок 2.4 – Схема для расчёта усилий уплотнения полимерных отходов

Максимальное силовое воздействие P_{max} возникает в зоне нейтрального угла $\alpha_n = 3 \div 4^\circ$ (рис. 2.4), около горизонтальной оси валков. Сила P_{max} необходима для уплотнения и деформирования ТПМ. Данный параметр эквивалентен распорному усилию, которое передаётся на подшипниковые опоры валков и определяет уровень их нагруженности в процессе работы оборудования.

Для исполнения ПВУ с шипами на рабочей поверхности валков силовое воздействие на пустотелые ТПМ рассчитывается с учетом коэффициента дополнительного сопротивления – $k_{сопр} = 1,1 \div 1,3$.

Величина P_{max} может быть определена из следующего выражения:

$$P_{max} = \sigma_{сж} \cdot S_v \cdot k_{\rho_0} \cdot k_{сопр}, \quad (2.8)$$

где $\sigma_{сж}$ – напряжение сжатия ТПМ, МПа; S_v – площадь силового воздействия на поверхности валков, м².

Согласно теории разрушения полимерных материалов [148] сжимающее напряжение $\sigma_{сж}$ рассчитывается по формуле

$$\sigma_{сж} = E \cdot \varepsilon = 3K(1 - 2\mu) \cdot \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2.9)$$

где E – модуль Юнга (модуль растяжения-сжатия), МПа; ε – относительная деформация растяжения (сжатия); K – модуль упругости при всестороннем сжатии, МПа; μ – коэффициент Пуассона, равный отношению поперечного сжатия образца к его продольному растяжению; Δl – удлинение образца при приложении силы, м; l_0 – исходная, первоначальная длина образца, м.

Площадь рабочей поверхности валков, взаимодействующей с деформируемым материалом, определяется по формуле:

$$S_v = B \cdot l_{упл} = B \cdot \pi \cdot R_v \cdot \alpha_{упл}, \quad (2.10)$$

где B – ширина валка, м; $l_{упл}$ – длина дуги поверхности валка в зоне уплотнения, м, ограниченная углом $\alpha_{упл}$, град.

Возникающий в подшипниковых опорах валков момент сопротивления трению $M_{тр}$, обусловлен результирующей силой $G_{рез}$ от совокупного действия максимального усилия P_{max} и силы тяжести G_v валка.

С учётом расположения проекции усилия P_{max} в зоне нейтрального угла на центральной линии валков, выражение для расчёта результирующей силы $G_{рез}$ можно записать в следующем виде:

$$G_{рез} = \sqrt{(P_{max} \cos \alpha_n)^2 + G_B^2}. \quad (2.11)$$

Тогда

$$M_{тр} = 0,5 \sqrt{(P_{max} \cos \alpha_n)^2 + G_B^2} \cdot f_{пр} \cdot d_{ц}, \quad (2.12)$$

где $f_{пр}$ – приведенный к валу коэффициент трения качения, $f_{пр} = 0,001$; $d_{ц}$ – диаметр цапфы вала, м.

Учитывая значения угловой скорости вращения валков ω_B , установленных значений $M_{вр. max}$ и $M_{тр}$, общее аналитическое выражение для определения потребляемой мощности привода ПВУ можно представить в виде:

$$P_{ПВУ} = \frac{2 \left(\sigma_{сж} \cdot B \cdot \pi \cdot R_B^2 \cdot \alpha_{упл} \cdot k_{\rho_0} \cdot \sin \alpha_n + 0,5 \sqrt{(\sigma_{сж} \cdot B \cdot \pi \cdot R_B \cdot \alpha_{упл} \cdot k_{\rho_0} \cos \alpha_n)^2 + G_B^2 \cdot f_{пр} \cdot d_{ц}} \right)}{\eta_{ПВУ}} \cdot \omega_B, \quad (2.13)$$

где $\eta_{ПВУ}$ – КПД ПВУ, ω_B – угловая скорость валков, рад/с, $\omega_B = 2\pi n_B$.

2.4 Теоретические исследования условий деформационно-силового воздействия рабочих органов в первой камере роторно-центробежного агрегата

2.4.1 Исследования геометрических параметров роторно-центробежного агрегата и кинетических параметров процесса измельчения в первой камере при деформационно-силовом воздействии

Процесс деформирования и измельчения ТПМ в первой рабочей камере РЦА КД осуществляется постадийно по следующим зонам (рис. 2.5) [149]: I – в зонах подачи и захвата, деформации и измельчения материала, ограниченных, соответственно, углами α_n , α_z и $\alpha_{деф.изм.}$; II – в зоне максимальных напряжений измельчения – $\alpha_{изм. max}$. После выхода из зоны II в зоне упругого расширения ($\alpha_{упр.}$) осуществляется релаксация напряжённого состояния измельчённого материала.

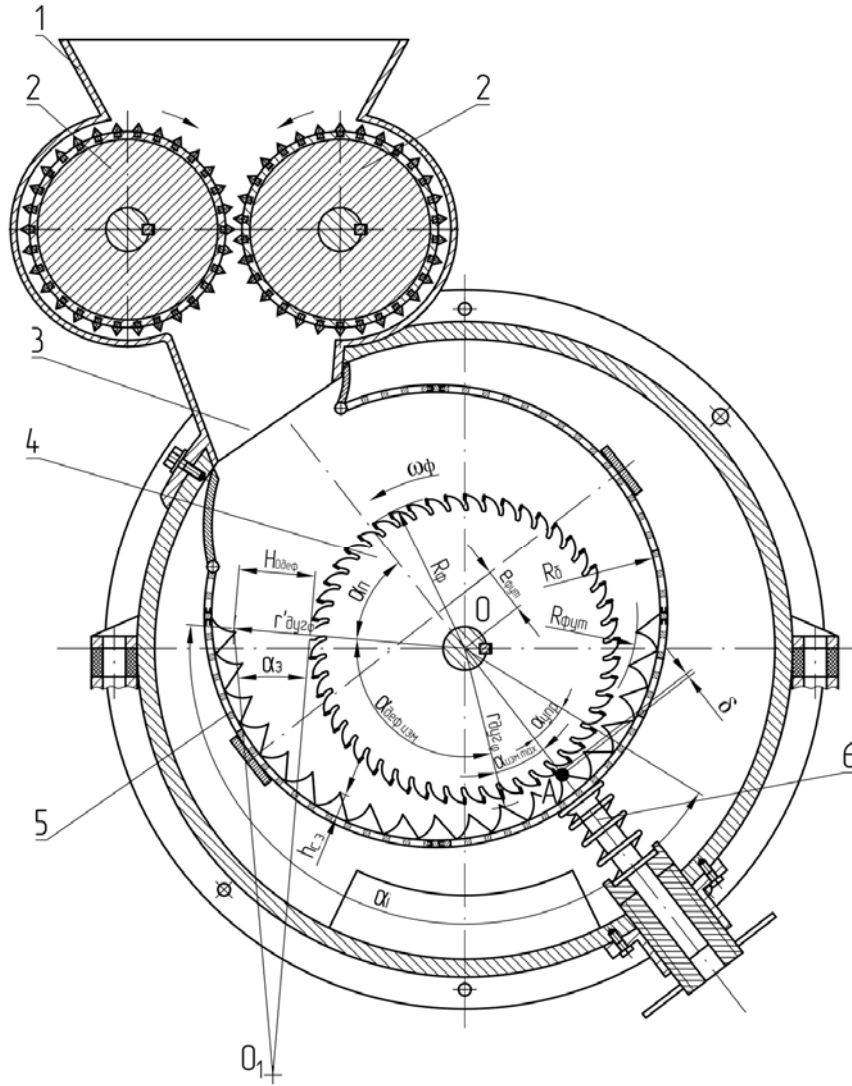


Рисунок 2.5 – Схема к расчёту геометрических и кинематических параметров агрегата:
 1 – бункер; 2 – шипованные валки пресс-валкового уплотнителя; 3 – загрузочное отверстие;
 4 – дисковые фрезы; 5 – бандаж; 6 – демпферное устройство

В связи с тем, что подвижный бандаж установлен эксцентрично относительно дисковых фрез рабочая зона первой камеры РЦА КД имеет дугообразную форму с сужающимся каналом, а радиус её кривизны определяется уравнением логарифмической спирали в полярных координатах [150]:

$$r'_{\text{дуг}\varphi} = r_{\text{дуг}\varphi} e^{q\varphi}, \quad (2.14)$$

где $r'_{\text{дуг}\varphi}$, $r_{\text{дуг}\varphi}$ – соответственно, полярные радиусы спирали до и после поворота на угол φ , м; q – коэффициент роста спирали; φ – угол поворота спирали, град., причём $\varphi = \alpha_{\text{деф.изм}}$; $\alpha_{\text{деф.изм}}$ – угол деформации и измельчения материала в дугообразном сужающемся канале, град.

Так как бандаж имеет возможность перемещения относительно дисковых фрез, следует учитывать величину эксцентриситета $e_{фут}$:

$$r_{\partial yz \alpha_{\text{деф.изм}}} = R_{фут} - e_{фут}, \quad (2.15)$$

где $R_{фут}$ – радиус внутренней поверхности футеровки бандажа, с учетом высоты съемных элементов футеровки $h_{с.э.}$, м; $e_{фут}$ – величина эксцентриситета, м.

В свою очередь, полярный радиус $r_{\partial yz \alpha_{\text{деф.изм}}}$, соответствующий начальной точки спирали, будет равен:

$$r_{\partial yz \alpha_{\text{деф.изм}}} = R_{\phi} + \delta, \quad (2.16)$$

где R_{ϕ} – радиус дисковой фрезы, м; δ – минимальный зазор между фрезами и футеровкой, м.

Толщина деформируемого и измельчаемого слоя материала, ограниченная углом $\alpha_{\text{деф.изм.}}$, согласно (2.14):

$$H_{0\text{деф}} = r'_{\partial yz \alpha_{\text{деф.изм}}} - R_{\phi}. \quad (2.17)$$

Из уравнения 2.16 выразим величину $r'_{\partial yz \phi}$:

$$r'_{\partial yz \alpha_{\text{деф.изм}}} = H_{0\text{деф}} + R_{\phi}. \quad (2.18)$$

Согласно известной зависимости [125]:

$$\alpha_{\text{деф.изм}} = \frac{\ln(r'_{\partial yz \alpha_{\text{деф.изм}}} / r_{\partial yz \alpha_{\text{деф.изм}}})}{k}, \quad (2.19)$$

где k – параметр, выражающийся через коэффициент роста спирали q ,

$$k = \frac{\ln q}{2\pi}, \quad (2.20)$$

или

$$\alpha_{\text{деф.изм}} = \frac{2\pi \ln \left(\frac{r'_{\partial yz \alpha_{\text{деф.изм}}}}{r_{\partial yz \alpha_{\text{деф.изм}}}} \right)}{\ln q}. \quad (2.21)$$

В то же время, параметр k можно выразить соотношением

$$k = \text{ctg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_3 \right), \quad (2.22)$$

где α_3 – угол захвата материала в зоне уплотнения, рад.

При равенстве значений выражений 2.20 и 2.22

$$\frac{\ln q}{2\pi} = \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_3 \right) \quad (2.23)$$

получим значение угла захвата измельчаемого материала

$$\alpha_3 = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}(k) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left[\frac{\ln \left(\frac{r'_{\partial y^2} \alpha_{\text{деф.изм}}}{r_{\partial y^2} \alpha_{\text{деф.изм}}} \right)}{\alpha_{\text{деф.изм}}} \right]. \quad (2.24)$$

Для выявления корреляции между угловыми параметрами, определённых в вышеуказанных выражениях, применяем метод проецирования на плоскость. Данная плоскость ориентирована ортогонально оси ротора. В данной проекционной схеме цилиндрическая поверхность ротора отображается в виде окружности. Её центр совпадает с точкой пересечения оси ротора с плоскостью проекций. Дугообразный профиль рабочей зоны при этом проецируется как фрагмент спирали, центр кривизны которой геометрически идентичен центру упомянутой окружности. Угол захвата α_3 определяется как угол между нормалью, проведенной к точке на данной окружности, соответствующей участку начала деформации и измельчения материала $H_{0_{\text{деф}}}$ и касательной к спиральному профилю в этой же точке.

При анализе кинематики движения ТПМ в первой камере измельчения РЦА КД угол захвата α_3 представляет собой угол между плоскостями касательными к окружности ротора и к внешней стороне дугообразного канала. Величина данного угла влияет на стабильность процесса измельчения. При превышении допустимых значений угла захвата, зависящих от внешнего трения частиц измельчаемого материала, последний начинает захватываться ротором ближе к зоне максимальных давлений измельчения. При уменьшении угла захвата α_3 ниже допустимых значений снижается эффективность силового воздействия на материал, а также производительность оборудования.

Величина угла, ограничивающего зону деформации-измельчения, зависит от величины эксцентриситета $e_{фут}$, радиуса футеровки $R_{фут}$, радиуса дисковых фрез R_{ϕ} и др.

Для описания деформационно-сдвигового уплотнения и измельчения материала в зоне угла $\alpha_{\text{деф.изм.}}$ используем полученные аналитические выражения.

Текущее значение толщины слоя материала рассчитывается по следующей формуле:

$$h_{\text{деф.упл.}} = r_{\partial y_{\phi}} e^{q\alpha_{\text{деф.изм.}}} - R_{\phi}. \quad (2.25)$$

В процессе вращения ротора в направлении, указанном на схеме (рис. 2.5), по мере уменьшения угла зоны деформации-измельчения $\alpha_{\text{деф.изм.}}$ ($\alpha_{\text{деф.изм.макс}} \rightarrow 0$, относительно точки А) происходит уменьшение толщины деформируемого слоя материала $h_{\text{деф.упл.}}$. Толщина слоя изменится от $H_{0_{\text{деф}}}$ до δ при достижении нулевого значения угла $\alpha_{\text{деф.изм.}}$.

При $\alpha_{\text{деф.изм.}} = \alpha_{\text{деф.изм.макс}}$

$$h_{\text{деф.упл.}} = r_{\partial y_{\phi}} e^{q\alpha_{\text{деф.изм.макс}}} - R_{\phi} = H_{0_{\text{деф}}}. \quad (2.26)$$

При $\alpha_{\text{деф.изм.}} = 0$

$$h_{\text{деф.упл.}} = r_{\partial y_{\phi}} - R_{\phi} = \delta. \quad (2.27)$$

Текущее значение уплотнения слоя материала:

$$H_{\text{деф.упл.}} = H_{0_{\text{деф}}} - h_{\text{деф.упл.}} = H_{0_{\text{деф}}} - (r_{\partial y_{\phi}} e^{q\alpha_{\text{деф.изм.}}} - R_{\phi}). \quad (2.28)$$

При $\alpha_{\text{деф.изм.}} = \alpha_{\text{деф.изм.макс}}$

$$H_{\text{деф.упл.}} = H_{0_{\text{деф}}} - (r_{\partial y_{\phi}} e^{q\alpha_{\text{деф.изм.макс}}} - R_{\phi}) = H_{0_{\text{деф}}} - H_{0_{\text{деф}}} = 0. \quad (2.29)$$

При $\alpha_{\text{деф.изм.}} = 0$

$$H_{\text{деф.упл.}} = H_{0_{\text{деф}}} - (r_{\partial y_{\phi}} - R_{\phi}). \quad (2.30)$$

Текущее значение деформационного уплотнения материала:

$$\rho_{\text{деф.упл.}} = \rho_0 \frac{H_{0_{\text{деф}}}}{h_{\text{деф.упл.}}}, \quad (2.31)$$

где ρ_0 – насыпная плотность материала, кг/м³.

Длина зоны деформации и измельчения материала:

$$l_{\text{деф.изм}} = \frac{\pi R_{\phi} \alpha_{\text{деф.изм.}}}{180}. \quad (2.32)$$

Период деформации и измельчения материала:

$$\tau_{\text{деф.изм}} = \frac{l_{\text{деф.изм}}}{\vartheta_{\phi}} = \frac{\pi R_{\phi} \alpha_{\text{деф.изм.}}}{180 \vartheta_{\phi}}, \quad (2.33)$$

где ϑ_{ϕ} – окружная скорость вращения дисковых фрез, м/с.

Текущее значение скорости деформации материала $\vartheta_{\text{деф.изм}}$ определяем по формуле:

$$\vartheta_{\text{деф.изм}} = \frac{H_{0\text{деф}} - h_{\text{деф.упл.}}}{\tau_{\text{деф.изм}}}. \quad (2.34)$$

Вследствие больших значений нормальных и касательных напряжений, возникающих в материале из-за силового воздействия дисковых фрез, наибольшая интенсивность измельчения ТПМ происходит в зоне максимальных напряжений, ограниченной углом $\alpha_{\text{изм.мах}}$.

Длина зоны максимальных напряжений измельчения:

$$l_{\text{изм.мах}} = \frac{\pi R_{\phi} \alpha_{\text{изм.мах}}}{180}. \quad (2.35)$$

Длительность процессов деформации и измельчения материала:

$$\tau_{\text{изм.мах}} = \frac{l_{\text{изм.мах}}}{\vartheta_{\phi}} = \frac{\pi R_{\phi} \alpha_{\text{изм.мах}}}{180 \vartheta_{\phi}}. \quad (2.36)$$

Текущее значение скорости измельчения материала $\vartheta_{\text{изм}}$ определяем по формуле:

$$\vartheta_{\text{изм}} = 2\pi R_{\phi} n_{\phi} \sin \alpha_{\text{изм.мах}}, \quad (2.37)$$

где n_{ϕ} – частота вращения дисковых фрез, с⁻¹.

Расчёт геометрических и кинетических параметров в зоне упругого расширения осуществляется методом, аналогичным зоне деформации и измельчения материала.

При этом, в зоне упругого расширения, ограниченной углом $\alpha_{\text{упр.}}$, происходит резкое снижение силового воздействия на материал. Интенсивность

релаксации напряжений определяется не только вышеуказанным фактором, но и упругопластическими характеристиками ТПМ.

Вышеуказанные аналитические выражения позволяют определить конструктивные параметры первой камеры измельчения (диаметры камеры и фрез, высоту съёмных элементов банджа и протяжённость зоны футеровки, минимальный зазор между фрезами и футеровкой и др.), а также технологические режимы работы РЦА КД (частоту вращения дисковых фрез, период силового воздействия на ТПМ и др.).

2.4.2 Графоаналитические исследования процесса измельчения полимерных материалов на его первой стадии

Для определения по вышеуказанным зависимостям численных значений кинетических параметров (рис. 2.6) при измельчении ТПМ рабочими органами РЦА КД использованы исходные данные: $D_{\phi} = 0,3 \text{ м}$; $n_{\phi} = 500 \div 2000 \text{ мин}^{-1}$; $\rho_{\text{деф}} = 600 \div 800 \text{ кг/м}^3$; $H_{0\text{деф}} = 0,2 \div 0,25 \text{ м}$; $\delta = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\alpha_{\text{деф.изм.}} = 110^{\circ}$; $\alpha_{\text{изм.мах}} = 25^{\circ}$; $\alpha_{\text{упр}} = 20^{\circ}$.

Анализ графических зависимостей показывает, что плотность $\rho_{\text{деф}}$ измельчаемых ТПМ возрастает при их уплотнении и деформации дисковыми фрезами до зоны с наименьшим зазором, а затем незначительно снижается из-за упругого расширения материала.

Скорость деформации ТПМ $\vartheta_{\text{деф}}$ максимальна в начальный период измельчения, затем она снижается до 0. В зоне упругого расширения скорость деформации возрастает.

Толщина деформируемого слоя $h_{\text{деф.упл.}}$ ТПМ убывает, а затем незначительно возрастает на величину упругого расширения полимеров.

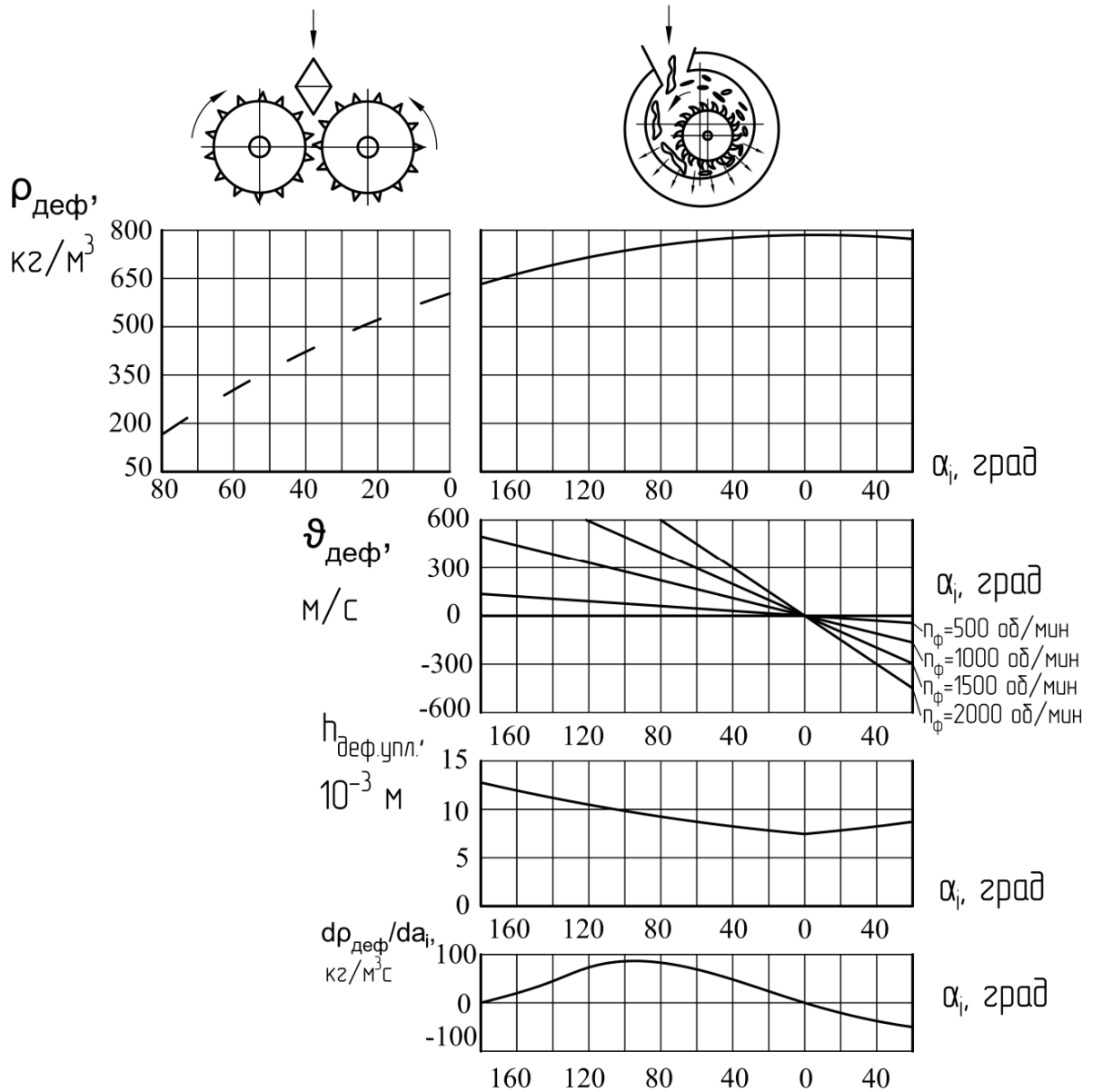


Рисунок 2.6 – Динамика изменения кинетических параметров $\rho_{\text{деф}}$, $\theta_{\text{деф}}$, $h_{\text{деф,упл.}}$, $\frac{d\rho_{\text{деф}}}{d\alpha_i}$ от угла поворота рабочих органов РЦА КД

Интенсивность изменения плотности измельчаемого материала $\frac{d\rho_{\text{деф}}}{d\alpha_i}$ характеризуется кривой, указанной на рисунке 2.6. При значении угла $\alpha_i = 80 \div 120^\circ$ параметр $\frac{d\rho_{\text{деф}}}{d\alpha_i}$ достигает максимальных значений.

Полученные аналитические зависимости кинетических параметров, а также построенные графики, позволят учесть закономерности деформационно-силового воздействия дисковых фрез на ТПМ при проведении экспериментальных исследований.

2.4.3 Расчёт усилий разрушения материала при разрезающем воздействии дисковых фрез

В камере измельчения РЦА КД предварительно уплотнённый материал измельчается дисковыми фрезами. Дисковые фрезы установлены на валу и разделены втулками. Бандаж со съёмными элементами установлен эксцентрично дисковым фрезам с возможностью изменения величины эксцентриситета $e_{фут}$.

В рамках выполняемых аналитических исследований кинетических параметров измельчения ТПМ в РЦА КД ключевое значение имеет анализ комбинированных силовых нагрузок. Они осуществляют напряженно-разрушающее воздействие на полимерные материалы до определённых значений. Далее реализуется разрывающее воздействие дисковых фрез. При реализации разработанного конструктивно-технологического решения [139] – смещения бандажа относительно ротора на величину $e_{фут}$ в рабочей зоне первой камеры РЦА КД формируется клиновидный сужающийся канал. В зоне с минимальным зазором между ротором и бандажом возникают максимальные разрушающие напряжения. Границы данной зоны определяются углом $\alpha_{изм.мах}$.

В зонах деформации и измельчения $\alpha_{деф.изм.}$, максимальных напряжений $\alpha_{изм.мах}$, упругого расширения материала $\alpha_{упр.}$ сырьё измельчается за счёт сдвиговых деформаций, возникающих между рабочей поверхностью ротора и неподвижными съёмными элементами бандажа (рис. 2.7).

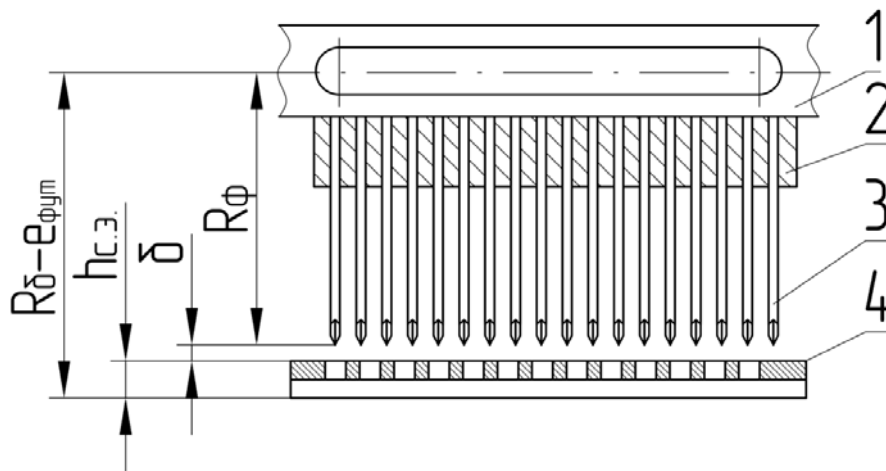


Рисунок 2.7 – Схема для определения геометрических параметров рабочей камеры агрегата с дисковыми фрезами: 1 – вал; 2 – втулки; 3 – дисковые фрезы; 4 – съемные элементы бандажа

Процесс разрушения полимерных материалов в камере РЦА КД под воздействием сдвиговых напряжений состоит из нескольких стадий деформации. Упругая деформация сменяется пластической деформацией со срезом, сопровождающимся изгибом и разрывом [148].

На предварительно уплотненный и деформируемый материал действует система силовых факторов, определяющих характер и интенсивность его разрушения. В первой камере РЦА КД на материал действуют следующие силы: сжимающее усилие P_σ со стороны ротора в виде дисковых фрез, сила трения $F_{тр} = P_\sigma f$, обеспечивающая движение измельчаемого материала в зону максимальных напряжений, разрывающее усилие P_τ , реализующая сдвиговое разрушение полимерных частиц (рис. 2.8).

Между результирующими силами и их составляющими существуют зависимости:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma x} &= P_{\sigma x} + F_{тр x} + P_{\tau x}, \\ P_{\Sigma y} &= F_{тр y} - P_{\sigma y} + P_{\tau y}. \end{aligned} \quad (2.38)$$

После проецирования действующих сил на соответствующие оси получим:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma x} &= P_\sigma \cdot \cos \alpha_{изм. max_{ср.}} + F_{тр} \cdot \sin \alpha_{изм. max_{ср.}} + P_\tau \cdot \sin \alpha_{изм. max_{ср.}}, \\ P_{\Sigma y} &= F_{тр} \cdot \cos \alpha_{изм. max_{ср.}} - P_\sigma \cdot \sin \alpha_{изм. max_{ср.}} + P_\tau \cdot \cos \alpha_{изм. max_{ср.}}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Разделив уравнения 2.39 на $\cos \alpha_{изм. max_{ср.}}$, после преобразований уравнения получаем:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma x} &= P_\sigma + F_{тр} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{изм. max_{ср.}} + P_\tau \cdot \operatorname{tg} \alpha_{изм. max_{ср.}}, \\ P_{\Sigma y} &= F_{тр} - P_\sigma \cdot \operatorname{tg} \alpha_{изм. max_{ср.}} + P_\tau. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Результирующая сила рассчитывается по формуле:

$$P_{\sigma\tau} = \sqrt{P_{\Sigma x}^2 + P_{\Sigma y}^2}. \quad (2.41)$$

Выполним анализ условий силового равновесия в зоне максимальных напряжений с целью определения величины воздействия, которое необходимо для измельчения полимерных материалов дисковыми фрезами.

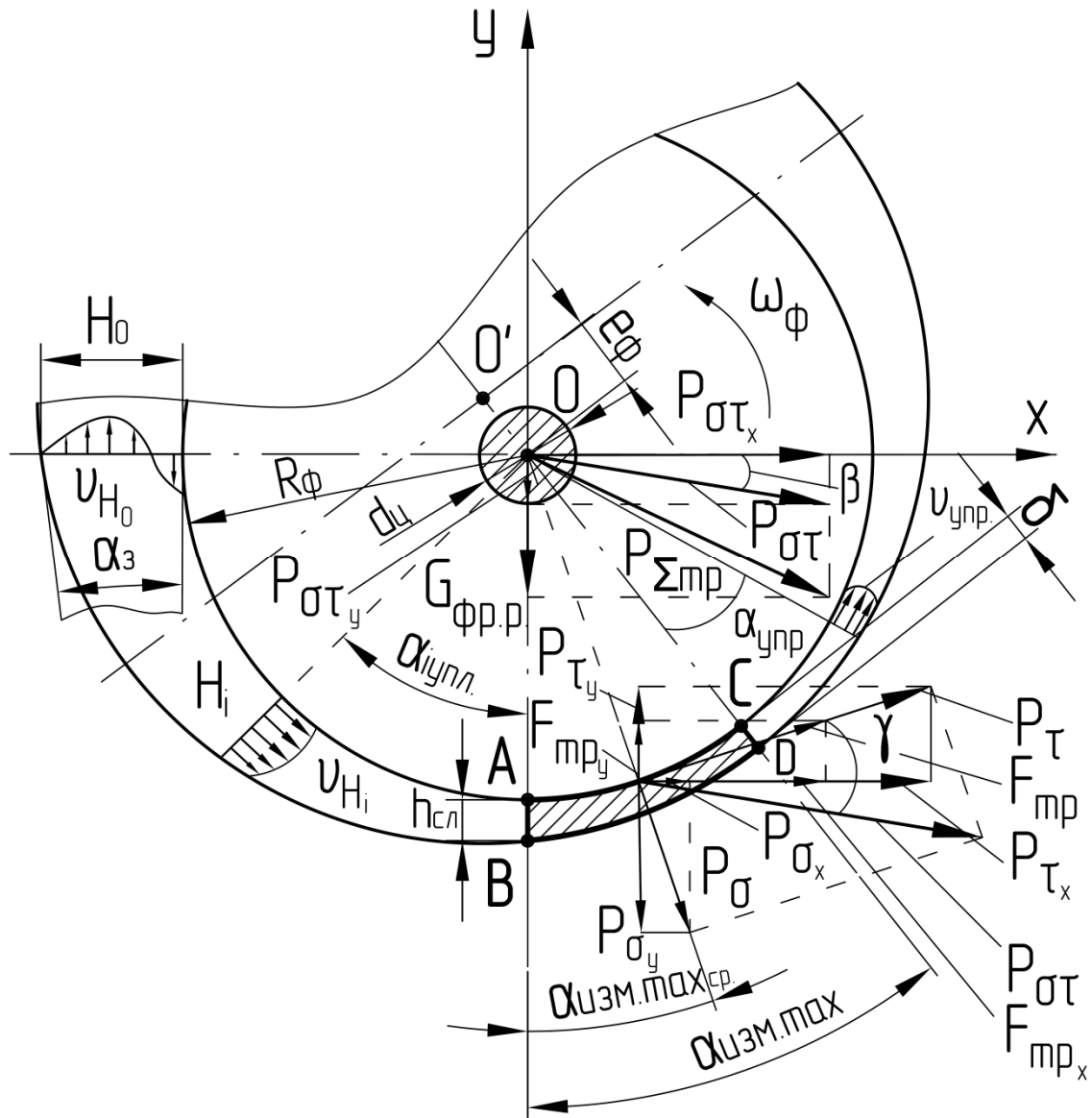


Рисунок 2.8 – Схема к расчету силового воздействия дисковых фрез на измельчаемый материал

Необходимо определить элементарный слой материала для составления уравнения силового равновесия в зоне максимальных напряжений. Элементарный слой ограничен сечениями АВ и CD, которые расположены на расстоянии dx друг от друга (рис. 2.9) [151].

Анализ условия равновесия сил в рассматриваемом слое ABCD выполняем с учётом следующих положений:

– на границах слоя, расположенных вдоль образующих окружностей ротора и бандажа, напряжения σ_x и σ_y равномерно распределены;

– в процессе перемещения материала в зоне максимальных напряжений каждый элементарный слой последовательно подвергается комбинированному силовому воздействию – сжимающему и сдвиговому;

– в зоне с наименьшим зазором δ между ротором и бандажом возникает максимальное результирующее напряжение.

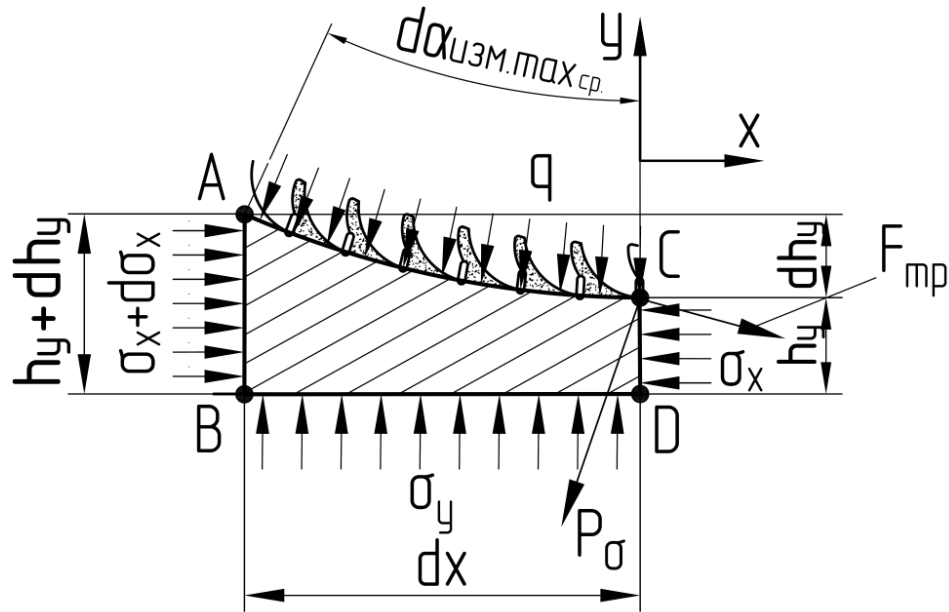


Рисунок 2.9 – Схема сил напряженного состояния элементарного слоя материала для определения напряжений

При анализе равновесия элементарного слоя движение материала считаем установившемся. Из-за специфических характеристик ТПМ силы инерции и тяжести материала не учитываем, так как они малы по сравнению с контактными и сдвиговыми нагрузками. В виду незначительной величины угла $\alpha_{изм.мах_ср.}$, в рамках данной расчётной схемы толщину элементарного слоя $h_{сл}$ деформируемого материала рассматриваем постоянной.

Рассмотрим равновесие сил относительно оси x:

$$\sum x = \frac{\sigma_x \cdot h_y \cdot B}{\cos \alpha_3} - \frac{(\sigma_x + d\sigma_x) \cdot (h_y + dh_y) \cdot B}{\cos \alpha_3} + \frac{q \cdot \sin \alpha_{изм.мах_ср.} \cdot R_\phi \cdot d\alpha_{изм.мах_ср.} \cdot B}{\cos \alpha_3} - \frac{f \cdot q \cdot \cos \alpha_{изм.мах_ср.} \cdot R_\phi \cdot d\alpha_{изм.мах_ср.} \cdot B}{\cos \alpha_3} = 0, \quad (2.42)$$

где σ_x – среднее нормальное напряжение деформации материала, МПа; h_y – толщина деформируемого слоя материала, м; f – коэффициент трения материала о поверхность дисковых фрез; q – удельное давление материала на контактируемые элементы, МПа; l_σ – длина дуги контакта элементарного слоя и дисковых фрез, м, $l_\sigma = R_\phi \cdot d\alpha_{изм.мах_{ср.}}$.

Разделим уравнение 2.42 на $\frac{B}{\cos\alpha_3}$ и, пренебрегая бесконечно малыми величинами, получим:

$$\sum x = h_y d\sigma_x + \sigma_x dh_y - q \cdot \sin\alpha_{изм.мах_{ср.}} \cdot R_\phi \cdot d\alpha_{изм.мах_{ср.}} + \\ + f \cdot q \cdot \cos\alpha_{изм.мах_{ср.}} \cdot R_\phi \cdot d\alpha_{изм.мах_{ср.}} = 0 \quad (2.43)$$

При условии, что $h_y = \delta + R_\phi \left(1 - \cos\alpha_{изм.мах_{ср.}}\right)$, $dh_y =$
 $= R_\phi \cdot \sin\alpha_{изм.мах_{ср.}} \cdot d\alpha_{изм.мах_{ср.}}$, получим:

$$R_\phi \cdot d\alpha_{изм.мах_{ср.}} = \frac{dh_y}{\sin\alpha_{изм.мах_{ср.}}}. \quad (2.44)$$

Считая, что среднее давление ротора на деформируемый материал P_σ и удельное давление сырья на контактируемые элементы рабочей камеры численно равны: $P_\sigma = q$, $F_{тр} = qf$, а также с учетом вышеуказанных зависимостей, уравнение 2.43 представим в виде:

$$h_y \cdot d\sigma_x + \sigma_x \cdot dh_y - P_\sigma \cdot dh_y + F_{тр} \cdot \operatorname{ctg}\alpha_{изм.мах_{ср.}} \cdot dh_y = 0. \quad (2.45)$$

После преобразований уравнения 2.45 получим:

$$d\sigma_x - (P_\sigma - \sigma_x) \frac{dh_y}{h_y} + F_{тр} \cdot \operatorname{ctg}\alpha_{изм.мах_{ср.}} \frac{dh_y}{h_y} = 0. \quad (2.46)$$

Используя выражение 2.46, а также значение гидравлического радиуса $R_{гидр.} = \frac{2S}{0,7L}$ (где S – площадь сечения деформируемого материала в пресс-матрице, м²; L – периметр внутренней поверхности пресс-матрицы, м), получим:

$$\sigma_{ср} = P_{\sigma_0} e^{-\frac{4ef}{R_{гидр.} \cos\alpha_3} (h_0 - \delta)}. \quad (2.47)$$

При этом можно принять:

$$P_\sigma - \sigma_x = (P_{\sigma_0} - \sigma_{ср}) \left(1 - \frac{h_y - \delta}{\Delta h}\right). \quad (2.48)$$

Полагая, что $B = \frac{4\varepsilon f}{R_{\text{гидр.}} \cos \alpha_3}$, получим:

$$P_\sigma - \sigma_x = P_{\sigma_0} (1 - e^{-B(h_0 - \delta)}) \left(1 - \frac{h_y - \delta}{\Delta h}\right). \quad (2.49)$$

Обозначив $P_i = P_{\sigma_0} (1 - e^{-B(h_0 - \delta)})$, из выражения 2.49 определяем

$$\sigma_x = P_\sigma - P_i \left(1 - \frac{h_y - \delta}{\Delta h}\right), \quad (2.50)$$

$$d\sigma_x = dP_\sigma + \frac{P_i}{\Delta h} dh_y. \quad (2.51)$$

Подставив полученные значения σ_x и $d\sigma_x$ в уравнение 2.45, получим

$$\begin{aligned} h_y \cdot \left(dP_\sigma + \frac{P_i}{\Delta h} dh_y\right) + \left[P_\sigma - P_i \left(1 - \frac{h_y - \delta}{\Delta h}\right)\right] \cdot dh_y - P_\sigma \cdot dh_y + \\ + P_\sigma f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}} \cdot dh_y = 0. \end{aligned} \quad (2.52)$$

После преобразований получим следующее неоднородное дифференциальное уравнение

$$\frac{dP_\sigma}{dh_y} + \frac{P_\sigma f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}}}{h_y} = \frac{P_i}{\Delta h} \left(\frac{h_0}{h_y} - 2\right), \quad (2.53)$$

$$h_0 = \Delta h + \delta = 2R_\Phi \left(1 - \cos \alpha_{\text{изм. max cp.}}\right) + \delta. \quad (2.54)$$

Решение уравнения 2.53 ищем в виде

$$P_\sigma(h_y) = \left[\int \frac{P_i}{\Delta h} \left(\frac{h_0}{h_y} - 2\right) e^{\int \frac{f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}} dh_y}{h_y}} + C \right] e^{-\int \frac{f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}} dh_y}{h_y}}. \quad (2.54)$$

Для данного уравнения принимаем

$$I_1 = \int \frac{f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}} dh_y}{h_y} = f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}} \ln h_y, \quad (2.55)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= \int \frac{P_i}{\Delta h} \left(\frac{h_0}{h_y} - 2\right) h_y^{f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}}} dh_y = \\ &= \frac{P_i [h_0 + f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}} (h_0 - 2h_y)]}{\Delta h f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}} (f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}} + 1)} h_y^{f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}}}. \end{aligned} \quad (2.56)$$

После подстановки значений интегралов I_1 и I_2 в уравнение 2.54 и соответствующих преобразований получим:

$$P_\sigma(h_y) = \left[\frac{P_i [h_0 + f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}} (h_0 - 2h_y)]}{\Delta h f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}} (f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}} + 1)} h_y^{f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}}} + C \right] h_y^{-f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max cp.}}}. \quad (2.57)$$

Значение постоянной C для уравнения 2.57 находим из граничных условий при $h_y = h_0$ и $P_\sigma = 0$

$$C = -\frac{P_i h_0 (1 - f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}})}{\Delta h f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} (f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} + 1)} h_0^{f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}}}. \quad (2.58)$$

Тогда уравнение 2.57 примет вид:

$$P_\sigma(h_y) = \frac{P_i h_0}{\Delta h f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} (f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} + 1)} \cdot \left[\left(1 + f \left(1 - \frac{2h_y}{h_0} \right) \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} \right) - \left(1 - f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} \right) \left(\frac{h_0}{h_y} \right)^{f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}}} \right]. \quad (2.59)$$

С учетом значений B и P_i получаем:

$$P_\sigma = \frac{P_{\sigma 0} \left[1 - e^{-\frac{4f}{R_{\text{гидр.}} \cos \alpha_3} (h_{\text{сл}} - \delta)} \right] h_{\text{сл}}}{(h_{\text{сл}} - \delta) f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} (f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} + 1)} \cdot \left[\left(1 + f \left(1 - \frac{2\delta}{h_{\text{сл}}} \right) \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} \right) - \left(1 - f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} \right) \left(\frac{h_{\text{сл}}}{\delta} \right)^{f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}}} \right], \quad (2.60)$$

где $P_{\sigma 0}$ – элементарное сжимающие усилие, Н; f – коэффициент трения материала; $R_{\text{гидр.}}$ – гидравлический радиус, м; α_3 – угол захвата, град.; δ – минимальный зазор между бандажом и дисковыми фрезами, м.

Режущее усилие P_τ со стороны фрезерного рабочего органа находим по формуле [152]:

$$P_\tau = \mu_{\text{ТПМ}} \vartheta_\phi R_\phi b_{\text{р.п.}} \left(\frac{1}{\delta} - \frac{1}{h_{\text{сл}}} \right) k_{\Delta \sigma_{\text{упр.}}}, \quad (2.61)$$

где $\mu_{\text{ТПМ}}$ – коэффициент динамической вязкости ТПМ, Па·с; ϑ_ϕ – окружная скорость вращения дисковых фрез, м/с; R_ϕ – радиус дисковых фрез, м; $b_{\text{р.п.}}$ – ширина рабочей поверхности фрезерного ротора, м; $k_{\Delta \sigma_{\text{упр.}}}$ – коэффициент снижения напряжений при упругом расширении деформированного слоя (фрикционного воздействия фрезерного ротора на материал), $k_{\Delta \sigma_{\text{упр.}}} = 0,6 \div 0,8$.

Учитывая, что $P_{\sigma\tau} = \sqrt{P_\sigma^2 + P_\tau^2}$, выражения 2.60 и 2.61, обозначив $A = \left(1 + f \left(1 - \frac{2\delta}{h_{\text{сл}}} \right) \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} \right) - \left(1 - f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}} \right) \left(\frac{h_{\text{сл}}}{\delta} \right)^{f \operatorname{ctg} \alpha_{\text{изм. max}_{\text{ср.}}}}$, получим уравнение для расчета результирующей силы:

$$P_{\sigma\tau} = \sqrt{\left(\frac{P_{\sigma 0} \left[1 - \exp\left(-\frac{4f}{R_{\text{гидр.}} \cos \alpha_3} (h_{\text{сл}} - \delta)\right) \right] h_{\text{сл}}}{(h_{\text{сл}} - \delta) f c t g \alpha_{\text{изм. max ср.}} (f c t g \alpha_{\text{изм. max ср.}} + 1)} \cdot A \right)^2 + \left(\mu_{\text{ТПМ}} \vartheta_{\text{ф}} R_{\text{ф}} b_{\text{р.п.}} \left(\frac{1}{\delta} - \frac{1}{h_{\text{сл}}} \right) k_{\Delta \sigma_{\text{упр.}}} \right)^2}. \quad (2.62)$$

Для определения потребляемой мощности привода камеры измельчения с дисковыми фрезами, с учётом значений результирующей силы $P_{\sigma\tau}$, используется полученное нами аналитическое выражение:

$$P_{\text{д.ф.}} = \frac{P_{\text{упл.раз.}} + P_{\text{тр}}}{\eta_I} = \frac{[M_{\text{упл.раз.}} + M_{\text{тр}}] \cdot \omega_{\text{ф}} \cdot i_{\text{ф}}}{\eta_I} = \frac{[P_{\sigma\tau} \cos \gamma \cdot R_{\text{ф}} + 0.5 \sqrt{(P_{\sigma\tau} \cos \beta)^2 + (G_{\text{ф}} + P_{\sigma\tau} \sin \beta)^2} \cdot f_{\text{тр.п.}} \cdot d_{\text{ц}}] \cdot \omega_{\text{ф}} \cdot i_{\text{ф}}}{\eta_I}, \quad (2.63)$$

где $P_{\text{упл.раз.}}$ – мощность, затрачиваемая на уплотнение, деформацию ТПМ и разрезающее воздействие фрезерного рабочего органа, Вт (от действия момента сопротивления разрушению $M_{\text{упл.раз.}}$); $P_{\text{тр}}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в подшипниковых опорах фрезерного рабочего органа, Вт (от действия момента сопротивления трению $M_{\text{тр}}$); $i_{\text{ф}}$ – количество фрез на валу, шт.; η_I – КПД трансмиссии привода первой камеры измельчения; $R_{\text{ф}}$ – радиус дисковых фрез, м; $\omega_{\text{ф}}$ – угловая скорость вращения дисковых фрез, рад/с; $f_{\text{тр.п.}}$ – коэффициент трения в подшипниках, $f_{\text{тр.п.}} = 0,001$; $G_{\text{фр.р.}}$ – сила тяжести дисковой фрезы, Н; $d_{\text{ц}}$ – диаметр цапфы, м.

2.4.4 Анализ процесса высокоскоростного воздействия рабочих органов на материал с учётом его упругопластических характеристик

При проектировании энергоэффективных измельчительных агрегатов для переработки ТПМ следует учитывать их упругопластические характеристики.

Наиболее эффективными способами разрушения пластика являются резание, истирание, удар после криогенной обработки, высокоскоростное измельчение.

При высокоскоростном механическом воздействии на полимерные материалы возникает релаксационный механизм их разрушения. Суть данного механизма заключается в том, что при увеличении частоты воздействия на частицы, высокоэластичная деформация полимеров не успевает развиваться и материал становится хрупким [153]. Если время воздействия рабочего органа меньше времени релаксации напряжений в частицах полимеров, то реализуется релаксационный механизм разрушения. С учётом циклического воздействия иглофрезерных рабочих органов на измельчаемый материал разрушающее напряжение определяется выражением:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\nu t) = \sigma_0 \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right), \quad (2.64)$$

где σ_0 – амплитудное напряжение, Па; ν – частота воздействия, с^{-1} ; t – время, с; T – период воздействия, с.

Уравнение 2.64 показывает, что при постоянных значениях t и σ_0 с уменьшением T напряжение в полимерах будет возрастать и, соответственно, будет более вероятно разрушение частиц материала.

Для определения влияния скорости рабочих органов на величину максимальной силы и амплитудного напряжения σ_0 можно воспользоваться уравнением Герца. Коэффициент упругости $k_{\text{упр}} = 4(1 - \mu_1^2)/E_1$ для металлических иглофрезерных рабочих органов величина малая по сравнению с коэффициентом упругости для полимеров, поэтому его значением можно пренебречь.

Выражение σ_0 имеет вид:

$$\sigma_0 = 1,65E_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2(1-\mu_2^2)^4} \right)^{1/5} \left(\frac{\vartheta_0}{a_n} \right)^{2/5}, \quad (2.65)$$

где E_2 – динамический модуль упругости полимерных материалов, Па; γ_1 – плотность иглофрезерных рабочих органов, кг/м^3 ; γ_2 – плотность полимерных материалов, кг/м^3 ; μ_2 – коэффициент Пуассона для полимерных материалов; ϑ_0 – скорость и иглофрезерных рабочих органов, м/с; a_n – скорость распространения продольных возмущений, численно равная

скорости распространения звука в полимерных материалах, м/с, $a_n = \sqrt{\frac{E_2}{\gamma_2}}$, например, для полипропилена $a_n = 35 \div 42$ м/с.

Из уравнения 2.65 следует, что при скорости иглофрезерных рабочих органов $v_0 \geq a_n$ напряжения в частицах материала сильно возрастают.

Подставив уравнение 2.65 в уравнение 2.64, получим:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(vt) = 1,65 E_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2 (1 - \mu_2^2)^4} \right)^{1/5} \left(\frac{v_0}{a_n} \right)^{2/5} \sin(vt). \quad (2.66)$$

Для разрушения ТПМ требуется достижение критических значений скорости силового воздействия, при которых реализуется релаксационный механизм износа частиц.

2.4.5 Определение силового воздействия иглофрезерных рабочих органов на измельчаемые полимерные материалы

При переработке ТПМ в РЦА КД процесс их измельчения иглофрезерными рабочими органами до порошкообразного состояния ($d_{cp} \geq 3$ мм) характеризуется наибольшей энергонапряжённостью. Механизм измельчения ТПМ является комплексным, сочетающим в себе деформационно-разрывающее и истирающее воздействие. На начальном этапе взаимодействия иглофрезерных элементов с материалом ТПМ образуются микробороздки, которые наращиваются при следующих циклах воздействия рабочего органа. Начальный размер борозд определяются диаметром проволочных элементов иглофрезы.

При выполнении расчёта силового воздействия иглофрезерных рабочих органов на измельчаемые материалы необходимо учитывать разные радиусы кривизны упруго изогнутых проволочных элементов [154]. Данная особенность обуславливает неравномерное распределение нагрузок по ряду рабочих элементов – величина воспринимаемой силы для каждого стержня оказывается неодинаковой. Наибольшая по величине сила P_{zi} приложена к первому элементу, наименьшая сила P_{zn} – к последнему элементу n . При этом, в пределах одного

ряда, содержащего n стержней, значения действующих сил располагаются в порядке убывающей арифметической прогрессии. Тогда получим:

$$\sum P_z = \sum_{i=1}^n P_{zi} = \frac{n(P_{zi} + P_{zn})}{2} \approx \frac{P_{zi} \cdot n}{2}, \quad (2.67)$$

$$P_{zi} = 2 \sum \frac{P_z}{n} = 2 \sum P_z / (\sqrt{D_{и} \cdot \frac{i}{2}} / d) = 2 \sum P_z d / \sqrt{D_{и} \cdot \frac{i}{2}}, \quad (2.68)$$

где $D_{и}$ – диаметр иглофрезерного рабочего органа, м;
 d – диаметр сечения проволоочного элемента иглофрезерного рабочего органа, м; i – степень натяжения проволоочного элемента иглофрезерного рабочего органа (рис. 2.8).

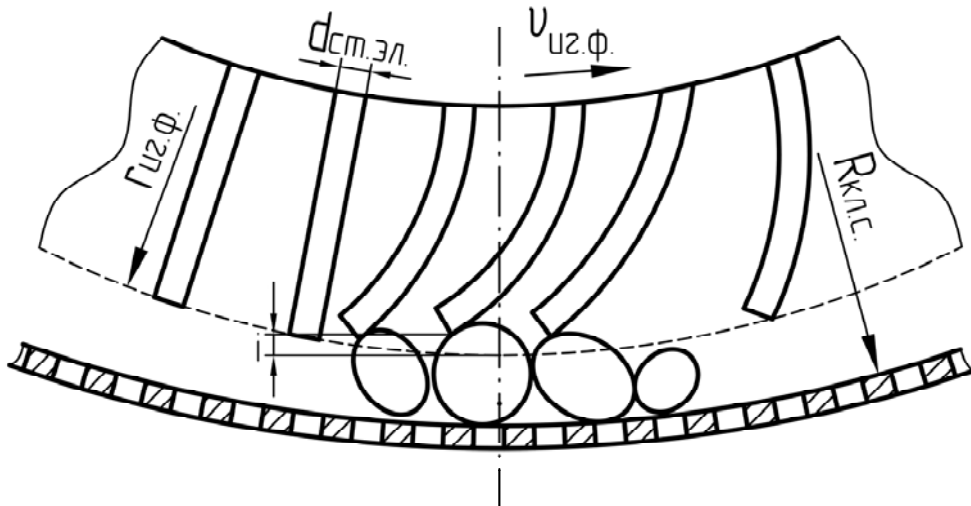


Рисунок 2.10 – Схема взаимодействия стержневых элементов иглофрезы с материалом

Суммарное силовое воздействие иглофрезерных рабочих органов на измельчаемый материал определяем по формуле:

$$P_{и.ф.} = \sum P_z \cdot z = \sum P_z \cdot B/d, \quad (2.69)$$

где z – число рядов проволоочных элементов на одной линии по ширине рабочей поверхности иглофрезы, шт.; B – ширина рабочей поверхности, м.

Полученное аналитическое выражение используется для определения потребляемой мощности привода второй камеры РЦА КД.:

$$P_{\text{ИРО}} = \frac{P_{\text{и.ф.}} + P_{\text{тр}}}{\eta} = \frac{[M_{\text{и.ф.}} + M_{\text{тр}}] \cdot \omega_{\text{и.ф.}}}{\eta} =$$

$$= \frac{\left[P_{\text{и.ф.}} \cdot \cos \gamma \cdot R_{\text{и.ф.}} + 0.5 \sqrt{(P_{\text{и.ф.}} \cdot \cos \alpha)^2 + (G_{\text{и.ф.}} + P_{\sigma \tau} \cdot \sin \alpha)^2} \cdot f_{\text{тр.п.}} \cdot d_{\text{ц}} \right] \cdot \omega_{\text{и.ф.}}}{\eta_{\text{II}}}, \quad (2.70)$$

где $P_{\text{и.ф.}}$ – мощность, затрачиваемая на измельчения материала иглофрезой, Вт; $M_{\text{и.ф.}}$ – момент сопротивления силовому воздействию иглофрезы, Н·м; $P_{\text{тр}}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в подшипниках рабочего органа, Вт; $M_{\text{тр}}$ – момент сопротивления трению, Н·м; η_{II} – КПД трансмиссии привода; $R_{\text{и.ф.}}$ – радиус иглофрезы, м; $\omega_{\text{и.ф.}}$ – угловая скорость вращения иглофрезы, рад/с; $f_{\text{тр.п.}}$ – коэффициент трения в подшипниках, $f_{\text{тр.п.}} = 0,001$; $G_{\text{и.ф.}}$ – сила тяжести иглофрезы, Н; $d_{\text{ц}}$ – диаметр цапфы, м.

2.4.6 Расчёт производительности роторно-центробежного агрегата и мощности его привода

Для эффективной работы РЦА КД должно соблюдаться следующее условие: производительность ПВУ ($Q_{\text{ПВУ}}$) не должна превышать производительность первой камеры измельчения (Q_I), а производительность первой камеры не должна превышать производительность второй камеры измельчения (Q_{II}), т.е.

$$Q_{\text{ПВУ}} \leq Q_I \leq Q_{\text{II}}, \quad (2.71)$$

Производительность ПВУ ($Q_{\text{ПВУ}}$) определяется по формуле 2.6. Производительность первой камеры измельчения:

$$Q_I = m_{\text{ч}} / t_{\text{р}} = b_{\text{ф}} \cdot h_{\text{сл}} \cdot l_{\text{изм}} \cdot i_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{мI}} \cdot i_{\text{з}} \cdot n_{\text{ф}} \cdot k_{\text{м}}, \quad (2.72)$$

где $m_{\text{ч}}$ – масса частицы материала, срезанной при единичном воздействии зуба дисковой фрезы, кг; $t_{\text{р}}$ – период воздействия дисковой фрезы на материал, с; $b_{\text{ф}}$ – ширина дисковой фрезы, м; $h_{\text{сл}}$ – толщина слоя измельчаемого материала, м; $l_{\text{изм}}$ – длина зоны измельчения (определяемая протяжённостью футеровки банджа $L_{\text{фут}}$), м; $i_{\text{ф}}$ – количество дисковых фрез, шт.; $\rho_{\text{мI}}$ – плотность измельчаемого в первой камере материала, кг/м³; $i_{\text{з}}$ – число зубьев дисковой

фрезы, шт.; n_ϕ – частота вращения дисковых фрез, об/с; k_m – коэффициент, учитывающий форму перерабатываемого материала, $k_m = 0,7 \div 0,8$.

На рисунках 2.11-2.13 приведены графические зависимости производительности Q_I от варьируемых конструктивно-технологических параметров.

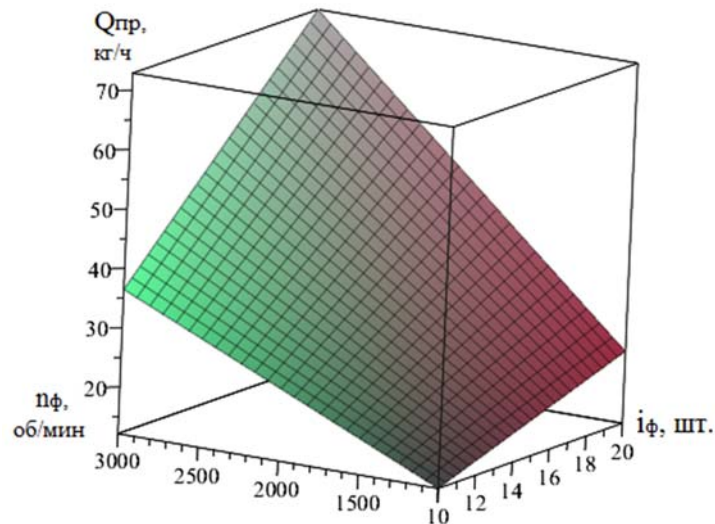


Рисунок 2.11 – График зависимости производительности Q_I от частоты вращения n_ϕ и количества дисковых фрез i_ϕ

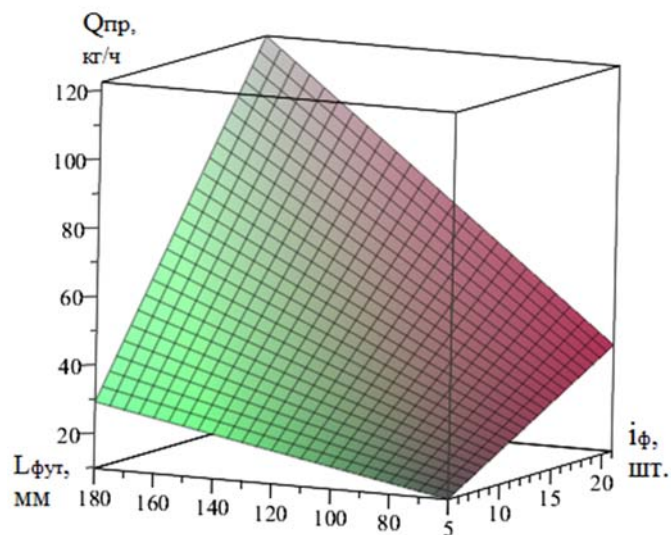


Рисунок 2.12 – График зависимости производительности Q_I от протяжённости футеровки $L_{фут}$ и количества дисковых фрез i_ϕ

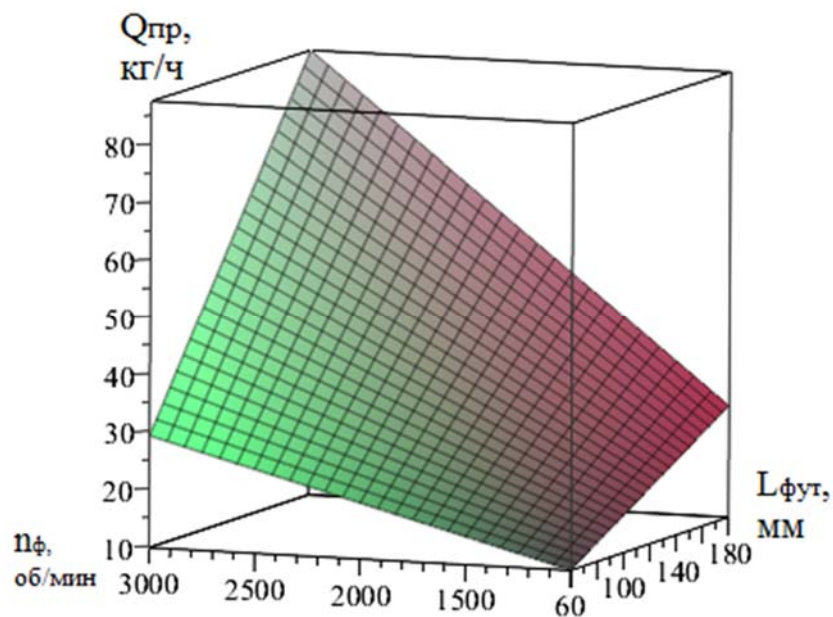


Рисунок 2.13 – График зависимости производительности Q_I от частоты вращения n_ϕ и протяжённости футеровки $L_{фут}$

На стадиях предварительной деформации и уплотнения, измельчения материала в первой камере РЦА КД имеется возможность изменения значений производительности оборудования в широком диапазоне. В связи с этим, определяющим производительность агрегата параметром является интенсивность разрушения материала иглофрезерными рабочими органами во второй камере измельчения.

Производительность второй камеры измельчения:

$$Q_{II} = B_{иг.ф.} \cdot \delta_{иг.ф.} \cdot v_{иг.ф.} \cdot \rho_{мII} \cdot k_z \cdot k_n \cdot i_{иг.ф.}, \quad (2.73)$$

где $B_{иг.ф.}$ – ширина иглофрезерных рабочих органов, м; $\delta_{иг.ф.}$ – зазор между иглофрезами и классифицирующими сетками, м; $v_{иг.ф.}$ – окружная скорость вращения иглофрез, м/с; $\rho_{мII}$ – плотность измельчаемого во второй камере материала, кг/м³; k_z – коэффициент заполнения рабочего пространства, $k_z = 0,7 \div 0,8$; k_n – коэффициент равномерности подачи материала в камеру измельчения, $k_n = 0,6 \div 0,8$; $i_{иг.ф.}$ – количество иглофрезерных рабочих органов.

Суммарная потребляемая РЦА КД мощность определяется по формуле:

$$P_{РЦА} = P_{ПВУ} + P_{д.ф.} + P_{ИРО}, \quad (2.74)$$

где $P_{ПВУ}$ – мощность, затрачиваемая на предварительную деформацию материала в пресс-валковом уплотнителе, Вт; $P_{д.ф.}$ – мощность, затрачиваемая на измельчение материала в первой камере, Вт; $P_{ИРО}$ – мощность, затрачиваемая на измельчение материала во второй камере, Вт.

На рисунке 2.14 представлена графическая зависимость потребляемой мощности привода первой камеры РЦА КД от варьируемых факторов.

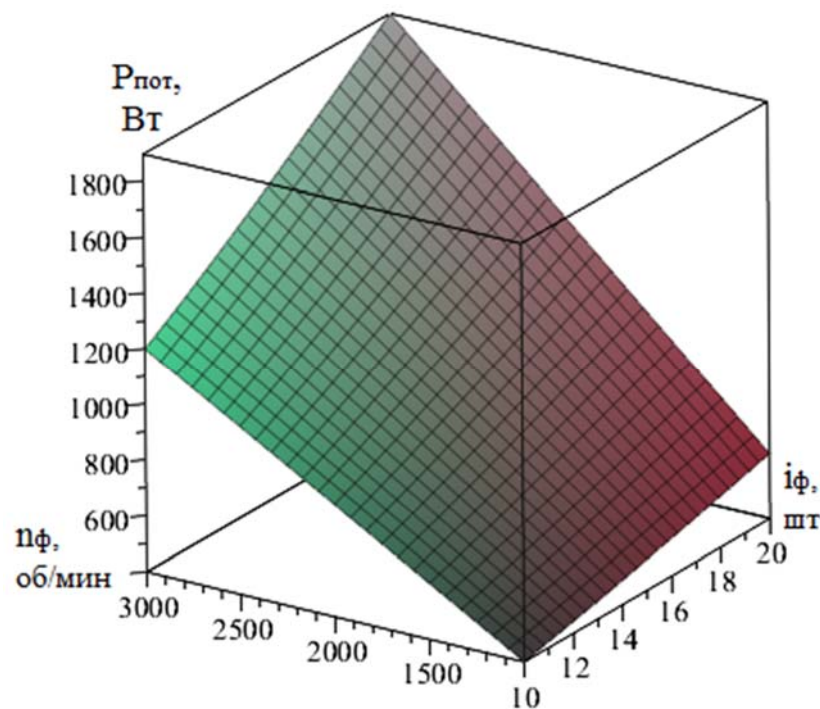


Рисунок 2.14 – График зависимости потребляемой мощности привода $P_{пот}$ от частоты вращения $n_{ф}$ и количества дисковых фрез $i_{ф}$

Удельные энергозатраты находим по формуле:

$$q = \frac{P_{РЦА}}{Q_{РЦА}}. \quad (2.75)$$

В результате выполненных теоретических исследований конструктивных, технологических и энергосиловых параметров проектируемого измельчителя определено их влияние на показатели потребляемой мощности привода и производительности. Наибольшее влияние оказывают следующие параметры: частота вращения роторов, плотность перерабатываемых материалов, геометрические характеристики агрегата (диаметр и ширина рабочих органов;

минимальные зазоры между валками, ротором и бандажом; диаметр и ширина камер измельчения; количество дисковых и иглофрез; протяжённость зоны футеровки бандажа и др.).

С целью снижения энергоёмкости процесса измельчения в разработанном агрегате реализуется постадийное комбинированное воздействие рабочих органов на перерабатываемые ТПМ.

2.5 Выводы

1. С учётом анализа специфических физико-механических характеристик ТПМ и проведённых теоретических исследований учёных в области переработки полимеров установлены основные закономерности деформационно-силового и релаксационного воздействия при их измельчении.

2. На основании результатов аналитических исследований и теоретических положений кинетики процесса измельчения ТПМ определены конструктивно-технологические условия для разработки роторно-центробежного агрегата комбинированного действия.

3. Разработаны и запатентованы конструктивные варианты устройства РЦА КД (патенты РФ 2724667, 2755436, 213199, 2834371) для постадийного измельчения ТПМ с различными физико-механическими характеристиками.

4. Теоретически исследованы условия предварительного деформирования ТПМ с различными характеристиками в пресс-валковом уплотнителе с развитой рабочей поверхностью.

5. Получены аналитические выражения, описывающие условия деформирования ТПМ объемной формы и низкой исходной объёмной плотности для определения производительности и мощности привода ПВУ.

6. В результате теоретических исследований получены выражения для определения кинетических параметров деформационно-силового воздействия на ТПМ в сужающейся рабочей зоне первой камеры измельчения РЦА КД

7. Получены уравнения, описывающие процессы переработки разрушения полимерных материалов в технологических зонах камеры измельчения с дисковыми фрезами.

8. Получены аналитические выражения для расчёта усилий разрушения полимерных материалов иглофрезерными рабочими органами.

9. Разработана методика расчёта кинетических, конструктивно-технологических и энергосиловых параметров разработанного измельчителя.

3 РАЗРАБОТКА СТЕНДОВЫХ УСТАНОВОК, МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1 Пресс-валковый уплотнитель для предварительного уплотнения техногенных полимерных материалов

Для проведения физического моделирования процесса предварительного уплотнения ТПМ перед их измельчением разработана и изготовлена экспериментальная установка пресс-валкового уплотнителя (ПВУ) с шипованными валками (рис. 3.1, табл. 3.1).

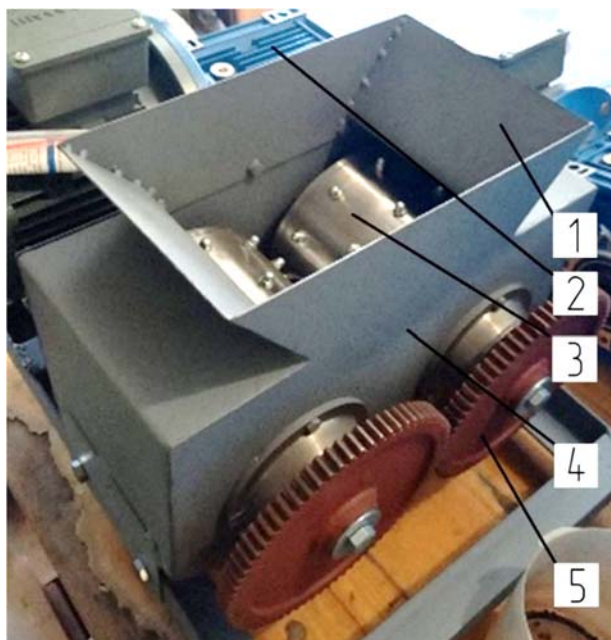


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка пресс-валкового уплотнителя с шипованными валками: 1 – загрузочный бункер; 2 – мотор-редуктор; 3 – шипованные валки; 4 – корпус; 5 – зубчатая передача

Таблица 3.1 – Технические характеристики пресс-валкового уплотнителя

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Диаметр валков	D_v	м	$430 \cdot 10^{-3}$
Ширина валков	B	м	$120 \cdot 10^{-3}$
Количество шипов	i_k	шт.	43
Межвалковый зазор	b	м	$12 \cdot 10^{-3}$
Частота вращения валков	n_v	об/мин	20÷30
Мощность электродвигателя	$P_{дв.ПВУ}$	кВт	1,1

Пресс-валковый уплотнитель состоит из двух валков 3, вращающихся навстречу друг другу. Валки установлены в корпусе 4, верхняя часть которого служит приемным бункером 1. На рабочей поверхности валков расположены в шахматном порядке шипы. Синхронное встречное вращение валков обеспечивается зубчатой передачей 5. Во вращение шипованные валки приводятся с помощью мотор-редуктора 2.

Диаметр валков принят $D_B = (2..6) \cdot d_{м.ср.}$, где; $d_{м.ср.}$ – средний размер уплотняемых полимерных отходов. При отношении $\frac{D_B}{d_{м.ср.}} < (2..6)$ ухудшаются условия захвата материала валками, а применение валков с бóльшим отношением $D_B/d_{м.ср.}$ нецелесообразно.

Пуск, остановка ПВУ, изменение частоты вращения валков осуществляются с помощью преобразователя частоты AFD-L075.43B (рис. 3.2, табл. 3.2).



Рисунок 3.2 – Преобразователь частоты AFD-L075.43B

Преобразователь частоты имеет четыре режима: ожидания, мониторинга, работы, программирования.

При проведении физического моделирования исследуемые параметры фиксируются в режиме мониторинга. Просмотр текущих значений рабочих параметров преобразователя частоты доступен как в режиме его работы, так и в режиме ожидания. Для вывода на дисплей преобразователя частоты определялись

следующие параметры: потребляемые ток и напряжение, частота вращения вала электродвигателя, текущее значение частоты тока и др.

Таблица 3.2 – Технические характеристики преобразователя частоты AFD-L075.43B

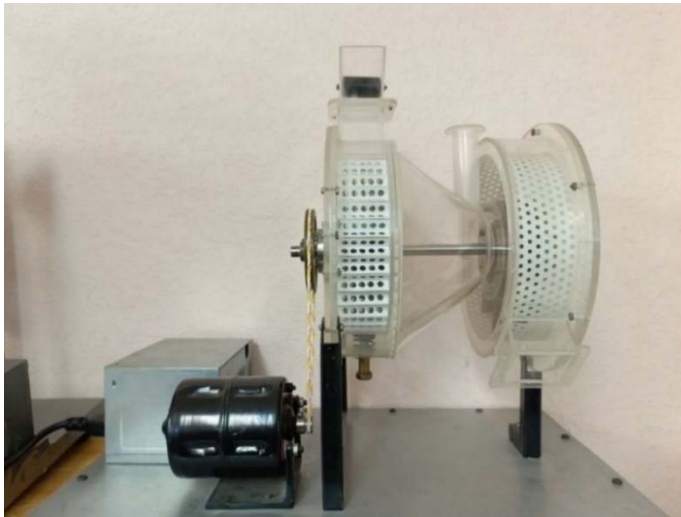
Параметр	Значение
Мощность преобразователя	7,5 кВт
Номинальный выходной ток	17 А
Питающее напряжение (вход)	3 фазы, 300÷460 В
Выходное напряжение	0÷500 В (3 фазы)
Частота питающей сети	50/60 Гц
Диапазон регулирования выходной частоты тока	0÷400 Гц
Перегрузочная способность	150% в течение 60 секунд
Цифровые входы	4 NPN
Аналоговые входы	1 (4÷20 мА / 0÷10 В)
Аналоговые выходы	1 (0÷10 В)
Класс защиты	IP20
Диапазон рабочих температур	от -10 °С до +40 °С при влажности <90%
Габариты	186×135×248 мм

Использование ПВУ с шипованными валками для предварительного уплотнения ТПМ позволяет достигать следующих результатов:

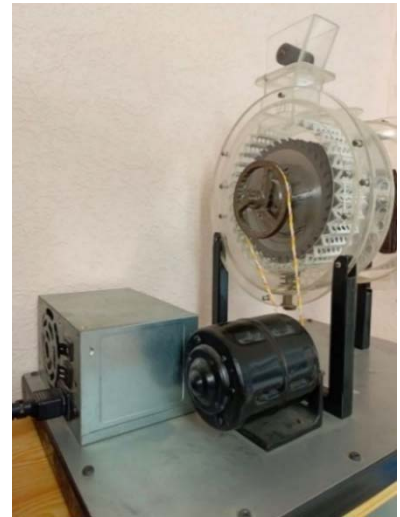
- варьировать производительность измельчителя за счет изменения частоты вращения валков или увеличения плотности перерабатываемых материалов;
- стабилизировать при заданных параметрах подачу материала в камеру измельчения РЦА КД исходную массу измельчаемого материала;
- снизить энергозатраты на процесс деформирования ТПМ и улучшить условия их захвата за счет повышенного коэффициента внешнего трения, достигаемого применением валков с шипами на рабочей поверхности;
- стабилизировать параметры процесса измельчения дисковыми фрезами предварительно деформированного материала и др.

3.2 Конструктивно-технологические особенности роторно-центробежного агрегата комбинированного действия с дисковыми и иглофрезерными рабочими органами

Для проведения физического моделирования технологических процессов постадийного измельчения ТПМ нами разработана и создана стендовая установка РЦА КД (рис. 3.3) [138].



а



б

Рисунок 3.3 – Стендовая установка роторно-центробежного агрегата комбинированного действия: а) общий вид; б) вид на привод

На данной установке изучены процессы движения полимерных материалов, рециркуляция воздушного и материального потоков, соотношение геометрических параметров камер измельчения и др.

Также, нами разработана и изготовлена экспериментальная установка РЦА КД (рис 3.4, табл. 3.3) для проведения комплексных экспериментальных исследований процесса измельчения ТПМ дисковыми фрезами. Технические характеристики РЦА КД представлены в таблице 3.2.

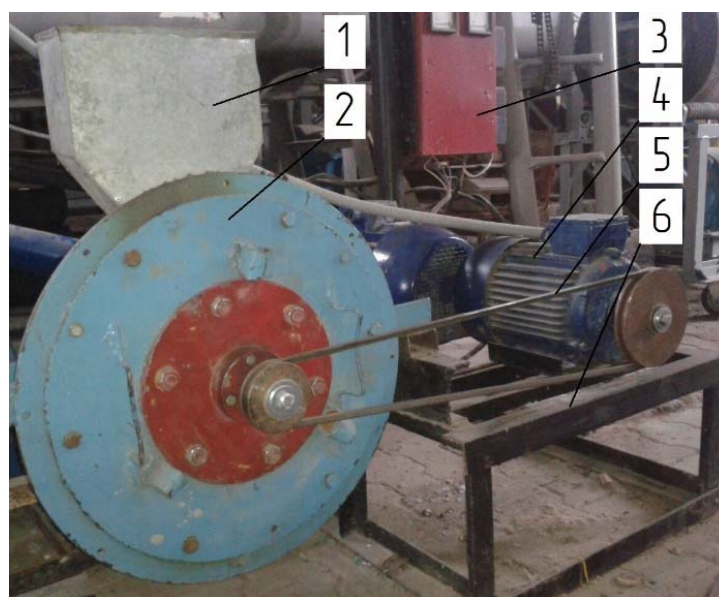


Рисунок 3.4 – Экспериментальная установка роторно-центробежного агрегата: 1 – загрузочный бункер; 2 – камера измельчения с дисковыми фрезами; 3 – блок управления; 4 – электродвигатель камеры измельчения; 5 – клиноременная передача; 6 – рама

Таблица 3.3 – Технические характеристики роторно-центробежного агрегата
комбинированного действия

№ П/П	Характеристика	Размерность	Обозначение	Значение
1.	Частота вращения дисковых фрез	мин ⁻¹	n _ф	$(1\div 3)\cdot 10^3$
2.	Шаг установки дисковых фрез	м	B _{у.ф.}	$(3\div 30)\cdot 10^{-3}$
3.	Минимальный зазор между ротором и бандажом	м	δ	$(5\div 30)\cdot 10^{-3}$
4.	Протяжённость зоны футеровки бандажа	м	L _{фут}	$(0\div 210)\cdot 10^{-3}$
5.	Размер классифицирующих отверстий	м	d _{отв}	0.1
6.	Мощность электродвигателя первой камеры измельчения	кВт	P _{дв.д.ф.}	5.5
7.	Производительность агрегата	кг/ч	Q _{РЦА}	70÷120
8.	Габаритные размеры: длина ширина высота	м	L B H	1.5 0.93 1.3

Экспериментальная установка РЦА КД (рис. 3.4) представляет собой камеру измельчения 2, закрепленную на раме 6. Над рабочей камерой установлен загрузочный бункер 1. В камере установлен ротор в виде набора дисковых фрез (ГОСТ 9769-79), закрепленных на валу. Вал ротора приводится во вращение электродвигателем 4 через клиноременную передачу 5.

Пуск, остановка, РЦА КД, изменение частоты вращения дисковых фрез осуществляются с помощью преобразователя частоты AFD-L075.43B, указанного в п. 3.1.

В первой камере измельчения РЦА КД установлен ротор (рис. 3.5, а) в виде дисковых фрез (рис. 3.5, б). Ротор находится внутри эксцентрично установленного бандажа (рис. 3.5, в) со съемными элементами (рис. 3.5, г). На поверхности съемных элементов выполнены классифицирующие отверстия диаметром 10 мм.



а



б



в



г

Рисунок 3.5 – Узлы и детали камеры измельчения с дисковыми фрезами роторно-центробежного агрегата: а – ротор; б – дисковая фреза; в – бандаж со съемными элементами; г – съемный элемент с классифицирующими отверстиями

С использованием разработанной нами экспериментальной установки (рис. 3.6) проводилось физическое моделирование процесса измельчения ТПМ иглофрезерными рабочими органами (ИРО).

Установка содержит ИРО с радиальными стержневыми элементами (ТУ 3918-001-23609732-2006) из витой проволоки. ИРО установлены в рабочей камере на валу электродвигателя. В верхней части рабочей камеры смонтирован приёмный бункер, оснащённый шибберным устройством. Для обеспечения заданного фракционного состава измельчённого материала в камере измельчения установлена классифицирующая сетка.

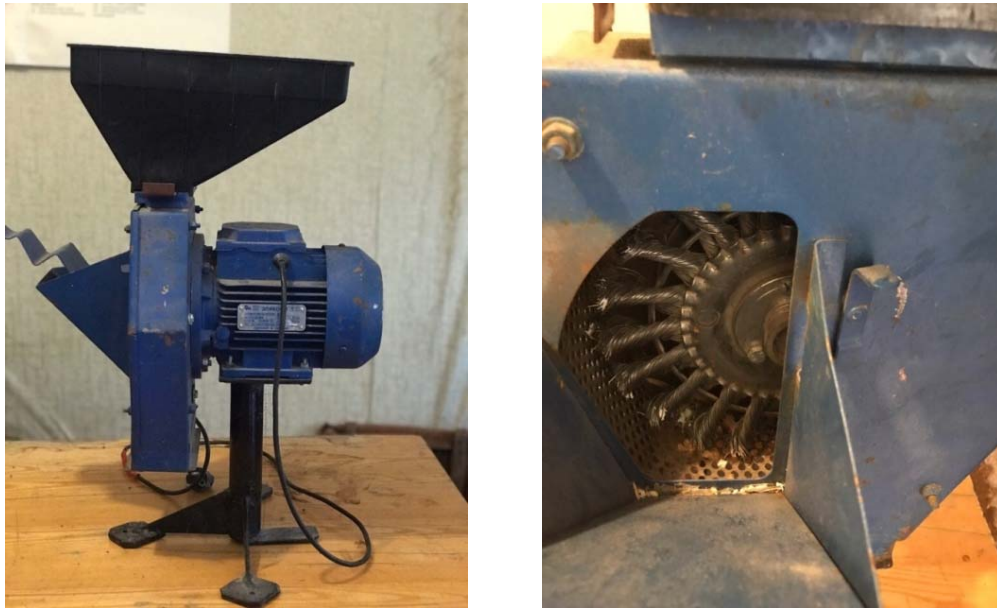


Рисунок 3.6 – Экспериментальная установка с иглофрезерными рабочими органами

Интенсивность измельчения ТПМ в экспериментальной установке зависит от частоты вращения ИРО, зазора между иглофрезой и классифицирующей сеткой, заполнения рабочей камеры материалом и др.

Технические характеристики экспериментальной установки: частота вращения ротора – $n = 2820 \text{ мин}^{-1}$; диаметр отверстий классифицирующей сетки – $d_{\text{отв}} = (2 \div 4) \cdot 10^{-3} \text{ м}$; мощность электродвигателя – $P = 1,7 \text{ кВт}$.

С учётом технологических особенностей процесса тонкого измельчения ТПМ иглофрезерными рабочими органами, выявленных при экспериментальных исследованиях, осуществлено конструктивно-технологическое совершенствование второй рабочей камеры РЦА КД (рис. 3.7) [155].

Рабочая камера РЦА КД оснащена комбинированным ротором, установленном в цилиндрическом корпусе 2. Ротор выполнен в виде цилиндрических центральной 1 и периферийных 3 иглофрез, вращающихся в противоположные стороны. Внутри корпуса установлена классифицирующая 4. Также, на корпусе расположен тангенциально выгрузочный патрубок 5. Центральная иглофреза приводится в движение с помощью центрального привода. Периферийные иглофрезы вращаются за счёт планетарного зубчатого механизма и привода с клиноременной передачей.

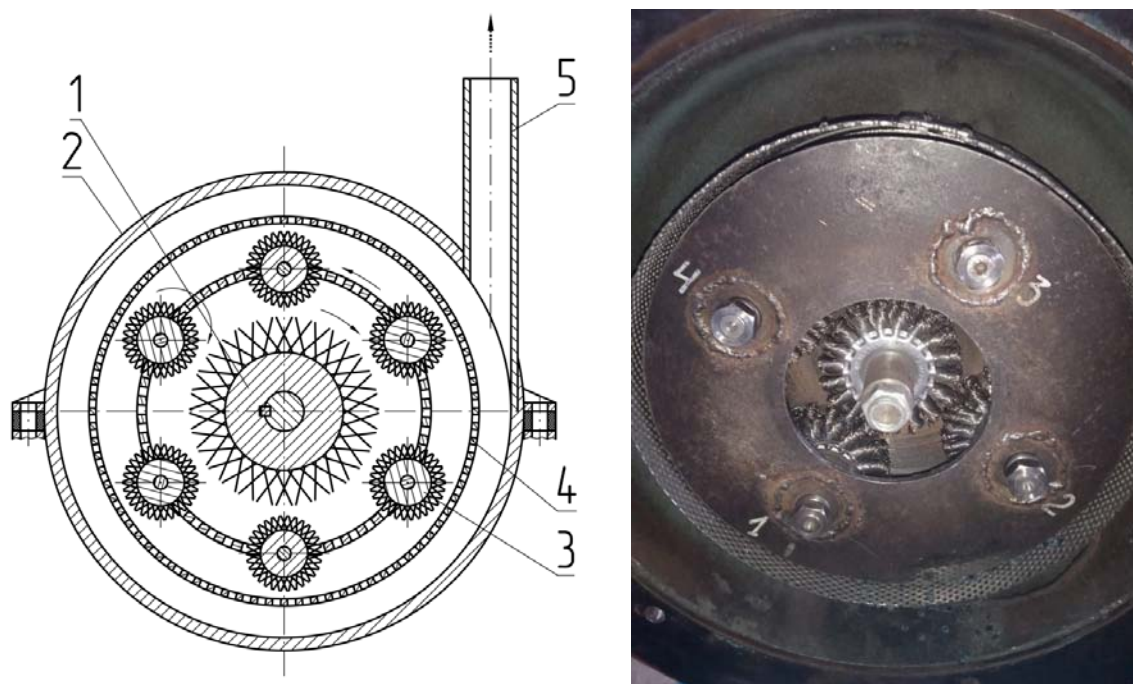


Рисунок 3.7 – Камера роторно-центробежного агрегата с иглофрезерными рабочими органами:
1 – центральная иглофреза; 2 – корпус; 3 – периферийная иглофреза; 4 – классифицирующая сетка; 5 – выгрузочный патрубок

Технические характеристики опытно-экспериментальной установки приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Технические характеристики опытно-экспериментальной установки с иглофрезерными рабочими органами

Наименование параметра	Размерность	Значение
Частота вращения центральной иглофрезы	об/мин	3000
Частота вращения периферийных иглофрез	об/мин	6000
Передаточное отношение планетарной зубчатой передачи	–	4
Диаметр иглофрез	мм	100
Количество иглофрез	шт.	10
Диаметр отверстий классифицирующей сетки	мм	3
Мощность электродвигателя центрального привода	кВт	2,2
Мощность электродвигателя привода периферийных иглофрез	кВт	2
Диаметр рабочей камеры	мм	410

При вращении стержневых элементов ИРО реализуется их высокоскоростное ударное и сдвиговое силовое воздействие на материал. При этом образуются многочисленные микродефекты структуры ТПМ – сколы и срезы микрообъемов с более крупных частиц. Применение комбинированного

ротора с ИРО позволяет интенсифицировать процесс измельчения ТПМ за счёт многократного увеличения количества единичных актов силового взаимодействия ротора на материал.

3.3 Физико-механические характеристики исследуемых материалов

Для получения заданных физико-механических характеристик производимых строительных материалов и изделий на основе ТПМ используются разнообразные комбинации их видов и свойств. К таким свойствам относятся прочность, истинная плотность и исходная насыпная масса, гранулометрия и дисперсность, пластические свойства и др.

На основании проведённого анализа существующих технологий комплексной переработки полимерсодержащих материалов и производства из них изделий при проведении физического моделирования процессов постадийной переработки в качестве исходного сырья выбраны вторичные термопластичные полимеры: полиэтилентерефталат (ПЭТ), полиэтилен высокой и низкой плотности (ПЭВП и ПЭНП, соответственно), полипропилен (ПП), полистирол (ПС) и др.

ТПМ представляют собой предварительно измельчённые с помощью шредера промышленные и коммунальные отходы (тара, упаковка, контейнеры и др.) до размеров частиц $(20\div 40) \cdot 10^{-3}$ м.

Физико-механические характеристики исходных полимерных материалов представлены в таблице 3.5 [156-157].

ТПМ, по сравнению с первичными полимерными материалами, обладают специфическими физико-механическими характеристиками и свойствами: низкой насыпной плотностью ($\rho_{0\text{ТПМ}}=80\div 550$ кг/м³), различной геометрической формой и размерами, сыпучестью, наличием посторонних включений и др.

Таблица 3.5 – Физико-механические характеристики полимерных материалов

Пластмасса	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Модуль упругости при изгибе, ГПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Твердость по Бринеллю, МПа
ПЭНП	7-17	0,09-0,01	0,09-0,13	50-600	14-23
ПЭВП	13-30	0,55-0,65	0,65-0,75	5-1000	44-52
ПП	24-39	0,8-1,18	1,2-1,7	10-800	40-70
ПВХ	40-120	2,6-3	0,7-1,1	5-100	10-160
ПС	30-48	0,3-0,5	2,7	1,5-4	140-160

При проведении экспериментальных исследований измельчения ТПМ в РЦА КД сырьё предварительно измельчалось в однороторном шредере (рис. 3.7, табл. 3.6).



а



б



в

Рисунок 3.7 – Однороторный шредер с гидравлическим прижимом: а) общий вид;

б) классифицирующий экран; в) рабочий орган

Таблица 3.6 – Технические характеристики однороторного шредера

Параметр	Размерность	Значение
Частота вращения ротора	об/мин	40
Ширина ротора	м	$600 \cdot 10^{-3}$
Диаметр ротора	м	$400 \cdot 10^{-3}$
Размер классифицирующих отверстий	м	$20 \cdot 10^{-3} \times 40 \cdot 10^{-3}$
Мощность электродвигателя	кВт	30
Производительность	кг/ч	100-120

Учёт вышеуказанных физико-механических характеристик, а также реализованные способы предварительной подготовки ТПМ к экспериментальным исследованиям позволили получать стабильны результаты экспериментов.

3.4 Методики проведения экспериментальных исследований и обработки полученных результатов, характеристика используемого оборудования

Целью исследования физических процессов и функциональных технологических возможностей РЦА КД является определение рациональных режимов его работы.

Использовался следующий алгоритм проведения экспериментальных исследований процесса измельчения ТПМ в РЦА КД, с учётом общепринятых методик и требований [158-159]:

- установление основных факторов, влияющих на выходные показатели процесса измельчения ТПМ, и оценка степени их влияния (значимости);
- определение варьируемых параметров, обеспечение их контроля при проведении экспериментальных исследований;
- с учётом специфических физико-механических характеристик ТПМ установление количественных и качественных критериев, определяющих эффективность процессов измельчения;
- определение диапазонов варьируемых параметров при различных режимах работы РЦА КД, подтверждение точности полученных результатов;
- уточнение или корректировка выбранных методик проведения экспериментальных исследований;

- расширение объёма экспериментальных данных и технологических возможностей разработанного агрегата при использовании планирования многофакторного эксперимента (ЦКРП–2⁴);

- разработка технических рекомендаций для их реализации в производственных условиях с использованием физического моделирования исследуемых процессов и получением адекватных результатов.

Экспериментальные исследования процесса измельчения ТПМ в РЦА КД проводились в два этапа.

Этап №1. Подготовка оборудования и измерительной аппаратуры для проведения экспериментальных исследований. Выполнение комплексных поисковых экспериментальных исследований и статистического анализа показателей РЦА КД. Определение исследуемых конструктивно-технологических параметров и уровней их варьирования.

Этап №2. Проведение экспериментальных исследований процесса измельчения ТПМ с использованием методики полного факторного эксперимента (ПФЭ). Получение регрессионных зависимостей целевых функций – регистрация мощности, затрачиваемой на измельчение и приведенной производительности. Выполнение классификационного анализа измельчённых ТПМ.

В качестве измельчаемого материала были выбраны отходы ПЭТ-тары. Этот вид отходов наиболее распространён, хорошо выделяем при сортировке. Области его применения, как вторичного сырья, весьма широки.

Организация и проведение экспериментальных исследований измельчения ТПМ осуществлялись в соответствии с известными методиками [158-159].

С помощью вибрационного питателя ПГ 1 осуществлялась равномерная подача измельчаемого материала в загрузочный бункер РЦА КД. После измельчения определялся средневзвешенный размер частиц ТПМ $d_{\text{ср.взв.}}$. Также фиксировались значения токовой нагрузки I в обмотке статора электродвигателя привода и производительность $Q_{\text{пр}}$ по готовому продукту. Эксперименты проводились при периодическом режиме работы установки для стабилизации процесса измельчения и обеспечения достоверности получаемых данных.

Остаток на контрольных ситах определялся с помощью прибора (вибропривод ВПС) для определения гранулометрического состава и весов. По формуле 3.1 [158] определялся средневзвешенный размер частиц измельчённого материала $d_{\text{ср.взв.}}$:

$$d_{\text{ср.взв.}} = \frac{C_1 \cdot d_{\text{ср1}} + C_2 \cdot d_{\text{ср2}} + C_3 \cdot d_{\text{ср3}} + \dots + C_n \cdot d_{\text{срn}}}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n}, \quad (3.1)$$

где $d_{\text{ср1}}, d_{\text{ср2}}, d_{\text{ср3}}, \dots, d_{\text{срn}}$ – средние размеры частиц измельчённого материала, соответствующие полученным фракциям, м; $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ – процентное содержание каждой полученной фракции в общем объёме измельчённого материала.

Согласно применяемым методикам [160], значения погрешностей выполненных экспериментальных исследований не превышали 10 %. Это позволило определять уровни исследуемых факторов и выполнять достоверный анализ результатов экспериментов с достаточной точностью.

Для определения гранулометрического состава исходного и измельчённого материала методом ситового анализа, были использованы:

- прибор для определения гранулометрического состава (вибропривод ВПС с регулировкой амплитуды);
- набор контрольных сит № 3, 5, 10, 20, 40, соответствующие ТУ 1812-001-50336739-2008;
- весы электронные;
- таймер.

Сила тока, напряжение и частота вращения вала электродвигателя отображались на дисплее преобразователя частоты. Для исключения погрешности частота вращения дополнительно измерялась непосредственно на ведомом шкиве с помощью бесконтактного оптического тахометра СЕМ АТ-8 (погрешность прибора $\pm 0,05\%$).

Активная электрическая P_{Σ} (Вт) и механическая N_{Σ} (Вт) мощности [161] определяются по формулам:

$$P_{\Sigma} = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi, \quad (3.2)$$

$$N_{\Sigma} = P_{\Sigma} \cdot \eta_{\text{эд}} \cdot \eta_{\text{тр}} = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{РЦА КД}}, \quad (3.3)$$

где I – среднее значение токовой нагрузки в обмотке статора электродвигателя привода при проведении экспериментов, (А); U – напряжение питающей сети, ($U = 380$ В); $\cos \varphi$ – коэффициент мощности электродвигателя, (у двигателя экспериментальной установки $\cos \varphi = 0,88$); $\eta_{\text{эд}}$ – КПД электродвигателя привода РЦА КД (у двигателя экспериментальной установки $\eta_{\text{эд}} = 87,5$ %); $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии РЦА КД, (у трансмиссии экспериментальной установки $\eta_{\text{тр}} \approx 90$ %); $\eta_{\text{РЦА КД}}$ – КПД гранулятора, (КПД экспериментальной установки $\eta_{\text{РЦА КД}} = 78,8$ %).

В результате анализа измельчения ТПМ в РЦА КД установлены взаимосвязи основных параметров, влияющих на данный процесс, и исследуемыми выходными показателями – функциями отклика.

В результате проведённых поисковых экспериментальных исследований были определены конструктивно-технологические параметры роторно-центробежного агрегата комбинированного действия, влияющие на потребляемую мощность привода $P_{\text{пот}}$ и на приведенную производительность $Q_{\text{пр}}$:

$$P_{\text{пот}}, Q_{\text{пр}} = f(B_{\text{у.ф.}}, \delta, n_{\text{ф}}, Q_{\text{пву}}, R_{\text{ф}}, B_{\text{ф}}, D_{\text{к}}, \rho_{\text{м}}, z_{\text{ф}}, L_{\text{фут}}), \quad (3.4)$$

где $B_{\text{у.ф.}}$ – шаг установки дисковых фрез, м; $n_{\text{ф}}$ – частота вращения фрез, мин^{-1} ; δ – минимальный зазор между ротором и бандажом, м; $Q_{\text{пву}}$ – подача ТПМ в камеру измельчения, кг/ч ; $R_{\text{ф}}$ – радиус дисковой фрезы, м; $B_{\text{ф}}$ – ширина фрезерного рабочего органа, м; $D_{\text{к}}$ – диаметр камеры измельчения, м; $\rho_{\text{м}}$ – плотность ТПМ, кг/м^3 ; $z_{\text{ф}}$ – количество дисковых фрез, шт.; $L_{\text{фут}}$ – протяжённость футеровки бандаж в зоне измельчения, м.

При проведении экспериментальных исследований определялись значения потребляемой мощности привода $P_{\text{пот}}$ и производительности по готовому продукту $Q_{\text{пр}}$ (при размере частиц измельчённого материала менее 10 мм).

Для проведения многофакторного эксперимента выбраны наиболее значимые варьируемые параметры: $B_{\text{у.ф.}}$ – шаг установки дисковых фрез, м; $n_{\text{ф}}$ – частота вращения фрез, мин^{-1} ; δ – минимальный зазор между ротором и

бандажом, м; $L_{\text{фут}}$ – протяжённость зоны футеровки бандажа, м. Основные факторы, уровни и интервалы их варьирования приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Факторы, уровни и интервалы их варьирования при проведении экспериментальных исследований

№	Факторы	Кодированные обозначения	Шаг	Уровни варьирования				
				-2	-1	0	1	2
1	Частота вращения дисковых фрез, $n_{\text{ф}}$, мин ⁻¹	x_1	500	1000	1500	2000	2500	3000
2	Шаг установки дисковых фрез, $B_{\text{у.ф.}}$, мм	x_2	4	7	11	15	19	23
3	Минимальный зазор между ротором и бандажом, δ , мм	x_3	4	5	9	13	17	21
4	Протяжённость зоны футеровки, $L_{\text{фут}}$, мм	x_4	30	60	90	120	150	180

Кроме указанного, при реализации ЦКРП–2⁴, учитывались физико-механические характеристики ТПМ и их гранулометрический состав. С использованием метода рандомизации осуществлялась минимизация систематических погрешностей, связанных с невозможностью обеспечения одинаковых условий проведения опытов в ходе экспериментальных исследований.

Использование ПФЭ позволяет нам с минимальным количеством проводимых опытов эксперимента и достаточной точностью установить энергозатраты, а также получить нелинейную модель процесса измельчения ТПМ в разработанном РЦА КД.

На основании обработки экспериментальных данных сформирована математическая модель процесса, представленная в форме уравнения регрессии квадратичного типа [159]:

$$y_i = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2, \quad (3.5)$$

где y_i – выходные показатели, полученные в процессе эксперимента; установленными показателями являлись: a_0 – свободный член уравнения; a_i , a_{ij} , a_{ii} – коэффициенты, соответственно, при линейных параметрах, при эффектах взаимодействия и квадратичных членах; x_i , x_j – уровни варьирования факторов.

Уравнения регрессии, полученные в результате проведения экспериментальных исследований, позволяют определить форму поверхности отклика. Для установления рациональных режимов работы разрабатываемого оборудования необходимы результаты экспериментальных данных, определяющих способ получения ТПМ с наименьшими энергозатратами и заданной крупностью частиц. Для выявления влияния этих параметров на приведенную производительность РЦА КД, затрачиваемую мощность использовалась разработанная нами экспериментальная установка агрегата. Реализация программы экспериментов по исследованию режимов работы РКА КД осуществлялась в соответствии с данными, представленными в таблице 3.3. Принятые уровни варьирования факторов реализуются на модели РЦА КД и соотносятся с реальными условиями работы оборудования.

Нами применялась гипотеза о нормальном законе распределения ошибок эксперимента для определения количества повторных опытов. С целью установления нормальной воспроизводимости проводимых экспериментальных исследований, количество параллельных опытов определялось с использованием критерия Кохрена.

Оценка воспроизводимости экспериментальных данных выполнялась с учётом отношения максимальной оценки дисперсии к сумме оценок всех дисперсий при доверительной вероятности равной 0,95. С использованием выражения 3.6 [159] определялось среднеквадратичное значение функции отклика:

$$G_{\text{расч}} = S^2\{y_i\}_{\text{max}} / \sum_{i=1}^N S^2\{y_i\}. \quad (3.6)$$

Коэффициенты полученного уравнения регрессии оценивались по t-критерию Стьюдента для дальнейшего применения полученных данных. Критерий Стьюдента определялся по формуле:

$$t_p = \frac{|a_k|}{S\{a_k\}}, \quad (3.7)$$

где a_k – значение параметра, $S\{a_k\}$ – стандартное отклонение параметра.

При заданном уровне статистической значимости $\alpha = 0,05$ табличное значение критерия Стьюдента t_p определялось с учётом числа степеней свободы, характерного для проведённой серии экспериментов. Далее выполнялось сопоставление табличного значения t_p с расчётной величиной t , полученной в ходе статистической обработки экспериментальных данных.

Проверка адекватности полученных нами регрессионных зависимостей и их соответствия реальному процессу измельчения ТПМ в РЦА КД осуществлялось с использованием критерия Фишера. Расчётное значение данного критерия определялось отношением дисперсии адекватности $S_{ад}$ к дисперсии воспроизводимости экспериментальных данных S_y . Далее осуществлялось сопоставление расчётного значения критерия Фишера с табличным (критическим) значением, соответствующим заданному уровню статистической значимости – $\alpha = 0,05$.

Расчетное значение критерия Фишера определяется согласно уравнению:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}. \quad (3.8)$$

Применение в диссертационной работе метода математического планирования эксперимента обусловлено большим количеством исследуемых параметров, сложностью процессов, протекающих в разработанном агрегате, а также трудоемкостью их анализа и описания. Конечной целью применения регрессионного анализа является установление рациональных режимов работы агрегата, а также использование полученных результатов при опытно-промышленном освоении ресурсосберегающей технологии и разработанного специального оборудования в производственных условиях.

3.5 Выводы

1. Для физического моделирования исследуемых процессов разработаны и изготовлены стендовые установки: пресс-валковый уплотнитель с шипованными валками; РЦА КД с камерами, оснащёнными дисковыми и иглофрезерными рабочими органами; вспомогательное оборудование, обеспечивающее реализацию технологических операций.

2. Изучены физико-механические характеристики ТПМ различных видов и типов, их особенности, влияющие на процесс измельчения.

3. Проведены поисковые эксперименты и изучены основные закономерности процессов предварительной деформации, уплотнения и постадийного измельчения ТПМ. Определены наиболее значимые параметры, влияющие на выходные показатели.

4. Изучены и применены методики проведения и обработки результатов экспериментальных исследований, выполненных с использованием разработанного РЦА КД.

5. Выбран и обоснован план проведения многофакторного эксперимента – ЦКРП–2⁴, определены целевые функции, варьируемые конструктивные параметры и уровни их варьирования.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ РОТОРНО- ЦЕНТРОБЕЖНОГО АГРЕГАТА КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ

4.1 Экспериментальные исследования процессов постадийной переработки техногенных полимерных материалов

В рамках проведения экспериментальных исследований выполнено физическое моделирование процессов постадийной переработки ТПМ с использованием оборудования, оснащенного рабочими органами с развитой поверхностью.

На первом этапе проведены исследования процесса деформирования ТПМ в пресс-валковом уплотнителе (ПВУ) с шипованными валками (раздел 3.2).

На рабочую поверхность валков подавались пустотелые полимерные отходы. Проходя между валками, материал деформировался и уплотнялся (рис. 4.1). При этом его плотность возрастала в $2\div 4$ раза за счет удаления воздушной фазы.



а

б

Рисунок 4.1 – Техногенные полимерные материалы до (а) и после (б) деформирования в пресс-валковом уплотнителе

Для улучшения условий захвата материала и повышения эксплуатационной надежности ПВУ на рабочей поверхности валков использовались шипы

конической и сферообразной формы. При этом обеспечивался надёжный захват ТПМ шипованными валками. Межвалковый зазор составлял $b = 12 \cdot 10^{-3}$ м, при высоте шипов – $h_{ш} = 10 \cdot 10^{-3}$ м.

В результате исследования процесса предварительной деформации ТПМ установлено, что рациональным соотношением диаметра шипованных валков D и размера уплотняемых материалов $d_{ср}$ (размера основания для материалов сложной конфигурации) является $\frac{D}{d_{ср}} = 2 \div 6$.

При проведении исследований частота вращения шипованных валков варьировалась в диапазоне $n_b = 20 \div 30$ об/мин. Для обеспечения стабильной работы РЦА КД с дисковыми фрезами соблюдалось условие:

$$Q_{ПВУ} \leq Q_{РЦА\ КД}, \quad (4.1)$$

где $Q_{ПВУ}$ – производительность ПВУ, кг/ч; $Q_{РЦА\ КД}$ – производительность РЦА КД, кг/ч.

Для установления рациональных режимов работы РЦА КД при заданном конструктивно-технологическом исполнении рабочих органов камер измельчения было проведено физическое моделирование процесса с использованием экспериментальной установки.

При измельчении ТПМ дисковыми фрезами в первую рабочую камеру РЦА КД (раздел 3.3) подавались предварительно уплотненные и деформированные в ПВУ материалы. В первой камере материал измельчался до размера частиц $d_1 \leq 10 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 4.2).

Полученные результаты физического моделирования процесса измельчению ТПМ дисковыми фрезами подтверждают целесообразность их применения. Первая камера по функциональному назначению реализует несколько технологических операций переработки ТПМ (уплотнение, деформирование и измельчение ТПМ под действием сжимающего и сдвигового воздействий в сужающейся рабочей зоне камеры) со степенью измельчения $i = 2 \div 10$.



а



б



в



г

Рисунок 4.2 – Техногенные полимерные материалы после измельчения дисковыми фрезами в роторно-центробежном агрегате: а – исходный материал (предварительно деформированный ПЭТ); б – фракция ПЭТ с размером частиц $4 \text{ мм} \leq d < 7 \text{ мм}$; в – с размером частиц $2 \text{ мм} \leq d < 4 \text{ мм}$; г – с размером частиц $d < 2 \text{ мм}$

С целью подтверждения эффективности использования иглофрез для измельчения ТПМ выполнено физическое моделирование процесса их переработки в экспериментальной установке, описанной в разделе 3.3.

В рамках проводимых нами экспериментальных исследований измельчались различные термопластичные ТПМ: полипропилен (рис. 4.3, а-б), полиэтилен высокой (рисунок 4.3, в-г) и низкой (рисунок 4.3, д-з) плотности.

Для реализации эффективного высокоскоростного измельчения ТПМ иглофрезерными рабочими органами частота их вращения должна составлять – $n_{иг.ф} = (2,5 \div 3) \cdot 10^3$ об/мин.

При измельчении материалов иглофрезами наблюдался их незначительный износ. Для предотвращения попадания металлических включений в перерабатываемый материал в выгрузочном патрубке измельчителя устанавливается магнитный уловитель.

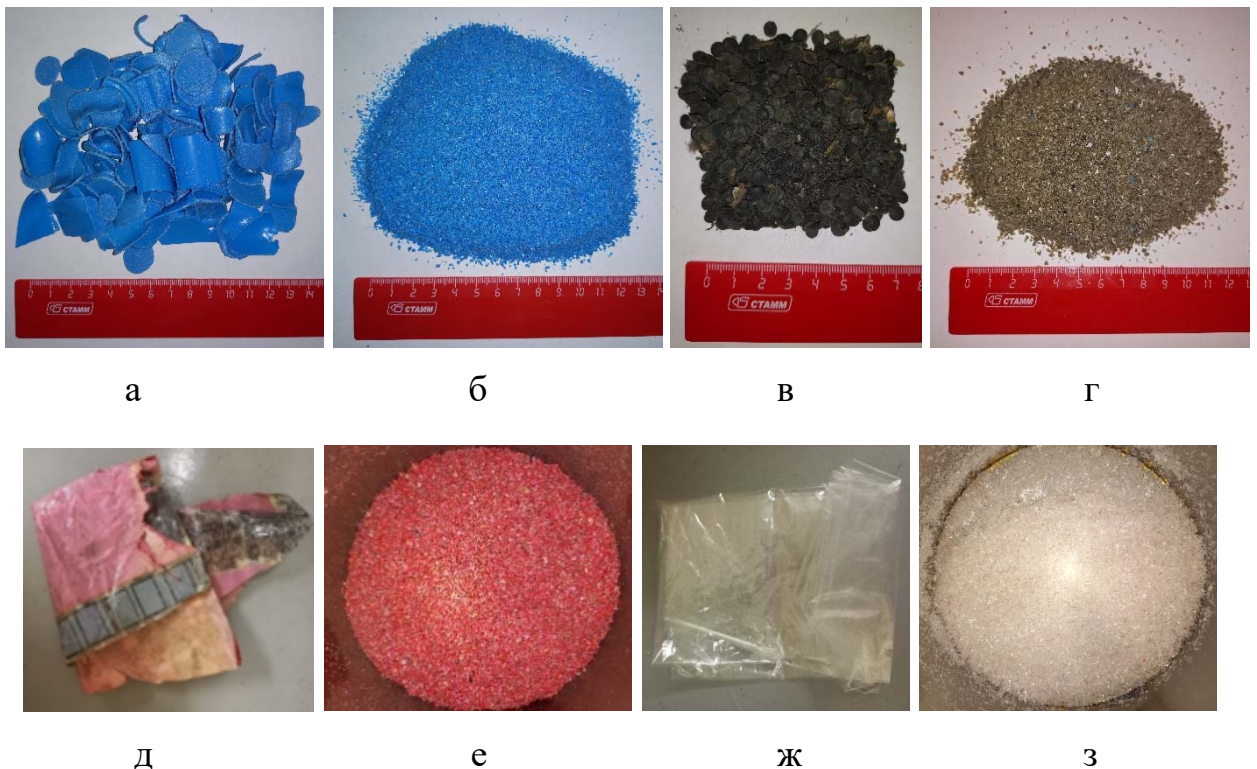


Рисунок 4.3 – Техногенные полимерные материалы до (а, в, д, ж) и после (б, г, е, з) измельчения иглофрезерными рабочими органами

Вследствие высокоскоростного вращения ротора материально-воздушный поток отбрасывается к периферии камеры измельчения. Частицы материала, размер которых превышает диаметр отверстий классифицирующей сетки, не проходят через неё и подвергаются дальнейшему измельчению. Для повышения степени измельчения ТПМ и качества вторичного сырья реализуется замкнутый цикл измельчения в технологическом модуле [141].

Для обеспечения дополнительной жесткости рабочих органов с обеспечением их повышенного силового воздействия на измельчаемый материал рекомендуется использовать иглофрезы из витой проволоки.

В процессе иглофрезерного измельчения ТПМ на их частицах образуются многочисленные микродефекты – сколы и срезы [155]. При этом повышается удельная поверхность полимерсодержащих материалов, что расширяет их функциональное назначение в композиционных смесях строительного назначения.

Полученные результаты физического моделирования процессов постадийной переработки ТПМ подтверждают целесообразность использования рабочих органов с развитой поверхностью для увеличения эффективности оборудования при измельчении упругопластических материалов.

4.2 Многофакторное планирование экспериментов при исследовании функциональных зависимостей $P_{изм}, Q_{пр} = f(n_{ф}, B_{у.ф.}, \delta, L_{фут})$

Полученные нами уравнения регрессии представляют собой математическую модель, адекватно описывающую реальный процесс измельчения ТПМ в РЦА КД.

В качестве основного плана эксперимента при проведении экспериментальных исследований выбран центральный композиционный ротатабельный план (ЦКРП-2⁴) полного факторного эксперимента (ПФЭ).

Количество, уровни и интервалы варьирования основных факторов определялись на основании результатов проведенных поисковых экспериментов и условий реализации процесса измельчения в РЦА КД.

Исследована зависимость мощности, потребляемой на измельчение, $P_{изм}$ и приведенной производительности $Q_{пр}$ от частоты вращения дисковых фрез ($n_{ф}$, мин⁻¹), шага установки дисковых фрез ($B_{у.ф.}$, мм), минимального зазора между ротором и бандажом (δ , мм) и протяжённостью зоны футеровки ($L_{фут}$, мм) – $P_{изм}, Q_{пр} = f(n_{ф}, B_{у.ф.}, \delta, L_{фут})$.

В таблице 4.1 представлены условия проведения и результаты экспериментальных исследований.

Таблица 4.1 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Линейные члены								Выходная функция	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	<i>n_ф</i> , об/мин	<i>V_{у.ф.}</i> , мм	<i>δ</i> , мм	<i>L_{фут.}</i> , мм	<i>P_{изм.}</i> , Вт	<i>Q_{пр.}</i> , кг/час
1	-1	-1	-1	-1	1500	11	9	90	340	5,6
2	1	-1	-1	-1	2500	11	9	90	430	6,7
3	-1	1	-1	-1	1500	19	9	90	300	4,9
4	1	1	-1	-1	2500	19	9	90	410	6,1
5	-1	-1	1	-1	1500	11	17	90	280	4,9
6	1	-1	1	-1	2500	11	17	90	370	6
7	-1	1	1	-1	1500	19	17	90	240	4,2
8	1	1	1	-1	2500	19	17	90	330	5,3
9	-1	-1	-1	1	1500	11	9	150	420	5
10	1	-1	-1	1	2500	11	9	150	510	7,1
11	-1	1	-1	1	1500	19	9	150	380	5,3
12	1	1	-1	1	2500	19	9	150	470	6,5
13	-1	-1	1	1	1500	11	17	150	360	5,3
14	1	-1	1	1	2500	11	17	150	450	6,4
15	-1	1	1	1	1500	19	17	150	320	4,6
16	1	1	1	1	2500	19	17	150	410	5,7
17	-2	0	0	0	1000	15	13	120	300	5,2
18	2	0	0	0	3000	15	13	120	440	6,9
19	0	-2	0	0	2000	7	13	120	410	6
20	0	2	0	0	2000	23	13	120	320	5,5
21	0	0	-2	0	2000	15	5	120	430	5,5
22	0	0	2	0	2000	15	21	120	310	5
23	0	0	0	-2	2000	15	13	60	400	5,5
24	0	0	0	2	2000	15	13	180	440	5,8
25	0	0	0	0	2000	15	13	120	370	6,1
26	0	0	0	0	2000	15	13	120	370	6,1
27	0	0	0	0	2000	15	13	120	370	6,1
28	0	0	0	0	2000	15	13	120	370	6,1
29	0	0	0	0	2000	15	13	120	370	6,1
30	0	0	0	0	2000	15	13	120	370	6,1
31	0	0	0	0	2000	15	13	120	370	6,1

По результатам проведенного многофакторного планирования эксперимента, после обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии в кодированном виде.

$$P_{изм}=370,01+42,5 \times X_1-20 \times X_2-30,83 \times X_3+29,17 \times X_4-2,09 \times X_2^2+11,7 \times X_4^2 \quad (4.2)$$

$$Q_{пр}=6,1+0,622 \times X_1-0,161 \times X_2-0,178 \times X_3+0,181 \times X_4-0,146 \times X_1 \times X_2-0,171 \times X_1 \times X_3-0,171 \times X_2 \times X_3-0,116 \times X_2^2-0,241 \times X_3^2-0,141 \times X_4^2. \quad (4.3)$$

Анализ полученных значений коэффициентов в уравнении регрессии в кодированном виде для определения мощности, потребляемой на измельчение $P_{изм}$, показал, что наибольшее влияние на потребляемую мощность оказывают факторы: частота вращения фрез и протяжённость зоны футеровки. Повышение их значений приводит к увеличению потребляемой мощности. Протяжённость зоны футеровки обуславливает энергозатраты на трение материала о поверхность камеры измельчения и усилия, необходимые для разрушения материала. С увеличением шага установки фрез и зазора между ротором и бандажом потребляемая мощность снижается.

Анализ полученных значений коэффициентов в уравнении регрессии кодированного вида для определения приведенной производительности по готовому продукту $Q_{пр}$ показывает, что наибольшее влияние на неё оказывает изменение частоты вращения фрез. Увеличение частоты вращения фрез приводит к повышению приведенной производительности, за счет увеличения скорости движения частиц и многократного воздействия рабочего органа на материал. При увеличении шага установки фрез и зазора между ротором и бандажом приведенная производительность снижается. С увеличением протяжённости футеровки производительность возрастает. При увеличении парных и квадратичных членов уравнения значение указанной производительности также уменьшается.

Для детального анализа полученного уравнения необходимо перейти от его кодированной формы к натуральному виду. Для этого используем следующую формулу:

$$X_k = \frac{X_n - X_{ср}}{\Delta}, \quad (4.4)$$

где X_k – обозначение фактора в кодированном виде; X_n – обозначение фактора в натуральном виде; X_{cp} – значение нулевого уровня варьирования фактора; Δ – шаг варьирования.

В данном случае: для частоты вращения – $X_1 = \frac{n_{\phi}-2000}{500}$; шага установки дисковых фрез – $X_2 = \frac{B_{y.\phi}-15}{4}$; минимального зазора – $X_3 = \frac{\delta-13}{4}$; протяжённости футеровки – $X_4 = \frac{L_{фут}-120}{30}$.

После подстановки значений X_1, X_2, X_3, X_4 получаем уравнения (4.2) и (4.3) в натуральном виде:

$$P_{изм}=358,95+0,12 \times n_{\phi}-0,066 \times B_{y.\phi}-5,17 \times \delta-1,96 \times L_{фут}, \quad (4.5)$$

$$Q_{np}=-10,97+0,004 \times n_{\phi}+0,495 \times B_{y.\phi}+0,711 \times \delta+0,056 \times L_{фут}-0,011 \times B_{y.\phi} \times \delta-0,007 \times B_{y.\phi}^2-0,015 \times \delta^2. \quad (4.6)$$

Оценка полученных уравнений регрессий на адекватность осуществлялась с использованием критерия Фишера [159].

4.3 Анализ графических зависимостей и установление рациональных режимов работы агрегата

На рисунке 4.4 представлены зависимости мощности, потребляемой на измельчение, $P_{изм}$ и приведенной производительности Q_{np} от частоты вращения дисковых фрез n_{ϕ} при различном шаге $B_{y.\phi}$ установки дисковых фрез.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что увеличение частоты вращения рабочего органа от $n_{\phi} = 1000$ об/мин до $n_{\phi} = 3000$ об/мин приводит к возрастанию мощности, потребляемой на измельчение, с $P_{изм} = 230 \div 320$ Вт до $P_{изм} = 410 \div 480$ Вт и к росту приведенной производительности с $Q_{np} = 4,0 \div 4,5$ кг/ч до $Q_{np} = 5,6 \div 6,8$ кг/ч. Однако, при $n_{\phi} > 2500$ об/мин приведенная производительность уменьшается. При значениях $B_{y.\phi} = 7 \cdot 10^{-3}$ м и $n_{\phi} = 3000$ об/мин наблюдается максимальное значение мощности,

потребляемой на измельчение, $P_{изм} = 480$ Вт за счёт суммарного сопротивления при измельчении материала и вращении наибольшего количества фрез на валу.

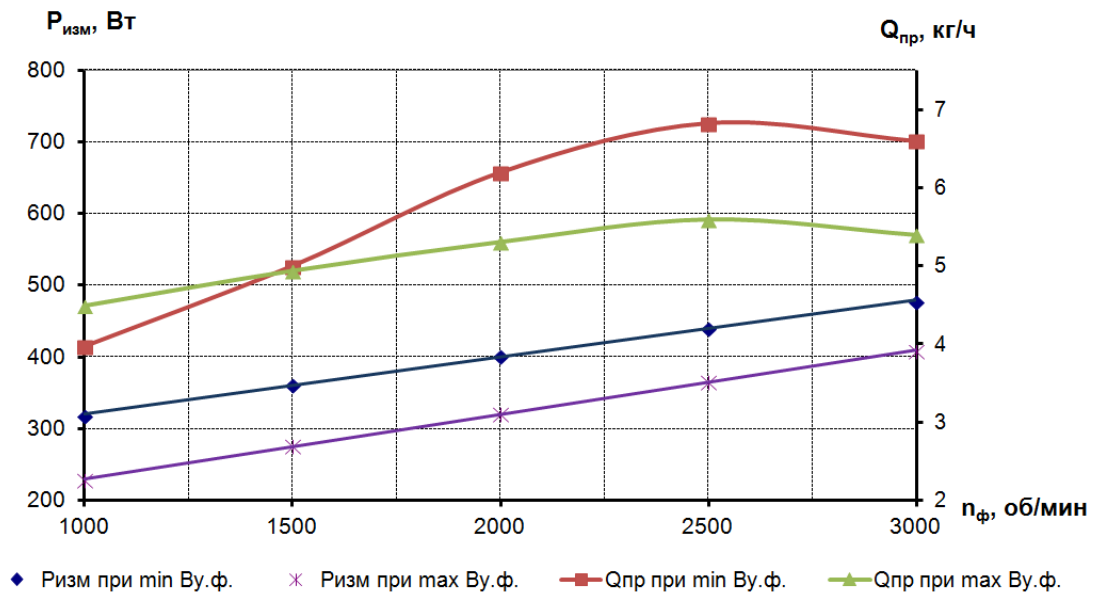


Рисунок 4.4 – Графические зависимости $P_{изм}$, $Q_{пр} = f(n_{ф}, B_{у.ф.})$ при $\delta = 13$ мм и $L_{фут} = 120$ мм

На рисунке 4.5 представлены зависимости мощности, потребляемой на измельчение, $P_{изм}$ и приведенной производительности $Q_{пр}$ от шага установки дисковых фрез $B_{у.ф.}$ при различных значениях зазора δ между ротором и бандажом.

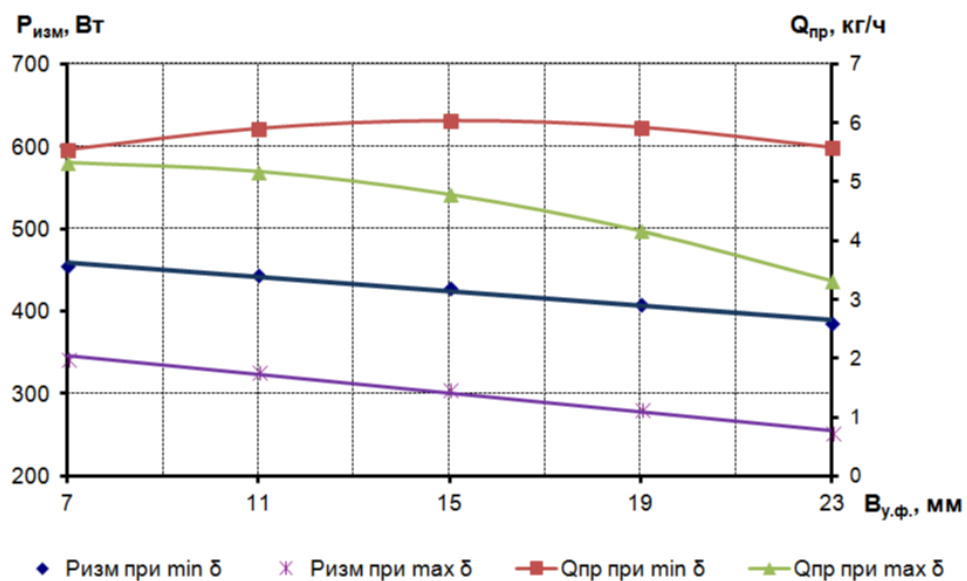


Рисунок 4.5 – Графические зависимости $P_{изм}$, $Q_{пр} = f(B_{у.ф.}, \delta)$ при $n_{ф} = 2000$ об/мин и $L_{фут} = 120$ мм

При увеличении шага установки дисковых фрез от $B_{y.ф.} = 7 \cdot 10^{-3}$ м до $B_{y.ф.} = 23 \cdot 10^{-3}$ м мощность, потребляемая на измельчение, снижается с $P_{изм} = 340 \div 450$ Вт до $P_{изм} = 250 \div 380$ Вт, т.к. уменьшается количество фрез, установленных на валу. При $B_{y.ф.} = (7 \div 11) \cdot 10^{-3}$ м наблюдается рост производительности, а при $B_{y.ф.} = (11 \div 23) \cdot 10^{-3}$ – её уменьшение.

На рисунке 4.6 представлены зависимости мощности, потребляемой на измельчение, $P_{изм}$ и приведенной производительности $Q_{пр}$ от шага установки дисковых фрез $B_{y.ф.}$ при различных значениях протяжённости зоны футеровки $L_{фут.}$.

При увеличении шага установки дисковых фрез от $B_{y.ф.} = 7 \cdot 10^{-3}$ м до $B_{y.ф.} = 23 \cdot 10^{-3}$ м мощность, потребляемая на измельчение, снижается с $P_{изм} = 380 \div 510$ Вт до $P_{изм} = 310 \div 420$ Вт. При $B_{y.ф.} = (7 \div 15) \cdot 10^{-3}$ м наблюдается рост производительности, т.к. фрезы взаимодействуют с измельчаемым материалом большей рабочей поверхностью. При $B_{y.ф.} = (15 \div 23) \cdot 10^{-3}$ производительность снижается вследствие уменьшения количества фрез, устанавливаемых на валу.

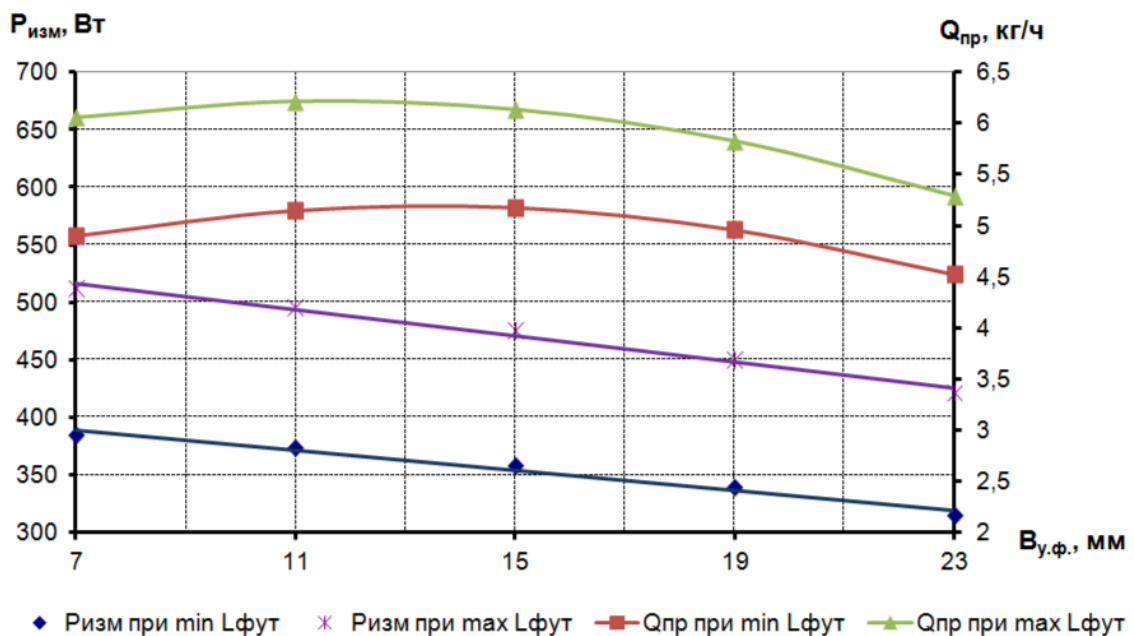


Рисунок 4.6 – Графические зависимости $P_{изм}, Q_{пр} = f(B_{y.ф.}, L_{фут.})$ при $n_{ф} = 2000$ об/мин и $\delta = 13$ мм

На рисунке 4.7 представлены зависимости мощности, потребляемой на измельчение, $P_{изм}$ и приведенной производительности $Q_{пр}$ от минимального зазора δ при различных значениях частоты вращения дисковых фрез $n_{ф}$.

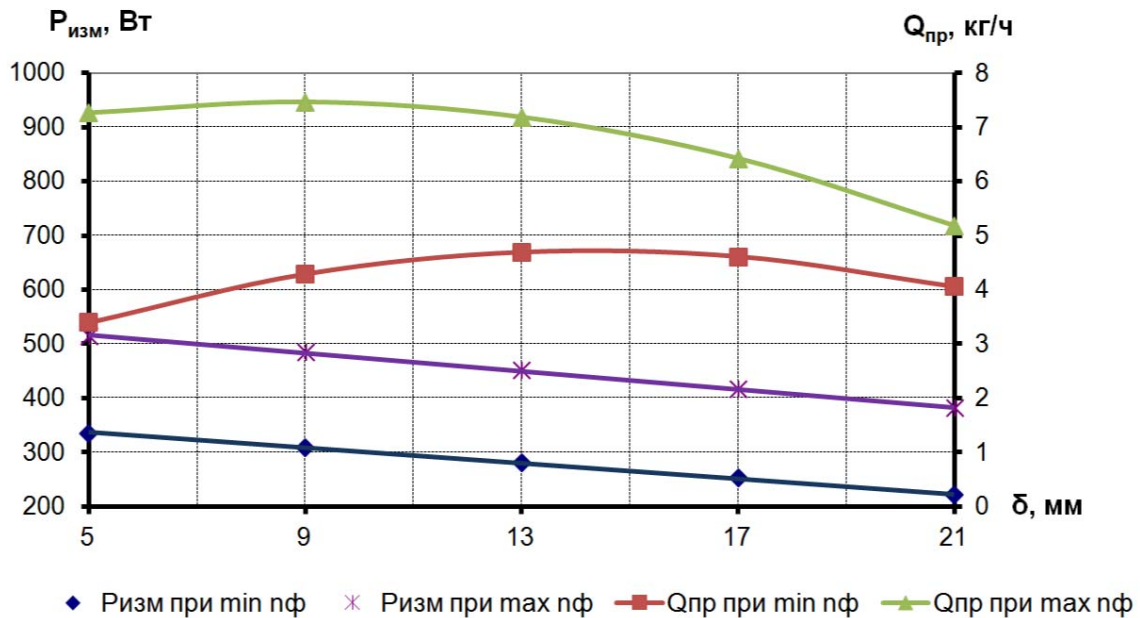


Рисунок 4.7 – Графические зависимости $P_{изм}$, $Q_{пр} = f(\delta, n_{ф})$ при $B_{у.ф.} = 15$ мм и $L_{фут} = 120$ мм

При увеличении минимального зазора от $\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м до $\delta = 21 \cdot 10^{-3}$ м мощность, потребляемая на измельчение, снижается с $P_{изм} = 330 \div 510$ Вт до $P_{изм} = 220 \div 380$ Вт. При $\delta = (5 \div 13) \cdot 10^{-3}$ м наблюдается рост приведенной производительности, а при $\delta = (13 \div 21) \cdot 10^{-3}$ – её снижение. Начальный рост приведенной производительности объясняется увеличением поперечного сечения зоны измельчения материала. Дальнейшее снижение производительности происходит из-за уменьшения сдвигового (разрывающего) воздействия в сопряжении «ротор – материал – футеровка».

На эффективность процесса измельчения существенное влияние оказывает сопротивление свободному движению измельчаемого материала в рабочей камере, что определяется протяжённостью зоны футеровки бандажа, $L_{фут}$.

На рисунке 4.8 представлены зависимости мощности, потребляемой на измельчение, $P_{изм}$ и приведенной производительности $Q_{пр}$ от протяжённости зоны футеровки $L_{фут}$ при различных значениях частоты вращения дисковых фрез $n_{ф}$.

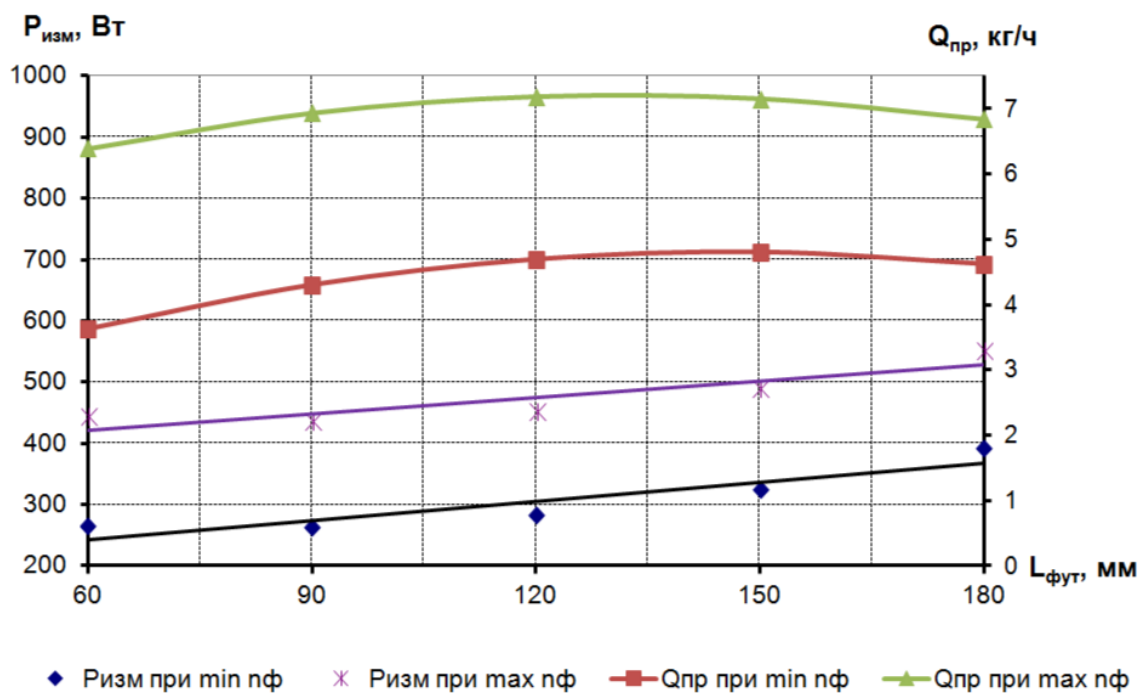


Рисунок 4.8 – Графические зависимости $P_{изм}, Q_{пр} = f(L_{фут}, n_{ф})$ при $\delta = 13 \text{ мм}$ и $B_{у.ф.} = 15 \text{ мм}$

Увеличение протяжённости зоны футеровки с $L_{фут} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ до $L_{фут} = 180 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ приводит к изменению мощности, потребляемой на измельчение, с $P_{изм} = 260 \div 440 \text{ Вт}$ до $P_{изм} = 390 \div 550 \text{ Вт}$ и к росту приведенной производительности с $Q_{пр} = 3,6 \div 6,4 \text{ кг/ч}$ до $Q_{пр} = 4,8 \div 7,2 \text{ кг/ч}$. При протяжённости зоны футеровки в диапазоне $L_{фут} = (60 \div 150) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ производительность возрастает, т.к. увеличивается сопротивление перемещению уплотняемого материала.

При $L_{фут} > 150 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ производительность снижается из-за дополнительного сопротивления рециркуляции материального потока вне зон уплотнения и измельчения.

При различных значениях зазора δ между ротором и бандажом с увеличением зоны протяжённости футеровки с $L_{фут} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ до $L_{фут} = 180 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ (рис. 4.9) мощность, потребляемая на измельчение, возрастает с $P_{изм} = 290 \div 420 \text{ Вт}$ до $P_{изм} = 410 \div 530 \text{ Вт}$. При $L_{фут} = (60 \div 150) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ наблюдается рост приведенной производительности, а при $L_{фут} = (150 \div 180) \cdot 10^{-3}$ значения указанного показателя снижаются.

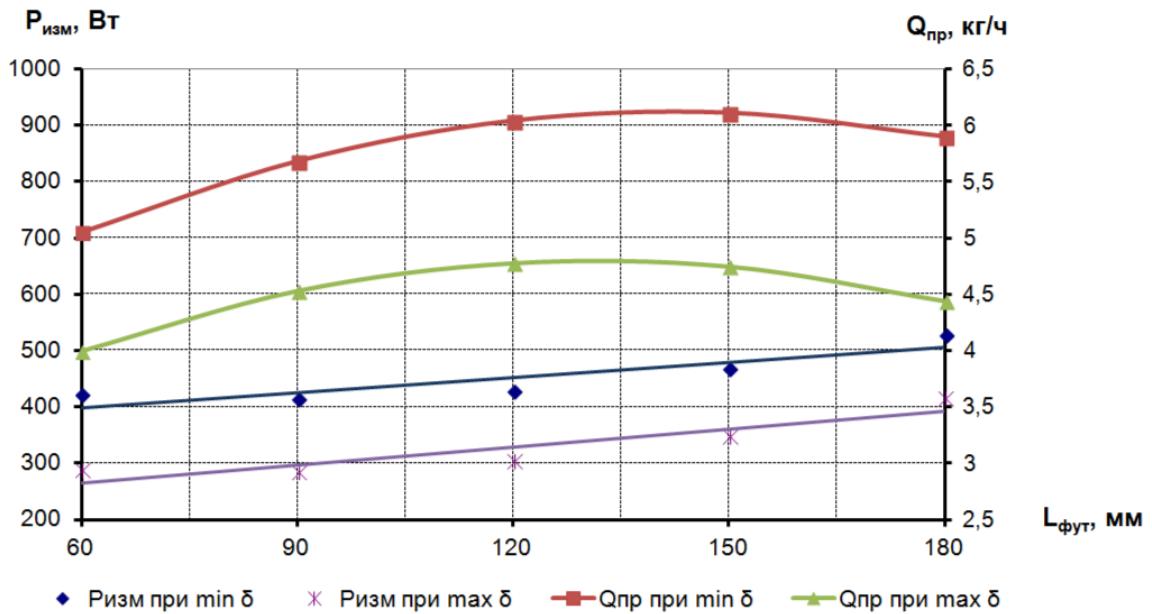


Рисунок 4.9 – Графические зависимости $P_{изм}, Q_{пр} = f(L_{фут}, \delta)$ при $n_{\phi} = 2000$ об/мин и $B_{у.ф.} = 15$ мм

При определении рациональных режимов работы РЦА КД для достижения его энергоэффективности нами учитывались результаты экспериментальных исследований, а также особенности процесса измельчения ТПМ в первой камере с использованием дисковых фрез.

Наибольшее влияние на мощность, потребляемую на измельчение, и приведенную производительность оказывают частота вращения дисковых фрез n_{ϕ} и протяжённость зоны футеровки $L_{фут}$.

Для достижения максимальной приведенной производительности частоту вращения дисковых фрез выбирали в зависимости от вида измельчаемых ТПМ, их конфигурации и размеров. Протяжённость зоны футеровки $L_{фут}$ определяли для достижения максимального деформационного воздействия на материал и его беспрепятственного выхода из зоны измельчения. Минимальный зазор δ устанавливался в зависимости от крупности исходного сырья и необходимой приведенной производительности. Шаг установки $B_{у.ф.}$ дисковых фрез определял величину рабочей поверхности ротора. При этом, если $B_{у.ф.} < 9 \cdot 10^{-3}$ м, то измельчение ТПМ дисковыми фрезами малоэффективно, т.к. при большой частоте вращения ротор представляет собой сплошной цилиндр, а «сплошная» рабочая поверхность многочисленных дисковых фрез незначительно оказывает

измельчающее воздействие на материал. При $B_{y.ф.} = (9 \div 15) \cdot 10^{-3}$ м, число фрез на валу уменьшается, а энергоэффективность измельчения возрастает. При определении рациональных режимов работы РЦА КД учитывалось совокупное влияние варьируемых факторов на выходные показатели.

В результате анализа графических зависимостей мощности, потребляемой на измельчение материала, и приведенной производительности от значений варьируемых факторов определены рациональные конструктивные параметры и режимы работы РЦА КД. Определены следующие рациональные значения факторов: $n_{\phi} = 2000 \div 2500$ об/мин, $B_{y.ф.} = (11 \div 15) \cdot 10^{-3}$ м, $\delta = (9 \div 17) \cdot 10^{-3}$ м, $L_{фут} = (120 \div 150) \cdot 10^{-3}$ м.

После определения рациональных значений варьируемых факторов и проверки адекватности уравнений регрессии, проводились экспериментальные исследования процесса измельчения ТПМ дисковыми фрезами при непрерывном режиме работы РЦА КД. Графические зависимости, построенные по результатам экспериментальных исследований измельчения ТПМ при непрерывном режиме, представлены на рисунках 4.10-4.13.

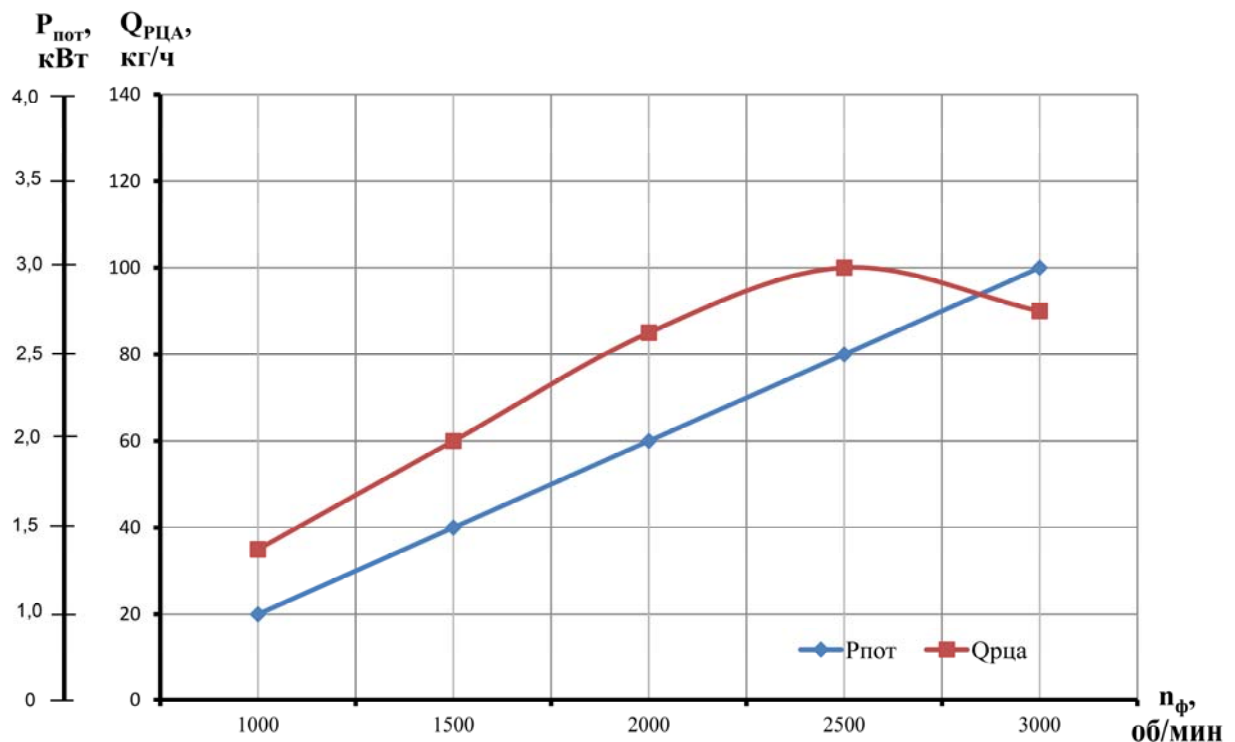


Рисунок 4.10 – Графические зависимости $P_{пот}$, $Q_{РЦА} = f(n_{\phi})$ при $B_{y.ф.} = 15$ мм, $\delta = 13$ мм и $L_{фут} = 120$ мм

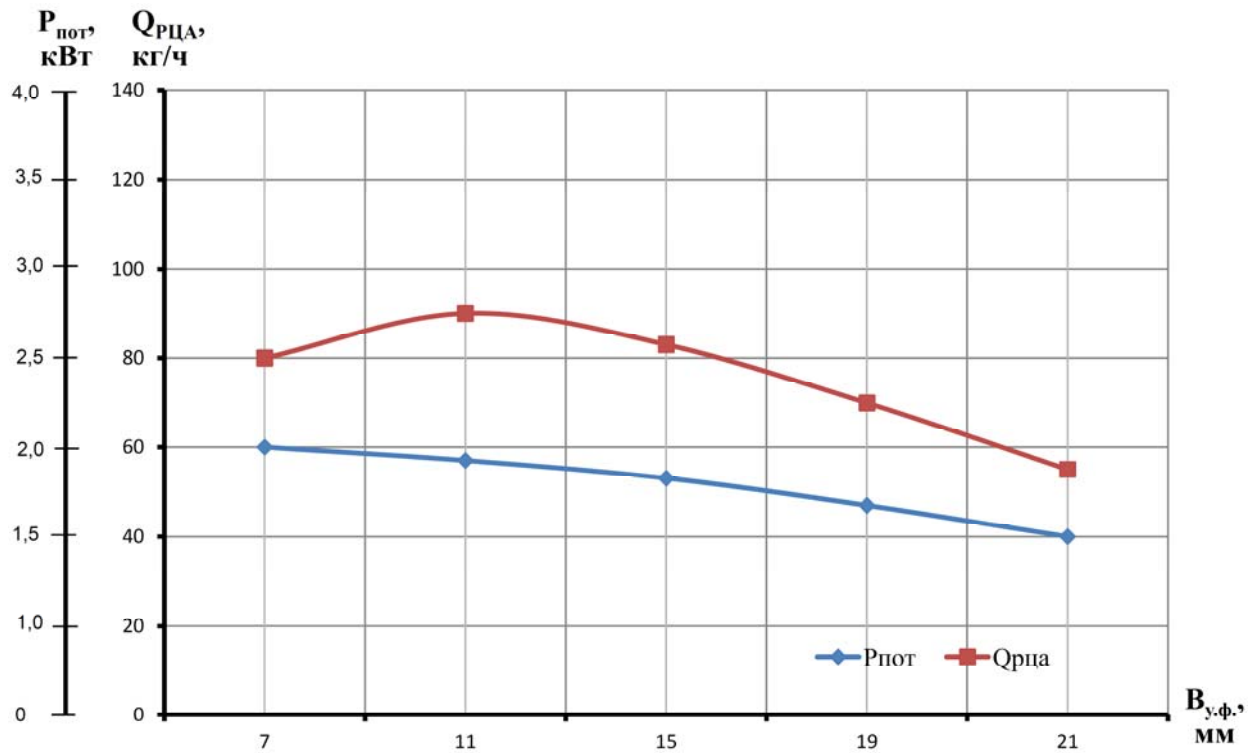


Рисунок 4.11 – Графические зависимости $P_{пот}, Q_{рца} = f(V_{y.ф.})$ при $n_{ф} = 2000$ об/мин, $\delta = 13$ мм и $L_{фут} = 120$ мм

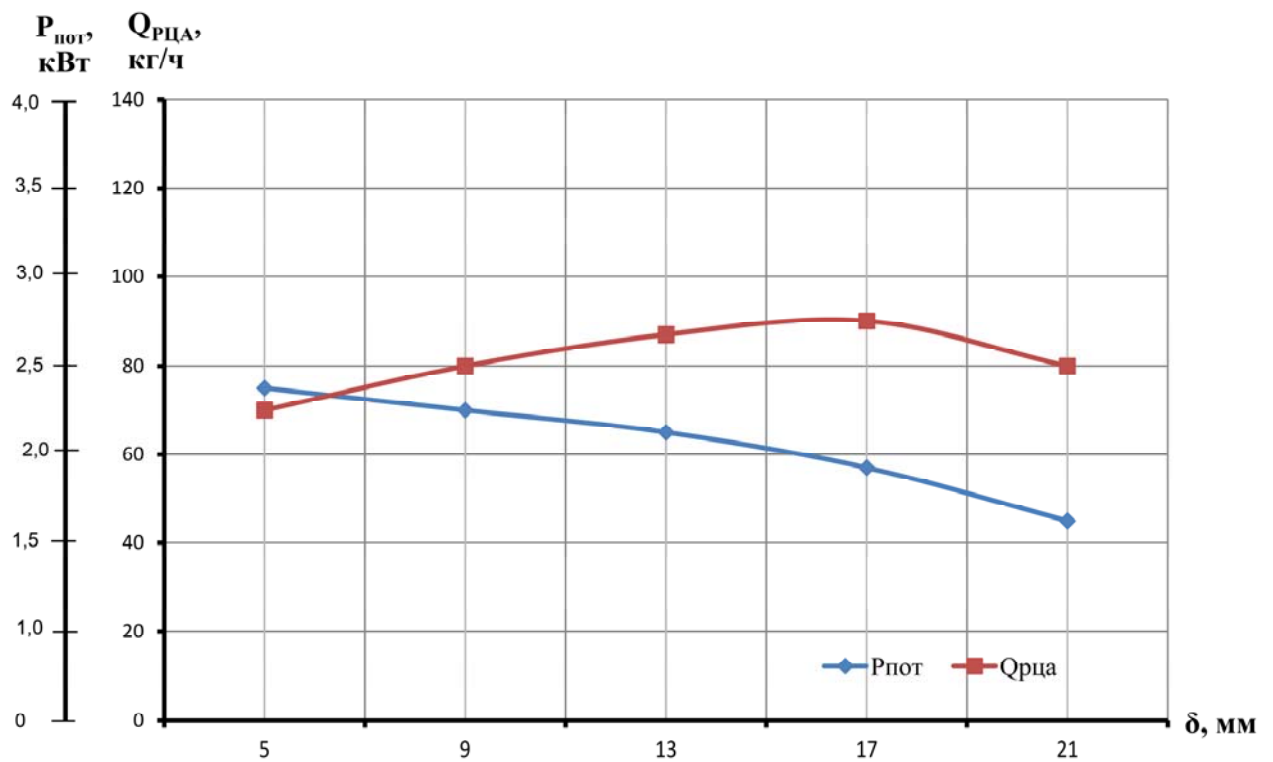


Рисунок 4.12 – Графические зависимости $P_{пот}, Q_{рца} = f(\delta)$ при $n_{ф} = 2000$ об/мин, $V_{y.ф.} = 15$ мм и $L_{фут} = 120$ мм

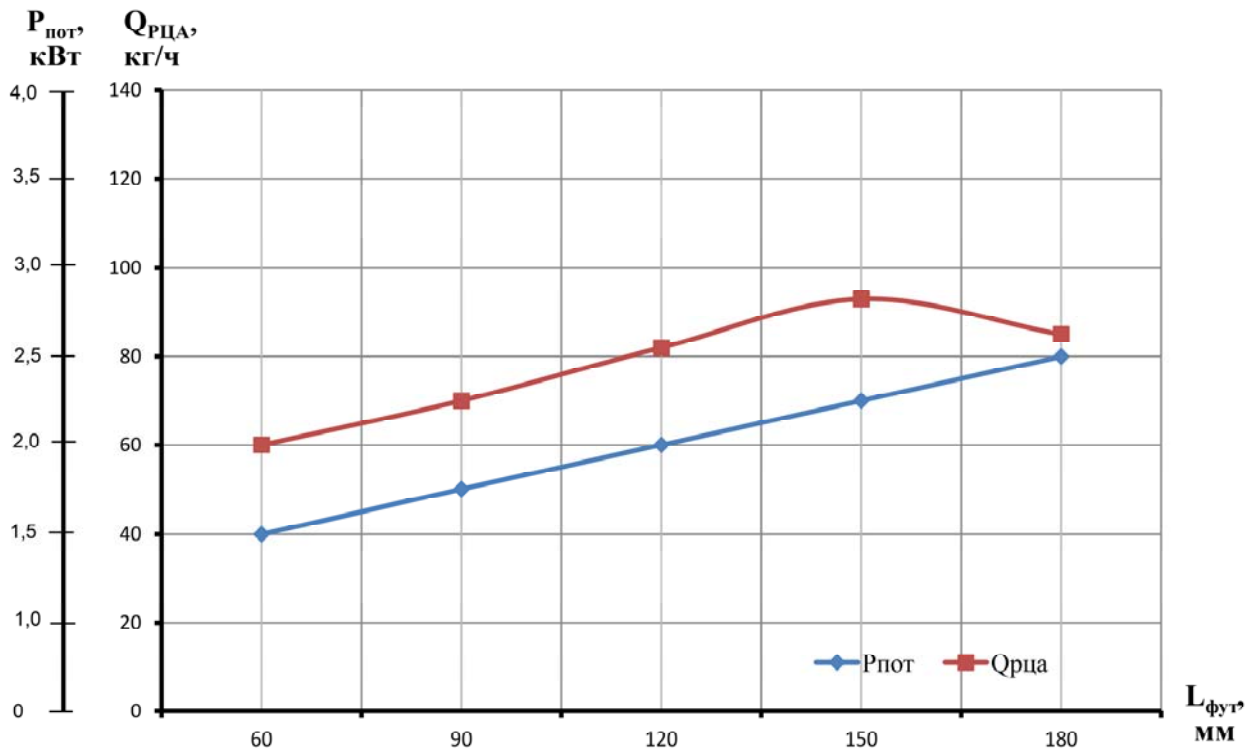


Рисунок 4.13 – Графические зависимости $P_{пот}, Q_{РЦА} = f(L_{фут})$ при $n_{ф} = 2000$ об/мин, $\delta = 13$ мм и $B_{у.ф.} = 15$ мм

В результате проведённых экспериментальных исследований определены диапазоны значений параметров, при которых достигается максимальные значения производительности ($Q_{РЦА} = 90 \div 100$ кг/ч) при непрерывном режиме работы РЦА КД: $n_{ф} = 2500$ об/мин, $B_{у.ф.} = 11 \cdot 10^{-3}$ м, $\delta = 17 \cdot 10^{-3}$ м, $L_{фут} = 150 \cdot 10^{-3}$ м.

Установленные закономерности процесса измельчения ТПМ дисковыми фрезами, а также полученные рациональные значения варьируемых параметров использованы нами при проведении опытно-промышленных испытаний разработанного технологического модуля с РЦА КД в производственных условиях.

4.4 Сравнительный анализ полученных результатов исследований

Для оценки адекватности полученных аналитических выражений и установленных при проведении эксперимента выходных показателей нами осуществлен сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Сопоставлены расчётные величины потребляемой мощности привода первой камеры измельчения РЦА КД – $P_{д.ф.}$ (2.63), в зависимости от частоты вращения ротора – n_{ϕ} , с результатами экспериментальных исследований зависимости $P_{nom} = f(n_{\phi})$ при непрерывном режиме работы оборудования.

Потребляемая мощность привода РЦА КД определялась экспериментально с использованием частотного преобразователя.

Вторым сравниваемым выходным показателем являлась производительность РЦА КД – $Q_{РЦА}$. Сравнение производилось с расчётными величинами Q_I (2.72), в зависимости от частоты вращения ротора – n_{ϕ} .

Полученные графические зависимости представлены на рисунке 4.14.

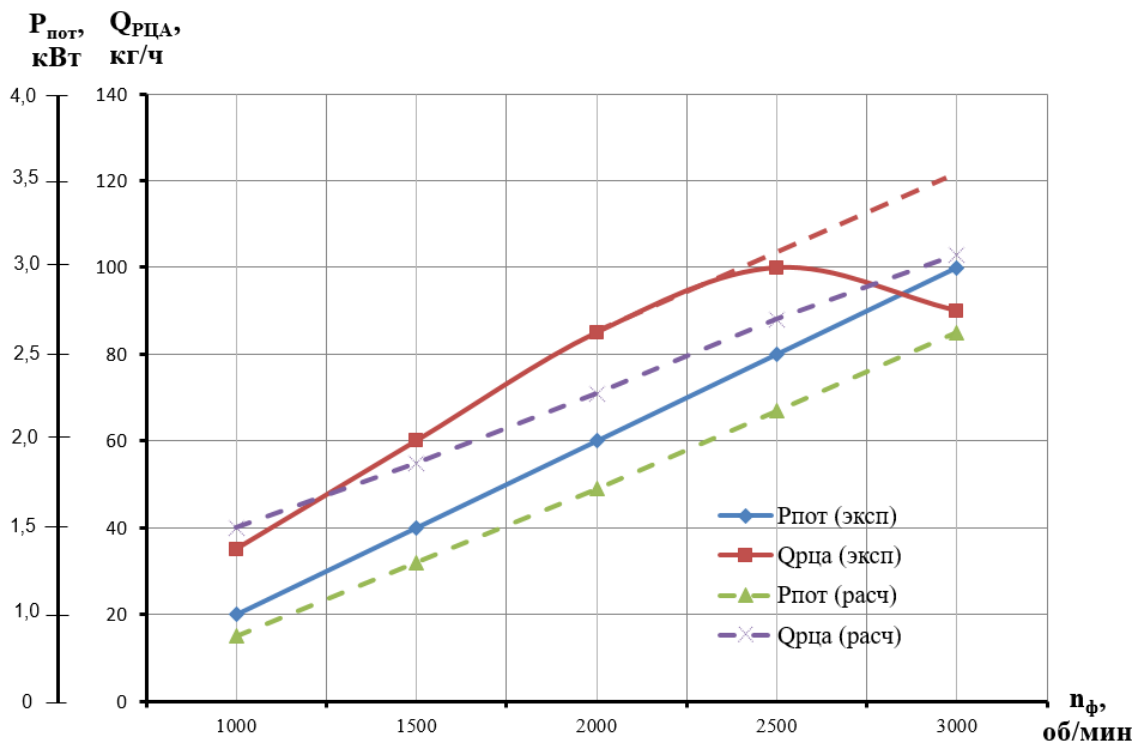


Рисунок 4.14 – Графические зависимости потребляемой мощности привода РЦА КД P_{nom} и производительности $Q_{РЦА}$ при различной частоте вращения ротора n_{ϕ}

Сравнительный анализ графических зависимостей потребляемой мощности привода P_{nom} и производительности $Q_{РЦА}$ при различной частоте вращения ротора n_{ϕ} показывает, что расхождение между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 15%.

4.5 Выводы

1. В результате моделирования процессов постадийного измельчения ТПМ на стендовых экспериментальных установках определены конструктивные параметры рабочих органов, а также технологические режимы работы камер измельчения РЦА КД при переработке ТПМ.

2. По результатам проведённых многофакторных экспериментальных исследований были получены уравнения регрессии $P_{изм}, Q_{пр} = f(n_{\phi}, B_{y.\phi}, \delta, L_{фут})$, позволяющие адекватно оценить влияние варьируемых параметров на выходные функции при измельчении ТПМ в РЦА КД.

3. В результате анализа уравнений регрессии определена значимость варьируемых факторов $n_{\phi}, B_{y.\phi}, \delta, L_{фут}$, влияющих на мощность, потребляемую на измельчение, $P_{изм}$ и приведенную производительность $Q_{пр}$. Установлено, что на мощность $P_{изм}$ наибольшее влияние оказывают частота вращения дисковых фрез n_{ϕ} и протяжённость зоны футеровки $L_{фут}$; на производительность $Q_{пр}$ – частота вращения ротора n_{ϕ} и шаг установки дисковых фрез $B_{y.\phi}$.

4. Установлено, что увеличение мощности с $P_{изм} = 220$ Вт до $P_{ном} = 550$ Вт наблюдается при повышении частоты вращения ротора n_{ϕ} , уменьшении шага установки дисковых фрез $B_{y.\phi}$ и минимального зазора δ , а также при увеличении протяжённости зоны футеровки $L_{фут}$.

5. Увеличение частоты вращения дисковых фрез с $n_{\phi} = 1000$ об/мин до $n_{\phi} = 2500$ об/мин, шага установки дисковых фрез с $B_{y.\phi} = 7 \cdot 10^{-3}$ м до $B_{y.\phi} = 15 \cdot 10^{-3}$ м и минимального зазора с $\delta = 9 \cdot 10^{-3}$ м до $\delta = 17 \cdot 10^{-3}$ м, протяженности зоны футеровки с $L_{фут} = 60 \cdot 10^{-3}$ м до $L_{фут} = 150 \cdot 10^{-3}$ м приводит к увеличению приведённой производительности с $Q_{пр} = 3,6$ кг/ч до $Q_{пр} = 7,5$ кг/ч. Дальнейшее увеличение значений варьируемых параметров приводит к снижению производительности.

6. Определены следующие рациональные значения конструктивно-технологических параметров РЦА КД: $n_{\phi} = 2000 \div 2500$ об/мин, $B_{y.\phi} = (11 \div 15) \cdot 10^{-3}$ м, $\delta = (9 \div 17) \cdot 10^{-3}$ м, $L_{фут} = (120 \div 150) \cdot 10^{-3}$ м.

5 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО АГРЕГАТА В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

5.1 Реализация научно-технических разработок в производственных условиях ООО «ТК «Экотранс»

В рамках реализации Федеральных проектов «Экологическое благополучие» и «Экономика замкнутого цикла» на период до 2030 года, утверждённых Указом Президента РФ В. В. Путина № 309 от 7 мая 2024 г., на ООО «ТК «Экотранс» разработана ресурсосберегающая технология и оборудование для комплексной переработки ТПМ [162-164].

С учетом накопленного опыта и требований экономической эффективности для ООО «ТК «Экотранс» наиболее целесообразными являются следующие направления комплексной переработки ТПМ:

I. Переработка ТПМ для получения флекса и реализации его в агломерированном виде [163-164].

II. Производство полидисперсных полимерсодержащих композиционных смесей с гетерогенными компонентами [165-168]: углеродсодержащими добавками; кремнезёмсодержащими добавками (в т.ч. механоактивированными) – отходами перлитового или вермикулитового производств, базальтовых волокнистых отходов (фибронаполнителей) и др.

III. Получение экструдированных материалов (гранул) – промежуточных материалов для последующего производства из них товарной продукции различного технологического назначения [166, 168]: труб, полимерного профиля, прессованных изделий, упаковочных материалов (плёнки) и др.

IV. Переработка ТПМ с производством гранулированных материалов для низкотемпературной термолизной переработки (до 500 °С) и получения высококалорийной продукции [56-57]: технического углерода ($Q_{\text{ту}} = 6800$ ккал/кг), жидкого углеводородного топлива ($Q_{\text{жвт}} = 10500$ ккал/кг), синтезированного газа ($Q_{\text{сг}} = 3600$ ккал/кг).

V. Получение композиционных материалов с различными наполнителями [162, 165, 167] из техногенного сырья для аддитивных технологий и последующим производством изделий в области машиностроения, строительства, архитектуры и др.

В производственных условиях ООО «ТК «Экотранс» осуществлена опытно-промышленная апробация разработанного РЦА КД для переработки ТПМ (патенты РФ 2724667, 2755436, 213199, 2834371 – приложение 1) с получением различных видов товарной продукции: полимерного флекса из вторичного сырья, гранулята, экструдированных изделий различной конфигурации.

При выполнении разработок использованы результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов переработки техногенных полимерных материалов в технологическом модуле (патент РФ 2834371), включающем пресс-валковый уплотнитель, камеры измельчения с дисковыми и игольчатыми (стержневыми) фрезами и др.

Целью опытно-промышленных испытаний являлось конструктивно-технологическое совершенствование выполненных научно-технических разработок с учётом реальных производственных условий и установление рациональных технологических режимов комплексной переработки ТПМ и технических средств для их реализации.

При поступлении на полигон из общей массы ТКО выделяют полимерные отходы, которые в общем объёме ТКО представлены различными видами материалов и составляют 15-20 %.

При проведении опытно-промышленной апробации разработанной технологии и технических средств исходным сырьём являлся полиэтилен низкого и высокого давления со следующими физико-механическими характеристиками: размеры $b \times h = (50 \div 200) \times (100 \div 300) \cdot 10^{-3}$ м; температура плавления $t_n = 100 \div 140$ °С; коэффициент линейного теплового расширения $\lambda = (180 \div 400) \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹; предел прочности (изделий) при растяжении $\sigma_p = 5 \div 30$ МПа; прочность (изделий) на сжатие $\sigma_c = 10 \div 35$ МПа; плотность $\rho = 900 \div 960$ кг/м³.

Предварительно выполнялись следующие технологические операции: сортировка ТПМ по типам пластика и исходному состоянию отходов, а также очистка их от загрязнений.

Измельчение техногенных полимерных материалов производилось в РЦА КД. Полимерные отходы предварительно уплотнялись и деформировались в ПВУ с шипованными валками. Далее сырьё постадийно измельчалось дисковыми фрезами и иглофрезерными рабочими органами.

Технические характеристики РЦА КД:

Габаритные размеры LxVxH, м	1,5x0,93x1,3
Частота вращения шипованных валков, мин ⁻¹	15÷20
Частота вращения дисковых фрез, 10 ³ мин ⁻¹	1÷2,5
Частота вращения иглофрезерных рабочих органов, 10 ³ мин ⁻¹	2,5÷3
Суммарная установочная мощность привода, кВт	6÷6,5
Производительность, кг/ч	90÷120
Масса, кг	190

Проведённые испытания РЦА КД позволили установить, что повышение эффективности использования оборудования в производственных условиях достигается при соблюдении следующих условий:

- постадийного измельчения полимерных отходов разработанными рабочими органами различной конфигурации с развитой рабочей поверхностью – шипованными валками, дисковыми фрезами, иглофрезерными рабочими органами;
- обеспечении наибольшей степени измельчения полимерных отходов: на стадии предварительной деформации до размеров – $b \times h = (20 \times 30) \cdot 10^{-3}$ м, на стадии грубого измельчения (первая камера) до размеров частиц – $d_{ч1} \leq 10^{-2}$ м; на стадии тонкого измельчения (вторая камера) – $d_{ч2} \leq (2 \div 4) \cdot 10^{-3}$ м;
- снижения удельных энергозатрат при комбинированном воздействии на перерабатываемый материал до значений $q = 0,05 \div 0,072$ кВт·ч/кг;

при получении флекса в первой камере измельчения удельные энергозатраты – $q_I = 0,015 \div 0,02$ кВт·ч/кг.

– высокой эксплуатационной надёжности агрегата: коэффициент эксплуатационной надёжности – $K_{ЭН} = 0,9 \div 0,95$.

Использование разработанного РЦА КД позволяет получать из измельчённых ТПМ различные виды товарной продукции: термоэкструдированный гранулят: $d \times l = (2,5 \div 5) \times (5 \div 15) \cdot 10^{-3}$ м; насыпная плотность гранул – $\rho_{гр} = 920 \div 950$ кг/м³; механическая прочность при сжатии – $\sigma_{сж} = 10 \div 25$ МПа; модуль упругости $E = 100 \div 400$ МПа; температура плавления – $T = 125 \div 130$ °С; изделия из него – трубы технического назначения: $D \times L = (25 \times 160) \cdot 10^{-3}$ м; толщина стенок – $h = (2 \div 12) \cdot 10^{-3}$ м; допустимое максимальное внутреннее давление – $0,6 \div 1$ МПа.

В период опытно-промышленных испытаний разработанный роторно-центробежный агрегат комбинированного действия подтвердил свою работоспособность и эксплуатационную надёжность (приложение 2).

Результаты опытно-промышленной апробации выполненных научно-технических разработок заложены в программу реализации ресурсоэнергосберегающей технологии комплексной переработки ТПМ и производства из них продукции различного технологического назначения на ООО «ТК «Экотранс».

Использование вышеуказанной технологии и технических средств обеспечивает следующие технико-экономические показатели:

– сокращение удельного расхода энергии при измельчении полимерных отходов на 15-20 % – до $q_I = 0,015 \div 0,02$ кВт·ч/кг;

– увеличение эксплуатационной надёжности технологического оборудования до 90-95%;

– обеспечение эффективного измельчения полимерных отходов с различными физико-механическими характеристиками, геометрической формой и

размерами в РЦА КД за счёт реализации комбинированного воздействия на перерабатываемое материалы;

– увеличение степени измельчения полимерных отходов до $i = 10 \div 50$;

В условиях производства апробирована разработанная технология комплексной переработки полимерных отходов и получены опытные образцы продукции, произведённые из измельчённых в РЦА КД ТПМ. Товарной продукцией из ТПМ являлись: термоэкструдированный гранулят, полимерный профиль различной конфигураций, в т.ч. трубы технического назначения.

5.2 Технологическая линия переработки техногенных полимерных материалов и производства гранулята

На ООО «ТК «Экотранс» организован сбор, сортировка, переработка и утилизация ТПМ. Полимерсодержащие материалы после классификации подаются в гидравлический пресс (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Гидравлический пресс для прессования отходов

В рамках реализации результатов выполненных научно-технических разработок для условий реального производства ООО «ТК «Экотранс» РЦА КД может быть использован в следующих технологических линиях:

- технологический комплекс для переработки полимерных отходов и получения гранулированных полимерсодержащих материалов с дальнейшим изготовлением из них различных видов товарной продукции;
- технологический модуль для производства труб технического назначения и полимерного профиля различной конфигурации;
- технологическая линия для получения полиэтиленовых упаковочных материалов и др.

Технологический комплекс предназначен для получения гранул из вторичного полиэтилена (высокого и низкого давления – ПЭВД, ПЭНД), полипропилена (ПП) с различными типами загрязнений (химикаты, красители, пищевые отходы и др.).

Технологическая линия состоит из следующего оборудования:

- измельчитель пластмасс – разработанный РЦА КД (мощность привода – $P_{РЦА} = 6$ кВт);
- ванна флотации (мощность двигателя лопастей – $P_{дв.л.} = 1,5$ кВт, двигателя шнека – $P_{дв.ш.} = 5,5$ кВт);
- моечно-сушильный комплекс (мощности приводных электродвигателей: смесителя – $P_{дв.с.} = 3$ кВт, блока мойки (суммарно) – $P_{дв.м.} = 35$ кВт, центрифуги – $P_{дв.ц.} = 22$ кВт, вентилятора выгрузки – $P_{дв.в.} = 11$ кВт);
- бункер-дозатор (мощность приводного двигателя – $P_{дв.б.} = 15$ кВт, мотор-редуктора ворошителя – $P_{дв.в.} = 1,1$ кВт);
- экструдер шнековый SLE-1-150 (мощность двигателя – $P_{дв.эк.} = 110$ кВт, электронагревателей – $P_{н.} = 65$ кВт);
- устройство торцевой резки (мощность двигателя резки – $P_{дв.р.} = 1,5$ кВт, двигателя центрифуги – $P_{дв.ц.} = 5,5$ кВт);
- блок досушки (мощность двигателей блока досушки, суммарно – $P_{дв.с.} = 11$ кВт; вентилятора выгрузки – $P_{дв.в.} = 5,5$ кВт);
- пневмофасовка;
- пульт управления.

Основные модули технологической линии представлены на рисунках 5.2-5.5.

Конечным продуктом технологической линии являлись экструдированные полимерные гранулы (рис. 5.6) [169, 170], произведённые из измельчённых в РЦА КД термопластичных полимерных отходов. Физико-механические характеристики полученного гранулята: размеры гранул – $d = 2,5 \div 5$ мм; $l = 5 \div 15$ мм; насыпная плотность гранул – $\rho_{гр} = 920 \div 950$ кг/м³; механическая прочность при сжатии – $\sigma_{сж} = 10 \div 25$ МПа; модуль упругости $E = 100 \div 400$ МПа; температура плавления – $T = 125 \div 130$ °С.



Рисунок 5.2 – Роторно-центробежный агрегат комбинированного действия



Рисунок 5.3 – Флотационная ванна для мойки полимерных отходов



Рисунок 5.4 – Экструдер шнековый SLE-1-150



Рисунок 5.5 – Модуль сушки и фасовки гранулированных полимерных материалов



Рисунок 5.6 – Произведённый экструдированный гранулят

Шнековый экструдер SLE 1-90 (рис. 5.7) является одним из ключевых элементов представленного технологического комплекса. Экструдер предназначен для получения однородного расплава из измельченного, агломерированного или капсулированного полимерного сырья. Экструдер оснащен навесным дозатором для равномерной подачи сырья.

Экструдер оснащен двумя зонами атмосферной дегазации для удаления из полимерного расплава паров, продуктов горения красок, органических включений и др., что способствует улучшению качества сырья на выходе.

Плунжерный фильтр расплава с большой площадью фильтрации позволяет с высокой производительностью очищать расплав от загрязнений. Возможность установки безостановочных фильтров позволяет уменьшить затраты времени на техническое обслуживание экструдера и повысить производительность линии в целом.

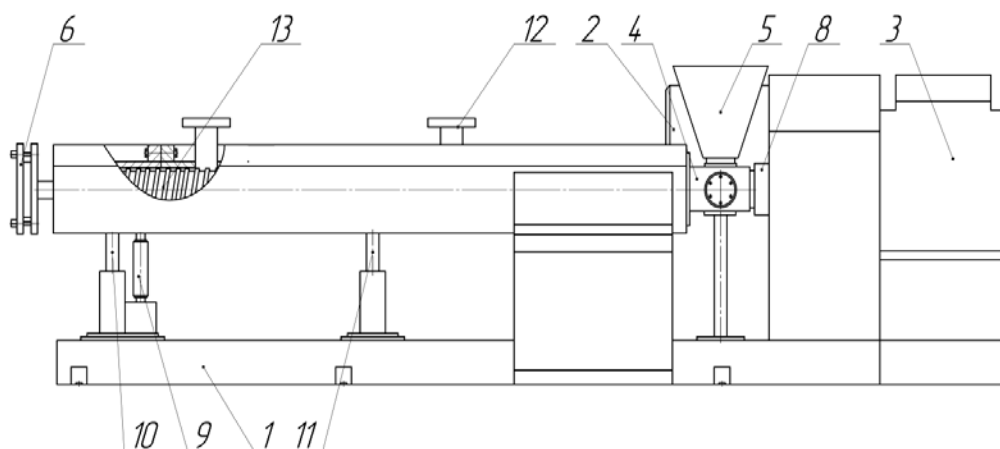


Рисунок 5.7 – Экструдер SLE 1-90: 1 – рама; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор; 4 – цилиндр; 5 – бункер загрузки; 6 – гидрошибер; 7 – пульт управления; 8 – подшипниковые узлы; 9 – гидростанция; 10 – стойка передняя; 11 – стойка центральная; 12 – шахта дегазации; 13 – шнек

Технические характеристики экструдера: диаметр шнека – 90 мм, мощность двигателя – 75 кВт, производительность – 250 кг/ч, масса – 3000 кг, длина – 4970 мм, ширина – 1545 мм, высота – 1440 мм, кол-во зон нагрева – 9 шт., кол-во зон охлаждения – 4 шт., кол-во шахт дегазации – 2 шт.

5.3 Технологический модуль для производства труб технического назначения

Линия (рис. 5.8, табл. 5.1) предназначена для производства труб из гранулированного полиэтилена диаметром $D = 20 \div 160$ мм, применяемых при прокладке различных коммуникаций в строительной, электротехнической и других отраслях, в коммунальном, сельском хозяйстве, бытовом использовании (для электроизоляции, воды, газа, воздуха и др.).

Таблица 5.1 – Технические характеристики линии и оборудования для производства труб

Наименование характеристики	Значение параметра
Производительность, кг/ч из ПЭНД из ПЭВД	45...170 45...170
Номенклатура выпускаемых труб: наружный диаметр, мм длина труб, м, не более суммарная длина труб в бухтах, м, не более	20...160 12 500
Общая установленная мощность, кВт, в т.ч.: электродвигателей электронагревателей	115,6 87,75 11
Электроснабжение – сеть трёхфазного тока напряжение, В частота, Гц	380/220 50
Объёмный расход воды, при $t = 20$ °С, м ³ /час, не более	1,5
Объёмный расход сжатого воздуха, при $t = 20$ °С, м ³ /час	0,5
Габаритные размеры, мм: длина ширина высота	32000 2400 2000
Масса, кг, не более	6500

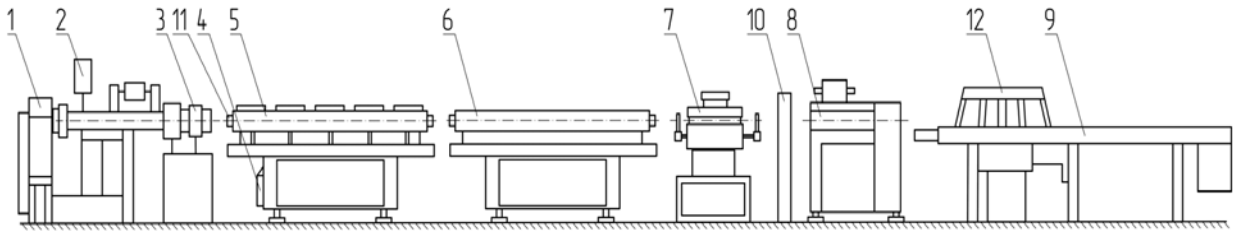


Рисунок 5.8 – Схема технологической линии для производства труб:

1 – червячный пресс; 2 – бункер; 3 – трубная головка; 4 – пульт управления; 5 – вакуум-водяная ванна охлаждения; 6 – водяная ванна охлаждения; 7 – двухтрактовая тянущая машина; 8 – машина для резки трубных изделий; 9 – приёмное оборудование; 10 – устройство для маркировки труб; 11 – калибр; 12 – привод намоточного устройства

Производимыми изделиями являются трубы технического назначения (рис. 5.9) со следующими характеристиками: $D \times L = (20 \times 160) \cdot 10^{-3}$ м; толщина стенок – $h = (2 \div 12) \cdot 10^{-3}$ м; максимальное внутреннее давление – $0,6 \div 1$ МПа.



Рисунок 5.9 – Трубы технического назначения

Основные модули технологической линии представлены на рисунках 5.10-5.13.

Использование РЦА КД в технологической линии позволило расширить номенклатуру перерабатываемых полимерсодержащих отходов.



Рисунок 5.10 – Модуль экструдирования



Рисунок 5.11 – Модуль охлаждения



Рисунок 5.12 – Модуль протяжки



Рисунок 5.13 – Модуль намотки и складирования

5.4 Инженерная методика проектирования роторно-центробежного агрегата комбинированного действия

На основании теоретических и экспериментальных исследований измельчения ТПМ, результатов опытно-промышленных испытаний экспериментальной установки РЦА КД, а также с использованием современных средств и методов [171-173] разработана инженерная методика проектирования измельчительного оборудования. Данная методика включает расчёт основных

конструктивно-технологических и энергосиловых параметров РЦА КД по полученным аналитическим выражениям.

Разработанный РЦА КД предназначен для измельчения ТПМ с различными физико-механическими характеристиками. Данный агрегат может работать как в комбинированном режиме, так и при автономном использовании его блоков.

При проектировании РЦА КД необходимо учитывать: виды и типы ТПМ, их геометрические и физико-механические характеристики, требуемую производительность, вид и фракционный состав получаемого измельчённого материала и др.

Алгоритм конструктивно-технологического проектирования РЦА КД представлен в виде блок-схемы на рисунке 5.14.

1. На первом этапе определяются исходные физико-механические характеристики перерабатываемых ТПМ: тип пластика, форма, размер, $D_{исх}$, м; плотность, ρ_0 , кг/м³; коэффициент трения ТПМ о металл, $f_{тр}$; предел прочности на сжатие, $\sigma_{сж}$, Па; модуль Юнга, E , Па; коэффициент Пуассона, μ ; коэффициент динамической вязкости, $\mu_{ТПМ}$, Па, и др.

2. Определяется требуемый фракционный состав измельчённых в РЦА КД ТМП; степень измельчения; производительность, $Q_{треб}$, кг/ч.

3. Выполняется расчёт производительности РЦА КД по формулам (2.6), (2.72-2.73), с учётом неравенства (2.71) и заданных конструктивно-технологических параметров измельчителя.

4. Полученное значение производительности РЦА КД сравнивается с требуемым – $Q_{РЦА} \geq Q_{треб}$. Если условие не соблюдается, то варьируются значения конструктивно-технологических параметров РЦА КД (n_b , n_ϕ , $B_{у.ф.}$, δ , $L_{фут}$, $n_{иг.ф.}$, k_z и др.).

5. Рассчитывается потребляемая мощность привода РЦА КД по формулам (2.13), (2.63), (2.70), (2.74) и удельные энергозатраты по формуле (2.75).

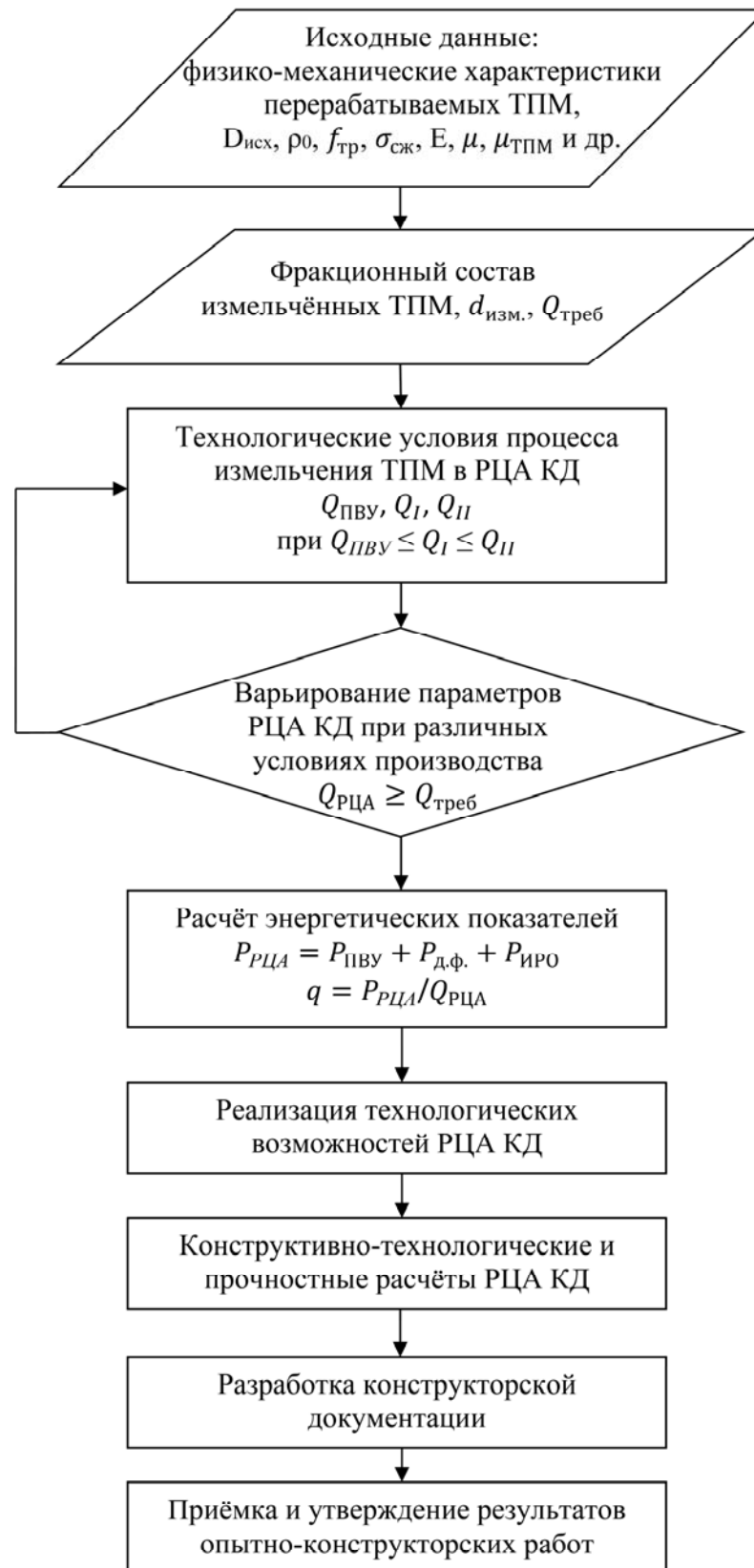


Рисунок 5.14 – Алгоритм конструктивно-технологического проектирования РЦА КД

6. Определяется компоновка конструктивно-технологических блоков РЦА КД и устанавливаются режимы его работы для реализации технологических

возможностей: предварительной деформации и уплотнения ТПМ в ПВУ, измельчения сырья до мелкокускового ($d_{ч1} \leq 10^{-2}$ м) или до порошкообразного состояния ($d_{ч2} \leq (2 \div 4) \cdot 10^{-3}$ м).

7. Выполняются конструктивно-технологические и прочностные расчёты [174]: проверка рабочих органов на изгиб и кручение, выбор подшипников, расчёт клиноременной передачи, проверка корпуса на жёсткость и прочность и др. Производится расчёт приёмного бункера РЦА КД и системы выгрузки [175]: определение объёма бункера, угла наклона его стенок, размеров входного и выходного отверстий и др.

8. Разрабатывается конструкторская документация: чертежи узлов и деталей, спецификация комплектующих, технологические карты сборки и технического обслуживания и др. При этом, осуществляется корректировка параметров: учёт износа рабочих органов, внесение поправок по результатам физического моделирования и экспериментальных исследований процессов постадийного измельчения ТПМ, вводятся условия эксплуатации агрегата на производстве.

9. Осуществляются приёмка и утверждение результатов опытно-конструкторских работ [176].

При реализации вышеуказанного алгоритма конструктивно-технологического проектирования РЦА КД рекомендуется использовать результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученных при создании патентозащищённого агрегата и технологического модуля, а также системы автоматизированного проектирования [173].

5.5. Технико-экономическая эффективность производства гранулята из техногенных полимерных материалов, измельчённых в роторно-центробежном агрегате

Эффективность применения РЦА КД для постадийного измельчения ТПМ с различными физико-механическими характеристиками подтверждена

результатами проведенных нами экспериментальных исследований и опытно-промышленной апробации в условиях реального производства ООО «ТК «Экотранс». Также подтверждена работоспособность и эксплуатационную надежность разработанного оборудования. Измельченный полимерный флекс целесообразно использовать для получения термоэкструдированного гранулята, из которого производятся различные полимерсодержащие изделия: трубы технического назначения, профиль различной конфигурации, полимерные нити и др.

Представленный нами расчёт экономической эффективности (приложение 3) составлен с использованием результатов опытно-промышленных испытаний РЦА КД, а также существующих нормативных технико-экономических показателей [177].

Для расчёта экономической эффективности реализации выполненных НИОКР определим следующие показатели.

Годовая производительность технологической линии $Q_{\text{год}}$ с учётом работы оборудования в две смены

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{час}} \cdot T_{\text{ном}} \cdot K_{\text{экт. исп.}} \quad (5.1)$$

где $Q_{\text{час}}$ – часовая производительность технологической линии по исходному сырью (ТПМ) – 90 кг/ч; $T_{\text{ном}}$ – номинальный фонд рабочего времени, час; $K_{\text{экт. исп.}}$ – коэффициент экстенсивного использования РЦА КД, $K_{\text{экт. исп.}} = 0,87$.

Количество выходных и праздничных дней при пятидневной рабочей неделе, согласно производственному календарю, составляет 118 дней.

$$T_{\text{ном}} = (T_{\text{кал}} - T_{\text{вых., праздн.}}) \cdot T_{\text{см. час}} = (365 - 118) \cdot 8 \cdot 2 = 3952 \text{ час.} \quad (5.2)$$

$$Q_{\text{ТПМ}} = 90 \cdot 3952 \cdot 0,87 = 309 \text{ т/год.}$$

В таблице 5.2 представлены исходные данные для проведения расчета.

С учётом технологических потерь (на стадиях сепарации, мойки, сушки, экструдирования и др.) из 1 тонны полимерного флекса производится 970 кг гранулята (таблица 5.3), следовательно годовая производительность по грануляту составит $Q_{\text{гр}} = 309 \cdot 0,97 = 300 \text{ т/год.}$

Необходимые инвестиции в оборотный капитал рассчитываются по формуле:

$$\text{ПР}_{\text{об.кап.}} = \frac{\text{Потр}_{\text{об.ср.}}}{K_{\text{об}}}, \quad (5.3)$$

где $\text{ПР}_{\text{об.кап.}}$ – прирост оборотного капитала, тыс. руб.; $\text{Потр}_{\text{об.ср.}}$ – потребность в оборотных средствах, тыс. руб.; $K_{\text{об}}$ – коэффициент оборачиваемости производственных запасов, $K_{\text{об}} = 9,17$.

$$\text{ПР}_{\text{об.кап.}} = \frac{(30900+2100+750+2025) \cdot 300}{9,17} = 1\,170,0 \text{ тыс. руб.}$$

Таблица 5.2 – Исходные данные для проведения расчета технико-экономической эффективности

Наименование	Ед. изм.	Значение
Производительность роторно-центробежного агрегата комбинированного действия при измельчении ТПМ	кг/ч	90-120
Производство гранулята из 1 тонны флекса	кг	900-970
Затраты на сырьё и предварительную переработку 1 т ТПМ	Руб.	30 900
Стоимость изготовления РЦА КД для измельчения	Руб.	550 000,00
Стоимость линии для производства гранулята из ТПМ (за исключением измельчительного оборудования)	Руб.	3 250 000,00
Затраты на подготовительные работы	Руб.	370 000,00
Инвестиции в оборотный капитал	Руб.	1 170 000,00
Общие инвестиционные затраты	Руб.	5 340 000,00
Количество обслуживающего персонала при работе в две смены	Чел.	4
Заработная плата одного сотрудника в месяц	Руб.	35 220,00

Состав общих затрат на производство 1 тонны полимерного гранулята представлен в таблице 5.3.

По данным анализа рынка полимерных материалов стоимость вторичных полимерных гранул полиэтилена составляет 80-110 тыс. руб. за тонну [178]. Стоимость производимого на ООО «ТК «Экотранс» гранулята из ТПМ, измельчённых в РЦА КД, с учетом конкурентноспособной рыночной цены принята в расчетах 60 тыс. руб. за тонну.

Таблица 5.3 – Текущие затраты на производство 1 т продукции

Составляющие себестоимости 1 тонны полимерного гранулята	Норма расхода на 1т	Затраты на 1 т, руб.
Затраты на сырье, кг	1 030	30 900,0
Электроэнергия, кВт•ч	350	2 100,0
Упаковка (Биг-Бэг), шт.	1	750,0
Затраты воду и реагенты для мойки ТПМ, м ³	3	2 025,0
Затраты на оплату труда		5 635,0
Отчисления на социальные нужды (30%)		1 691,0
Амортизация оборудования		1 267,0
Прочие расходы		5 000,0
Итого себестоимость производства		49 368,0

В таблице 5.4, представлен план производства и продаж гранулята из вторичных ТПМ для производства изделий различного назначения.

Таблица 5.4 – План производства и продаж гранулята из вторичных ТПМ

Показатель	1	2	3	4
Объем производства, т	300	300	300	300
Цена 1 тонны, тыс. руб.	60,00	60,00	60,00	60,00
Объем продаж, тыс. руб.	18 000,00	18 000,00	18 000,00	18 000,00

Амортизация основных средств на предприятии начисляется линейным способом при норме 10%. Исходя из общей стоимости оборудования 3 800,00 тыс. руб., сумма амортизационных отчислений составит 380,00 тыс. руб. в год.

Оценка эффективности инвестиций в реализацию проекта проводится с использованием следующих показателей: чистого дисконтированного дохода (NPV), внутренней нормы доходности (IRR); индекса рентабельности (PI); периода окупаемости вложенных средств (PP).

Для получения численных значений, указанных выше показателей, составлен план денежных потоков (таблица 5.5) по соответствующим видам деятельности, а именно: инвестиционной, операционной, финансовой. Также, принимая во внимание ключевую ставку ЦБ РФ, определена ставка дисконтирования, для дальнейшего расчета коэффициента дисконтирования.

Ставка дисконтирования – расчетная величина, которая позволяет оценить доходность будущих инвестиций. По оценочным расчетам, учитывая, что

ключевая ставка ЦБ РФ на 24.05.2026 – 14,5%, с учетом возможных рисков, примем ставку дисконтирования равной 21%. Источник финансирования – собственные средства организации – чистая прибыль и амортизационные отчисления.

Таблица 5.5 – План денежных потоков

Показатель, тыс. руб.	0	1	2	3	4
Инвестиционная деятельность					
Стоимость оборудования	-3 800,00				
Оборотный капитал	-1 170,00				
Подготовительные работы	- 370,00				
Итого:	-5 340,00				
Операционная деятельность					
Доход		18 000,00	18 000,00	18 000,00	18 000,00
Себестоимость продукции		14 810,4	14 810,4	14 810,4	14 810,4
В т.ч. амортизационные отчисления		380,00	380,00	380,00	380,00
Прибыль до налогов		3 189,6	3 189,6	3 189,6	3 189,6
Налог на прибыль, 25%		- 797,4	- 797,4	- 797,4	- 797,4
Чистая прибыль		2 392,2	2 392,2	2 392,2	2 392,2
Чистый доход от операционной деятельности		2 772,2	2 772,2	2 772,2	2 772,2
Финансовая деятельность					
Собственные средства	5 340,00				
Всего средств	5 340,00				
Сальдо	0	2 772,2	2 772,2	2 772,2	2 772,2
Денежный поток	-5 340,00	2 772,2	2 772,2	2 772,2	2 772,2
Коэффициент дисконта (при 21%)	1,0000	0,8264	0,6830	0,5645	0,4665
Чистый дисконтированный доход	-5 340,00	2 290,95	1 893,41	1564,91	1293,23
Чистый дисконтированный доход нарастающим итогом	-5 340,00	-3 049,05	-1 155,64	409,27	1 702,5

Коэффициент дисконтирования рассчитывается по формуле:

$$K_d = \frac{1}{(1 + r)^n}. \quad (5.4)$$

Проведем расчет числовых значений показателей для оценки эффективности проекта.

Чистый дисконтированный доход (NPV) – характеризует результат инвестирования. Представляет собой разницу между дисконтированными

денежными поступлениями от проекта и дисконтированными вложениями в проект.

$$NPV = \sum_{i=1}^t \frac{CF_i}{(1+r)^i} - S, \quad (5.5)$$

где NPV – чистый дисконтированный доход; t – период реализации проекта; CF_i – денежный поток i-го периода; r – ставка дисконтирования (21%); S – сумма первоначальных вложений.

При $NPV > 0$, проект рекомендуется принять к реализации. В нашем случае: $NPV = 1\,702,5$ тыс. руб., следовательно, проект можно принять к осуществлению, так как он является экономически эффективным.

Индекс рентабельности (PI) – отношение приведенных денежных потоков от инвестиционных вложений к их сумме. Значение данного индекса позволяет сравнить начальные инвестиции с будущими приведенными денежными потоками.

$$PI = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} \div I. \quad (5.6)$$

$$PI = (2\,290,95 + 1\,893,41 + 1\,564,91 + 1\,293,23) / 5\,340,00 = 1,32.$$

Внутренняя норма рентабельности (IRR) – ставка дисконтирования, при которой сумма поступлений и отчислений дают нулевой интегральный экономический эффект (таблица 5.6).

Таблица 5.6– Результаты расчета внутренней нормы доходности

Годы осуществления проекта	2026	2027	2028	2029	2030	NPV	IRR
Чистый денежный поток	-5 340,00	2 772,2	2 772,2	2 772,2	2 772,2		
Ставка дисконта r_i							
0%	-5 340,00	2 772,2	2 772,2	2 772,2	2 772,2	5 748,8	
21%	-5 340,00	2 290,95	1 893,41	1 564,91	1 293,23	1 702,5	
23%	-5 340,00	2 253,8	1 832,42	1 489,78	1 211,17	1 447,17	34,34%

$$IRR = r_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \times (r_2 - r_1), \quad (5.7)$$

где r_1 и r_2 – соответственно нижняя и верхняя ставки дисконтирования.

$$IRR = 21 + \frac{1\,702,5}{1\,702,5 - 1\,447,17} \times (23 - 21) = 34,34\%. \quad (5.8)$$

Полученное значение внутренней нормы доходности выше принятой нами ставки дисконтирования (21%). По рассчитанным показателям проект можно считать эффективным.

Период окупаемости проекта (PP, DPP).

Рассчитаем простой (PP) и дисконтированный (DPP) срок окупаемости дополнительных капиталовложений в инвестиционный проект.

$$PP = I_0 / P_t, \quad (5.9)$$

где I_0 – сумма инвестиций; P_t – чистые денежные поступления за год, $P_t = 2\,772,2$ тыс. руб.

$$PP = 5\,340,00 / 2\,772,2 = 2 \text{ года.}$$

Простой срок окупаемости проекта – 2 года.

$$P_{dt} = 7\,042,5 / 4 = 1\,760,63,$$

$$DPP = 5\,340,00 / 1\,760,63 = 3 \text{ года.}$$

Дисконтированный срок окупаемости проекта – 3 года.

Таким образом, по рассчитанным показателям проект можно считать экономически эффективным.

5.6 Выводы

1. В условиях реального производства ООО «ТК «Экотранс» осуществлена опытно-промышленная апробация разработанного роторно-центробежного агрегата ($Q_{РЦА} = 90 \div 120$ кг/час, $P_{ном} = 6 \div 6,5$ кВт). Агрегат является основополагающим для измельчения ТПМ в технологическом комплексе при переработке полимерных отходов с последующим производством из них экструдированного гранулята и другой товарной продукции. Использование

РЦА КД в технологической линии позволило реализовать его технологические возможности при измельчении ТПМ с различными физико-механическими характеристиками.

2. По результатам опытно-промышленной апробации РЦА КД установлены его рациональные конструктивные параметры, технологические режимы работы и условия переработки ТПМ.

3. Для пресс-валкового уплотнителя рекомендованы следующие значения параметров: соотношение диаметра шипованных валков и размера уплотняемых материалов – $\frac{D}{d_{cp}} = 2 \div 6$; частота вращения шипованных валков – $n_{\phi} = 20 \div 30$ об/мин; межвалковый зазор – $b = 12 \cdot 10^{-3}$ м; высота шипов – $h_{ш} = 10 \cdot 10^{-3}$ м.

4. Подтверждены рациональные диапазоны значений варьируемых параметров камеры измельчения с дисковыми фрезами: частота вращения дисковых фрез – $n_{\phi} = 2000 \div 2500$ об/мин, шаг установки дисковых фрез – $B_{y.\phi} = (11 \div 15) \cdot 10^{-3}$ м, минимальный зазор между ротором и бандажом – $\delta = (9 \div 17) \cdot 10^{-3}$ м, протяжённость зоны футеровки – $L_{фут} = (120 \div 150) \cdot 10^{-3}$ м. Рекомендуемый размер частиц измельченного в первой камере материала – $d_I \leq 10 \cdot 10^{-3}$ м.

5. Для камеры измельчения РЦА с иглофрезерными рабочими органами рекомендованы значения параметров: размер частиц измельченного материала – $d_{II} \leq (2 \div 3) \cdot 10^{-3}$ м; частота вращения иглофрезерных рабочих органов – $n_{иг.ф} \geq 2500$ об/мин. Установлена необходимость размещения в выгрузочном патрубке измельчителя магнитного уловителя, организации внешнего рециклинга материала, использования иглофрез из витой проволоки.

6. Разработана технология комплексной переработки ТПМ с использованием РЦА КД для получения различных видов продукции: полимерного флекса и порошкообразных материалов из вторичного сырья, гранулята с дальнейшим производством труб технического назначения, полимерных профилей различных конфигураций и др.

7. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований создана инженерная методика проектирования РЦА КД для реализации выполненных научно-технических разработок.

8. Определена технико-экономическая эффективность использования РЦА КД для переработки ТПМ и производства из них экструдированной продукции. Экономический эффект составляет 1 700 тыс. рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа современного уровня развития техники и технологий переработки ТПМ установлены существующие проблемные задачи измельчения полимерных отходов и направления конструктивно-технологического совершенствования измельчительного оборудования, определены цель и задачи научных исследований.

2. На основании изученных особенностей кинетики процесса измельчения ТПМ, с использованием методов физического моделирования и теории подобия разработаны основополагающие принципы конструктивно-технологического исполнения агрегата.

3. Разработана патентозащищённая конструкция РЦА КД (патенты РФ 2724667, 2755436, 213199, 2834371) для измельчения ТПМ с различными физико-механическими характеристиками. На основании разработанной конструкции созданы стендовые установки и проведены экспериментальные исследования процессов постадийного измельчения ТПМ.

4. Получены аналитические выражения, описывающие кинетику процесса деформационно-силового воздействия на ТПМ в технологических зонах камеры измельчения с дисковыми фрезами.

5. Получены уравнения для расчёта кинетических параметров процессов уплотнения и измельчения ТПМ в ПВУ и рабочих камерах агрегата при различных режимах его работы.

6. Разработана методика расчёта основных конструктивно-технологических и энергосиловых параметров роторно-центробежного агрегата.

7. С использованием математического планирования эксперимента исследованы полученные регрессионные зависимости $P_{ном}, Q_{пр} = f(n_{ф}, B_{у.ф.}, \delta, L_{фут})$ и определены рациональные значения конструктивно-технологических параметров РЦА КД: частота вращения фрез – $n_{ф} = 2000 \div 2500$ об/мин, шаг установки дисковых фрез – $B_{у.ф.} = (11 \div 15) \cdot 10^{-3}$ м, минимальный зазор между

ротором и бандажом – $\delta = (9 \div 17) \cdot 10^{-3}$ м, протяжённость зоны футеровки бандажа – $L_{фут} = (120 \div 150) \cdot 10^{-3}$ м.

8. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана и изготовлена опытно-промышленная установка РЦА КД ($Q_{РЦА} = 90 \div 120$ кг/час, $P_{nom} = 6 \div 6,5$ кВт).

9. В условиях реального производства ООО «ТК «Экотранс» осуществлена опытно-промышленная апробация РЦА КД. Использование разработанного агрегата в технологической линии позволило расширить номенклатуру перерабатываемых полимерсодержащих отходов.

10. Определена технико-экономическая эффективность использования РЦА КД для переработки ТПМ и производства из них экструдированной продукции. Экономический эффект составляет 1 700 тыс. рублей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветрова, М. А. Стратегия развития отрасли утилизации ПЭТ-упаковки в условиях цифровой трансформации / М. А. Ветрова, И. Э. Яруллина, А. А. Богданова // Креативная экономика. – 2022. – Т. 16, № 7. – С. 2769-2794. – DOI 10.18334/ce.16.7.114884.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 16 мая 2026 г. № 567 «О единых требованиях к объектам обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твёрдых коммунальных отходов, перегрузочным станциям» [Электронный ресурс] // ГАРАНТ: информационно-правовой портал. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/414123017/> (дата обращения: 01.06.2026).
3. Согомонян, Л. А. Циркулярная экономика: синергия логистики возвратных потоков и управления отходами в России и за рубежом / Л. А. Согомонян, У. Ю. Удоденко // Проблемы и перспективы устойчивого развития промышленности в XXI веке: от теории к практике. – Санкт-Петербург, 2025. – С. 232-235.
4. Будюгина, Д. Р. Экологические проблемы на промышленных предприятиях в постиндустриальном обществе / Д. Р. Будюгина, В. В. Мязина // Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли. – Владивосток, 2026. – С. 490-493.
5. Дударева, О. В. Управление устойчивым развитием промышленных экосистем в условиях технологических трансформаций / О. В. Дударева. – Курск, 2023. – 401 с. – ISBN 978-5-907710-99-3.
6. Ахметшина, Л. Г. Организационно-экономические аспекты комплексного решения проблем переработки промышленных и твердых коммунальных отходов / Л. Г. Ахметшина, А. С. Мазанкин // Вестник евразийской науки. – 2025. – Т. 17, № 2. – 12 с.
7. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года

и на перспективу до 2036 года» [Электронный ресурс] // Гарант: информационно-правовой портал. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/408892634/> (дата обращения: 01.06.2026).

8. Росприроднадзор: офиц. сайт. – URL: <https://rpn.gov.ru> (дата обращения: 01.06.2026).

9. Белгородский опыт: принципы эффективности обращения с отходами [Электронный ресурс] // РБК Черноземье. – URL: <https://chr.plus.rbc.ru/news/62833f6d7a8aa9a69ec02853> (дата обращения: 01.06.2026).

10. Семкина, О. С. Проблема утилизации твердых коммунальных отходов / О. С. Семкина, Д. К. Овсянникова // Муниципальная академия. – 2016. – № 3. – С. 79-85.

11. Сконечный, М. С. Сравнительный анализ технологий утилизации и обезвреживания ТКО с позиции решения текущих проблем отрасли обращения с отходами / М. С. Сконечный // Энергетический вестник. – 2019. – № 25. – С. 54-62.

12. Пипия, Л. К. Переработка пластмасс: оценка рынка и перспективы / Л. К. Пипия, А. Г. Елкин // Наука за рубежом. – 2018. – № 75. – 33 с.

13. Петов, Н. А. Полимерные отходы: оценка образования и пути переработки / Н. А. Петов // Твердые бытовые отходы. – 2008. – № 7(25). – С. 44-47.

14. Ткач, Т. С. Вторичная переработка отходов из полипропилена / Т. С. Ткач, Р. А. Чесноков // Новые технологии в науке, образовании, – Рязань, 2014. – С. 477-484.

15. Науменко, А. С. Технологии переработки полимерных отходов / А. С. Науменко // Твердые бытовые отходы. – 2009. – № 7(37). – С. 24-29.

16. Лескова, С. А. Вторичная переработка полипропилена / С. А. Лескова // Инновации. Наука. Образование. – 2022. – № 63. – С. 26-34.

17. Чиляева, М. Р. Современные технологии утилизации отходов / М. Р. Чиляева, Ю. А. Аверьянова // Экологическая безопасность в техносферном пространстве. – Екатеринбург, 2020. – С. 201-204.

18. Кузнецова, Т. С. Анализ методов утилизации отходов / Т. С. Кузнецова // Вестник науки. – 2023. – Т. 2, № 5(62). – С. 515-520.

19. Громов, Н. А. Современные технологии утилизации промышленных и бытовых отходов / Н. А. Громов, Е. А. Беловодский // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования. – Белгород, 2020. – С. 122-125.

20. Глаголев, С. Н. Технологические комплексы и оборудование для переработки техногенных материалов / С. Н. Глаголев, В. С. Севостьянов, С. В. Свергузова [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 10. – С. 198-200.

21. Шешуков, О. Ю. Разработка технологии и оборудования для комплексной переработки техногенных отходов / О. Ю. Шешуков, О. В. Матюхин, М. А. Михеенков, Н. К. Озорнин // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. – Екатеринбург, 2023. – С. 110-114.

22. Быстров, Г. А. Обезвреживание и утилизация отходов в производстве пластмасс / Г.А. Быстров, В.М. Гальперин, Б.П. Титов. – Л.: Химия, 1982. – С. 178–214.

23. Белобородова, Т. Г. Актуальные направления переработки вторичных полимерных материалов в изделия / Т. Г. Белобородова // Проблемы и перспективы развития науки и образования в XXI веке. – София, 2017. – С. 87-94.

24. Мухаметзянов, Т. Н. Вторичная переработка полиэтилентерефталата / Т. Н. Мухаметзянов // Аллея науки. – 2022. – Т. 1, № 12(75). – С. 110-113.

25. Шаурина, О. С. Вторичная переработка полиэтилена / О. С. Шаурина // Реализация целей устойчивого развития ООН в сфере экологии на примере Калужской области. – Калуга, 2020. – С. 284-292.

26. Шипицин, Ю. С. Разработка технологии вторичной переработки отходов полистирола / Ю. С. Шипицин, Д. В. Галкина, К. В. Сайдакова, А. И. Щелоков // Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды – Чебоксары, 2020. – С. 117-118.

27. Орлецкая, Л. В. Ценные вторичные ресурсы / Л. В. Орлецкая // Специализированный информационно-аналитический журнал «Рециклинг отходов». – 2006. № 6. – С. 3-4.

28. Тимофеев, А. А. Физико-механические и технологические характеристики композиционных материалов на основе смесей вторичных термопластов / А. А. Тимофеев, В. В. Тимошенко, Е. А. Шутова, В. М. Шаповалов // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 162-169. – DOI 10.29235/1561-8358-2020-65-2-162-169.

29. Адаменко, Н. А. Свойства полимерных материалов / Н. А. Адаменко, Г. В. Агафонова. – Волгоград, 2018. – 96 с. – ISBN 978-5-9948-2951-6.

30. Ухарцева, И. Ю. Полимерные упаковочные материалы для пищевой промышленности: классификация, функции и требования (обзор) / И. Ю. Ухарцева, Е. А. Цветкова, В. А. Гольдаде // Пластические массы. – 2019. – № 9-10. – С. 56-64. – DOI 10.35164/0554-2901-2019-9-10-56-64.

31. Рязанова, О. А. Классификация тары и полимерных упаковочных материалов / О. А. Рязанова // Молочная промышленность. – 2012. – № 1. – С. 10-12.

32. Волкова, А. В. Рынок утилизации отходов / А.В. Волкова // Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 2018. – 87 с.

33. Базунова, М. В. Способы утилизации отходов полимеров / М. В. Базунова, Ю. А. Прочухан // Вестник Башкирского университета. – 2008. – Т. 13, № 4. – С. 875-885.

34. Бракк, Д. Г. Обеспечение экологической безопасности в аспекте воздействия утилизации пластиковых отходов на здоровье населения и окружающую среду / Д. Г. Бракк // Экономическая безопасность. – 2022. – Т. 5, № 2. – С. 673-694. – DOI 10.18334/ecsec.5.2.114416.

35. Мехоношина, А. В. Анализ способов утилизации полимерных отходов / А. В. Мехоношина, Э. Х. Сакаева // Энерго- и ресурсосберегающие экологически

чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды. – Белгород, 2016. – С. 184-188.

36. Хрунов, В. А. Анализ существующих способов переработки отходов полимерных материалов / В. А. Хрунов // Информационная среда вуза. – 2017. – № 1(24). – С. 424-426.

37. Пшебельская, Л. Ю. Эффективные направления переработки пластиковых отходов / Л. Ю. Пшебельская, А. В. Ледницкий // Труды БГТУ. Серия 5: Экономика и управление. – 2021. – № 2(250). – С. 89-94. – DOI 10.52065/2520-6877-2021-250-2-89-94.

38. Лозовая, С. Ю. Характеристики термопластов и их применение в различных отраслях промышленности / С. Ю. Лозовая, О. В. Гуденко, Д. А. Косминский // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник статей. Выпуск XXIII. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 148-152.

39. Marquez, C. Catalytic routes towards polystyrene recycling / C. Marquez, C. Martin, N. Linares, D. De Vos // Materials Horizons. – 2023. – Vol. 10, № 5. – P. 1625–1640. — DOI: 10.1039/D2MH01215D.

40. Vincent, G. A. Process- and material-induced heterogeneities in recycled thermoplastic composites / G. A. Vincent, T. A. Bruijn, S. Wijskamp, M. van Drongelen, R. Akkerman // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2020. – Vol. 35, № 12. – P. 2530–2551. – DOI:10.1177/0892705720979347.

41. Муминова, О. А. Способы переработки полимерных отходов / О. А. Муминова, Л. А. Колесникова // Новые материалы и технологии для устойчивого развития. – Москва, 2024. – С. 138-140.

42. Тарасова, Т. Ф. Экологическое значение и решение проблемы переработки изношенных автошин / Т. Ф. Тарасова, Д. И. Чапалда // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – № 2-2(52). – С. 130-135.

43. Макеев, П. В. Переработка отходов полимерных материалов на валково-шнековом агрегате / П. В. Макеев, А. С. Клинков, И. В. Шашков, Д. Л. Полушкин

// Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2013. – № 1(104). – С. 119-123.

44. Арашкевич, Д. А. Вторичная переработка отходов пластмасс и специальные роторные дробилки / Д. А. Арашкевич // Пластические массы. – 2003. – № 3. – С. 5-13.

45. Иванова, О. А. Утилизация и переработка пластиковых бутылок / О. А. Иванова, Е. О. Реховская // Молодой ученый. – 2015. – №21. – С. 54-56.

46. Супрун, Л.В. Анализ и решение проблемы утилизации и вторичной переработки полиэтилентерефталат (ПЭТ) отходов / Л. В. Супрун, С. В. Романенко, Т. С. Цыганкова // Вестник науки Сибири, 2012. – № 4 (5). – С. 107-112.

47. Петрова, Г. Н. Современные способы переработки термопластов / Г. Н. Петрова, С. А. Ларионов, А. Е. Сорокин, Ю. А. Сапего // Труды ВИАМ. – 2017. – № 11(59). – С. 7. – DOI 10.18577/2307-6046-2017-0-11-7-7.

48. Литвинец, Ю. И. Технологическое оборудование для переработки пластмасс методом экструзии / Ю. И. Литвинец, В. Г. Бурындин, А. П. Пономарев. – Магнитогорск, 2015. – 89 с. – ISBN 978-5-9967-0671-6.

49. Колосова А. С. Современные методы получения полимерных композиционных материалов и изделий из них / А. С. Колосова, М. К. Сокольская, И. А. Виткалова [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 8. – С. 123-129.

50. Аракелян, А. Г. Вакуумное формование / А. Г. Аракелян // Научные исследования. – 2018. – № 6(26). – С. 28-29.

51. Афанасьева, А. С. Способы переработки термопластичных полимеров / А. С. Афанасьева, Е. С. Ваганова // Экология и циклическая экономика. – Ульяновск, 2022. – С. 47-49.

52. Баженов, С. Л. Пластическое деформирование пленок полиэтилентерефталата при прокатке / С. Л. Баженов, А. В. Ефимов, И. В. Сосновский [и др.] // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2015. – Т. 57, № 4. – С. 333. – DOI 10.7868/S230811201504001X.

53. Тужилин, С. П. Переработка полимерных материалов методом свободного литья в вакууме / С. П. Тужилин, Ю. А. Лопатина, А. С. Свиридов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 7. – С. 93-100. – DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-7-93-100.

54. Долинская, Р. М. Технология и оборудование синтеза и переработки полимеров / Р. М. Долинская. – Минск, 2020. – 118 с. – ISBN 978-985-530-821-9.

55. Ениколопов, Н. С. Полимерные композиционные материалы. Состояние и перспективы / Н. С. Ениколопов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2008. – № 12. – С. 7-10.

56. Глаголев, С. Н. Технологии комплексной переработки твердых коммунальных отходов / С. Н. Глаголев, Н. Т. Шеин, В. С. Севостьянов [и др.] // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24, № 12. – С. 11-15. – DOI 10.18412/1816-0395-2020-12-11-15.

57. Севостьянов, В. С. Термолиз в переработке полимерных отходов / В. С. Севостьянов, Р. Ю. Шамгулов // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования. – Белгород, 2019. – С. 125-130.

58. Шевкопляс, В. Н. Термическая переработка отходов пластика в смеси с бурым углем / В. Н. Шевкопляс // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 6(166). – С. 47-57. – DOI 10.26730/1999-4125-2024-6-47-57.

59. Захарян, Е. М. Пиролиз полиамидсодержащих материалов. Особенности процесса и состав продуктов реакции (обзор) / Е. М. Захарян, А. Л. Максимов // Журнал прикладной химии. – 2022. – Т. 95, № 7. – С. 811-844. – DOI 10.31857/S0044461822070015.

60. Костылева, Е. И. Переработка вторичных полимеров методом пиролиза / Е. И. Костылева, Н. И. Корзиенко, И. А. Щукина // Проблемы науки – Новомосковск, 2019. – С. 176-178.

61. Раувендааль, К. Экструзия полимеров: экструзионное оборудование, анализ процесса, практические прил. / К. Раувендааль; пер. с англ. яз. 4-го изд. под ред. А. Я. Малкина. – Санкт-Петербург, 2006. – 762 с. – ISBN 5-93913-102-6.

62. Гидиятуллина, И. И. Переработка полимерных отходов экструзией / И. И. Гидиятуллина // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых). – Казань, 2019. – С. 411-414.

63. Дядичев, В. В. Совершенствование экструзионного оборудования и технологии переработки вторичных комбинированных полимерных материалов и смесей / В. В. Дядичев, А. В. Колесников, А. В. Дядичев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 162-167. – DOI 10.25206/2310-9793-2018-6-1-162-167.

64. Антонова, И. О. Проблема компактирования отходов пенополистирола / И. О. Антонова, Н. Г. Гладышев // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2021. – Самара, 2021. – С. 9-12.

65. Азанова, А. А. Композиты на основе текстильно-полимерных отходов / А. А. Азанова, Р. Р. Мустафина, Е. Ю. Гаврилюк // Эффективность соотношение науки с производством в условиях ускоренной индустриализации Республики Таджикистан. – Душанбе, 2024. – С. 10-12.

66. Севостьянов, В. С. Технологические комплексы для переработки техногенных материалов / В. С. Севостьянов, Л. И. Шинкарев, В. А. Бабуков // Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2020. – 135 с.

67. Севостьянов, В. С. Технологические комплексы и оборудование для переработки и утилизации техногенных материалов / В. С. Севостьянов, В. И. Уральский, М. В. Севостьянов, О. А. Носов // Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – 321 с.

68. Сырых, Н. В. Способы и методы вторичной переработки пластика / Н. В. Сырых // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – С. 836-840.

69. Шаповалова, В. А. Об утилизации пластиковых отходов в России / В. А. Шаповалова, Е. И. Иващенко, И. А. Бгатова [и др.] // Наука и инновации в строительстве. – Белгород, 2017. – С. 325-331.

70. Евсеев, О. В. Переработка отходов полиэтилена в порошок в роторном диспергаторе / О. В. Евсеев, А. Г. Липин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53, № 9. – С. 128-129.

71. Савриев, Ш. М. Использование отходов производства для получения полимерных композиционных материалов / Ш. М. Савриев, А. Ю. Шомуродов // Наука и образование сегодня. – 2016. – № 4(5). – С. 23-24.

72. Балыбердин, В. Н. Диспергаторы для тонкого измельчения полимерных материалов, резин и их композитов / В. Н. Балыбердин, В. Г. Никольский, А. Э. Аринштейн // Техника машиностроения. – 1998. – Т. 18. – № 4. – С. 94-103.

73. Мухиддинов, Б. Ф. Установки для переработки отходов пластмасс и получение композиции на их основе / Б. Ф. Мухиддинов, А. Ф. Шодиев // Journal of Advances in Engineering Technology. – 2021. – № 2. – С. 40-46. – DOI 10.24412/2181-1431-2021-2-40-46.

74. Севостьянов, В. С. Обоснование подходов и проектирование новых конструкций измельчителей ударного действия / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, Л. А. Сиваченко [и др.] // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 253-260.

75. Бондалетова, Л. И. Полимерные композиционные материалы / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов. – Томск:Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 130 с.

76. Кравченко, В. М. Аналитический обзор для повышения эффективности измельчителей для переработки резинотехнических отходов / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, М. С. Рысиков // Машины, агрегаты и технологические процессы в строительной индустрии. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 56-59.

77. Гоголь, Э. В. Анализ существующих способов утилизации и переработки отходов полимеров / Э. В. Гоголь, И. Х. Мингазетдинов,

Г. И. Гумерова [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 10. – С. 163-168.

78. Сиваченко, Л. А. Комбинированный криоизмельчитель полимеров / Л. А. Сиваченко, М. Г. Богатырев, Д. В. Богданов // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород, 2014. – С. 265-271.

79. Людсков, Д. И. Методы переработки изношенных автомобильных шин / Д. И. Людсков, Н. В. Неприн // Новая наука: Теоретический и практический взгляд. – 2017. – Т. 1, № 4. – С. 21-25.

80. Севостьянов, В. С. Переработка использованной полиэтиленовой тары / В. С. Севостьянов, О. А. Носов, Г. Р. Варданян, О. Л. Бережной // Экология: образование, наука, промышленность и здоровье. – Белгород, 2013. – С. 152-156.

81. Севостьянов, В. С. Техника и технология измельчения вторичного полимерного сырья / В. С. Севостьянов, О. А. Носов, О. Л. Бережной, Г. Р. Варданян // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды. – Белгород, 2015. – С. 50-54.

82. Макаров, А. Г. Начальная стадия релаксации напряжения в ориентированных полимерах / А. Г. Макаров, Г. Я. Слуцкер, И. В. Гофман, В. В. Васильева // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58, № 4. – С. 814-820.

83. Сеник, К. А. Исследование процессов долговременной релаксации внутренних напряжений в полимерных композитах с порошковыми наполнителями / К. А. Сеник, А. С. Ажеганов // Вестник Пермского университета. – 2007. – № 1(6). – С. 74-78.

84. Тарасова, Т. Ф. Установка для переработки изношенных автомобильных шин механическим скоростным способом / Т. Ф. Тарасова, Д. И. Чапалда // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2007. – № 2(65). – С. 115-122.

85. Киркор, М. А. Исследование процесса измельчения полимерных материалов / М. А. Киркор, В. А. Шуляк, А. В. Евдокимов, А. Г. Смусенок //

Вестник Белорусско-Российского университета. – 2007. – № 3(16). – С. 31-39.
– DOI 10.53078/20778481_2007_3_31.

86. Пат. 2540549 РФ. Установка для измельчения волокнистых материалов / Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Севостьянов М.В., Сиваченко Л.А., Сиваченко Т.Л., Михайличенко С.А., Макридин А.А., Маншин А.С. // заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова; № 2013141378/13; заявл. 09.09.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4. – 11 с.

87. Пат. 2446015 РФ. Установка для измельчения волокнистых материалов / Глаголев С.Н., Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Михайличенко С.А., Макридин А.А. // заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова; № 2010143951/13; заявл. 26.10.2010; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 9. – 9 с.

88. Пат. 49467 РФ. Устройство для переработки пластмасс полимеров / Астанин В.К., Худояров В.В. // заявитель и патентообладатель: ВПО ВГАУ им. К.Д. Глинки; № 2005118458; заявл. 14.06.2005; опубл. 27.11.2005, Бюл. № 33. – 2 с.

89. Пат. 51933 РФ. Устройство для измельчения полимеров / Мингазетдинов И.Х., Глебов А.Н., Гоголь Э.В., Ктомас Б.Г., Мергалиева Р.Р. // заявитель и патентообладатель: КГТУ им. А.Н. Туполева; № 2005134534/22; заявл. 07.11.2005; опубл. 10.03.2006, Бюл. № 7. – 2 с.

90. Пат. 2207908 РФ. Устройство для измельчения бытовых и промышленных пластмассовых отходов / Шардаков А.А., Великих В.Ф. // заявитель и патентообладатель: Шардаков А.А., Великих В.Ф.; № 2001130510/03; заявл. 12.11.2001; опубл. 10.07.2003, Бюл. № 19. – 6 с.

91. Пат. 2235019 РФ. Измельчитель роторный для тонкостенных пустотелых отходов из пластмасс / Сычев Г.М., Шумаков Н.Г., Свитка Н.И. // заявитель и патентообладатель: ОАО «ПКБ ПЛАСТМАШ»; № 2002130191/12; заявл. 11.11.2002; опубл. 10.05.2004, Бюл. № 24. – 5 с.

92. Пат. 2550658 РФ. Роторная дробилка трубчатых материалов / Гиниятов Х.З., Шаповалов Е.В. и др. // заявитель и патентообладатель:

ФКП «КГ КПЗ»; № 2013144160/13; заявл. 01.10.2013; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13. – 7 с.

93. Пат. 2248243 РФ. Устройство для измельчения твёрдых прутковых материалов / Матросов А.А., Свиначев В.В., Шаповалов Ю.Н. // заявитель и патентообладатель: ГОУВПО ВГТА; № 2003136216/03; заявл. 15.12.2003; опубл. 20.03.2005, Бюл. № 8. – 6 с.

94. Сиваченко, Л. А. Зубофрезерный измельчитель для твердых бытовых отходов / Л. А. Сиваченко, Е. И. Дерман // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 306-310.

95. Кравченко, В. М. Обзор режущих элементов для измельчения твердых бытовых отходов / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, М. С. Рысиков // Машины, агрегаты и технологические процессы в строительной индустрии. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 60-67.

96. Antonova, E. L. Recycling as a chemical technology for processing polymer waste / E. L. Antonova, V. E. Sytsko, N. V. Kuzmenkova [et al.] // Education and science in the 21st century. – Vitebsk, 2022. – P. 14-17.

97. Шаповалов, В. М. Рециклинг и утилизация многокомпонентных полимерных систем на основе вторичных термопластов / В. М. Шаповалов, А. Я. Григорьев // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 3. – С. 6-19. – DOI 10.32864/polymmattech-2021-7-3-6-19.

98. Гаральд, С. Оборудование для переработки полимерных отходов / С. Гаральд // Твердые бытовые отходы. – 2008. – № 9(27). – С. 58-61.

99. Титова, И. В. Анализ технологий утилизации полимерных отходов машин и оборудования в сельском хозяйстве / И. В. Титова, В. К. Астанин, А. Н. Коноплин, А. С. Василенко // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2017. – № 4. – С. 110-117.

100. Щербин, С. А. О совмещении процессов перемешивания и диспергирования / С. А. Щербин, В. А. Глотов // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2024. – № 18. – С. 159-162.

101. Колобов, М. Ю. Использование дезинтегратора для получения смесей дисперсных материалов / М. Ю. Колобов, А. Э. Козловский, С. Е. Сахаров [и др.] // Надежность и долговечность машин и механизмов. – Иваново, 2021. – С. 255-258.

102. Сиваченко, Л. А. Анализ изменения угла захвата и межвалкового пространства в вибровалковом измельчителе / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник, И. А. Богданович // Научные стремления. – 2017. – № 22. – С. 7-11.

103. Мурзина, А. И. Методы механической обработки твердых отходов / А. И. Мурзина, Г. Ю. Федоров // Вестник магистратуры. – 2015. – № 5-1(44). – С. 70-72.

104. Власенко, Д. А. Аналитический способ определения энергосиловых параметров процесса измельчения в валковых дробилках с рифленой поверхностью бандажей / Д. А. Власенко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического института. – 2020. – № 20(63). – С. 93-101.

105. Ефименко, С. В. Разработка конструкции измельчителя для переработки и утилизации пластиковых отходов / С. В. Ефименко, Д. А. Филькин, А. С. Бинчуров [и др.] // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – Красноярск, 2020. – С. 991-993.

106. Халимов, Р. Ш. Модернизация измельчителя кормов / Р. Ш. Халимов, Н. П. Аюгин, Л. Г. Татаров, К. Р. Кундротас // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 11-4(65). – С. 79-83. – DOI 10.23670/IRJ.2017.65.075.

107. Севостьянов, В. С. Игофрезерные измельчители, их технологические возможности и пути развития / В. С. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко // Вестник Белорусско-Российского университета. 2016. № 1. С. 69-78.

108. Горягин, П. Ю. Конструктивно-технологическое совершенствование двухроторного шредера для переработки полимерных отходов / П. Ю. Горягин, Н. Р. Лопухов, А. В. Мирошниченко // Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство». – Белгород, 2022. – С. 67-70.

109. Сиваченко, Л. А. Конструкция и технологические возможности иглофрезерных измельчителей / Л. А. Сиваченко, П. В. Силина, Т. Л. Сиваченко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. – Могилев: Государственное учреждение высшего профессионального образования "Белорусско-Российский университет", 2018. – С. 222-223.

110. Сиваченко, Л. А. Технологические аппараты адаптивного действия: монография / Л. А. Сиваченко [и др.]. – Минск: Белорусский гос. Ун-т. 2008. – 375 с.

111. Севостьянов, В. С. Машины и агрегаты адаптивного действия для селективной переработки природных и техногенных материалов / В. С. Севостьянов, В. И. Уральский, Л. А. Сиваченко, А. М. Проценко. – Белгород: БГТУ, 2024. – 351 с.

112. Борщев, В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учебное пособие, Тамбов: издательство ТГТУ. 2004. – 75 с.

113. Абдулханова, М. Ю. Механическое оборудование предприятий стройиндустрии: Учебное пособие / М. Ю. Абдулханова, А. М. Колбасин, В. И. Марсов. – Москва: МАДИ, 2014. – 120 с.

114. Прокопчук, Н. Р. Химия и физика пленкообразующих веществ: учебное пособие / Н. Р. Прокопчук, А. Л. Шутова, П. П. Казаков. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2014. – 365 с. – ISBN 978-985-530-310-8.

115. Леденев, В. В. Теоретические основы механики деформирования и разрушения / В. В. Леденев, В. Г. Однолько, З. Х. Нгуен. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013 – 312 с. – ISBN 978-5-8265-1208-1.

116. Стружанов, В. В. Теория упругости: основные положения / В. В. Стружанов, Н. В. Бурмашева // М-во науки и высш. образования РФ, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 204 с. ISBN 978-5-7996-2541-2.

117. Акопян, Е. Л. Упруго-деформационное измельчение некоторых полиолефинов: специальность 01.04.19: диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / Е. Л. Акопян. – Москва, 1993. – 128 с.

118. Потапова, Л. Б. Механика материалов при сложном напряженном состоянии. Как прогнозируют предельные напряжения / Л. Б. Потапова, В. П. Ярцев. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2012. – 244 с.

119. Римлянд, В. И. Элементы физики твердого тела / В. И. Римлянд, А. В. Казарбин, В. И. Нестеров. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015 – 123 с. – ISBN 978-5-7389-1681-6.

120. Шафигулин, Р. В. Физическая химия. Химическая кинетика / Р. В. Шафигулин, К. А. Копытин, А. В. Буланова. – Самара: Издательство Самарского университета, 2023 – 105 с. ISBN 978-5-7883-1856-1.

121. Завражин, Д. О. Основы реологии полимеров и технологические методы переработки полимерных материалов / Д. О. Завражин, О. Г. Маликов, П. С. Беляев. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2017. – 108 с. – ISBN 978-5-8265-1785-7.

122. Бондалетова, Л. И. Полимерные композиционные материалы / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020 – 130 с.

123. Соловых, С. Ю. Измельчители для пищевой, зерноперерабатывающей и химической промышленности / С. Ю. Соловых, С. В. Антимонов, Е. В. Волошин. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2023. – 109 с. – ISBN 978-5-7410-2688-5.

124. Дружакина, О. П. Технологии механической переработки и захоронения отходов / О. П. Дружакина – Ижевск: Удмуртский университет, 2013. – 98 с. – ISBN 978-5-4312-0216-2.

125. Клинков, А. С. Утилизация и вторичная переработка тары и упаковки из полимерных материалов / А. С. Клинков, П. С. Беляев, В. К. Скуратов, М. В. Соколов, В. Г. Однолько. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2010. – 100 с. – ISBN 978-5-8265-0903-6.

126. Sevostyanov, V.S. Development and Research of Technological Equipment for Production of Polymer Composite Materials with Basalt Fiber Fillers from Man-

Made Raw Materials / V.S. Sevostyanov, P.Y. Goryagin, V.A. Babukov // Digital Technologies in Construction Engineering: Selected Papers. – 2022. – Vol. 173. – P. 297-304. – DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8_38.

127. Klyuev, S. Improvement of technical means for recycling of technogenic waste to construction fiber / S. Klyuev, V. Sevostyanov, M. Sevostyanov, M. Ageeva, E. Fomina, A. Klyuev, A. Protsenko, P. Goryagin, V. Babukov, R. Shamgulov, R. Fediuk, L. Sabitov // Case Studies in Construction Materials. – 2022. – Vol. 16. – 01071. – DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01071.

128. Shein, N.T. Resource and energy-saving technologies of complex processing and utilization of technogenic materials / N.T. Shein, V.V. Obolonsky, V.S. Sevostyanov, M.V. Sevostyanov, P.Y. Goryagin, V.A. Babukov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2019. – Vol. 552. – 012042. – DOI: 10.1088/1757-899X/552/1/012042.

129. Sevostyanov, V.S. Constructive and Technological Features of Units for Milling Polymer Material / V.S. Sevostyanov, P.Y. Goryagin, M.V. Sevostyanov, R.A. Ermilov // IOP Conference Series: Journal of Physics. – 2018. – Vol. 1066. – P. 70-73. – DOI: 10.1088/1742-6596/1066/1/012006.

130. Sevostyanov, V.S. Resource-Saving Technological Complex for Polymer Waste Processing / V.S. Sevostyanov, P.Yu. Goryagin, V.V. Obolonsky, R.A. Ermilov // IOP Conference Series: Journal of Physics. –2018. – Vol. 1066. – P. 80-85. – DOI: 10.1088/1742-6596/1066/1/01202.

131. Севостьянов, В. С. Ресурсосберегающая технология комплексной переработки техногенных полимерных материалов и технические средства для её реализации / В.С. Севостьянов, Н.Т. Шеин, В.В. Оболонский, М.В. Севостьянов, О.Л. Бережной, П.Ю. Горягин, А.М. Проценко // СТИН. – 2024. – № 9. – С. 27-30. (Sevost'yanov, V.S. Resource-Saving Technology for Polymer Waste Processing / V.S. Sevost'yanov, N.T. Shein, V.V. Obolonskii, M.V. Sevost'yanov, O.L. Berezhnoi, P.Yu. Goryagin, A.M. Protsenko // Russian Engineering Research. – 2024. – Vol. 44, No. 10. – P. 1487-1490. – DOI: 10.3103/S1068798X24702381).

132. Евразийский патент 046589. Рециркуляционный смеситель комбинированного действия / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Проценко, М.В. Севостьянов, С.В. Ключев, Р.Ю. Шамгулов; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова, заявл. 05.04.2023, опубл. 27.03.2024. – 19 с.

133. Севостьянов, М. В. Разработка и исследования оборудования для комплексной переработки техногенных полимерсодержащих материалов / М.В. Севостьянов, Н.Т. Шеин, В.С. Севостьянов, В.В. Оболонский, А.М. Проценко, П.Ю. Горягин, В.А. Бабуков // СТИН. – 2025. – № 9. – С. 21-25. (Sevostyanov, M.V. Development and Study of Equipment for Comprehensive Processing of Technogenic Polymer-Containing Materials / M.V. Sevostyanov, N.T. Shein, V.S. Sevostyanov, V.V. Obolonskiy, A.M. Protsenko, P.Yu. Goryagin, V.A. Babukov // Russian Engineering Research. – 2025. – Vol. 45, No. 10. – P. 1440-1444. – DOI: 10.3103/S1068798X25702259).

134. Пат. 2681091 РФ. Пресс-валковый экструдер со съемными формующими элементами / М.В. Севостьянов, П.Ю. Горягин, В.С. Севостьянов, А.В. Осокин, Н.А. Якимец. № 2017136911; заявл. 19.10.2017; опубл. 04.03.2019, Бюл. № 7. – 11 с.

135. Пат. 2264268 РФ. Вихреакустический классификатор / А.М. Гридчин, В.С. Севостьянов, В.С. Лесовик, Д.Э. Зубков, А.В. Шаталов, С.П. Нечаев; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова, заявл. 05.08.2004, опубл. 20.11.2005, Бюл. № 32. – 11 с.

136. Пат. 2678279 РФ. Воздушный сепаратор-гранулятор комбинированного действия / В.С. Севостьянов, И.П. Бойчук, М.В. Севостьянов, Д.Н. Перельгин, Р.А. Ермилов, П.Ю. Горягин; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова, заявл. 23.01.2018, опубл. 24.01.2019, Бюл. № 3. – 11 с.

137. Севостьянов, В.С. Научно-практические основы создания иглофрезерных измельчителей многоцелевого назначения / В.С. Севостьянов, Т.Л. Сиваченко, М.В. Севостьянов, П.Ю. Горягин, В.А. Бабуков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 3. – С. 107-116. – DOI: 10.12737/article_5abfc9cfb02a37.92961359.

138. Пат. 2724667 РФ. Роторно-центробежный агрегат комбинированного действия для переработки органических и минеральных материалов / Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Севостьянов М.В., Горягин П.Ю., Ермилов Р.А.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; № 2019129930; заявл. 23.09.19; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 18. – 12 с.

139. Пат. 2755436 РФ. Роторно-центробежный агрегат с иглофрезерными рабочими органами / Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Севостьянов М.В., Горягин П.Ю., Оболонский В.В., Перелыгин Д.Н., Шамгулов Р.Ю.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; № 2021101630; заявл. 26.01.2021; опубл. 16.09.2021, Бюл. № 26. – 13 с.

140. Пат. 213199 РФ. Роторно-центробежный агрегат комбинированного действия / Севостьянов В.С., Горягин П.Ю. // заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; № 2022115621; заявл. 09.06.2022; опубл. 30.08.2022, Бюл. № 25. – 10 с.

141. Пат. 2834371 РФ. Технологический модуль постадийного измельчения органических и минеральных материалов / Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Севостьянов М.В., Ключев С.В., Горягин П.Ю., Оболонский В.В.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; № 2024120112; заявл. 17.07.2024; опубл. 06.02.2025, Бюл. № 4. – 14 с.

142. Пат. 2853333 РФ. Технологический модуль для диспергирования и смешения изотропных и анизотропных материалов / Севостьянов В.С., Гаевой А.П., Севостьянов М.В., Шаталов А.В., Шаталов В.А., Проценко А.М., Горягин П.Ю.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова; № 2025115913; заявл. 09.06.2025; опубл. 23.12.2025, Бюл. № 36. – 20 с.

143. Вилсон, Д. Утилизация твердых отходов / Под ред. Д. Вилсона. Сокр. пер. с англ. Э.Г. Тетерина и А.С. Скотникова. Под ред. А.П. Цыганкова. – М.: Стройиздат, Том 1, 1985. – 336 с.

144. Горягин, П. Ю. Научно-технические разработки и исследования специального оборудования для переработки техногенных полимерных материалов / П.Ю. Горягин // IX Международный студенческий строительный

форум – 2024: Сборник докладов форума, Белгород, 29 ноября 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 300-303.

145. Горягин, П. Ю. Техника и технологии для перфорирувания и компактирования техногенных полимерных материалов / П.Ю. Горягин, Р.А. Ермилов, И.В. Кирилов // IX Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство», Белгород, 01–10 октября 2017 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. – С. 1252-1255.

146. Степаненко, А. В. Обработка давлением порошковых сред / А.В. Степаненко, Л.А. Исаевич, В.Е. Харлан // АН Белоруссии. Физ.-техн.ин-т. Минск: Наука и техника, 1993. – 168 с.

147. Горягин, П. Ю. Расчёт основных параметров пресс-валкового уплотнителя для предварительной деформации полимерных отходов / П.Ю. Горягин, В.С. Севостьянов // Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения): Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 23 ноября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 1140-1144.

148. Козлов, Н. А. Физика полимеров: Учеб. пособие / Н.А. Козлов, А.Д. Митрофанов // Владим. гос. ун-т; Владимир, 2001. – 345 с.

149. Севостьянов, В. С. Теоретические исследования параметров роторно-центробежного агрегата комбинированного действия для переработки полимерных отходов / В.С. Севостьянов, П.Ю. Горягин, В.Ю. Шаповалов // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования: Сборник докладов Всероссийской научной конференции, Белгород, 19–23 октября 2020 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 251-256.

150. Севостьянов, М. В. Расчет и проектирование оборудования для компактирования техногенных материалов / М. В. Севостьянов. – Белгород:

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. – 205 с. – ISBN 978-5-361-00418-8.

151. Севостьянов, В. С. Научно-техническая разработка ресурсоэнергосберегающей технологии с роторно-центробежным агрегатом комбинированного действия / В.С. Севостьянов, Н.Т. Шеин, В.В. Оболонский, П.Ю. Горягин, А.П. Гаевой // Пластические массы. – 2025. – № 6. – С. 52-56. – DOI: 10.35164/0554-2901-2025-06-52-56.

152. Гиберов, З. Г. Механическое оборудование заводов пластических масс / З. Г. Гиберов // Учебник. М. Машиностроение, 1977. – 335 с.

153. Чапалда, Д. И. Разработка технологии утилизации изношенных автомобильных шин / Д. И. Чапалда // Диссертация ... кандидата технических наук: 03.00.16, 05.17.08. – Оренбург, 2007. – 154 с.

154. Гавриленко, И. Г. Технологические основы и пути повышения эффективности иглофрезной обработки металлов / И. Г. Гавриленко // Диссертация ... доктора технических наук: 05.02.08. – Белгород, 1996. – 235 с.

155. Севостьянов, В. С. Исследование процесса измельчения техногенных полимерных материалов иглофрезерными рабочими органами / В.С. Севостьянов, П.Ю. Горягин, В.А. Бабуков // Энергетические системы. – 2019. – № 1. – С. 313-318.

156. Крыжановский, В. К. Производство изделий из полимерных материалов: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности 240502 «Технология переработки пласт. масс и эластомеров» / В.К. Крыжановский, М.Л. Кербер, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко. – Санкт-Петербург: Профессия, 2004. – 460 с.

157. ГОСТ 4651-2014. Пластмассы. Метод испытания на сжатие. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

158. Кохужева, Р. Б. Основы научных исследований. Планирование эксперимента: Планирование эксперимента, курс лекций: учебное пособие / Р.Б. Кохужева. – Майкоп. 2020. – 183 с.

159. Макаричев, Ю. А. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.

160. Суриков, Е. М. Погрешность приборов и измерений / Е.М. Суриков // М.: Энергия, 1975. – 160 с.

161. Попов, В. С. Общая электротехника с основами электроники / В.С. Попов, С.А. Николаев. – М.: Энергия, 1972. – 504 с.

162. Севостьянов, В. С. Ресурсосберегающая технология производства полимерно-базальтовых материалов и изделий из техногенного сырья для строительства временных дорог / В.С. Севостьянов, В.В. Оболонский, П.Ю. Горягин, В.А. Бабуков // Научные чтения (XXV научные чтения): Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 23 ноября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 1057-1061.

163. Горягин, П. Ю. Разработка и исследование техники и технологии переработки полимерных отходов / П.Ю. Горягин, Р.А. Ермилов, Н.А. Якимец, К.И. Севостьянова // Энергетические системы: II Международная научно-техническая конференция. Секция молодых ученых. Сборник трудов, Белгород, 23–24 ноября 2017 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. – С. 39-42.

164. Севостьянов, В. С. Технологическая концепция и технические средства для комплексной переработки техногенных полимерсодержащих материалов / В.С. Севостьянов, Н.Т. Шеин, В.В. Оболонский, П.Ю. Горягин, А.П. Гаевой // Пластические массы. – 2026. – № 3. – С. 49-52. – DOI 10.35164/0554-2901-2026-03-49-52.

165. Агеева, М. С. Технология и оборудование для получения органических компонентов полимерсодержащего цементобетона / М.С. Агеева, П.Ю. Горягин, М.С. Колесников // Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Сборник докладов

конференции, Белгород, 29–30 мая 2025 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 83-87.

166. Севостьянов, В. С. Ресурсоэнергосберегающая технология переработки техногенных органических материалов и производства из них гранулированных композиционных смесей / В.С. Севостьянов, Н.Т. Шеин, П.Ю. Горягин, Р.Ю. Шамгулов, Н.Р. Лопухов // Современные технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых и специалистов, Казань, 21–22 марта 2023 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 755-760.

167. Севостьянов, В. С. Технология и технические средства для переработки полимерных отходов с получением компонентов полимерцементных бетонов / В.С. Севостьянов, П.Ю. Горягин, М.В. Севостьянов, А.М. Проценко // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования: Сборник докладов Всероссийской научной конференции, Белгород, 04–08 октября 2022 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 182-186.

168. Севостьянов, В. С. Техника и технология производства полимерпесчаных изделий из техногенного сырья / В.С. Севостьянов, В.В. Оболонский, Л.А. Сиваченко, Н.А. Якимец, П.Ю. Горягин // Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды: Материалы докладов Международной научно-технической конференции, Алушта, 04–08 июня 2018 года / Ответственный редактор И.В. Старостина. Том III. – Алушта: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 132-138.

169. ТУ 38.32.33-001-44971101-2017. Гранулы вторичные. Технические условия. – М., 2017. – 8 с.

170. ГОСТ 11035.1-93. Пластмассы. Определение насыпной плотности формовочного материала, который просыпается через специальную воронку. – М., 1993. – 7 с.

171. Абрамов, В. В. Технические основы создания машин и оборудования предприятий строительных материалов / В. В. Абрамов, Ю. П. Ракунов, Т. А. Суэтина, В. Б. Герасименко // – М.: Граница, 2009. – 432 с. – ISBN 978-5-94691-332-4.

172. Клинков, А. С. Технология переработки полимеров. Инженерная оптимизация оборудования / А. С. Клинков, М. А. Шерышев, М. В. Соколов, В. Г. Однолько // – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство «Юрайт», 2026. – 386 с. – ISBN 978-5-534-04990-9.

173. Берлинер, Э. М. САПР конструктора-машиностроителя / Э. М. Берлинер, О. В. Таратынов. // – М., 2025. – 288 с. – ISBN 978-5-00091-558-5.

174. Дунаев, П. Ф. Конструирование узлов и деталей машин: учеб. пособие для техн. спец. вузов / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. – 7-е изд., испр. – М.: Высш.шк., 2001. – 447 с.

175. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.

176. ГОСТ Р 15.301-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки на производство. – М.: Стандартинформ, 2016. – 15 с.

177. Селиверстов, Ю. И. Экономика предприятия. Учебное пособие: в 2 ч. / Ю. И. Селиверстов, И. А. Кузнецова, О.И. Доможирова и др., под общ. ред. д-ра экон. наук, проф. Ю. И. Селиверстова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. – Ч. 1. – 298 с.

178. Рынок вторичной полиэтиленовой гранулы: аналитический материал [Электронный ресурс] // NAIR.RU. – URL: https://naair.ru/files/articlesblockgallery/rinok_vtorichnoi_pe_granuli.pdf?ysclid=mtq259zhy886815021 (дата обращения: 24.05.2026).

Патент на изобретение РФ № 2724667

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2724667

**РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ АГРЕГАТ
КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ
ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Севостьянов Владимир Семёнович (RU), Шенин
Николай Тихонович (RU), Севостьянов Максим
Владимирович (RU), Горягин Павел Юрьевич (RU), Ермилов
Родион Андреевич (RU)*

Заявка № 2019129930

Приоритет изобретения 23 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 25 июня 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 23 сентября 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Патент на изобретение РФ № 2755436

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2755436

**РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ АГРЕГАТ С
ИГЛОФРЕЗЕРНЫМИ РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Авторы: *Севостьянов Владимир Семёнович (RU), Шеин Николай Тихонович (RU), Севостьянов Максим Владимирович (RU), Горягин Павел Юрьевич (RU), Оболенский Виктор Васильевич (RU), Перелыгин Дмитрий Николаевич (RU), Шамгулов Роман Юрьевич (RU)*

Заявка № 2021101630

Приоритет изобретения **26 января 2021 г.**Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретенийРоссийской Федерации **16 сентября 2021 г.**Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **26 января 2041 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



Патент на полезную модель РФ № 213199

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 213199

**РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ АГРЕГАТ
КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Севостьянов Владимир Семёнович (RU), Горягин Павел Юрьевич (RU)*

Заявка № 2022115621

Приоритет полезной модели 09 июня 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 30 августа 2022 г.Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 09 июня 2032 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Патент на изобретение РФ № 2834371

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2834371

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ ПОСТАДИЙНОГО
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ И
МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова" (RU)*

Авторы: *Севостьянов Владимир Семёнович (RU), Шеин Николай Тихонович (RU), Севостьянов Максим Владимирович (RU), Ключев Сергей Васильевич (RU), Горягин Павел Юрьевич (RU), Оболонский Виктор Васильевич (RU)*

Заявка № 2024120112

Приоритет изобретения 17 июля 2024 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 06 февраля 2025 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 17 июля 2044 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



«Утверждаю»

Первый проректор
БГТУ им. В.Г. Шухова
д-р техн. наук, проф.

Е.И. Евтушенко

2026 г.



«Утверждаю»

Главный инженер
ООО «ТК «Экотранс»

В.Г. Афонин

2026 г.

**АКТ**

**опытно-промышленной апробации научно-технических разработок по
комплексной переработке техногенных полимерных материалов**

Настоящий акт составлен в том, что комиссией в составе:

от Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова: вед. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории ресурсо-энергосберегающих технологий, оборудования и комплексов управления научно-исследовательских работ (НИЛ РЭТОК УНИР), д-р техн. наук, проф. В.С. Севостьянов, зав. каф. технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиала) национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов», канд. техн. наук, доц. А.П. Гаевой, мл. науч. сотр. НИЛ РЭТОК УНИР П.Ю. Горягин, лаборант-исследователь НИЛ РЭТОК УНИР (инженер), канд. техн. наук Р.Ю. Шамгулов, ведущий инженер кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы» В.А. Бабуков;
– от ООО «ТК «Экотранс»: начальник отдела разработки новой техники и технологий В.В. Оболонский; инженер отдела разработки новой техники и технологий С.А. Чечель, техник по наладке и испытаниям оборудования Ю.В. Ширяев

в период с «16» марта 2026 года по «10» апреля 2026 года были проведены промышленные испытания разработанных технологий и технических средств по комплексной переработке техногенных полимерных материалов (ТПМ) (патенты на изобретения РФ 2724667, 2755436, 2834371) с получением различных видов товарной продукции: полимерного флекса из вторичного сырья, гранулята, экструдированных изделий различной конфигурации.

Указанные разработки осуществляются в рамках выполняемого государственного задания FZWN-2024-0002 «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологий и технических

средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органоминеральных компонентов».

При выполнении разработок использованы результаты опытно-промышленных испытаний технологий переработки полимерных отходов, моделирования процессов комплексной переработки техногенных полимерных материалов научными сотрудниками БГТУ им. В.Г. Шухова и инженерно-техническими работниками ООО «ТК «Экотранс».

При поступлении на полигон из общей массы ТКО выделяют полимерные отходы, которые в общем объёме ТКО представлены различными видами материалов и составляют 15-20 %.

При проведении опытно-промышленной апробации разработанной технологии и технических средств исходным сырьём являлся полиэтилен низкого и высокого давления.

Предварительно выполнялись следующие операции: сортировка техногенных полимерных материалов по типу и исходному состоянию отходов, а также очистка их от загрязнений.

Измельчение техногенных полимерных материалов производилось в роторно-центробежном агрегате комбинированного действия (РЦА КД) (патенты на изобретения РФ 2724667, 2755436, 2834371).

В зависимости от технологических задач и вида выпускаемой продукции РЦА может работать как в комбинированном режиме, так по отдельным блокам (деформация ТПМ в пресс-валковом уплотнителе, измельчение отходов дисковыми фрезами, диспергирование иглофрезерными рабочими органами).

РЦА КД имеет следующие технические характеристики:

Габаритные размеры LxVxH, м	1,5x0,93x1,3
Частота вращения шипованных валков, мин ⁻¹	15÷20
Частота вращения дисковых фрез, 10 ³ мин ⁻¹	1÷2,5
Частота вращения иглофрезерных рабочих органов, 10 ³ мин ⁻¹	2,5÷3
Суммарная потребляемая мощность привода, кВт	6÷6,5
Производительность, кг/ч	90÷120
Масса, кг	190

Эффективность использования РЦА КД достигается за счёт:

- постадийного измельчения полимерных отходов рабочими органами различной конфигурации с развитой рабочей поверхностью — шипованными валками, дисковыми фрезами, иглофрезерными рабочими органами;

- высокой степени измельчения полимерных отходов: на стадии предварительной деформации до размеров – $l \times b = (20 \times 30) \cdot 10^{-3}$ м, на стадии грубого измельчения (первая камера) до размеров частиц – $d_{\text{ч1}} \leq 10^{-2}$ м; на стадии тонкого измельчения (вторая камера) – $d_{\text{ч2}} \leq (2 \div 4) \cdot 10^{-3}$ м;
- снижения удельных энергозатрат при комбинированном воздействии на перерабатываемый материал до $q = 0,05 \div 0,072$ кВт·ч/кг; при получении флекса в первой камере измельчения потребляемая мощность привода – $P_1 = 1,8 \div 2,1$ кВт, удельные энергозатраты – $q_1 = 0,015 \div 0,02$ кВт·ч/кг.
- высокой эксплуатационной надёжности агрегата: коэффициент эксплуатационной надёжности – $K_{\text{ЭН}} = 0,9 \div 0,95$.

В результате опытно-промышленной апробации технологий переработки техногенных полимерных материалов получена продукция: термоэкструдированный гранулят: $d \times l = (2,5 \div 5) \times (5 \div 15) \cdot 10^{-3}$ м; насыпная плотность гранул – $\rho_{\text{гр}} = 920 \div 950$ кг/м³; механическая прочность при сжатии – $\sigma_{\text{сж}} = 10 \div 25$ МПа; модуль упругости $E = 100 \div 400$ МПа; температура плавления – $T = 125 \div 130$ °С; изделия из него – трубы технического назначения: $D \times L = (25 \times 160) \cdot 10^{-3}$ м; толщина стенок – $h = (2 \div 12) \cdot 10^{-3}$ м; допустимое максимальное внутреннее давление – $0,6 \div 1$ МПа.

В период опытно-промышленных испытаний разработанные технологические модули и оборудование показали свою работоспособность и эксплуатационную надёжность.

Результаты опытно-промышленной апробации научно-технических разработок будут использованы при реализации ресурсоэнергосберегающей технологии комплексной переработки техногенных полимерных материалов на ООО «ТК «Экотранс».

Использование вышеуказанной технологии и технических средств позволило достичь следующих технико-экономических показателей:

- сокращение удельного расхода энергии при измельчении полимерных отходов на 15-20 % – до $q_1 = 0,015 \div 0,02$ кВт·ч/кг;
- увеличение эксплуатационной надёжности технологического оборудования;
- эффективное измельчение полимерных отходов с различными физико-механическими характеристиками за счёт реализации комбинированного воздействия на перерабатываемое сырьё;
- увеличение степени измельчения полимерных отходов;

- апробирована в условиях производства разработанная технология комплексной переработки полимерных отходов и получены опытные образцы продукции: термоэкструдированный гранулят, полимерный профиль различной конфигураций, в т.ч. трубы технического назначения.

От Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова):

вед. науч. сотр.
НИЛ РЭТОК УНИР
д-р техн. наук, проф.



В.С. Севостьянов

зав. каф. ТОММ им. В.Б. Крахта
Старооскольского технологического
института им. А.А. Угарова (филиала)
НИТУ МИСиС, канд. техн. наук, доц.



А.П. Гаевой

мл. науч. сотр.
НИЛ РЭТОК УНИР



П.Ю. Горягин

лаборант-исследователь
НИЛ РЭТОК УНИР
(инженер)
канд. техн. наук

Р.Ю. Шамгулов

ведущий инженер
кафедры ТКММ



В.А. Бабуков

от ООО «ТК «Экотранс»:
начальник отдела разработки
новой техники и технологий



В.В. Оболонский

инженер отдела разработки
новой техники и технологий



С.А. Чечель

техник по наладке
и испытаниям оборудования



Ю.В. Ширяев

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «ТК «Экотранс»



Н.Т. Шеин
 «26» 05 2026 г.

**Расчёт технико-экономической эффективности использования
 измельчённых в роторно-центробежном агрегате техногенных полимерных
 материалов для производства гранулята**

Данный расчёт предназначен для определения технико-экономической эффективности использования измельчённых в роторно-центробежном агрегате комбинированного действия (РЦА КД, патенты РФ 2724667, 2755436, 213199, 2834371) техногенных полимерных материалов (ТПМ) для производства полимерсодержащего гранулята. Из полимерных гранул производятся различные полимерсодержащие изделия: трубы технического назначения, профиль различной конфигурации, полимерные нити и др.

Годовая производительность технологической линии $Q_{\text{год}}$ с учётом работы оборудования в две смены

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{час}} \cdot T_{\text{ном}} \cdot K_{\text{экт. исп.}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{час}}$ – часовая производительность технологической линии по исходному сырью (ТПМ) – 90 кг/ч; $T_{\text{ном}}$ – номинальный фонд рабочего времени, час; $K_{\text{экт. исп.}}$ – коэффициент экстенсивного использования РЦА КД, $K_{\text{экт. исп.}} = 0,87$.

Количество выходных и праздничных дней при пятидневной рабочей неделе, согласно производственному календарю, составляет 118 дней.

$$T_{\text{ном}} = (T_{\text{кал}} - T_{\text{вых., праздн.}}) \cdot T_{\text{см. час}} = (365 - 118) \cdot 8 \cdot 2 = 3952 \text{ час.} \quad (2)$$

$$Q_{\text{ТПМ}} = 90 \cdot 3952 \cdot 0,87 = 309 \text{ т/год.}$$

В таблице 1 представлены исходные данные для проведения расчета.

С учётом технологических потерь (на стадиях сепарации, мойки, сушки, экструдирования и др.) из 1 тонны полимерного флекса производится 970 кг

гранулята (таблица 1), следовательно годовая производительность по грануляту составит $Q_{гр} = 309 \cdot 0,97 = 300$ т/год.

Необходимые инвестиции в оборотный капитал

$$ПР_{об.кап.} = \frac{Потр_{об.ср.}}{K_{об}}, \quad (3)$$

где $ПР_{об.кап.}$ – прирост оборотного капитала, тыс. руб.; $Потр_{об.ср.}$ – потребность в оборотных средствах, тыс. руб.; $K_{об}$ – коэффициент оборачиваемости производственных запасов, $K_{об} = 9,17$.

$$ПР_{об.кап.} = \frac{(30900+2100+750+2025) \cdot 300}{9,17} = 1\,170,0 \text{ тыс. руб.}$$

Таблица 1 – Исходные данные для проведения расчета технико-экономической эффективности

Наименование	Ед. изм.	Значение
Производительность роторно-центробежного агрегата комбинированного действия при измельчении ТПМ	кг/ч	90-120
Производство гранулята из 1 тонны флекса	кг	900-970
Затраты на сырьё и предварительную переработку 1 т ТПМ	Руб.	30 900
Стоимость изготовления РЦА КД для измельчения	Руб.	550 000,00
Стоимость линии для производства гранулята из ТПМ (за исключением измельчительного оборудования)	Руб.	3 250 000,00
Затраты на подготовительные работы	Руб.	370 000,00
Инвестиции в оборотный капитал	Руб.	1 170 000,00
Общие инвестиционные затраты	Руб.	5 340 000,00
Количество обслуживающего персонала при работе в две смены	Чел.	4
Заработная плата одного сотрудника в месяц	Руб.	35 220,00

Состав общих затрат на производство 1 тонны полимерного гранулята представлен в таблице 2.

По данным анализа рынка полимерных материалов стоимость вторичных полимерных гранул полиэтилена составляет 80-110 тыс. руб. за тонну. Стоимость производимого на ООО «ТК «Экотранс» гранулята из ТПМ, измельчённых в РЦА КД, с учетом конкурентноспособной рыночной цены принята в расчетах 60 тыс. руб. за тонну.

Таблица 2 – Текущие затраты на производство 1 т продукции

Составляющие себестоимости 1 тонны полимерного гранулята	Норма расхода на 1т	Затраты на 1 т, руб.
Затраты на сырье, кг	1 030	30 900,0
Электроэнергия, кВт•ч	350	2 100,0
Упаковка (Биг-Бэг), шт.	1	750,0
Затраты воду и реагенты для мойки ТПМ, м ³	3	2 025,0
Затраты на оплату труда		5 635,0
Отчисления на социальные нужды (30%)		1 691,0
Амортизация оборудования		1 267,0
Прочие расходы		5 000,0
Итого себестоимость производства		49 368,0

Амортизация основных средств на предприятии начисляется линейным способом при норме 10%. Исходя из общей стоимости оборудования 3 800,00 тыс. руб., сумма амортизационных отчислений составит 380,00 тыс. руб. в год.

Для оценки эффективности проекта и доходности будущих инвестиций, учитывая ключевую ставку ЦБ РФ на 24.05.2026 – 14,5%, а также возможные риски принята ставка дисконтирования – 21%. Источник финансирования – собственные средства организации, чистая прибыль и амортизационные отчисления.

В таблице 3 представлен план денежных потоков.

Таблица 3 – План денежных потоков

Показатель, тыс. руб.	0	1	2	3	4
Инвестиционная деятельность					
Стоимость оборудования	-3 800,00				
Оборотный капитал	-1 170,00				
Подготовительные работы	- 370,00				
Итого:	-5 340,00				
Операционная деятельность					
Доход		18 000,00	18 000,00	18 000,00	18 000,00
Себестоимость продукции		14 810,4	14 810,4	14 810,4	14 810,4
В т.ч. амортизационные отчисления		380,00	380,00	380,00	380,00
Прибыль до налогов		3 189,6	3 189,6	3 189,6	3 189,6
Налог на прибыль, 25%		- 797,4	- 797,4	- 797,4	- 797,4
Чистая прибыль		2 392,2	2 392,2	2 392,2	2 392,2
Чистый доход от операционной деятельности		2 772,2	2 772,2	2 772,2	2 772,2

Продолжение таблицы 3

Финансовая деятельность					
Собственные средства	5 340,00				
Всего средств	5 340,00				
Сальдо	0	2 772,2	2 772,2	2 772,2	2 772,2
Денежный поток	-5 340,00	2 772,2	2 772,2	2 772,2	2 772,2
Коэффициент дисконта (при 21%)	1,0000	0,8264	0,6830	0,5645	0,4665
Чистый дисконтированный доход	-5 340,00	2 290,95	1 893,41	1 564,91	1 293,23
Чистый дисконтированный доход нарастающим итогом	-5 340,00	-3 049,05	-1 155,64	409,27	1 702,5

Оценка эффективности проекта производилась по следующим показателям.

1. Чистый дисконтированный доход (NPV)

$$NPV = \sum_{i=1}^t \frac{CF_i}{(1+r)^i} - S, \quad (4)$$

где NPV – чистый дисконтированный доход; t – период реализации проекта; CF_i – денежный поток i -го периода; r – ставка дисконтирования (21%); S – сумма первоначальных вложений.

Результат расчёта чистого дисконтированного дохода представлен в таблице 3.

2. Индекс рентабельности (PI)

$$PI = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} \div I. \quad (5)$$

$$PI = (2\,290,95 + 1\,893,41 + 1\,564,91 + 1\,293,23) / 5\,340,00 = 1,32$$

3. Внутренняя норма доходности (IRR) (таблица 4).

$$IRR = r_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \times (r_2 - r_1), \quad (6)$$

где r_1 и r_2 – соответственно нижняя и верхняя ставки дисконтирования.

$$IRR = 21 + \frac{1\,702,5}{1\,702,5 - 1\,447,17} \times (23 - 21) = 34,34\% \quad (7)$$

Таблица 4 – Результаты расчета внутренней нормы доходности

Годы осуществления проекта	2026	2027	2028	2029	2030	NPV	IRR
Чистый денежный поток	-5 340,00	2 772,2	2 772,2	2 772,2	2 772,2		
Ставка дисконта r_i							
0%	-5 340,00	2 772,2	2 772,2	2 772,2	2 772,2	5 748,8	
21%	-5 340,00	2 290,95	1 893,41	1 564,91	1 293,23	1 702,5	
23%	-5 340,00	2 253,8	1 832,42	1 489,78	1 211,17	1 447,17	34,34%

Срок окупаемости проекта (PP) составил 2 года, дисконтированный срок окупаемости проекта (DPP) – 3 года.

Результаты расчёта вышеуказанных показателей подтверждают технико-экономическую эффективность использования научно-технических разработок на ООО «ТК «Экотранс».

от ООО «ТК «Экотранс»:

Главный бухгалтер

 Н.П. Матренина

Начальник отдела разработки новой техники

 В.В. Оболонский