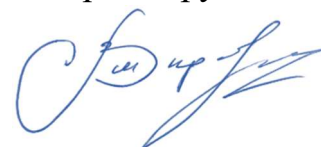


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

На правах рукописи



**Кравченко Владимир Михайлович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА  
ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ В КРОШКУ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ**

Специальность 2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р техн. наук, доц.

Лозовая С.Ю.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ПЕРЕРАБОТКИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ.....	13
1.1 Классификация и технологические свойства резинотехнических отходов как вторичного сырья .....	13
1.2 Характеристика крошки, получаемой при переработке резинотехнических отходов .....	16
1.3 Область использования резиновой крошки после вторичной переработки .....	20
1.4 Сравнительный анализ существующих технологий переработки резинотехнических отходов .....	28
1.5 Анализ конструкций и принципа действия оборудования для переработки резинотехнических отходов .....	35
1.6 Анализ математических описаний процесса получения резиновой крошки в измельчителях для переработки резинотехнических отходов и методик расчета их основных конструктивно-технологических параметров .....	41
1.7 Цель и задачи исследования.....	46
1.8 Выводы по главе.....	47
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА.....	49
2.1 Ряд аспектов кинетики разрушения резины при механическом воздействии для получения крошки.....	49
2.2 Теоретические аспекты математического представления процесса разрушения резинотехнических отходов .....	51
2.3 Применение концептуального подхода к математическому описанию энергетических параметров вертикального измельчителя .....	55
2.4 Определение производительности .....	63
2.5 Выводы по главе.....	67
ГЛАВА 3. МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ.....	69
3.1 Постановка цели и задач экспериментальных исследований .....	69
3.2 Описание экспериментальной установки.....	70

3.3 Описание основных характеристик и технических требований режущих и регулировочного ножей.....	76
3.4 Приборы и оборудование для контроля и регистрации, исследуемых параметров, техника отбора проб.....	79
3.5 Статический анализ вертикального ротора в <i>CAD/ CAE</i> – системе <i>SOLIDWORKS CAD Simulation</i> .....	88
3.6 Выводы по главе.....	96
<b>ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ В КРОШКУ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ .....</b>	<b>97</b>
4.1 Обоснование выбора функций отклика и основных факторов, влияющих на процесс измельчения.....	97
4.2 Исследование влияния основных факторов на процесс переработки резинотехнических отходов в измельчителе вертикального типа.....	101
4.2.1 Исследование изменения процентного содержания фракции 1-3 мм и частиц менее 1 мм в крошке в измельчителе вертикального типа.....	103
4.2.2 Исследование изменения производительности в измельчителе вертикального типа .....	111
4.2.3 Исследование изменения мощности, затрачиваемой на процесс измельчения резинотехнических отходов .....	117
4.3 Определение рациональных параметров процесса получения максимального процентного содержания фракции 1-3 мм в готовом продукте.....	122
4.4 Сравнение экспериментальных и теоретических результатов энергетических параметров .....	129
4.5 Выводы по главе.....	130
<b>ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ .....</b>	<b>134</b>
5.1 Актуальность и постановка проблемы на предприятии .....	134
5.2 Интеграция разработанного вертикального измельчителя для получения резиновой крошки .....	136
5.3 Внедрение результатов работы в учебный процесс .....	138
5.4 Техничко-экономическая эффективность внедрения разработанного измельчителя вертикального типа.....	139
5.5 Выводы по главе.....	142
Список сокращений и условных обозначений.....	146

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	173
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 .....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 .....	186
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	189

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобального экологического кризиса проблема утилизации и переработки резинотехнических отходов приобретает особую значимость для Российской Федерации [1]. Отрицательной особенностью резинотехнических отходов является в их исключительной устойчивости к биологическому разложению, что превращает любые резинотехнические отходы в долговременный источник загрязнения окружающей среды [2].

С 1 января 2019 года в Российской Федерации запрещено действующим полигонам принимать на захоронение все виды резинотехнических отходов (РТО) [3], поэтому проблема их переработки на данный момент приобретает особую актуальность [4]. Однако нормативная база - лишь первый шаг в решении вопроса, требующего комплексного технологического подхода. Накопленный за последние десятилетия объем резинотехнических отходов (превышающий 20 млн тонн) [5] свидетельствует о необходимости ускоренного развития перерабатывающей инфраструктуры.

Развитие перерабатывающих технологий РТО – это не просто экологическая необходимость, а стратегическое направление ресурсосбережения. Современные методы переработки позволяют трансформировать проблему отходов в продукт для вторичного использования. Особенно перспективным направлением [6] является их механическая переработка с целью получения крошки для дальнейшего использования ее в строительной, горнорудной, дорожной, химической и др. видах промышленности [7].

На основании проведенного анализа изделий, изготавливаемых из резиновой крошки, было выявлено, что для вторичного потребления используется крошка с размером 1-3 и 3-5 мм [8, 9]. При получении данной крошки так же имеют место быть частицы размером менее 1 мм, что есть брак, их процентное содержание в готовом продукте не должно превышать более 15% [10, 28].

Резиновая крошка фракцией 3-5 мм чаще всего используется для создания травмобезопасных покрытий, резиновых ковриков, наполнителя боксерских мешков, в качестве мульчи, как демпфирующего слоя под искусственным

травяным покрытием, что значительно улучшает эксплуатационные характеристики спортивных площадок [11, 12] и т.д.

Крошка размером 1-3 мм получила более широкое распространение в различных отраслях. Так в строительстве ввиду эластичных и вибропоглощающих свойств она востребована при производстве высококачественных кровельных покрытий (черепица, коньки и др.), тротуарной плитки [13], шумоизоляционных изделий [14], специализированных изделий (парковочные столбики, бордюры и др.) и т.д. В спортивной индустрии крошка с размером 1-3 мм играет ключевую роль при обустройстве современных спортивных объектов, промышленных полов, добавки в асфальт для велодорожек. Благодаря однородной структуре и размеру частиц, покрытия получается идеально ровным, что особенно важно для беговых дорожек и игровых зон профессионального уровня.

В ходе выполнения диссертационной работы использовались научные труды отечественных и зарубежных ученых, в работах которых отражены проблематика и вопросы совершенствования процесса получения резиновой крошки, таких как: Зубенко Н.А., Гусев А.Д., Дик Джон С., Винтер К., Чапалда Д.И., Попов А.Ю., Хабиров Р.Р., Нейман Л.Р., Беляев З.А., Арнольд В.И., Лозовая С.Ю., Севостьянов В.С. и другие.

Научные работы указанных ученых способствовали расширению знаний о процессе измельчения и получения резиновой крошки механическим способом, влиянии конструктивно-технологических параметров машины на процесс измельчения. Однако, при этом на сегодняшний день недостаточно проработан вопрос стадийного измельчения и повышения качества готового продукта в измельчительном оборудовании.

В настоящее время при переработке резинотехнических отходов используют механический способ измельчения для получения крошки чаще всего в шредерах, валковых дробилках, роторных и шнековых измельчителях и др. Общими недостатками данного оборудования является:

– горизонтальная компоновка, при этом материал контактирует только с 2-3 элементами режущего или разрушающего инструмента, что предполагает увеличение стадийности оборудования в технологической линии [15, 16];

– не обеспечивается необходимое качество измельчения из-за получения крошки более 5 мм и менее 1 мм в готовом продукте до 25%, что является браком. [17, 18, 19, 28].

Как было отмечено выше наиболее часто используется резиновая крошка 1-3 мм, полученная механическим способом. Таким образом, создание измельчительного оборудования, в котором можно получить процентное содержание крошки более 70% фракцией 1-3 мм при наличии частиц менее 1 мм не более, чем 10-12%, является актуальной задачей.

Данные условия можно реализовать в измельчителе, имеющем вертикальный ротор с режущими и регулировочными ножами с переменным количеством зубьев, разделенных шайбами, которые увеличивают рабочую зону. Количество режущих ножей обеспечат число стадий, а количество зубьев и толщина регулировочного ножа увеличит контакты с материалом [20, 21, 22].

**Объектом исследования** является измельчитель вертикального типа для переработки резинотехнических отходов в крошку.

**Предметом исследования** является процесс получения резиновой крошки необходимых размеров и качества в измельчителе вертикального типа.

**Цель работы:** повышение качества переработки резинотехнических отходов в крошку за счет увеличения рабочей зоны и организации стадийности измельчения.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ техники и технологии в области переработки резинотехнических отходов для получения резиновой крошки.
2. Разработать вертикальный измельчитель для вторичной переработки резинотехнических отходов, обеспечивающий более 70% крошки с размером частиц 1-3 мм в готовом продукте.

3. Разработать математическую модель процесса разрушения резины для получения крошки при воздействии на нее рабочего органа.

4. Получить аналитические выражения, описывающие основные энергетические показатели технологического процесса переработки резинотехнических отходов.

5. Определить аналитические зависимости выходных показателей измельчителя от его конструктивно-технологических параметров.

6. Спроектировать и изготовить экспериментальную установку измельчителя резинотехнических отходов вертикального типа, разработать методику и провести экспериментальные исследования.

7. Получить уравнения регрессии, определяющие зависимости выходных показателей измельчителя: процентное содержание частиц 1–3 мм и менее 1 мм в крошке, производительность и мощность, затрачиваемую на измельчение. Определить рациональные режимы работы экспериментальной установки.

8. Разработать рекомендации по внедрению полученных результатов в производственных условиях и образовательном процессе.

#### **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** заключается в получении:

– результатов теоретических исследований процессов переработки резинотехнических отходов в крошку в измельчителе вертикального типа;

– математической модели, описывающей процесс деформации и разрушения резинотехнического материала при воздействии вертикально расположенного рабочего органа с учетом различных физико-механических характеристик материала;

– аналитических выражений для определения энергетических параметров измельчителя при изменении физико-механических характеристик материала и конструктивно-технологических параметров ротора;

– теоретической зависимости производительности от конструктивно-технологических и геометрических параметров измельчителя;

– уравнений регрессии, определяющих зависимость выходных показателей измельчителя: процентного содержания фракции 1–3 мм в готовом продукте, частиц менее 1 мм в крошке, производительности, а также мощности, затрачиваемой на измельчение, от варьируемых конструктивно-технологических параметров разработанного измельчителя.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

– разработаны математические выражения, позволяющие определить основные конструктивно-технологические параметры измельчителя, а также установлены закономерности из изменения для обеспечения рациональных режимов его работы;

– на основании проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований разработана конструкция патентно защищенного измельчителя вертикального типа для переработки резинотехнических отходов. Данная конструкция позволяет получить более 70% резиновой крошки с частицами 1-3 мм в готовом продукте, за счет обеспечения стадийности измельчения, увеличения рабочей зоны и повышения количества контактов зубьев ножей с материалом;

– проведены опытно-промышленные испытания разработанного измельчителя вертикального типа для получения резиновой крошки на предприятии ОАО «Машиностроитель» (с. Ливенка, Белгородская обл.);

– результаты работы используются в образовательном процессе кафедры «Механическое оборудование» ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке кадров по направлениям 15.03.02 – «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов», 15.04.02 – «Технологические машины и оборудование» и 15.05.01 – «Проектирование технологических машин и комплексов».

### **Методы исследования.**

В диссертационной работе использовались общепринятые для технических наук теоретические (идеализация, формализация), экспериментальные (наблюдение, эксперимент, сравнение) и специальные (математическое и физическое моделирование) методы исследований.

### **Автор защищает следующие положения, выносимые на защиту:**

1. Математическую модель, описывающую процесс деформации и разрушения резинового материала, под воздействием вертикально расположенного рабочего органа, при различных физико-механических характеристиках материала.

2. Аналитические выражения для определения производительности и энергетических параметров измельчителя вертикального типа при изменении физико-механических характеристик материала и конструктивно-технологических параметров ротора.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, определяющих изменение производительности; мощности, затрачиваемой на измельчения, процентное содержания фракции 1-3 мм в готовом продукте, а также частиц менее 1 мм в крошке в зависимости от конструктивно-технологических параметров разработанного устройства.

4. Конструкцию измельчителя вертикального типа для переработки резинотехнических отходов, подтвержденную патентом РФ на полезную модель.

**Достоверность** научных положений и выводов диссертационной работы соответствует предъявляемым требованиям, основана на использовании контрольно-измерительной, вычислительной аппаратуры высокого класса

точности, основополагающих принципов и законов, подтверждена высоким показателем соответствия теоретических расчетов с результатами экспериментальных данных и положительной промышленной апробацией результатов исследований.

### **Апробация работы.**

Диссертационная работа выполнялась в БГТУ им. В.Г. Шухова в рамках научно-исследовательской работы (договор № 17633ГУ/2022 от 05.05.2022 «Разработка двухстадийного измельчителя для переработки техногенных отходов и вторичного сырья») и стала победителем в научно-инновационном конкурсе «УМНИК» – 2021 при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (г. Белгород). Результаты диссертационной работы рассмотрены и одобрены на расширенном заседании кафедры механического оборудования БГТУ им. В.Г. Шухова.

Основные результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях: International Scientific and Technical Conference «Practice oriented science: UAE – RUSSIA – INDIA» 2024 г. (г. ОАЭ), «Russian engineering research: Moscow» 2022 г. (г. Москва), Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова 2022, 2023, 2024 гг. (г. Белгород), Международной научно-технической конференции молодых ученых «Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов» 2022, 2023 гг. (г. Белгород), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс» 2020 г. (г. Губкин), Национальной конференции «Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии» 2023 г. (г. Белгород).

### **Публикации.**

По результатам работы опубликовано 17 статей, в том числе 3 в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, 1 в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень Scopus, 13 статей в научных журналах, индексируемых в РИНЦ. Получено 3 патента РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы:** Работа выполнена на 189 стр., содержит 5 глав, 67 рисунков, 15 таблиц, 119 формул, 146 источников использованной литературы, 6 приложений на 19 стр.

# **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ПЕРЕРАБОТКИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ**

## **1.1 Классификация и технологические свойства резинотехнических отходов как вторичного сырья**

Эффективность процесса переработки резинотехнических отходов и качество получаемой на выходе резиновой крошки напрямую зависят от состава, происхождения и физико-механических свойств исходного сырья. Резина представляет собой продукт вулканизации каучука – высокомолекулярного эластомера, способного к большим обратимым деформациям. Основное отличие резины от других полимерных материалов заключается в способности к высокоэластическим деформациям в широком интервале температур, включающем комнатную и более низкие температуры. В процессе вулканизации макромолекулы каучука соединяются поперечными химическими связями, образуя пространственную вулканизационную сетку, что существенно снижает долю необратимых пластических деформаций и повышает прочностные свойства материала [23].

Техническая резина является композиционным материалом, который может содержать до 15–20 веществ. Помимо каучука, в состав резиновых смесей входят вулканизирующие вещества (сера, оксиды металлов), ускорители вулканизации, наполнители (технический углерод, мел, каолин), мягчители, противостарители и другие компоненты. Наполнители, особенно активные (технический углерод), существенно влияют на механические характеристики резины.

По происхождению каучука резины подразделяются на основе натурального каучука (НК), получаемого из латекса каучуконосных растений, и синтетических каучуков (СК), производимых методом полимеризации из низкомолекулярных мономеров. По назначению резины делятся на две основные группы: общего назначения и специального назначения [24].

Резины общего назначения изготавливаются из неполярных каучуков – натурального, изопреновых, бутадиен-стирольных, бутадиеновых. Они эксплуатируются в интервале температур от -50 до 130-150 °С и работают в среде воды, воздуха, слабых растворов кислот и щелочей. Из этих резин производят шины, конвейерные ленты, рукава, ремни и различные резинотехнические изделия.

Резины специального назначения предназначены для эксплуатации в условиях, требующих особых свойств [24]:

- теплостойкие – на основе этилен-пропиленовых и кремнийорганических каучуков для длительной работы при 150-200 °С ;
- морозостойкие – на основе каучуков с низкой температурой стеклования (бутадиеновые, кремнийорганические), работоспособны при температурах ниже -50 °С, отдельные типы до -150 °С;
- масло- и бензостойкие – на основе бутадиен-нитрильных, хлоропреновых, полисульфидных каучуков;
- кислотощелочестойкие, озоностойкие – на основе бутилкаучука, хлоропреновых, фторсодержащих каучуков.

Механические свойства резин характеризуются комплексом показателей, среди которых основными являются прочностные и деформационные характеристики.

Прочность при растяжении резин на основе натурального каучука составляет 20-30 МПа для наполненных сажей композиций, у резин на основе синтетических каучуков этот показатель ниже от 10 до 20 МПа [25]. Относительное удлинение при разрыве для мягких резин из натурального каучука достигает 600-850 %, для синтетических каучуков 400-700 % [24].

Твердость резин по Шору А измеряется в единицах от 20 до 85 и более. По твердости резины разделяют на мягкие, жесткие и твердые. В зависимости от назначения изделий твердость может варьироваться в широких пределах. Например, в производстве уплотнителей выделяют подгруппы твердости 45-55 и 56-75 единиц Шор А.

Эластичность по отскоку – важнейший показатель, характеризующий способность резины восстанавливать форму после деформации. Для резин на основе натурального каучука эластичность по отскоку составляет 40-55 %, на основе бутадиен-стирольного каучука 35-46 %, на основе бутилкаучука 20-25 % (табл. 1).

Износостойкость резины определяется энергией, затраченной на истирание единицы объема материала, и характеризуется коэффициентом истираемости. Для различных типов резин этот показатель варьируется от 170 до 450 см<sup>3</sup>/(кВт·ч).

Таблица 1.1

Физико-механические свойства резин на основе различных каучуков

Тип каучука	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Шору А, ед.	Эластичность по отскоку, %	Температура стеклования, °С
Натуральный (НК)	20–30	600–850	60–75	40–55	-70
Синтетический изопреновый (СКИ)	18–25	600–800	60–70	37–51	-70
Бутадиеновый стереорегулярный (СКД)	10–15	400–600	55–65	45–50	-95–100
Бутадиен-стирольный (СКС)	15–20	500–650	50–60	35–45	-55–60
Бутилкаучук (БК)	12–18	400–800	60–80	15–25	-70
Этиленпропиленовый (СКЭП)	15–20	350–500	40–65	50–60	-60
Бутадиеннитрильный (СКН)	18–25	450–650	65–75	25–35	-30–40
Хлоропреновый	15–20	450–700	55–65	30–40	-45

Натуральный каучук и синтетический изопреновый каучук близки по свойствам и характеризуются высокими прочностными показателями и эластичностью [25]. Бутадиеновый каучук обладает наиболее низкой температурой стеклования, что обеспечивает высокую морозостойкость, но его прочность без наполнения невелика. Бутадиен-стирольный каучук является наиболее распространенным каучуком общего назначения. Бутилкаучук

отличается низкой эластичностью по отскоку, но высокой газонепроницаемостью. Бутадиен-нитрильные каучуки характеризуются маслостойкостью, но имеют повышенную температуру стеклования.

Для процесса измельчения значение имеют твердость и эластичность резины. Резины высокой твердости (более 70 ед. Шор А) разрушаются с образованием частиц более правильной формы. Высокоэластичные резины требуют больше энергозатрат при измельчении. Резины на основе бутадиен-стирольных каучуков, занимающие наибольший объем в производстве шин, характеризуются средними показателями твердости и эластичности.

## **1.2 Характеристика крошки, получаемой при переработке резинотехнических отходов**

Резиновая крошка – это основной и конечный продукт переработки резинотехнических отходов, представляющий собой сыпучий гранулированный материал, как правило, черного цвета, без каких-либо видимых примесей. Основным источником сырья для ее производства служат отходы резинотехнической промышленности, в том числе автомобильные покрышки, камеры, компоненты спортивных покрытий, резиновые коврики, конвейерные ленты и др.

Благодаря своим уникальным характеристикам резиновая крошка, получаемая из вторичного сырья, нашла широкое применение в строительстве, сельском хозяйстве, в быту и в различных отраслях промышленности [7, 26].

Резинотехнические отходы охватывают широкий спектр продукции, используемой в разных сферах деятельности. Независимо от способа изготовления и применения, все резинотехнические изделия объединяет наличие в составе эластичного и водоотталкивающего эластомера – каучука, который в процессе вулканизации превращается в резину [27]. Так же резинотехнические отходы являются одним из наиболее распространенных и проблемных видов сырья для технологии вторичной переработки, хотя после измельчения в крошку материал во многом сохраняет свои исходные полезные свойства. Качество

исходных резинотехнических отходов, используемых для производства крошки, должно отвечать определенным требованиям [28].

Изношенные резинотехнические изделия относятся к 4-му классу опасности из 5-ти для окружающей среды и подлежат обязательной утилизации. Однако нужно учитывать, что основная масса резинотехнических отходов, требующих утилизации и переработки, представляет собой сложные композитные материалы.

При традиционной механической переработке резинотехнических отходов получают следующие компоненты [31, 32]:

- резиновые чипсы, которые в дальнейшем перерабатываются в резиновую крошку (рис. 1.1);
- резиновую крошку кубовидной формы (рис. 1.2);
- резиновую крошку рваной формы (рис. 1.3);
- резиновую крошку по форме «елочная игла»; (рис. 1.4)

Необходимо отметить, что для получения чистой резиновой крошки высокого качества необходимо использовать резину без содержания каких-либо посторонних включений (металлического корда и текстильных волокон), такая резина чаще всего подвергается измельчению, так как это упрощает процесс переработки и обеспечивает более высокий выход готового продукта [29, 30].



Рисунок 1.1 Резиновые чипсы

По типу формы резиновая крошка делится на три основных вида:

1. Кубовидная крошка (рис. 1.2) – это гранулы резины правильной рубленой формы. Такую форму обычно получают методом дробления в шредерах,

на ножевых грануляторах или ножевых дробилках [35, 82, 84]. Угол заточки ножей в этих устройствах составляет менее  $90^\circ$ .

Преимущество кубовидной крошки заключается в том, что при изготовлении изделий из нее требуется значительно меньше связующего по сравнению с гранулами рваной формы того же размера. Это позволяет снизить себестоимость изделия до 30 %. Такой эффект достигается благодаря меньшей удельной поверхности частиц кубовидной формы, что уменьшает расход связующего материала по сравнению с частицами рваной формы аналогичного размера [9, 10].



Рисунок 1.2 Кубовидная крошка

Покрyтия, изготовленные из кубовидной крошки, обладают повышенной прочностью и жесткостью, это связано с тем, что кубовидная форма гранул обеспечивает более плотную упаковку частиц, что приводит к уменьшению количества микропустот в структуре материала [36]. В результате чего материал становится более устойчивым к механическим нагрузкам и деформациям, сохраняя при этом свои эксплуатационные характеристики на высоком уровне.

2. Крошка рваной сложной формы (рис. 1.3), это тип крошки с неоднородной и неравномерной формой частиц. Материал характеризуется нерегулярными и неоднородными контурами, неровными поверхностями и различными размерами частиц [37].

Рваная крошка активно применяется при изготовлении мастик, различных битумных соединений и смесей, красок, в качестве модификатора для добавления в асфальт и регенерата, но в основном ее используют для изготовления бесшовных покрытий и плитки, так как характеристики материала делают его необходимым для использования в местах, где требуется хорошая амортизация, упругость и износостойкость [38, 39].



Рисунок 1.3 Крошка рванной сложной формы

Данная крошка изготавливается комбинированным методом истирания в сочетании с резкой в измельчительных устройствах. Однако себестоимость готовых изделий будет выше, чем при использовании крошки кубовидной формы и при использовании такой фракции в производстве очень сложно добиться цветового однообразия партии.

3. Крошка, имеющая название «стружка» или «елочная игла» (рис. 1.4) получается методом шероховки шин или с помощью использования инструмента типа шарошки. Для этого покрышка фиксируется в специальном посадочном патроне и вращается со средней скоростью 30 оборотов в минуту, а к вращающейся покрышке подводится режущая коронка, которая вращается в противоположном направлении со скоростью 2500 об/мин и срезает гранулы вытянутой формы.

Главное достоинство крошки в форме «елочная игла» заключается в том, что покрытия, изготовленные методом холодного или горячего формования,

получаются более прочными по сравнению с покрытиями из кубических или рваных гранул. Это обеспечивается тем, что вытянутые частицы резины накладываются друг на друга, создавая более плотную и устойчивую структуру.



Рисунок 1.4 Крошка по форме «елочная игла» [39]

Эта форма гранул улучшает адгезию (сцепление) частиц при склеивании, что делает покрытия более долговечными и устойчивыми к механическим нагрузкам [40].

### **1.3 Область использования резиновой крошки после вторичной переработки**

Область применения резиновой крошки зависит от ее размера, формы и других характеристик, что должно соответствовать технологическим условиям в области ее применения:

1) **Бесшовные резиновые покрытия (рис. 1.5).** Данные резиновые покрытие могут иметь различные назначения и разные рецептуры:

- поверхность детских игровых площадок;
- покрытие для открытых спортивных площадок;
- покрытие для беговых дорожек;
- теннисные корты и другие объекты для различных видов спорта;
- обустройств пешеходных зон, как антискользящие покрытия тротуаров, входов, лестниц и др.

Основным размером фракции резиновой крошки для бесшовных покрытий являются 1–3 мм и 3–5 мм. Выбор фракции зависит от требуемых характеристик

поверхности. Основной формой резиновой крошки для таких покрытий является рубленая гранула правильной формы без резиновой пыли и текстиля [41].



Рисунок 1.5 Резиновые бесшовные покрытия

Если использовать для создания бесшовного покрытия только крупные фракции, например, 5–8 мм, качество покрытия ухудшится. Это связано с тем, что площадь соприкосновения между частицами будет меньше, чем у ходовой фракции 2–5 мм. Однако допустимо незначительное включение более крупной крошки размером до 6 мм в общую фракцию.

При использовании гранул рваной формы размером 1–5 мм покрытие получается более мягким, что может быть преимуществом в зависимости от назначения. Однако они менее устойчивы к разрушающим нагрузкам, медленнее пропускают воду и больше задерживают ее внутри из-за большого количества микропор и полостей. Однако монтаж таких покрытий имеет сезонный характер и обычно проводится в теплое время года под открытым небом. Однако существуют технологии и рецептуры, позволяющие производить такие покрытия в условиях цеха по индивидуальным размерам, такие покрытия иногда называют ковровыми [42].

2) Плиточные изделия (маты, сегменты, коврики, брусчатка, тротуарная плитка и т. д.) часто изготавливаются из гранул фракции 2–7 мм (рис. 1.6). Обычно они производятся двуслойными. Нижний слой которых составляет до 70–80 % от общей толщины изделия и производят его из чипсов, которые дешевле в

изготовлении. Максимальный размер чипсов может достигать 15 мм. Верхний слой как правило изготавливают из цветной крошки размером 1–5 мм.

В отличие от бесшовных покрытий, плиточные покрытия изготавливаются методом формования на прессе при значительном сжатии общей массы крошки, поэтому их прочность увеличивается [43].



Рисунок 1.6 Резиновые плиточные изделия

Плиточные или блочные покрытия (рис. 1.7) с крупной гранулой в нижнем слое являются более прочными, так как в нижних слоях используют вкладыши из цельных кусков резины, например, резиновых полос и чипсов. Существует множество видов блочных покрытий, изготовленных методом формования [44]:

- резиновые бордюры;
- искусственные неровности;
- защитные резиновые пластины;
- другие элементы стоянок и парковок транспорта [44].



Рисунок 1.7 Блочные изделия

3) Для засыпки искусственной травы (рис. 1.8) используют черную и цветную резиновую крошку с частицами от 1 до 5 мм, но более целесообразно использовать размер гранул 1–3 мм. Они отлично пропускают воду, обеспечивают хороший отскок мяча, делают покрытие более упругим и травмобезопасным для спортсмена. Крупные фракции недостаточно хорошо держат волокна травы в вертикальном положении, при эксплуатации быстро перераспределяются, что приводит к необходимости частого «расчесывания» газона для восстановления слоя наполнителя [46].

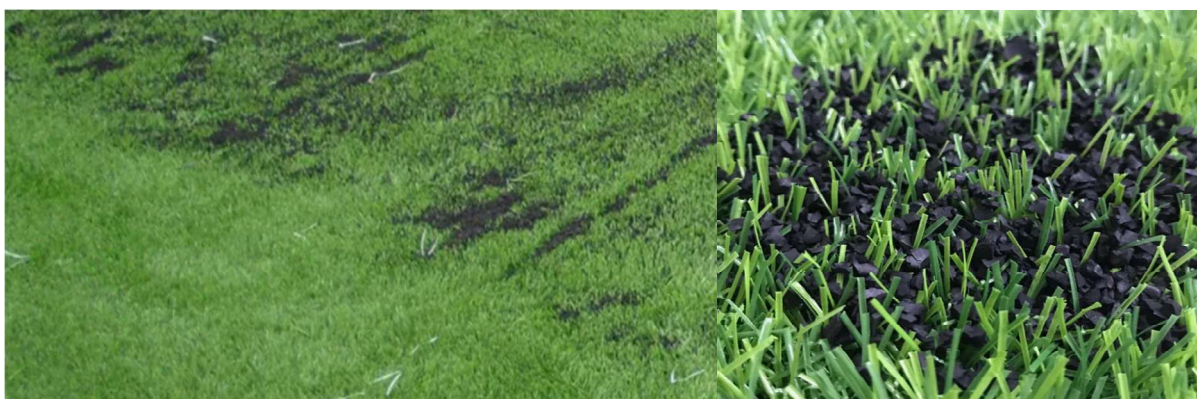


Рисунок 1.8 Покрытие искусственная трава [46]

4) Резиновая крошка для производства шумоизоляционных материалов, предназначенных для снижения структурного и ударного шума. Благодаря своим демпфирующим свойствам, она широко применяется при изготовлении резиновых стеновых и напольных покрытий (рис. 1.12), используемых в качестве дополнительной виброакустической изоляции в гражданском и промышленном строительстве.

Проникновение посторонних звуков в смежные помещения происходит преимущественно через межэтажные перекрытия. Это обусловлено прямым воздействием динамических и статических нагрузок на конструкцию пола при перемещении людей, перестановке мебели или эксплуатации оборудования. Для эффективного гашения вибраций и ударного шума применяются мягкие демпфирующие материалы на основе эластомеров. В частности, резиновые подложки и маты, изготовленные из крошки фракцией 1–3 мм, обладают

высокими показателями звукопоглощения и снижения ударного шума благодаря способности материала рассеивать механическую энергию [47].

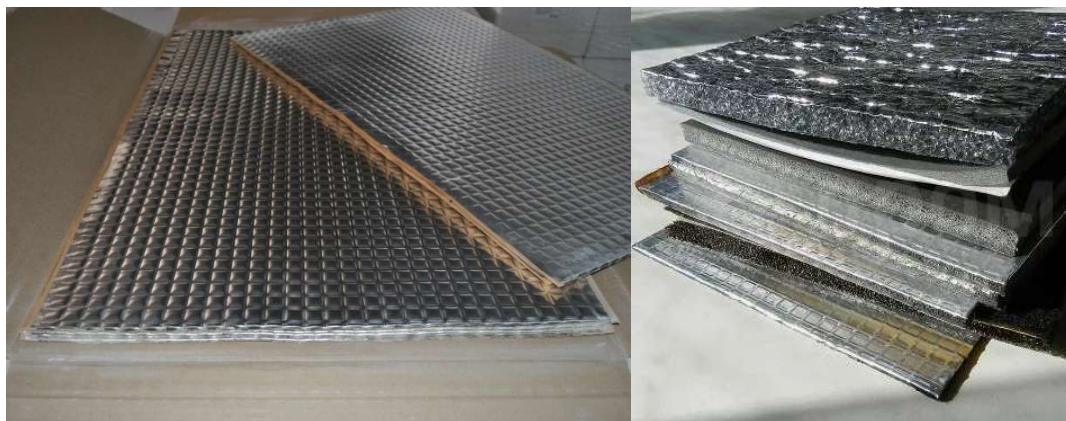


Рисунок 1.9 Резиновая шумоизоляция

5) Использование резинового гранулята при создании надежных кровельных покрытий (рис. 1.13) на основе резиновой крошки. Данные покрытия обладают высокой гидроизоляцией, долговечностью, эластичностью, ремонтпригодностью, высоким шумопоглощением и экологичностью [48].



Рисунок 1.10 Резиновая кровля [48]

Виды кровельных материалов из резиновой крошки:

- резиновая черепица – имитирует классическую черепицу, но обладает гибкостью и простым монтажом;
- волнистые листы (аналог шифера) – легкие, ударопрочные, подходят для скатных крыш;
- наливная (бесшовная) кровля – наносится методом напыления или налива, идеальна для плоских крыш и сложных форм.

Для изготовления кровельных покрытий используется резиновая крошка фракцией 1–3 мм, связанная полиуретановыми или битумными составами в который добавляются модификаторы для повышения устойчивости к огню, УФ-лучам и механическим нагрузкам. Данные покрытия особенно востребованы в промышленном и гражданском строительстве, а также при ремонте крыш [49].

б) Резиновая крошка менее 1 мм (рис. 1.9) зачастую используют как добавку в верхние слои асфальтового покрытия, что представляет собой перспективное направление использования данного материала.



Рисунок 1.11 Резиновая крошка в верхних слоях асфальта [50]

Существуют различные методы внедрения частиц резиновой крошки в структуру связующего битума. Размер фракции крошки, используемой в этих целях, обычно не превышает 1 мм. Некоторые технологии предусматривают использование исключительно частиц с размером до 0,6 мм [50, 51].

Основными потребителями резиновой крошки с размером частиц менее 1 мм являются организации, занимающиеся строительством дорог с резинобитумным покрытием. Эффективность таких покрытий подтверждается более чем десятилетним опытом их использования, однако они пока не получили широкого распространения по ряду причин.

Одной из ключевых причин является то, что при полном измельчении резинотехнических отходов крошка с размером частиц до 1 мм обычно образуется как побочный продукт (брак) при производстве основных фракций с размером частиц 1–5 мм. В зависимости от настроек оборудования и технологии

измельчения, доля такой пыли составляет от 5 % до 20 % от общей массы крошки на выходе [52, 53]. Получение такой крошки в полном объеме измельченной массы очень энергозатратный процесс, около 400 кВт·ч / т.

7) Резиновая крошка может быть переработана в регенерат резины (рис. 1.11) с использованием различных технологий переработки средних и мелких фракций. В процессе переработки она переходит из эластичного состояния в пластичное, полученная резиновая смесь используется в качестве добавки или полуфабриката для производства резиновых смесей в различных рецептурах [54, 55]. Оборудование для производства регенерата резины обычно стоит гораздо дороже, чем линия по механической переработке шин той же мощности и требует значительных производственных площадей.



Рисунок 1.12 Регенерат резины

8) В последнее время активно проводятся исследования по использованию резиновой крошки в смеси с другими компонентами в качестве сорбента для очистки поверхности воды от нефти и нефтепродуктов. Они уже доказали свою эффективность в борьбе с экологическими загрязнениями. Резиновая крошка, благодаря своей пористой структуре и гидрофобным свойствам, способна поглощать нефтепродукты, что делает ее полезным материалом для ликвидации разливов нефти [56, 57].

Преимущества использования резиновой крошки в качестве сорбента:

– экологичность – материал производится из переработанных резинотехнических изделий, что способствует утилизации отходов;

- доступность – крошка является относительно недорогим материалом;
- простота применения – сорбент можно легко распределить по поверхности воды и собрать после использования.

9) Битумно-резиновые мастики (рис. 10) – это многофункциональный материал, который широко используется в различных областях строительства и ремонта, включая [58, 59]:

- гидроизоляцию (защита от влаги и протечек);
- кровельные работы (создание долговечных и эластичных покрытий);
- антикоррозийную защиту (предотвращение разрушения металлических конструкций).



Рисунок 1.13 Резиновая крошка в битумных мастиках [60]

В состав таких мастик входят следующие компоненты:

- нефтяной битум – основа материала, обеспечивающая гидроизоляционные свойства и адгезию к поверхности;
- наполнитель из резиновой крошки (до 1 мм) – придает мастике эластичность, упругость и устойчивость к деформациям;
- антисептик – защищает материал от биологических воздействий, таких как плесень, грибок и бактерии;
- растворитель – обеспечивает необходимую консистенцию для удобного нанесения.

Благодаря данному составу битумно-резиновые мастики обладают высокой долговечностью, устойчивостью к перепадам температур и механическим нагрузкам, что обеспечивает их использование в строительстве и ремонте [60].

10) Другие сферы применения. Производство нащпальных прокладок. Их можно изготовить из регенерата и резиновой смеси или методом горячего формования с применением полиуретанового связующего (как маты и брусчатка), производство подошв обуви, резиновых сапог – это из области производства из крошки регенерата, а затем производство резиновой смеси по определенной рецептуре и формование готового изделия-товара и т.д.

#### 1.4 Сравнительный анализ существующих технологий переработки резинотехнических отходов

Существует различные методы переработки резинотехнических отходов и изношенных шин для получения крошки или порошка для вторичного применения в различных изделиях. Переработка резинотехнических отходов может происходить при различных температурах, с использованием различных техник измельчения, таких как взрыв, истирание, раздавливание, разрезание и др (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 Схема способов измельчения

При переработке шин критически важны следующие факторы: скорость переработки (эффективность производственной линии), потребление энергии и ресурсов (экономичность установки), качество конечного продукта и экологические параметры оборудования [61, 62].

Одной из технологий переработки резинотехнических изделий является **пиролиз** (рис. 1.15) – это процесс высокотемпературного разложения органических соединений при нагревании в среде с ограниченным количеством кислорода, в вакууме или в атмосфере водорода, как с использованием катализаторов, так и без них [63].

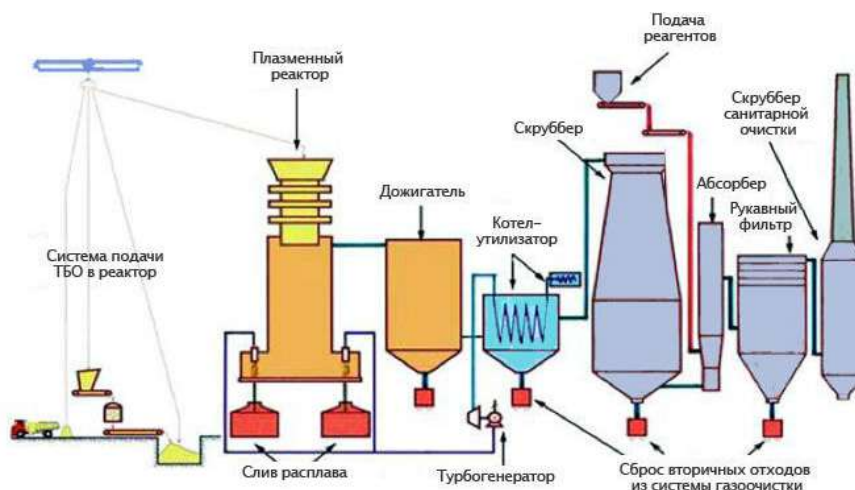


Рисунок 1.15 Технологический комплекс пиролиза резинотехнических изделий

Пиролиз резинотехнических отходов может быть реализован различными способами, включая применение электромагнитного СВЧ-излучения в реакторах как периодического, так и непрерывного действия (например, во вращающемся трубчатом реакторе или при сжигании в вихревой топке). Процесс может проводиться при различных температурных режимах – низких, средних и высоких. В результате пиролиза образуются газообразные, жидкие и твердые продукты, соотношение которых зависит от условий проведения процесса [64, 65].

Главным недостатком пиролиза является то, что в зависимости от его типа в атмосферу могут выделяться продукты сгорания, такие как соединения серы, оксид азота, оксид и диоксид углерода, а также сажа. Конечные продукты

пиролиза также содержат бензапирен, который является крайне опасным веществом и представляет угрозу для здоровья человека и окружающей среды. Это создает необходимость в серьезной очистке выбросов органических токсичных веществ. Кроме того, дорогостоящий и дефицитный каучук, содержащийся в шинах, не используется в полной мере, что приводит к тому, что затраты не окупаются стоимостью получаемых материалов.

В производстве также используется регенерат резины (рис. 1.16), однако в последнее время наблюдается значительное сокращение его производств и использование за счет замены каучука [66, 67].

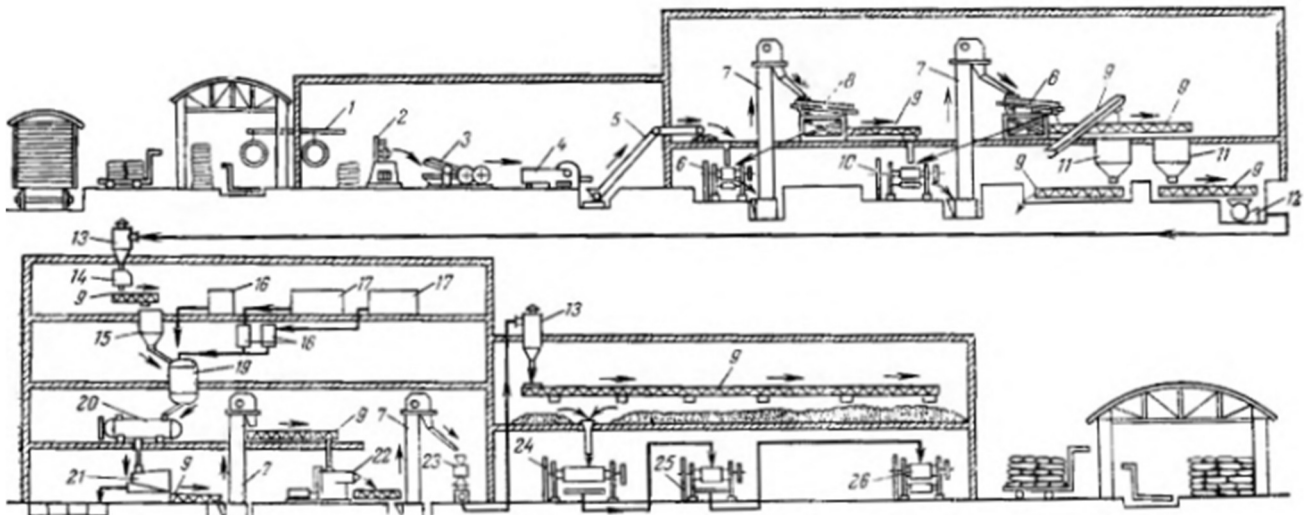


Рисунок 1.16 Технологическая линия регенерации резинотехнических отходов:  
 1- подвесной конвейер; 2- борторезка; 3- механические ножницы; 4- шинорез; 5- наклонный транспортер; 6- дробильные вальцы; 7- элеватор; 8- вибрационное сито; 9- шнеки;  
 10- размольные вальцы; 11- бункер; 12- вентилятор; 13- циклон; 14- автоматические весы;  
 15- дозировочный бункер; 16- бак для подогрева воды; 17- бак для мягчителей; 18- мерники;  
 19- вертикальный автоклав; 20- промывочный сборник; 21- конусный сетчатый барабан;  
 22- пресс-шнек; 23- рыхлитель с дозатором; 24- регенерато-смесительные вальцы;  
 25- подогревательные вальцы; 26- выпускные рафинировочные вальцы

Широко распространен метод **криогенного измельчения** (рис. 1.17), который основан на охлаждении материала до экстремально низких температур с последующим измельчением при помощи небольшого механического воздействия в различных типах соответствующих устройств.

Разрушение материала происходит как на поверхности, так и в объеме, благодаря существующим микродефектам, которые в условиях хрупкости становятся точками разрушения [68].

В качестве хладагента используется жидкий азот, обеспечивающий быстрое охлаждение резиновых смесей до температуры хрупкости от  $-80$  до  $-90^{\circ}\text{C}$ , при этом из-за потерь тепла на практике резиновые смеси охлаждают до  $-120^{\circ}\text{C}$ , что снижает энергозатраты на разрушение в 2–2,5 раза.

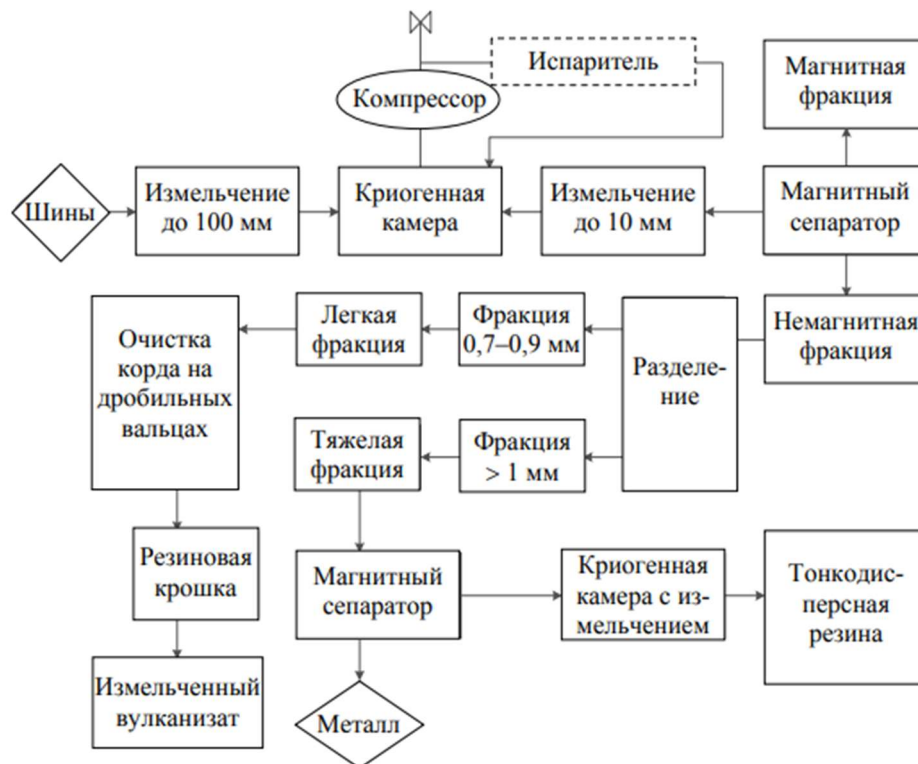


Рисунок 1.17 Схема криогенного измельчения

Криогенный метод обладает рядом преимуществ: экологичность, высокая производительность, значительное (в 1,5–2,5 раза) снижение энергопотребления при дроблении по сравнению с обычными температурами, меньшая пожаро и взрывоопасность, исключение окисления резиновой крошки, возможность получения крошки мелкого помола (менее 150 мкм), а также инертная среда, предотвращающая окислительные процессы [69, 70].

Но этот метод имеет ряд существенных ограничений, это сложность и высокая стоимость систем охлаждения, значительные затраты на хладагент и эксплуатацию. Получаемый порошок отличается гладкой поверхностью, что

требует дополнительной обработки для улучшения совместимости с другими эластомерами, увеличивая энергопотребление на 100 – 400 кВт ч/т.

**Бародеструкционная** технология (рис. 1.18) заключается в помещении кусков шин в рабочую камеру, где под воздействием высокого давления и температуры резина псевдоожигается, при этом резина и текстильный корд отделяются от металлокорда и выходят через фильеры камеры в форме первичных резиноканевых жгутов размером от 20 до 80 мм. Около 90% металлокорда, оставшегося в камере, извлекается в виде спрессованного брикета. Полученные жгуты затем подвергаются дальнейшей обработке: дроблению в роторно-ножевой дробилке и экструдере-измельчителе до частиц резины размером не более 10 мм и 3 мм, соответственно. Происходит отделение текстильного корда в кордоотделителях и остатков металлокорда в магнитных сепараторах, после чего материал разделяется на фракции и упаковывается [71, 72].



Рисунок 1.18 Схема бародеструкционного метода

Недостатком данной технологической линии является существенные загрязнения резиной получаемого металлического корда, что затрудняет его дальнейшее использование, даже как лома черного металла, при этом в результате

такой переработки получают только одно сырье к использованию – резиновую крошку. В связи с этим понадобятся дополнительные расходы на размещение отходов металлокорда и дальнейшее доведение крошки до состояния востребованной продукции [73].

В РФ наиболее распространенным методом переработки изношенных шин и резинотехнических отходов есть **механическое измельчение** (рис. 1.19) с получением крошки [74].

Механическое измельчение резины – это процесс, при котором резиновые изделия подвергаются переработке для получения чипсов, крошки или порошка. Этот метод широко используется для переработки изношенных шин, резинотехнических изделий и резиновых отходов [75].

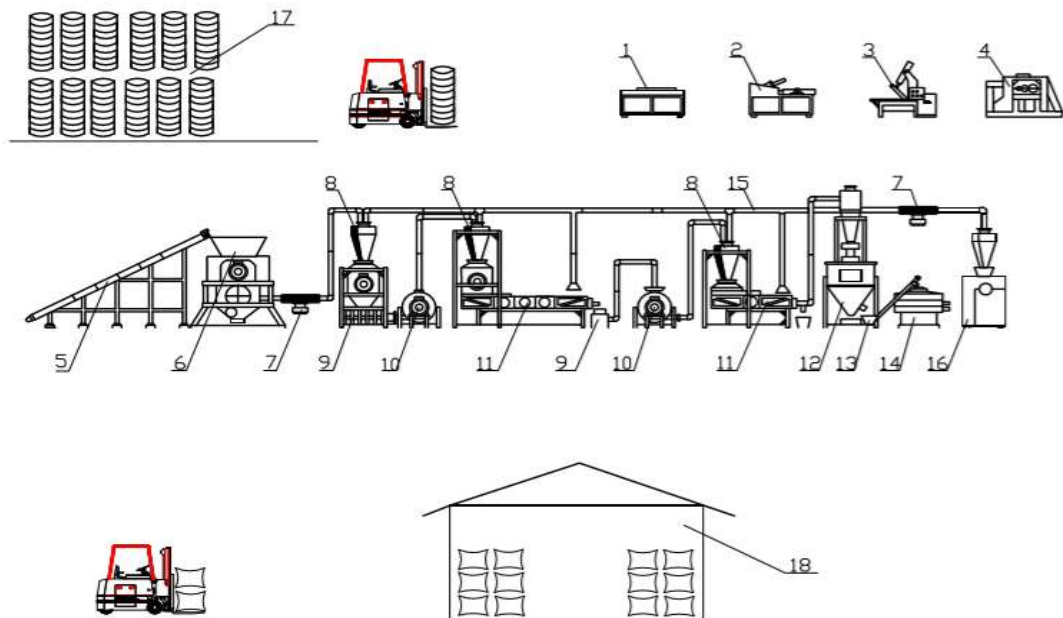


Рисунок 1.19 Схема оборудования технологического комплекса по производству резиновой крошки механическим способом:

- 1 - гидравлический станок; 2 - надрыватель корда; 3 - гидравлические ножницы;  
 4 - станок вторичной разделки; 5 - конвейер ленточный; 6 - шредер; 7 - вентилятор;  
 8 - циклон сборник; 9 - магнитный сепаратор; 10 - дробилка роторная;  
 11 - вибростол; 12 - текстильный сепаратор; 13 - конвейер винтовой; 14 - вибросито;  
 15 - пневмотрасса; 16 - пылевой циклон; 17 - склад шин; 18 - склад готовой продукции

Процесс механического измельчения резины включает несколько этапов:

1. Предварительная подготовка. На этом этапе резиновые изделия могут быть предварительно разрезаны на более мелкие куски для удобства дальнейшей

обработки. Это может включать удаление металлических и текстильных компонентов, если они присутствуют.

2. Измельчение. Куски резины подаются в измельчительные агрегаты, где они подвергаются механическому воздействию, в результате чего происходит уменьшение размеров.

3. Сепарация. На этом этапе происходит разделение полученной массы на компоненты: резиновая крошка, металлический корд, текстильное волокно и другие возможные примеси. Для этого могут использоваться различные методы, включая магнитные сепараторы для удаления металлических частиц, воздушные сепараторы для разделения по весу и размерам, а также ситовые установки для классификации резиновой крошки по размеру частиц.

4. Доработка. В зависимости от требований к конечному продукту, резиновая крошка может подвергаться дополнительной обработке, например, просеиванию или классификации по размерам частиц. Это позволяет получить продукт с заданными характеристиками, соответствующими требованиям конкретных отраслей и производителей.

Механическое измельчение резиновых изделий позволяет эффективно их перерабатывать в резиновую крошку для производства новых изделий. Полученная резиновая крошка может использоваться в различных отраслях, включая строительство, производство спортивных покрытий, дорожных материалов, изделий для ландшафтного дизайна и т.д. [58, 59, 76, 77, 78].

Преимущества механического измельчения резины:

- возможность переработки больших объемов резинотехнических отходов;
- получение продукта с заданными характеристиками;
- снижение экологического воздействия за счет уменьшения количества отходов, отправляемых на свалку;
- создание новых материалов и продуктов из переработанной резины, что способствует устойчивому развитию и экономии ресурсов.

## 1.5 Анализ конструкций и принципа действия оборудования для переработки резинотехнических отходов

**Одновальный шредер** (рис. 1.20) оснащен одним массивным горизонтальным ротором, на котором жестко закреплены режущие диски (как правило, из высоколегированной стали) [18]. Резиновые изделия (целые или предварительно разрезанные шины) загружаются через подающий бункер в камеру дробления. Ротор вращается с относительно низкой скоростью, но с высоким крутящим моментом. Режущие диски захватывают материал и принудительно продавливают его через калибровочное сито, установленное в нижней части камеры. Именно размер и форма ячеек этого сита определяют конечную фракцию выходящего продукта. Для получения фракции ~10 мм требуется сито с соответствующими отверстиями [79].

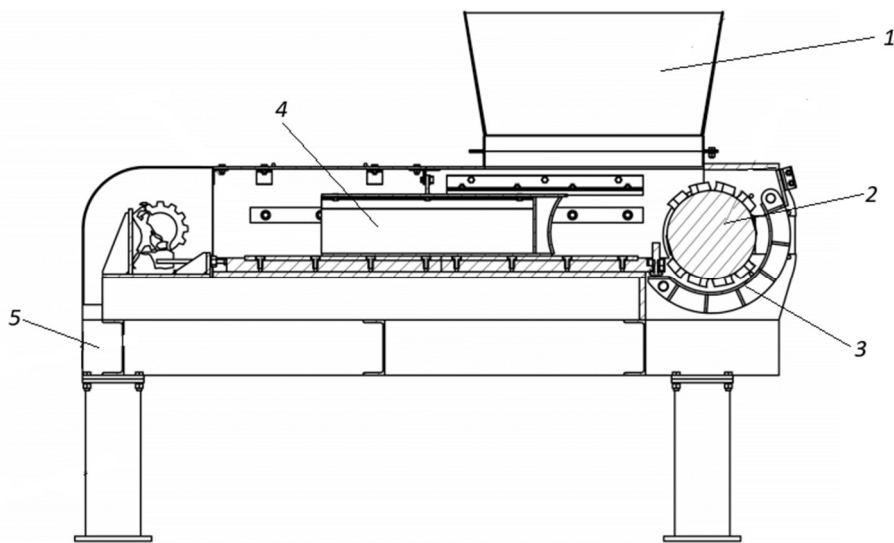


Рисунок 1.20 Схема одновального шредера [75]:

1 - загрузочный бункер; 2 - ротор; 3 - сито; 4 - гидравлическая плита; 5 - рама

Недостатки одновального шредера.

– Риск забивания сита. При работе с резиной, особенно для получения мелкой фракции, высока вероятность налипания и забивания ячеек сита, что требует частых остановок для чистки.

- Нагрев материала. Интенсивное трение и проталкивание резины через мелкие отверстия сита вызывает сильный нагрев материала, что может привести к его оплавлению и спеканию, что снижает качество сырья.

- Высокое энергопотребление.

- Меньшая производительность. Процесс проталкивания материала через сито является более медленным по сравнению с принципом самозахвата двухвального шредера.

**Двухвальный шредер** (рис. 1.21) имеет два параллельных горизонтальных ротора, вращающихся навстречу друг другу с синхронизированной скоростью [41]. На каждом валу расположены режущие диски, смещенные относительно дисков на противоположном валу. Такая конструкция работает по принципу механических ножниц. Материал захватывается валами и самозатягивается в зону резания, где он разрывается, сжимается и срезается между режущими дисками. Размер выходной фракции регулируется не ситом, а расстоянием между режущими дисками на валах [80].

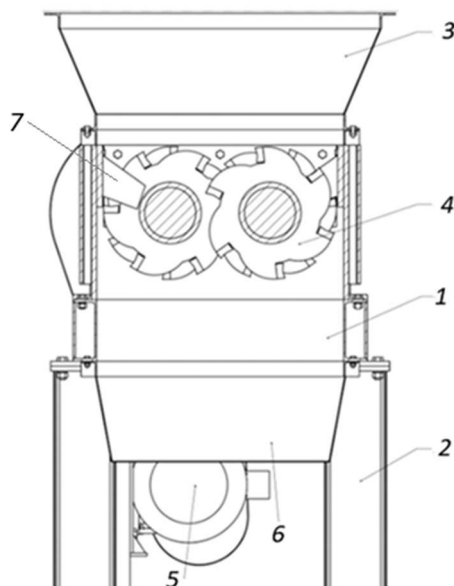


Рисунок 1.21 Схема двухвального шредера [75]:

- 1- рама измельчителя; 2 - опора; 3 - загрузочный бункер; 4 - вал с режущими ножами;  
5 - электродвигатель; 6 - выгрузочный бункер; 7 - противорезающий нож

Недостатки двухвального шредера.

- Необходимость увеличения стадийности. Контакт измельчаемого материала только с 1-3 зубьями режущего инструмента.

– Сложность и стоимость. Конструкция с двумя синхронизированными валами, редукторами и сложной системой подшипников технологически сложнее и дороже в производстве и обслуживании.

– Чувствительность к посторонним предметам. Хотя двухвальные шредеры мощны, попадание особо твердых недеформируемых предметов (например, массивных кусков металла) может привести к поломке дисков или сбою синхронизации валов.

– Более высокое энергопотребление. Для вращения двух массивных валов с высокой точностью требуется мощный привод.

**Вальцовый измельчитель** (рис. 1.22) предназначен для тонкого помола предварительно измельченных резиновых чипсов, после шредера. Принцип действия основан на вращении двух близко расположенных рифленых валков, вращающихся с разной скоростью. Резиновая крошка подается между валками, где подвергается сильному сжатию, сдвигу и истиранию, в результате чего многократно деформируется и раскалывается на более мелкие частицы. Процесс происходит при комнатной температуре и является чисто механическим [81].

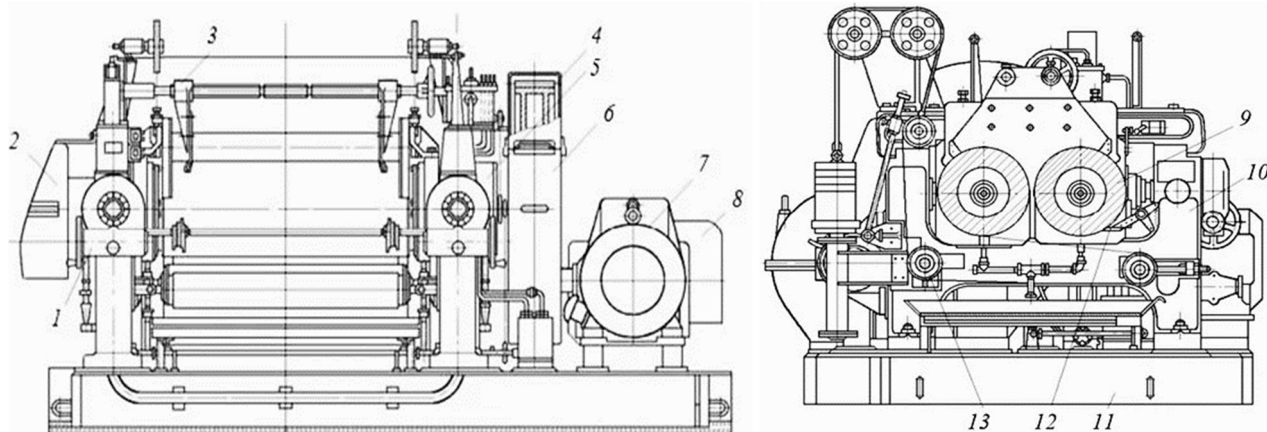


Рисунок 1.22 Схема вальцевого измельчителя [75]:

- 1 – червячные редукторы для регулировки зазора; 2 – фрикционные шестерни; 3 – ограничительные стрелки; 4 – приводные колеса; 5 – подшипники; 6 – колодочный тормоз; 7 – асинхронный двигатель; 8 – коническо-цилиндрический редуктор; 9 – валки; 10 – станина; 11 – фундаментная плита; 12 – ножи для срезки ленты, 13 – фартук (ленточный транспортер)

Недостатки вальцевого измельчителя.

– Определенный измельчаемый материал. Требуется качественной предварительной подготовки сырья (подбор чипсов определенного размера).

- Сложность и стоимость. Валки являются расходным материалом и требуют дорогостоящего обслуживания (восстановления рифления или замены).
- Высокое энергопотребление.
- Низкая производительность. Производительность несколько ниже, чем у ударно-роторных установок.

**Роторный измельчитель** (рис. 1.23) в основном используется для финальной стадии переработки резиновых чипсов 10-20 мм в резиновую крошку. Подготовленное сырье подается в помольную камеру, где вращается ротор с жестко закрепленными измельчающими элементами. С большой скоростью (до 1000 об/мин и более) эти элементы измельчают куски резины, которые задерживаются отбойными кольцами (статор) или футеровано износостойкими пластинами [82].

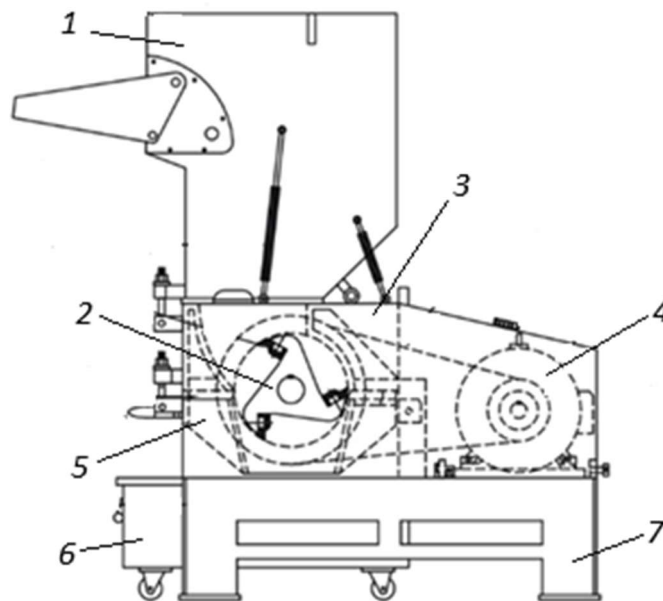


Рисунок 1.23 Схема роторного измельчителя [75]:

1 – загрузочный бункер; 2 – ротор; 3 – корпус; 4 – электродвигатель; 5 – противорежущие ножи;  
6 – выгрузочный лоток; 7 – станина

Основной принцип разрушения – ударное воздействие и истирание. При контакте с ударными элементами и статором резина разрушается на более мелкие частицы. Выделяющееся при этом трением тепло (температура в камере может достигать 100 °С) размягчает резину, облегчая ее дробление, но требует жесткого контроля для предотвращения деградации материала.

Недостатки роторного измельчителя.

- Интенсивный износ рабочих органов. Молотки (била), сита и футеровка камеры подвержены чрезвычайно высокому абразивному износу из-за постоянного контакта с резиной. Это приводит к регулярным и затратным заменам расходных материалов. Требуется дорогостоящего обслуживания.
- Перегрев материала. Высокоскоростной помол неизбежно вызывает значительный нагрев резины, что негативно влияет на ее физико-химические свойства (частичная девулканизация) и качество получаемой крошки.
- Высокое энергопотребление. Создание высокой скорости вращения ротора и эффективного ударного воздействия делает процесс энергозатратным.
- Повышенный уровень шума и вибраций. Агрегат работает с высоким уровнем шума и вибраций, что требует установки на специальный виброизолированный фундамент и размещения в звукоизолированном помещении.

**Шнековый измельчитель** (рис. 1.24) для переработки резинотехнических отходов без посторонних включений работает по принципу механического прессования и сдвиговой деформации материала.

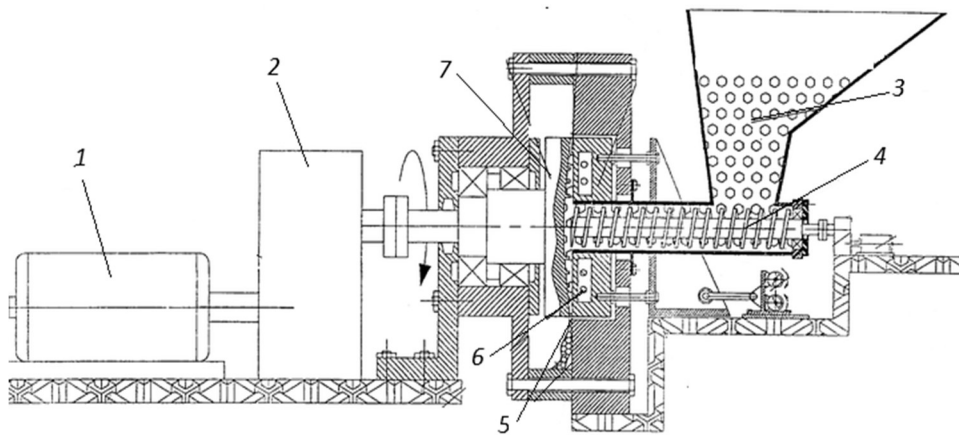


Рисунок 1.24 Схема шнекового измельчителя [75]:

- 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; загрузочный бункер; 4 – шнек; 5 – выгрузочная щель;  
6 – ножи; 7 – ротор

Основным рабочим органом устройства является вращающийся шнек, размещенный в цилиндрическом корпусе. Резинотехнические отходы подаются в загрузочную камеру и захватываются витками шнека. По мере продвижения по

корпусу материал подвергается возрастающему механическому давлению благодаря уменьшению шага витков или сужению корпуса. В зоне максимального сжатия резина проходит через калибровочные отверстия в фильерной головке, где происходит ее пластическая деформация и измельчение. Процесс сопровождается значительным тепловыделением из-за интенсивного трения, что размягчает резину и облегчает ее переработку.

Недостатки шнекового измельчителя.

- Интенсивный износ рабочих органов. Ножи, сита и футеровка подвержены абразивному износу, требуют регулярной замены.
- Перегрев материала. Высокоскоростное дробление вызывает нагрев резины, что может ухудшать ее качество (частичная девулканизация).
- Низкая производительность.
- Уровень шума и вибраций. Высокий уровень шума и вибраций, требующий специального фундамента и шумоизоляции.

Удельный расход энергии является одним из основных показателей для технологического процесса измельчения. Он напрямую определяет экономическую целесообразность, а снижение этого показателя сразу же повышает рентабельность (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Анализ удельного расхода энергии, затрачиваемой оборудованием на  
измельчение резинотехнических отходов

Название оборудования	Удельная энергоемкость	
	Общая удельная энергоемкость (кВт·ч /т)	Энергоемкость, затрачиваемая на процесс измельчения (кВт·ч /т)
Одновальный шредер	250-470	30 - 70
Двухвальный шредер	200-420	25 - 80
Вальцовый измельчитель	140-250	25 - 60
Роторный измельчитель	125-300	20 - 65
Шнековый измельчитель	100-200	20- 55

Также удельный расход энергии напрямую связан с эффективностью работы оборудования и правильности его настройки. Он служит основой для сравнительного анализа машин и оптимизации технологических режимов. Кроме того, высокий расход энергии часто свидетельствует о перегреве материала, что ухудшает качество готового продукта.

Таким образом, контроль удельного расхода энергии – это не просто учет, а комплексный инструмент управления себестоимостью, качеством и экологической ответственностью предприятия.

### **1.6 Анализ математических описаний процесса получения резиновой крошки в измельчителях для переработки резинотехнических отходов и методик расчета их основных конструктивно-технологических параметров**

Основным направлением для производства резиновой крошки является механическое измельчение резинотехнических отходов. Цель процесса – получение частиц заданных размеров и конфигурации при максимальном объеме выхода целевой фракции и минимизации удельных энергозатрат. Для решения данных задач задействуется специализированное оборудование, а оптимизация его конструктивных и технологических характеристик, обеспечивающая требуемое качество продукта, и достигается путем математического моделирования рабочих процессов.

Энергия, необходимая для разрушения упруго-вязких материалов, таких как резина, описывается классическими теориями дробления.

Закон Риттингера предполагает, что работа измельчения пропорциональна вновь образованной поверхности [84]:

$$A = K_P \cdot \Delta F = K_P \left( \frac{1}{d_k} - \frac{1}{D_k} \right) Q \rho_m, \quad (1.1)$$

где  $K_P$  – коэффициент пропорциональности (энергия на образование единицы новой поверхности);

$\Delta F$  – приращение поверхности;

$D_k$  и  $d_k$  – характерные размеры частиц до и после измельчения, м;

$Q$  – производительность, кг/ч;

$\rho_m$  – насыпная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Закон Кирпичева–Кика исходит из того, что работа деформации пропорциональна объему или массе измельчаемого тела [84]:

$$A = K_K \cdot \Delta V = K_K Q \ln \frac{D_k}{d_k}, \quad (1.2)$$

где  $K_K$  – коэффициент пропорциональности;

$\Delta V$  – деформированный объем, м<sup>3</sup>;

Обобщенное уравнение П.А. Ребиндера объединяет оба подхода и наиболее адекватно описывает измельчение эластомеров, учитывая как упругие деформации, так и образование новых поверхностей [84]:

$$A = \sigma \Delta V_0 + k_e \Delta F = \frac{\sigma_B^2}{2E} V_0 + k_e \Delta F, \quad (1.3)$$

где  $\sigma_B$  – временное сопротивление разрушению, Па;

$E$  – модуль упругости, МПа;

$V_0$  – объем зоны уплотнения материала, м<sup>3</sup>;

$k_e$  – коэффициент, характеризующий удельную поверхностную энергию.

Одним из основных параметров измельчительного оборудования является производительность, которая зависит от кинематических параметров самого оборудования и физико-механических свойств измельчаемого материала.

Для первичного измельчения резиновых отходов и получения резиновых чипсов в основном применяются двухвалковые шредеры, производительность которых определяется пропускной способностью зазора между валками [85]:

$$Q = 60 \cdot \pi \cdot D_B \cdot D_B \cdot n \cdot h_r \cdot k_3 \cdot \rho_m \cdot \psi, \quad (1.4)$$

где  $D_B$  – диаметр валка, м;

$L_B$  – длина валка, м;

$n$  – частота вращения валка, мин<sup>-1</sup>;

$h_r$  – ширина разгрузочной щели, м;

$k_3$  – коэффициент заполнения (0,2–0,5);

$\psi$  – коэффициент, учитывающий проскальзывание и упругие свойства резины (0,3–0,7).

Для среднего и тонкого измельчения используются роторные дробилки. Производительность может быть рассчитана на основе геометрии ротора и количества ножей [85]:

$$Q = 60 \cdot k_3 \cdot F_p \cdot L_N \cdot n \cdot z \cdot \rho_m \cdot \psi, \quad (1.5)$$

где  $F_p$  – площадь поперечного сечения загрузочного окна, м<sup>2</sup>;

$L_N$  – длина ножа, м;

$z$  – количество ножей;

Для тонкого помола резины часто применяются вальцевые измельчители с многократным прохождением материала. Производительность рассчитывается по формуле, аналогичной валковым дробилкам [85]:

$$Q = 60 \cdot \pi \cdot D_B \cdot L_B \cdot n \cdot e \cdot k_3 \cdot \rho_m \cdot \psi, \quad (1.6)$$

где  $e$  – ширина зазора между валками в зоне измельчения, м.

Мощность привода измельчителя определяется энергозатратами на разрушение материала и преодоление сил трения в рабочей зоне.

С использованием закона Ребиндера мощность может быть выражена как:

$$N = \frac{A \cdot Q}{3600} = \frac{(\sigma_B \cdot \varepsilon \cdot V_0 + k_e \cdot \Delta F) \cdot Q}{3600}, \quad (1.7)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация при разрушении.

Однако на практике чаще применяют эмпирические зависимости, адаптированные к конкретному типу оборудования.

Для роторных дробилок предложена формула, аналогичная используемой для лопастных смесителей [86], но с коэффициентами, соответствующими процессу резания:

$$N = 0,001 \cdot z \cdot n \cdot R_r^3 (\gamma \cdot R_r (0,455 + 0,00014 \cdot n^2 \cdot R_r) + 2,744 \cdot \tau), \quad (1.8)$$

где  $R_r$  – радиус ротора, м;

$\gamma$  – насыпная плотность резины, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  – удельное сопротивление сдвигу (резанию) резины, Па.

Для шредеров мощность складывается из нескольких составляющих:

$$N_{\text{общ}} = \frac{N_{\text{рез}} + N_{\text{тр}} + N_{\text{пр}}}{\eta}, \quad (1.9)$$

где  $N_{рез}$  – мощность на разрезание материала (определяется по касательным усилиям резания), Вт;

$N_{тр}$  – мощность на преодоление трения, Вт;

$N_{пр}$  – мощность на протягивание материала, Вт;

$\eta$  – КПД привода.

Для вальцевых измельчителей используется выражение [86]:

$$N = \frac{\pi \cdot D_B \cdot n \cdot L_B \cdot \sigma_{сж} \cdot e \cdot f}{60 \cdot \eta}, \quad (1.10)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности материала при сжатии, Па;

$f$  – коэффициент трения материала о валок.

Методика расчета основных параметров роторной дробилки для получения резиновой крошки [87]:

Частота вращения ротора определяется из условия оптимальной скорости резания  $v$  (для резины рекомендуется 15–25 м/с):

$$n = \frac{60}{\pi D_r}, \quad (1.11)$$

где  $D_r$  – диаметр ротора, м.

Количество режущих ножей  $z$  выбирается в зависимости от требуемой производительности и дисперсности. Для получения фракции 1–3 мм с выходом не менее 70 % рекомендуется устанавливать 6–8 ножей [16].

Зазор между ножами  $\delta$  (регулируемый зазор) влияет на крупность и форму частиц. Меньший зазор (2–3 мм) способствует получению кубовидных частиц, больший (5–10 мм) – рваной и игольчатой формы [16].

Угол заточки ножей  $\alpha$  для измельчения эластомеров принимается 45–55° [87].

Ширина ножей  $b_H$  определяется по эмпирическому соотношению:

$$b_H = (0,3 \dots 0,5) D_r. \quad (1.12)$$

Шаг установки ножей на роторе  $t_H$  выбирается из условия равномерности нагрузки:

$$t_H = (0,8 \dots 1,2) b_H. \quad (1.13)$$

Для двухвальных измельчителей (шредеры и вальцевые измельчители) важны следующие параметры [87]:

Угол захвата  $\alpha$  должен удовлетворять условию:

$$\alpha \leq 2\varphi, \quad (1.14)$$

где  $\varphi$  – угол трения резины о материал валков.

Диаметр валков выбирается исходя из крупности исходного материала:

$$D_{\text{в}} \geq (20 \dots 25)d_{\text{max}}, \quad (1.15)$$

где  $d_{\text{max}}$  – максимальный размер куска.

Профиль зубьев ножей шредера определяется требуемой степенью дробления и формой частиц. Для получения кубовидной формы рекомендуется использовать ножи с трапецеидальным профилем [28, 39], а для вальцевых измельчителей важна шероховатость поверхности валков  $R_a$ , которая влияет на захват материала:

$$2R_{Ia} \leq R_a \leq 6R_{Ia}, \quad (1.15)$$

где  $R_{Ia}$  – параметр равновесной шероховатости для пары трения сталь–резина.

Для оптимизации формы рабочих органов применяется моделирование НДС в зоне контакта. Вязкоупругое поведение резины описывается уравнением состояния:

$$\sigma(t) = E_0\varepsilon(t) + \eta_k \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1.16)$$

где  $\sigma$  – напряжение, Па;

$E_0$  – мгновенный модуль упругости;

$\eta_k$  – коэффициент вязкости.

Существующие математические описания процесса измельчения резины опираются на классические законы дробления с использованием эмпирических коэффициентов, требующих экспериментального определения для каждого типа резины и конструкции измельчителя. Наиболее сложны для точного расчета коэффициенты сопротивления резанию, удельная поверхностная энергия, константы скорости измельчения. Многие формулы дают удовлетворительную точность лишь в узком диапазоне режимных параметров.

В последние годы активно развиваются методы компьютерного моделирования (DEM – дискретно-элементное моделирование, FEM – метод конечных элементов), позволяющие детально описывать движение частиц, их разрушение и взаимодействие с рабочими органами. Однако такие модели требуют значительных вычислительных ресурсов и калибровки по физическим свойствам материала.

Таким образом, разработка уточненных аналитических и численных моделей, учитывающих реологические свойства резины, температурные эффекты и реальную кинематику оборудования, остается актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность процесса получения резиновой крошки с заданными характеристиками (размер, форма частиц).

### **1.7 Цель и задачи исследования**

Цель данной работы - повышение качества переработки резинотехнических отходов в крошку за счет увеличения рабочей зоны и организации стадийности измельчения.

Задачи исследования:

1. Провести анализ техники и технологии в области переработки резинотехнических отходов для получения резиновой крошки.
2. Разработать вертикальный измельчитель для вторичной переработки резинотехнических отходов, ориентированный на получение более чем 70% крошки размером частиц 1-3 мм в готовом продукте.
3. Разработать математическую модель процесса разрушения резины для получения крошки при воздействии на нее рабочего органа.
4. Получить аналитические выражения, описывающие основные энергетические показатели технологического процесса переработки резинотехнических отходов.
5. Определить аналитические зависимости выходных показателей измельчителя от его конструктивно-технологических параметров.

6. Спроектировать и изготовить экспериментальную установку измельчителя резинотехнических отходов вертикального типа, разработать методику и провести экспериментальные исследования.

7. Получить уравнения регрессии, определяющие зависимости выходных показателей измельчителя: процентное содержание частиц 1–3 мм и менее 1 мм в крошке, производительность и мощность, затрачиваемую на измельчение. Определить рациональные режимы работы экспериментальной установки.

8. Разработать рекомендации по внедрению полученных результатов в производственных условиях и образовательном процессе.

### **1.8 Выводы по главе**

1. В результате проведенного анализа установлено, что физико-механические свойства исходных резинотехнических отходов, в частности твердость и эластичность (определяемые типом каучука), оказывают определяющее влияние на эффективность процесса измельчения и качество получаемой крошки.

2. Выявлено, что наиболее распространенным методом переработки резинотехнических изделий для получения крошки фракцией 1-3 мм является механический способ, который в настоящее время преимущественно используется в устройствах с горизонтальной компоновкой. При этом способе материал контактирует только с 2-3 элементами режущего или разрушающего инструмента, что предполагает увеличение стадийности оборудования в имеющихся технологических линиях. Кроме того, данный способ не обеспечивает требуемого качества измельчения из-за получения крошки более 5 мм и менее 1 мм в готовом продукте до 25%, что является браком.

3. Анализ оборудования для переработки РТО показал, что наиболее целесообразно для получения процентного содержания крошки более 70% в диапазоне частиц 1-3 мм при наличии частиц менее 1 мм не более, чем 10-12% использовать измельчитель вертикального типа, имеющий сборный ротор с комплектом режущих и регулировочных ножей с переменным количеством

зубьев, обеспечивающие стадийность переработки РТО в крошку, разделенных шайбами, которые увеличивают рабочую зону измельчения.

4. Выявлено, что существующие математические модели процесса измельчения резины и методики расчета оборудования носят ограниченный характер, так как не в полной мере учитывают вязкоупругие свойства эластомеров, реальную кинематику рабочих органов и др. Для оптимизации определения рациональных конструктивно-технологических параметров разрабатываемого вертикального измельчителя целесообразно создание уточненных аналитических зависимостей, учитывающих стадийность разрушения материала и максимальное процентное содержание однородности крошки в готовом продукте, геометрические и кинематические характеристики рабочих органов, а также свойства перерабатываемого сырья. Это позволит получить выражения для ключевых энергетических показателей и установить теоретическую связь производительности с указанными параметрами.

5. Сформулированы цель и задачи исследования.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВТОРИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА

### 2.1 Ряд аспектов кинетики разрушения резины при механическом воздействии для получения крошки

При переработке резинотехнических отходов необходимо рассмотреть процесс разрушения резины в крошку с точки зрения ее вторичного использования в другом изделии, а не как процесс ее резания, с точки зрения механической обработки, т.е. придание формы некому изделию. Нужно рассмотреть именно процесс получения крошки, а не стружкообразование.

Внедрение зуба ножа в резину влечет за собой ряд особенностей механического поведения при измельчении [88]:

1. Максимальные напряжения концентрируются в объеме материала непосредственно над вершиной зуба.
2. Интенсивность напряжений возрастает по мере увеличения глубины резания.
3. Растягивающие напряжения, действующие вдоль поверхности образца резины и боков зуба ножа, достигают наибольших значений вблизи режущей кромки.

На начальной стадии взаимодействия зуба ножа с материалом наблюдаются высокоэластичные деформации, из-за неравномерного прилегания материала к поверхности кромки зуба по глубине, что приводит к преобладающему влиянию режущей кромки в процессе разрушения, где преобладают растягивающие напряжения (до 20% толщины). Дальнейшее углубление ножа (свыше 20%) влечет возникновение сложного напряженного состояния, обусловленного сочетанием контактного давления и сил трения. Это приводит к формированию локальной зоны сжатия, где фиксируется исходная или деформированная структура материала. Процесс резания резины характеризуется последовательным развитием деформаций, переходящих в разрушение:

1. На начальном этапе наблюдается чисто упругое поведение – при снятии нагрузки след от зуба полностью исчезает, а глубина внедрения линейно зависит от приложенного усилия, пока не будет достигнут предел упругости.

2. При превышении критической нагрузки начинается фаза необратимых изменений, когда в материале происходят сложные структурные преобразования. Разрыв и восстановление химических связей в полимерной сетке сопровождается образованием микронадрезов, что приводит к появлению остаточных деформаций. Этот процесс протекает с постоянной скоростью и занимает значительную часть общего времени резания.

3. Завершающей становится стадия окончательного разрушения, когда первоначальные микронадрезы трансформируются в единую трещину. Важно отметить, что развитие этой трещины вдоль режущей кромки фактически представляет собой процесс формирования поверхности реза. Особенностью резины является образование стружки без пластической деформации - возникающая трещина точно повторяет траекторию движения ножа с радиусом скругления 5-20 мкм.

При уменьшении глубины резания до значений, равных или меньших, чем радиус скругления кромки между зубьев, механизм взаимодействия зуба ножа с материалом кардинально меняется. Вместо классического резания наблюдается процесс, при котором резец начинает вдавливаться и проскальзывать по поверхности резины. В зависимости от условий трения этот процесс может развиваться по двум различным направлениям.

При относительно низком трении происходит разогрев контактной зоны, приводящий к термической деструкции поверхностного слоя резины и образованию липкого осмоленного слоя. Однако, когда силы трения достигают критических значений, превышающих прочностные характеристики материала, в поверхностном слое резины возникают характерные поперечные трещины.

Развитие этих трещин инициирует специфический механизм разрушения, известный как "истирание скатыванием" [88]. В этом случае отделение материала происходит не через классическое резание, а посредством постепенного

отдирания поверхностного слоя с образованием свернутых фрагментов резины. Особенностью данного процесса является отсутствие традиционного скольжения - относительное перемещение реализуется через сложную деформацию контактной зоны, что принципиально отличает этот механизм от обычного абразивного износа.

## 2.2 Теоретические аспекты математического представления процесса разрушения резинотехнических отходов

Процесс разрушения резинового материала осуществляется в результате внедрения зуба режущего ножа в массив резинового образца, в результате этого в нем под действием силы  $F$  в направлении движения зуба формируется зона уплотнения объемом  $V_0$ , которая распределяется в перпендикулярном направлении сформированной зоны объемом  $V$ . Вследствие чего в зоне уплотнения образуется напряжение  $\sigma$ . В результате расширения зона уплотнения будет совершать работу  $A$ , которая будет расходоваться на разрыв связей объема  $V$  полученной частицы (рис. 2.1) [89].

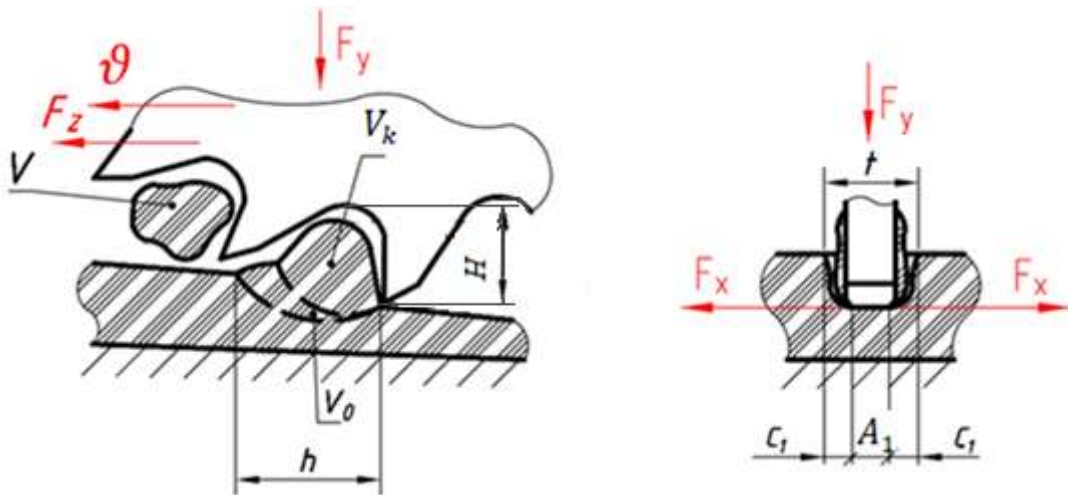


Рисунок 2.1 Схема к описанию разрушения резинового массива

В рамках классической термодинамики выражение величины работы  $A$ , затрачиваемой на разрушение массива резинотехнических отходов, через величину элементарной работы  $\delta A$ , которая определится следующим соотношением:

$$\delta A = \sigma dV, \quad (2.1)$$

где  $A$  – работа, затрачиваемая одним зубом на разрушение массива резины, Дж;

$V$  – объем частицы готового продукта, м<sup>3</sup>;

$V_0$  – объем зоны уплотнения материала перед зубом, м<sup>3</sup>;

$\sigma$  – напряжение, возникающее в зоне уплотнения, МПа.

Найдем величину изменения объема  $V$ . В результате ввода в рассматриваемый массив резины энергии  $W$ , зависящей только от переменных  $W$  и  $\sigma$ , т.е.  $V = V(W, \sigma)$ .

На основании этого находим:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial W} \cdot dW + \frac{\partial V}{\partial \sigma} d\sigma. \quad (2.2)$$

где  $W$  – энергия, вводимая зубом ножа в массив резины, Дж;

Введем обозначение:

$$\beta = \left( \frac{\partial V}{\partial W} \right)_{\sigma} \cdot \frac{1}{V_0}, \quad (2.3)$$

где  $\beta$  – коэффициент объемного расширения при введении в рассматриваемый объем резины энергии  $dW$ , Дж<sup>-1</sup> [90];

$$\gamma = - \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \nu} \right)_W \cdot V_0, \quad (2.4)$$

$$\gamma = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad (2.5)$$

где  $\gamma$  – коэффициент объемного модуля упругости, МПа [95];

$E$  – модуль Юнга, МПа [91];

$\nu$  – коэффициент Пуассона,  $\nu = 0,46-0,5$  [91].

Подстановка (2.3), (2.4) с учетом (2.5) в (2.2) приводит к следующему результату:

$$dV = \beta \cdot V_0 \cdot dW - \frac{3(1-2\nu) \cdot V_0}{E} d\sigma. \quad (2.6)$$

На основании полученного выражения (2.6) выражение для элементарной работы (2.1) примет вид:

$$dA = \beta \cdot V_0 \cdot \sigma dW - \frac{3(1-2\nu) \cdot \sigma \cdot V_0}{E} d\sigma. \quad (2.7)$$

Интегрирование (2.7) позволяет получить:

$$A = \beta \cdot V_0 \cdot \sigma \cdot W - \frac{3(1-2\nu) \cdot \sigma^2 \cdot V_0}{2E} + C_0, \quad (2.8)$$

здесь  $C_0$  – константа интегрирования, значение которой можно найти на основании следующего условия, при:

$$W = 0, \quad \sigma = 0 \text{ и } A = 0. \quad (2.9)$$

Применение соотношений (2.9) к (2.8) дает:

$$C_0 = 0. \quad (2.10)$$

Подстановка (2.10) в (2.8) позволяет получить выражение работы, затрачиваемое на разрушение массива резины:

$$A = \beta \cdot V_0 \cdot \sigma \cdot W - \frac{3(1-2\nu)}{2E} \cdot \sigma^2 \cdot V_0. \quad (2.11)$$

Первое слагаемое в (2.11) описывает работу, необходимую непосредственно для резания резины, то есть для деформации и отделения частицы материала в зоне контакта с зубом ножа. Если коэффициент Пуассона материала  $\nu=0,5$ , то второе слагаемое обнуляется, и процесс становится «чистым» резанием без дополнительных эффектов. Второе слагаемое характеризует энергию упругой деформации, которая накапливается в объеме резины перед фронтом резания, так при  $\nu < 0,5$  эта накопленная энергия приводит к отрыву частицы от массива резины, а не к отрезу, что влияет на конечную форму отделяемой частицы [92].

На основании соответствия выражения (2.11) можно сделать вывод, что существует некоторое пороговое значение напряжения в рассматриваемом объеме резины, при котором работа (2.11) не совершается, а именно:

$$\sigma_n = \frac{2E \cdot \beta \cdot W}{3(1-2\nu)}. \quad (2.12)$$

Полученное выражение (2.12) позволяет определить величину максимальной работы, затрачиваемой на разрушение массива резины. Для этого необходимо вычислить первую производную от выражения (2.11) по величине действующей нагрузки  $\sigma$ :

$$\frac{\partial A}{\partial \sigma} = \beta \cdot V_0 \cdot W - \frac{3(1-2\nu) \cdot V_0 \sigma}{E}. \quad (2.13)$$

Если выражение (2.13) равно нулю, то можно определить экстремальное значение нагрузки:

$$\frac{\sigma_m \cdot V_0 \cdot 3(1-2\nu)}{E} = \beta \cdot V_0 \cdot W, \quad (2.14)$$

откуда

$$\sigma_m = \frac{\beta \cdot E \cdot W}{3(1-2\nu)}. \quad (2.15)$$

Для определения значения экстремума (2.15) необходимо вычислить вторую производную от (2.11):

$$\frac{\partial^2 A}{\partial \sigma^2} = -\frac{3(1-2\nu) \cdot V_0}{E}. \quad (2.16)$$

В силу положительности величин  $E$  и  $V_0$  и значения коэффициента Пуассона  $\nu < 0,5$  знак выражения (2.16) отрицательный и, следовательно, соотношение (2.11) при значении (2.15) принимает максимальное значение работы  $A_{max}$ , затрачиваемой на отрыв частицы:

$$A_{max} = \frac{\beta^2 \cdot V_0 \cdot W^2 \cdot E}{6(1-2\nu)}. \quad (2.17)$$

Анализ полученного выражения (2.11) позволяет сделать вывод для резины с коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,5$  второе слагаемое выражение (2.11) обращается в ноль и, следовательно, вся введенная в рассматриваемый образец энергия  $W$  будет расходоваться только на увеличение объема.

Мощность, затрачиваемая на измельчение массива резины в общем виде без учета геометрических и технологических особенностей измельчителя вертикального типа:

$$P = A \cdot n, \quad (2.18)$$

$$P_{max} = \frac{\beta^2 \cdot V_0 \cdot W^2 \cdot E \cdot n}{6(1-2\nu)}, \quad (2.19)$$

где  $n$  – частота вращения ротора,  $c^{-1}$ ;

Получен график общей максимальной мощности  $P_{max}$ , необходимой для разрушения резинового образца, в зависимости от частоты вращения ротора  $n$  и требуемого объема частиц  $V_k$  (рис. 2.2). Анализ показал, что как с повышением

частоты вращения  $n$  с  $2,2 \text{ с}^{-1}$  (130 об/мин) до  $4,5 \text{ с}^{-1}$  (270 об/мин), так и с увеличением объема отделяемой частицы  $V_k$  с  $5,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$  (частица 1 мм) до  $6,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$  (частица 5 мм) максимальная мощность  $P_{max}$ , затрачиваемая на получение крошки размером 1–5 мм, возрастает. Так, при минимальной частоте вращения  $n$  мощность, затрачиваемая на получение крошки  $P_{max}$ , возрастает с 30 до 60 Вт, а при максимальной частоте  $n$  она возрастает со 130 до 300 Вт.

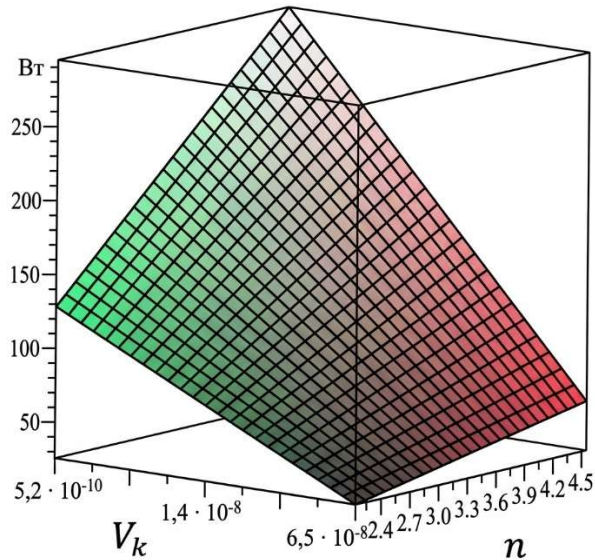


Рисунок 2.2 Предполагаемая максимальная мощность, необходимая на процесс разрушения резинового образца  $P_{max}$  от частоты вращения ротора  $n$  и необходимого объема частиц  $V_k$

Полученные соотношения (2.11), (2.17), (2.18), (2.19) описывают предпосылки к математическому расчету энергетических параметров измельчителя вертикального типа.

### 2.3 Применение концептуального подхода к математическому описанию энергетических параметров вертикального измельчителя

Найдем коэффициент объемного расширения зоны уплотнения резины при воздействии на нее зуба ножа.

Предположим, что объем зоны уплотнения  $V_0$ , который формируется в результате воздействия на массив резины зубом ножа по своей форме подобен объему цилиндра с параметрами  $r$  и  $H$  (рис. 2.3):

$$V_0 = \pi r^2 \cdot H, \quad (2.20)$$

где  $r$  – радиус основания цилиндра, м;

$H$  – высота зуба ножа, м.

Данный объем (2.20) образовывается при прохождении зубом ножа поверхности резины прямоугольной формы с геометрическими параметрами  $H$  и  $2\pi r$  (рис. 2.1, 2.3, 2.4).

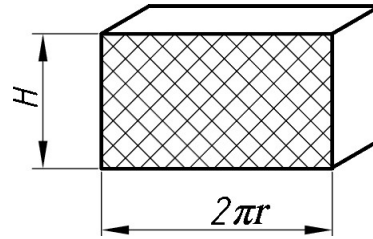


Рисунок 2.3 Схема развертки образовавшегося цилиндра:  
 $H$  – высота зуба;  $r$  – радиус основания цилиндра

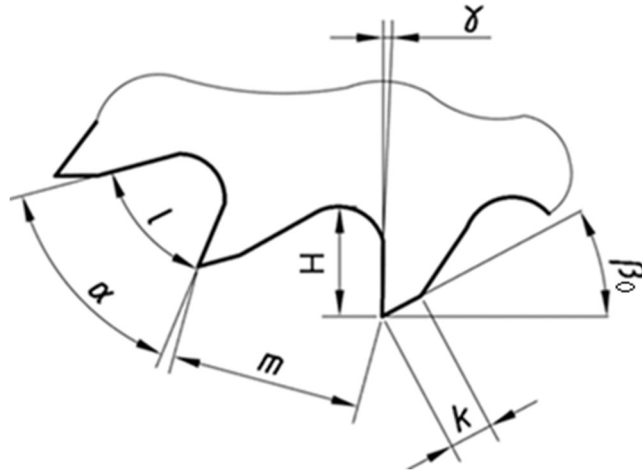


Рисунок 2.4 Схема геометрии ножа

Геометрический размер  $2\pi r$  предоставляет собой длину окружности, в которую преобразуется дуга  $l$  описываемая зубом в массиве куска резины, представленным на рисунках 2.3 и 2.4.

На основании этого факта имеем:

$$l = R \cdot \alpha, \quad (2.21)$$

$$R \cdot \alpha = 2\pi r, \quad (2.22)$$

здесь  $R$  – радиус ножа, м;

$l$  – дуга описываемая зубом в массиве куска резины, м;

$\alpha$  – угол между зубьями ножа, рад.

Используя (2.22), находим:

$$r = \frac{R \cdot \alpha}{2\pi}. \quad (2.23)$$

Формулу (2.3) представим в виде:

$$\beta = \frac{dV_0}{V_0 \cdot dW}. \quad (2.24)$$

Данная энергия  $W$  расходуется на совершение работы силой  $F$  по отделению куска объемом  $V_k$  по дуге  $l$  резанием:

$$W = -F \cdot l, \quad (2.25)$$

тогда путь  $\Delta l$  зависит от угла  $\Delta\alpha$ :

$$\Delta l = R \cdot \Delta\alpha; \quad (2.26)$$

$$dW = -dF \cdot \Delta l, \quad (2.27)$$

где  $\Delta\alpha$  – бесконечно малый поворот зуба ножа, рад.

С учетом (2.26) уравнение (2.24) принимает вид:

$$\beta = -\frac{dV_0}{V_0 \cdot dF \cdot \Delta l}. \quad (2.28)$$

Величину  $dF$  запишем в виде:

$$dF = S \cdot d\sigma, \quad (2.29)$$

здесь  $S$  – площадь контакта зуба ножа с массивом резины,  $m^2$  [93].

Используя определение модуля Юнга  $E$ :

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon_l}, \quad (2.30)$$

можно записать:

$$d\sigma = E \cdot d\varepsilon_l, \quad (2.31)$$

$\varepsilon_l$  – относительная деформация вдоль дуги пройденного пути  $l$ .

Подстановка (2.29), (2.30) и (2.31) в (2.28) приводят к следующему результату:

$$\beta = -\frac{dV_0}{V_0 \cdot S \cdot E \cdot \Delta l \cdot d\varepsilon_l}. \quad (2.32)$$

Далее учитывая, что

$$V_0 = \pi r^2 \cdot H. \quad (2.33)$$

Вычисляем:

$$dV_0 = 2\pi r \cdot H \cdot dr, \quad (2.34)$$

и

$$\frac{dV_0}{V_0} = 2 \frac{dr}{r}, \quad (2.35)$$

учитывая, что:

$$\frac{dr}{r} = d\varepsilon_{\perp}, \quad (2.36)$$

находим:

$$\frac{dV_0}{V_0} = 2d\varepsilon_{\perp}, \quad (2.37)$$

$\varepsilon_{\perp}$  – относительная деформация вдоль перпендикулярного направления зуба ножа.

Исходя из определения коэффициента Пуассона  $\nu$ :

$$\nu = - \frac{d\varepsilon_{\perp}}{d\varepsilon_{\parallel}}. \quad (2.38)$$

На основании (2.37) и (2.38) формула (2.32) принимает вид:

$$\beta = \frac{2\nu}{S \cdot E \cdot \Delta l}. \quad (2.39)$$

Величина работы, определяемая соотношением (2.11) с учетом (2.26), и (2.39) принимает вид:

$$A = \frac{2\nu \cdot H \cdot W_0 \cdot \sigma}{E \cdot R \cdot \Delta \alpha} - \frac{3(1-2\nu) \cdot S \cdot H}{2E} \cdot \sigma^2, \quad (2.40)$$

где  $S = 2\pi r^2$  с учетом (2.23):

$$S = \frac{\pi R^2 \cdot \alpha^2}{4\pi^2} = \frac{R^2 \alpha^2}{4\pi}. \quad (2.41)$$

Если  $\sigma_p$  предел прочности резины на растяжение, а  $S_p$  поверхность, которая получена в результате среза зубом новой поверхности и  $S_{V_0}$  поверхность зоны уплотнения, образованная внедрением зуба в массив резины, то:

$$S_{V_0} = A_1 \cdot l; \quad (2.42)$$

где  $A_1$  – толщина ножа, м;

$$S_p = \frac{V_k \cdot k}{H}, \quad (2.43)$$

где  $S_p$  – поверхность, полученная в результате среза зубом новой поверхности;

$V_k$  – объем, отрезаемый зубом ножа в зависимости от формы частицы, м<sup>3</sup>;

$k$  – коэффициент, учитывающий форму отрезаемого объема,  $k_{\sigma} = \frac{\pi}{6}$ ,  $k_{\square} = 1$

[94];

$S_{V_0}$  – поверхность зоны уплотнения, образованная внедрением зуба в массив резины.

Тогда нагрузка  $\sigma$  на зону уплотнения будет равна:

$$\sigma = \sigma_p \cdot \frac{S_p}{S_{V_0}}, \quad (2.44)$$

где  $\sigma_p$  – предел прочности резины на растяжение, МПа.

С учетом (2.42) и (2.43) формула (2.44) примет вид:

$$\sigma = \sigma_p \cdot \frac{V_k \cdot k}{H \cdot A_1 \cdot l}. \quad (2.45)$$

Величина работы, затрачиваемой на разрушение исходного массива резины зубом ножа, можно получить на основании выражения (2.40), в котором  $\Delta\alpha$  заменим на  $\alpha$ , а  $\sigma$  на формулу (2.45) [95]:

$$A_p = \frac{2\nu \cdot W_0 \cdot \sigma_p \cdot V_k}{E \cdot R \cdot \Delta l \cdot A_1} - \frac{3(1-2\nu) \cdot S \cdot \sigma_p^2 \cdot V_k^2 \cdot k^2}{2 \cdot E \cdot H \cdot A_1^2 \cdot R^2 \cdot \alpha^2}. \quad (2.46)$$

Выражение (2.46) можно привести к следующему виду:

$$A_p = \frac{\sigma_p \cdot V_k \cdot k}{E \cdot R^2 \cdot \alpha \cdot A_1} \left( 2\nu \cdot W_0 - \frac{3(1-2\nu) \cdot S \cdot V_k \cdot k \cdot \sigma_p}{2H \cdot A_1 \cdot \alpha} \right), \quad (2.47)$$

$W_0$  – величина энергии для отделения куска резины объемом  $V_k$ , Дж.

В силу того, что величины сомножителей выражения (2.47) положительные получим следующее соотношение:

$$W_0 \geq \frac{3(1-2\nu) \cdot S \cdot V_k \cdot k \cdot \sigma_p}{4\nu \cdot H \cdot A_1 \cdot \alpha}. \quad (2.48)$$

Выражение (2.48) показывает, что для измельчения резинотехнических отходов необходима энергия, которая будет больше или равна значению определяющее данное соотношение. На основании выражения (2.48) величина энергии  $W_0$  для отделения куска резанием объемом  $V_k$  должна быть больше предельного значения  $W_p$  равного:

$$W_p = \frac{3(1-2\nu) \cdot S \cdot V_k \cdot k \cdot \sigma_p}{4 \cdot \nu \cdot H \cdot A_1 \cdot \alpha}. \quad (2.49)$$

Величина энергии  $W_0$  вводимой зубом ножа определяется следующим соотношением:

$$W_0 = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (2.50)$$

где  $m$  – масса зуба, кг:

$$m = \rho \cdot V_3, \quad (2.51)$$

здесь  $\rho$  – плотность материала, из которого изготавливается режущий нож, кг/м<sup>3</sup>;

$V_3$  – объем зуба ножа, м<sup>3</sup>;

$\vartheta$  – линейная скорость вращения зуба равная, м/с:

$$\vartheta = n \cdot R. \quad (2.52)$$

С учетом (2.51) и (2.52) формула (2.50) примет вид:

$$W_0 = \frac{\rho V_3}{2} R^2 \cdot n^2. \quad (2.53)$$

Подстановка (2.53) в (2.48) позволяет получить следующее соотношение:

$$\frac{\rho V_3}{2} R^2 n^2 \geq \frac{3(1-2\nu) \cdot S \cdot V_k \cdot k \cdot \sigma_p}{4 \cdot \nu \cdot H \cdot A_1 \cdot \alpha}. \quad (2.54)$$

На основании формулы (2.54) получим выражение, определяющее минимальное значение частоты вращения ротора вертикального измельчителя, приводящее к отделению куска резины от исходного массива резанием [96, 97]:

$$V = V_k \cdot k, \quad (2.55)$$

$$V_k \cdot k = \frac{n_{min} \cdot 2\nu}{3(1-2\nu)} \cdot \frac{\rho \cdot R^2 \cdot H \cdot A_1 \cdot \alpha \cdot V_3}{S \cdot \sigma_p}. \quad (2.56)$$

Найдем минимальную частоту вращения, при которой получим нужный размер частиц:

$$n_{min} = \left( \frac{3(1-2\nu)}{2\nu} \cdot \frac{V_k \cdot k}{V_3} \cdot \frac{S \cdot \sigma_p}{\rho \cdot R^2 \cdot H \cdot A_1 \cdot \alpha} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.57)$$

Если частота вращения ротора будет меньше, чем значение, определяемое выражением (2.57), то измельчение резинового материала не будет.

Подстановка (2.39), (2.53) в (2.17) позволяет получить  $A_{max}$ :

$$A_{max} = \frac{\nu^2 \cdot H \cdot \rho^2 \cdot V_3^2 \cdot R^2 \cdot n^4}{6(1-2\nu) \cdot S \cdot E \cdot \alpha^2}. \quad (2.58)$$

В свою очередь постановка в (2.19), (2.30) и (2.53) приводит к следующему результату:

$$P_{изм} = \frac{\beta^2 \cdot V_0 \cdot W^2 \cdot E \cdot n}{6(1-2\nu)}. \quad (2.59)$$

Проведены теоретические описания энергетических характеристик работы ножей ротора вертикального измельчителя, в частности, определены параметры воздействия одного зуба ножа на измельчаемый материал. Расчеты включают определение усилия резания, работы и мощности, затрачиваемой на деформацию и разрушение измельчаемого материала.

С использованием полученных аналитических выражений построены графики (рис. 2.5) затрачиваемой мощности измельчителя, на резание и разрыв резинотехнических изделий при изменении частоты вращения зубьев ножей  $n=2,2\dots4,5$  с<sup>-1</sup> и предела прочности на растяжение измельчаемого материала  $\sigma_p=8\cdot 10^6\dots1,2\cdot 10^7$  Па с фиксируемым максимальным количеством режущих ножей  $z = 7$  шт при минимальной и максимальной толщине регулировочного ножа  $z_b = 2$  и 10 мм.

Мощность, затрачиваемая на измельчение  $P_{изм}$ , (рис. 2.5) при максимальной компоновке ротора с семью режущими ножами  $z$  при:

- толщине регулировочного ножа 2 мм (рис. 2.5., а) максимальное значение, затрачиваемое на измельчение, равно 0,334 кВт, при частоте вращения зубьев  $n = 4,5$  с<sup>-1</sup>, а предел прочности на растяжение  $\sigma_p = 1,2\cdot 10^7$  Па;

- толщине регулировочного ножа 10 мм (рис. 2.5, б) максимальное значение, равное 0,119 кВт, при частоте вращения зубьев  $n = 4,5$  с<sup>-1</sup>, а предел прочности на растяжение  $\sigma_p = 9\cdot 10^6$  Па.

При этом увеличение частоты вращения ротора увеличивает потребляемую мощность и уменьшает предел прочности на растяжение, так как при повышении частоты вращения ротора повышается механическая энергия.

Была выявлена связь между основными параметрами работы измельчителя, которые показали, что:

1. Режим работы измельчителя с максимальной толщиной регулировочного ножа и минимальной частотой вращения ротора приводит к преобладанию в готовом продукте частиц «рваной» формы. Данный эффект объясняется доминированием механизма разрыва и сдвига материала над чисто режущим

воздействием. Меньшая скорость и большая толщина режущего ножа способствуют многократному деформированию на выходе и перетиранию частицы перед ее окончательным разделением, что и формирует неправильную, рваную форму готового продукта с преобладающей фракцией 1 мм.

2. Режим работы измельчителя с минимальной толщиной регулировочного ножа и максимальной частотой вращения ротора, напротив, способствует образованию частиц кубовидной (изометрической) формы. В этих условиях процесс приближается к чистому резанию: высокая скорость воздействия и минимальная толщина регулировочного ножа обеспечивают быстрое и локализованное разрезание материала по нужным размерам фракции, минимизируя пластическую деформацию и производя более однородные по форме частицы, близкие к кубовидным с преобладающей фракцией 3 мм.

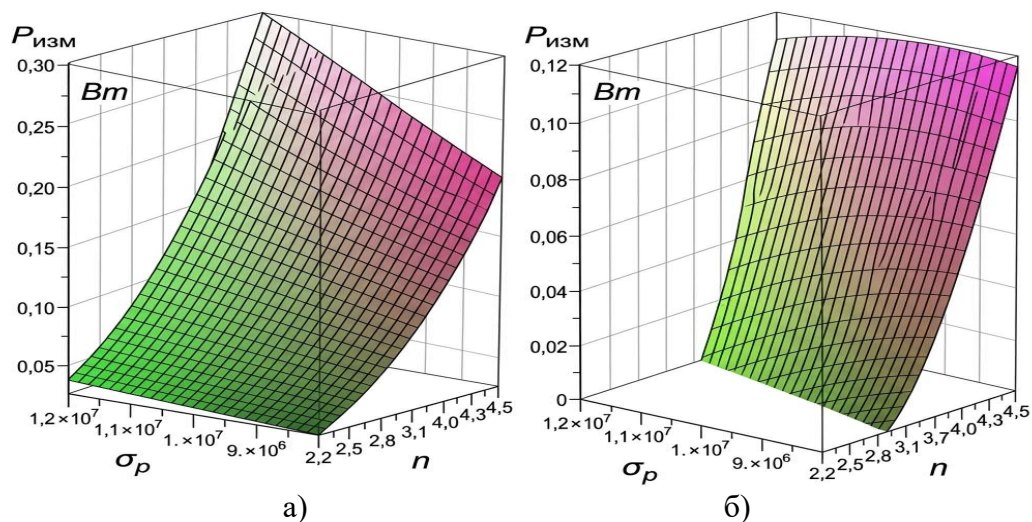


Рисунок 2.5 Зависимость изменения затрачиваемой мощности измельчителя для разрушения резинотехнических отходов при изменении частоты вращения зубьев ножей  $n$  и предела прочности на растяжение измельчаемого материала  $\sigma_p$  при максимальной компоновке ротора с набором режущих ножей  $z = 7$ :

а – толщина регулировочного ножа  $z_b = 2$  мм; б – толщина регулировочного ножа  $z_b = 10$  мм

Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать, что морфология частиц резиновой крошки является не случайным, а полностью управляемым параметром технологического процесса. Путем подбора конфигурации количества режущих ножей, толщины регулировочного ножа и кинематических режимов работы измельчителя (частоты вращения) можно целенаправленно изменять механизм разрушения материала от преимущественно

раздавливающего и сдвигового с получением «рваной» крошки к чисто режущему с получением кубовидной крошки [98].

## 2.4 Определение производительности

Расчет производительности вертикального измельчителя основан на допущении о линейном характере изменения насыпной плотности материала. Согласно этой гипотезе, плотность загрузки изменяется от начального значения на входе до конечного значения на выходе по линейному закону. Для описания данного процесса используется следующее соотношение:

$$Q = \frac{d}{dt} \iiint \gamma(z_h) dV, \quad (2.60)$$

где  $\gamma(z_h)$  – функция, описывающая изменение насыпной плотности резинового материала при движении в корпусе измельчителя. На основании предположения ведем цилиндрическую систему координат с осями  $r, \varphi, z_h$ . Ось  $z_h$  направим вниз от точки загрузки измельчаемого материала. Пусть в начале координат  $z_h = 0$  насыпная плотность загрузки материала равна  $\gamma_0$ , а в точке  $h$  равной высоте корпуса вертикального измельчителя насыпная плотность принимает значение  $\gamma_k$ . Тогда можно записать следующее:

$$\frac{\gamma(z_h) - \gamma_0}{\gamma_k - \gamma_0} = \frac{z_h}{h}, \quad (2.61)$$

где  $h$  – высота корпуса вертикального измельчителя, м;

$\gamma_0$  – насыпная плотность загрузки, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_k$  – конечная насыпная плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$z_h$  – расстояние от верхней точки загрузки до рассматриваемого поперечного сечения, м.

Исходя из предположения, что характер изменения насыпной плотности материала в первом приближении носит линейный характер, задаваемый соотношением (2.62), на основании выражения (2.61) найдем искомое значение:

$$\gamma(z_h) = \gamma_0 + \frac{\gamma_k - \gamma_0}{h} \cdot z_h. \quad (2.62)$$

Элемент объема  $dV$  в цилиндрической системе координат будет иметь вид:

$$dV = r dr d\varphi dz_h. \quad (2.63)$$

С учетом полученных формул (2.62) и (2.63) выражение для изменения производительности, как функции координаты  $z$  примет вид:

$$Q(z_h) = \frac{d}{dt} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{r_1}^{r_k} r dr \cdot \int_0^{z_h} \left( \gamma_0 + \frac{\gamma_k - \gamma_0}{h} \cdot z_h \right) dz_h, \quad (2.64)$$

где  $r_1$  – радиус верхнего ряда режущих ножей, м;

$r_k$  – радиус последнего нижнего ряда режущих ножей, м.

Вычисление первых двух интегралов в формуле (2.64) приводит к виду:

$$Q(z_h) = \pi(r_k^2 - r_1^2) \frac{d}{dt} \int_0^{z_h} \left( \gamma_0 + \frac{\gamma_k - \gamma_0}{h} \cdot z_h \right) dz_h. \quad (2.65)$$

Интегрирование (2.65) приводит к следующему результату:

$$Q(z_h) = \pi(r_k^2 - r_1^2) \frac{d}{dt} \left( \gamma_0 \cdot z_h + \frac{\gamma_k - \gamma_0}{2h} \cdot z_h^2 \right). \quad (2.66)$$

Вычисление производных по времени позволяет записать:

$$Q(z_h) = \pi(r_k^2 - r_1^2) \left( \gamma_0 \cdot \vartheta_{z_h} + \frac{\gamma_k - \gamma_0}{h} \cdot z_h \cdot \vartheta_{z_h} \right), \quad (2.67)$$

где  $\vartheta_{z_h} = \frac{dz_h}{dt}$  – скорость движения материала вдоль оси  $Oz_h$ .

Для согласованной работы шнекового питателя и пропускной способности вертикального измельчителя необходимо чтобы:

$$\vartheta_{z_h} = \vartheta_{\Omega}, \quad (2.68)$$

где  $\vartheta_{\Omega}$  – скорость подачи материала шнековым питателем, которую можно записать в виде:

$$\vartheta_{\Omega} = n_{\Omega} \cdot h_w, \quad (2.69)$$

здесь  $n_{\Omega}$  – частота вращения шнекового питателя,  $c^{-1}$ ;

$h_w$  – шаг шнека, м.

С учетом (2.68) и (2.69) формула (2.67) принимает вид:

$$Q(z_h) = \pi(r_k^2 - r_1^2) \left( \gamma_0 + \frac{\gamma_k - \gamma_0}{h} \cdot z_h \right) n_{\Omega} \cdot h_w. \quad (2.70)$$

Полученное соотношение (2.70) описывает изменение производительности при прохождении материала через всю рабочую область. При этом насыпная плотность загрузки  $\gamma_0$  изменяется до конечной насыпной плотности  $\gamma_k$ , которая зависит от толщины регулировочного ножа  $z_b$ . Так, при минимальной толщине

регулирующего ножа  $z_b = 2$  мм, конечная насыпная плотность  $\gamma_k$  будет равна 400 кг/м<sup>3</sup>, где будут преобладать частицы кубовидной формы размером 3 мм. А при увеличении толщины регулирующего ножа  $z_b = 10$  мм, конечная насыпная плотность  $\gamma_k$  будет равна 490 кг/м<sup>3</sup>, где будут преобладать частицы рваной формы размером 1 мм.

Для более точного описания процесса измельчения учтем, что по всей высоте корпуса  $h$  равномерно установлены ножи. Количество ножей  $z$  может составлять от 3 до 7 шт. При равномерном расположении расстояние между ножами составит:

$$\Delta z = \frac{h}{z - 1}, \quad (2.71)$$

здесь  $z$  – количество ножей, шт.

В таком случае координата  $j$ -го ряда ножей ( $j=0,1,\dots, z-1$ ) определяется выражением:

$$z_j = j \cdot \Delta z = j \cdot \frac{h}{z - 1}, \quad (2.72)$$

Поскольку изменение насыпной плотности происходит дискретно при прохождении каждого ряда ножей, значение плотности после прохождения  $j$ -го ряда ножей (или перед  $(j+1)$ -м рядом) можно записать в виде:

$$\gamma_j = \gamma_0 + \frac{\gamma_k - \gamma_0}{z - 1} \cdot j, \quad (2.73)$$

где  $j$  – номер ряда ножей ( $j=0,1,\dots, z-1$ ), шт.

Подставляя (2.73) в (2.70) вместо непрерывной зависимости  $\gamma(z_h)$ , получаем выражение для производительности на участке между  $j$ -м и  $(j+1)$ -м рядами ножей:

$$Q_j = \pi(r_k^2 - r_1^2) \cdot \gamma_j \cdot n_\Omega \cdot h_w, \quad (2.74)$$

где  $\gamma_j$  – насыпная плотность после прохождения  $j$ -го ряда ножей, кг/м.

На основании (2.74) значение итоговой производительности на выходе из измельчителя (при  $j = z - 1$ , то есть после последнего ряда ножей) составит [99]:

$$Q(h) = \pi(r_k^2 - r_1^2) \cdot \gamma_k \cdot n_\Omega \cdot h_w. \quad (2.75)$$

Таким образом, полученная формула (2.70) описывает изменение производительности при переходе материала от одного ряда ножей к другому, а (2.75) определяет суммарную производительность вертикального измельчителя.

Получена 3х мерная поверхность изменения производительности  $Q$  измельчителя (рис. 2.6) в зависимости от изменения насыпной плотности в зоне измельчения  $\gamma_k$  и частоты вращения шнекового питателя  $n_\Omega$ . Насыпная плотность зоны измельчения  $\gamma_k$  зависит от высоты корпуса вертикального измельчителя  $h$  и насыпной плотности загрузки материала до измельчения  $\gamma_0$ , а частота вращения шнекового питателя  $n_\Omega$  напрямую зависит от частоты вращения ротора.

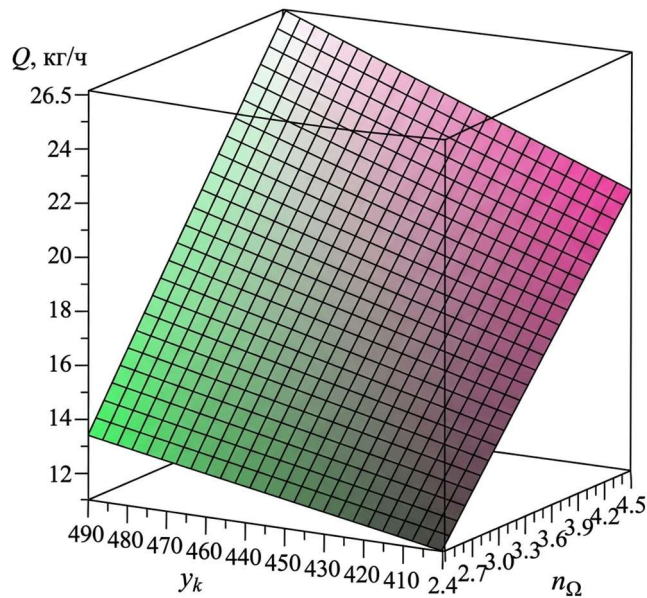


Рисунок 2.6 Зависимость производительности  $Q$  от насыпной плотности зоны измельчения  $\gamma_k$  и частоты вращения шнекового питателя  $n_\Omega$

При изменении насыпной плотности в зоне измельчения  $\gamma_k$  в интервале от 400 до 490 кг/м<sup>3</sup> производительность  $Q$  принимает значение равное 13,5 кг/ч. При изменении частоты вращения шнекового питателя  $n_\Omega$  с 2,3 с<sup>-1</sup> до 4,5 с<sup>-1</sup> производительность  $Q$  возрастает в пределах от 13,5 до 26,5 кг/ч. Максимальную производительность  $Q$  получим при частоте вращения шнекового питателя  $n_\Omega$  4,5 с<sup>-1</sup> и насыпной плотности зоны измельчения  $\gamma_k = 490$  кг/м<sup>3</sup> и она будет равна 26,5 кг/ч.

## 2.5 Выводы по главе

1. На основе анализа кинетики разрушения резины при механическом воздействии установлено, что при внедрении зуба ножа в материал максимальные напряжения преимущественно концентрируются в объеме над вершиной зуба, интенсивность напряжений возрастает с увеличением глубины резания, а наибольшие растягивающие напряжения достигаются вблизи режущей кромки. Выявлены три стадии процесса резания: упругое деформирование, необратимые структурные преобразования с образованием микронадрезов и окончательное разрушение с формированием единой трещины.

2. С применением термодинамического подхода получено аналитическое выражение для определения работы, затрачиваемой на разрушение резинового массива, учитывающее как энергию, необходимую непосредственно для резания, так и энергию упругой деформации, накапливаемую в объеме материала перед фронтом резания. Показано, что при коэффициенте Пуассона  $\nu = 0,5$  процесс соответствует «чистому» резанию, а при  $\nu < 0,5$  накопленная энергия способствует отрыву частицы.

3. Выведены зависимости для определения максимальной работы и мощности, затрачиваемых зубом ножа на отделение частицы, которые связывают физико-механические свойства резины (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел прочности на растяжение), геометрические параметры зуба и ножа, а также технологические параметры ротора (частота вращения). Полученные соотношения позволяют рассчитывать энергетические параметры вертикального измельчителя.

4. Установлено, что форма частиц резиновой крошки является управляемым параметром: при работе с минимальной толщиной регулировочного ножа 2 мм и максимальной частотой вращения ротора преобладает режущий механизм разрушения, что обеспечивает получение частиц кубовидной формы размером 3 мм; при увеличении толщины регулировочного ножа до 10 мм и снижении

частоты вращения преобладают сдвиговые деформации и разрыв, что приводит к образованию частиц «рваной» формы размером 1 мм.

5. Разработана математическая модель производительности вертикального измельчителя, основанная на линейном изменении насыпной плотности материала по высоте рабочей зоны. На основе полученных выражений, описывающих изменение производительности, установлено, что при изменении насыпной плотности в зоне измельчения от 400 до 490 кг/м<sup>3</sup> и частоты вращения шнекового питателя с 2,3 до 4,5 с<sup>-1</sup> производительность может достигать 26,5 кг/ч.

## **ГЛАВА 3. МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ**

### **3.1 Постановка цели и задач экспериментальных исследований**

Целью экспериментальных исследований является: определение рациональной конструкции основных рабочих узлов и режимов работы измельчителя вертикального типа при возможных максимальных показателях качества готового продукта, минимальных энергозатратах и максимальной производительности [100, 101].

На основании поставленной цели задачами экспериментальных исследований являются:

– установить зависимость между основными конструктивными параметрами исследуемого измельчителя вертикального типа и его технологическими показателями работы;

– определить характер влияния режимов работы лабораторной установки на процесс измельчения резинотехнических отходов, находящихся в рабочей зоне между ротором и статором.

На первом этапе (рис. 3.1) нужно провести оценочные испытания измельчителя для определения основных факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс измельчения, а также выбора интервалов их варьирования.

На втором этапе проводятся экспериментальные исследования с использованием лабораторной установки для сопоставления теоретических и экспериментальных исследований. При этом используется рототабельное планирование второго порядка, а анализ получаемых данных производится методами математической статистики с использованием продуктов (Maple, Excel) [102, 103].



106, 107]. Данная разработка относится к устройствам для измельчения и может быть использована в строительной, горнорудной, дорожной, химической и энергетической промышленности и т.д. Устройство защищено патентом на полезную модель РФ [20] (Приложение 1). Ранее полученные патенты [21, 22] (Приложения 2, 3) содержат базовые конструктивные решения, на основе которых выполнена доработка до итоговой конструкции.

Установка (рис. 3.2) предполагает расположение внутри помещения и может эксплуатироваться в климатических условиях, группа У2 со следующими ограничениями [108]: температура окружающей среды от плюс 5 С° до 30 С°; атмосферное давление от 75,6 до 106,7 кПа; относительная влажность до 100% при  $t = 25^{\circ}\text{C}$ .



Рисунок 3.2 Измельчитель вертикального типа для переработки резинотехнических отходов:  
а – вертикальный измельчитель в сборе; б – конструктивные элементы

Технические характеристики установки измельчителя вертикального типа:

Частота вращения ротора.....	от 130 до 270 мин <sup>-1</sup>
Внутренний диаметр статора .....	127 мм
Высота статора.....	115 мм
Высота рабочей зоны.....	105 мм
Количество противорежущих ребер внутри статора.....	13 шт

Количество режущих ножей ротора.....	от 3 до 7 шт
Диаметр режущих ножей.....	125 мм
Толщина режущих ножей.....	2 мм
Количество зубьев режущих ножей.....	от 32 до 64 шт
Количество шайб между режущими ножами.....	от 2 до 6 шт
Диаметр шайб между режущими ножами.....	110 мм
Толщина шайб между режущими ножами.....	от 12,5 до 42 мм
Толщина регулировочного ножа.....	от 2 до 10 мм
Масса оборудования.....	83 кг
Габаритные размеры: высота - 750 мм; ширина - 310 мм; длина - 620 мм	

Измельчитель вертикального типа (рис. 3.3) включает в себя раму 1, на которую жестко крепится болтами выгрузочный желоб 2, сверху на нем закреплен цилиндрический корпус 3 с загрузочным бункером 4, который жестко соединен шпильчатым соединением с выгрузочным желобом 2.

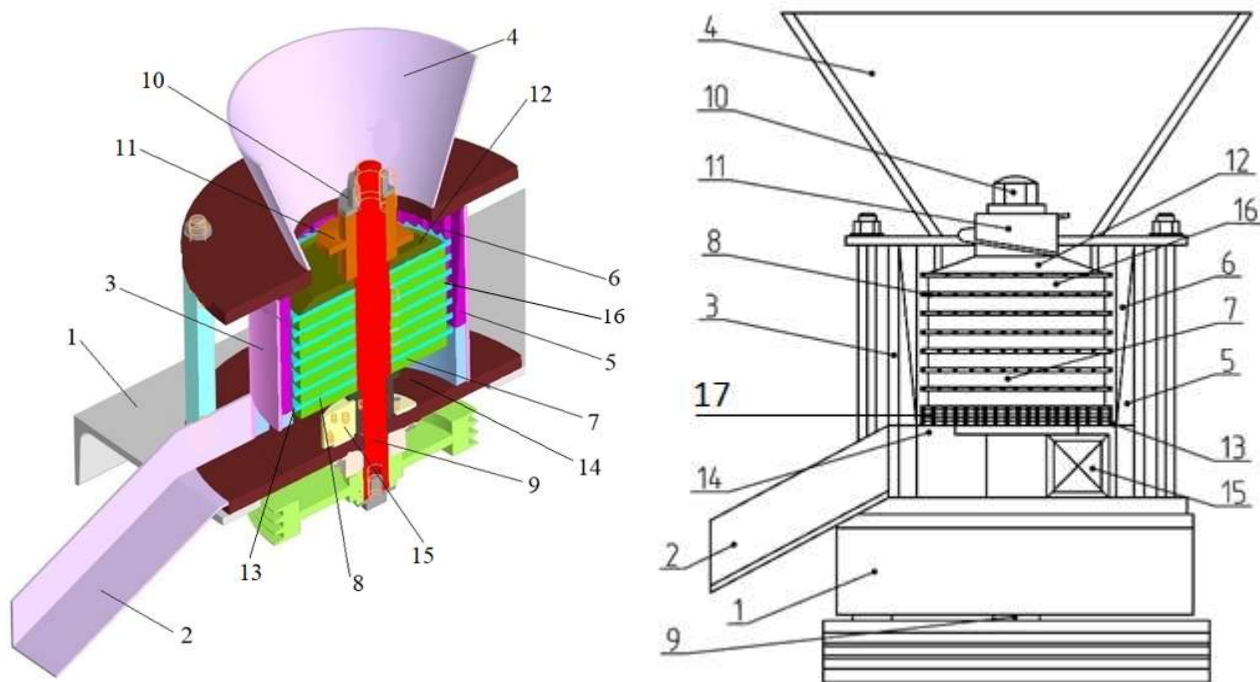
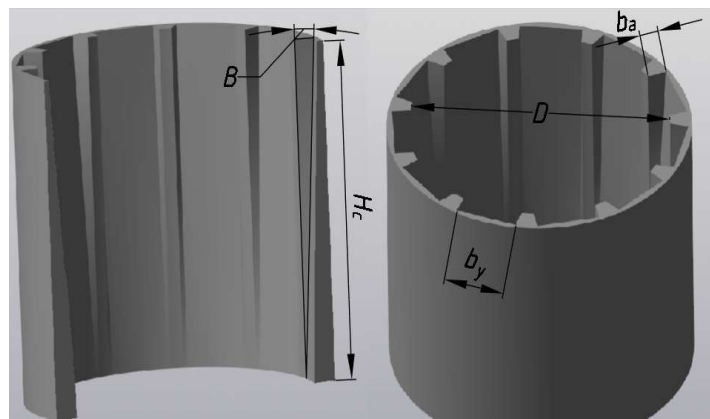


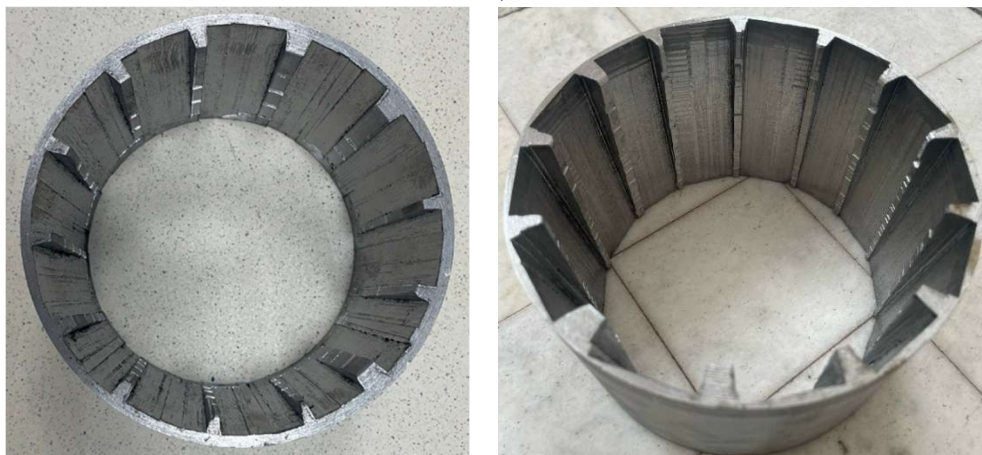
Рисунок 3.3 Измельчитель вертикального типа для переработки РТО:

- 1 - рама; 2 - выгрузочный желоб; 3 - цилиндрический корпус; 4 - загрузочный бункер;  
 5 - статор; 6 - противорежущие ребра; 7 - ротор; 8 - режущие ножи; 9 - вала;  
 10 - гайка; 11 - шнековый питатель; 12 - конусная втулка; 13 - минимальный зазор (между ротором и статором); 14 - зону выгрузки; 15 - выгрузочная лопасть; 16 - шайбы, 17 - регулировочный нож

Внутри корпуса 3 вставлен сменный статор 5 (рис. 3.4), имеющий форму полого цилиндра с противорежущими ребрами 6. Противорежущие ребра 6 образованы за счет протачивания пазов клиновидной формы вдоль всей высоты внутренней поверхности статора 5, сами пазы должны быть расположены острием вниз, чтобы происходило постепенное измельчение материала, так как более крупный материал задерживается вверху статора противорежущими ребрами 6, а зубья режущих ножей 8 и регулировочного ножа 17 (рис. 3.5) срезают выпирающие части материала, таким образом материал подвергается стадийному измельчению по всей высоте рабочей зоны между ротором и статором.



а)



б)

Рисунок 3.4 Цифровая модель статора (а); фотография статора (б):

$D$  – внутренний диаметр статора;  $b_y$  – ширина клиновидных пазов;  $H_c$  – высота статора;  $b_a$  – глубина клиновидных пазов;  $B$  – угол проточки клиновидных пазов статора

В статоре 5 расположен вертикальный ротор 7 (рис. 3.6), выполненный в форме цилиндра, образованного режущими ножами 8 и регулировочным ножом

17 одного диаметра, но с разным количеством и размером зубьев, а также шайбы 16 между ними (рис. 3.7).

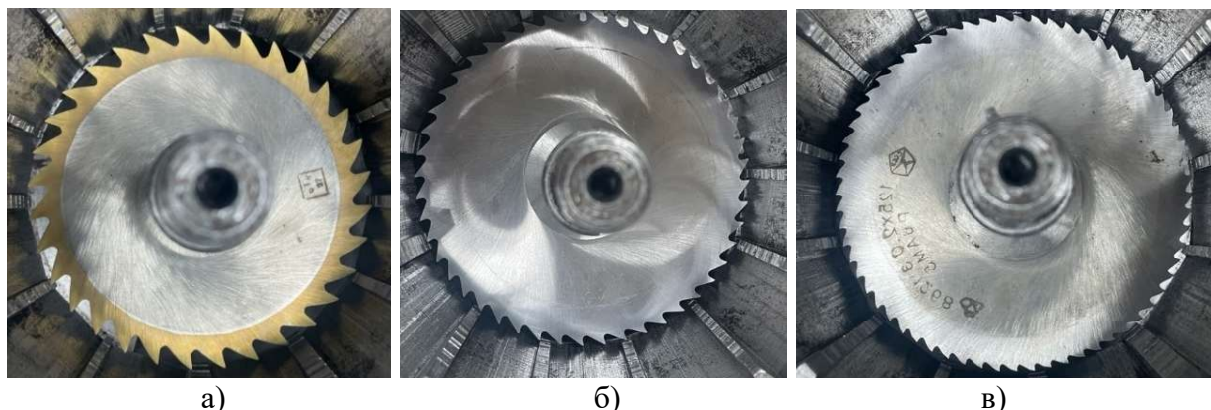


Рисунок 3.5 Ножи ротора измельчителя, расположенные в статоре:  
а – режущий нож  $z_a = 32$ ; б – режущий нож  $z_a = 48$ ; в – регулировочный нож  $z_b = 64$

В верхней части вала 9 гайкой 10 закреплен шнековый питатель 11 и конусная втулка 12, имеющая форму усеченного конуса, направленного большим основанием в низ. В нижней части ротора 7 имеется регулируемый минимальный зазор 13, находящийся между ротором 7 и статором 5, через который готовый продукт попадает в зону выгрузки 14, где на валу 9 размещена лопасть 15, выталкивающая его в выгрузочный желоб 2.

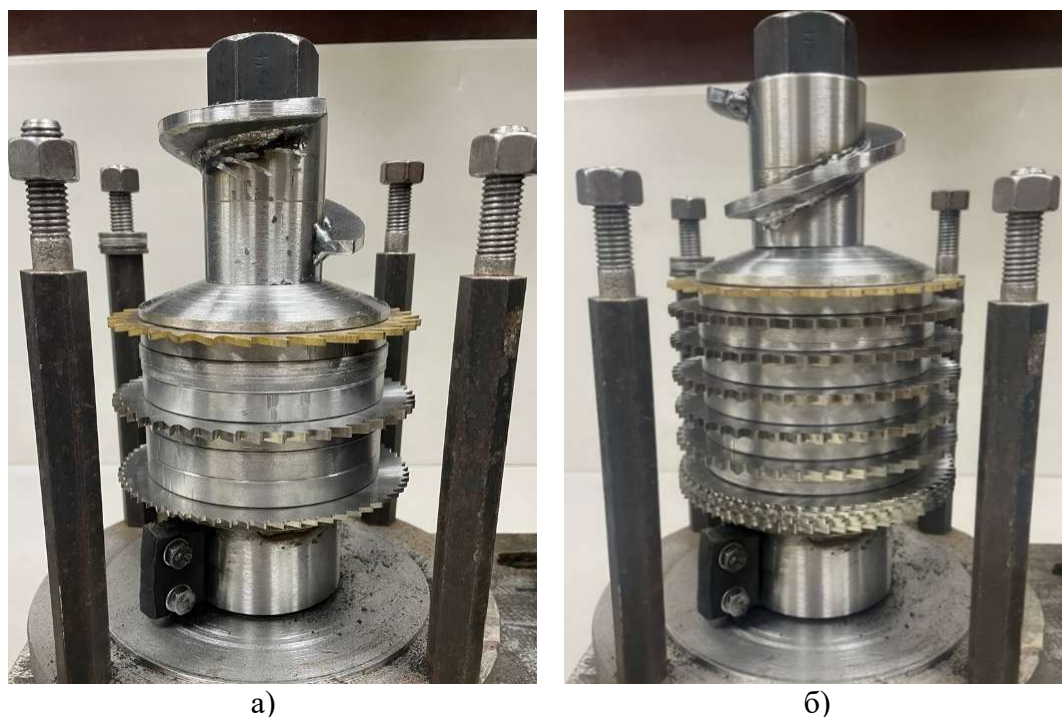


Рисунок 3.6 Ротор измельчителя вертикального типа в сборе:  
а – минимальная компоновка; б – максимальная компоновка.

Вертикальный измельчитель работает следующим образом, Ротор 7 приводится во вращение посредством клиноременной передачи от электродвигателя асинхронного «АИР 4АМ100L2У3» (табл. 3.1) [109, 110], после чего в загрузочный бункер 4 (рис. 3.3), который расположен выше цилиндрического корпуса 3 подаются резиновые чипсы, например, размером 22x22x5 мм и с помощью шнекового питателя 11, закрепленного шайбой 10 по втулке 12 равномерно подаются в рабочую зону измельчения между ротором 7 и статором 5.

Таблица 3.1

Основные технические параметры электродвигателя асинхронного  
«АИР 4АМ100L2У3»

Параметр	Значение
Мощность, кВт	5,5
Параметр	Значение
Мощность, кВт	5,5
Тип электродвигателей	Асинхронный, переменного тока
Частота вращения вала (синхронная), об/мин	3000
Напряжение, В	380
Номинальный ток ( $I_n$ ), А	10,51
Количество фаз	3-х фазный
КПД, %	87,5
Коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ )	0,91
Крутящий момент (номинальный), Н·м	17,51
Тип ротора	Короткозамкнутый
Кратность пускового момента (Мп/Мн)	2,0
Кратность максимального момента (М <sub>max</sub> /Мн)	2,2
<b>Габаритные размеры и вес</b>	
Диаметр вала, мм	28
Диаметр фланца, мм	250
Габаритные размеры (В×Д×Г), мм	395 × 280 × 235
Масса, кг	40,5

Материал попадая в рабочую зону между статором 5 и ротором 7, задерживается противорежущими ребрами 6 статора 5, а выпирающие части материала срезаются режущими ножами 8 и регулировочным ножом 17, расположенных на вертикальном валу 9, как и шайбы 16 (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 Шайбы ротора

Измельчаясь, материал просыпается вниз за счет клиновидных пазов статора 5, между противорежущими ребрами 6, вследствие чего и происходит постепенное измельчение и продвижение материала вниз. Далее готовый продукт нужной фракции просыпается через регулируемый минимальный зазор 13 в зону выгрузки 14, где с помощью вращающейся лопасти 15 выталкивается на выгрузочный желоб 2, который прикреплен к раме 1.

### **3.3 Описание основных характеристик и технических требований режущих и регулировочного ножей**

В качестве режущих и регулировочного ножей экспериментальной установки, на основании получения большого числа экспериментальных данных были выбраны дисковые отрезные фрезы с внешним диаметром 125 мм и толщиной 2 мм по ГОСТ 2679-2014. Конструкция ротора предусматривает последовательный монтаж ножей на вертикальный вал, собранный в комплект от 3 до 7 штук [111, 112]. Ступенчатое изменение числа зубьев 32, 48 и 64 сверху вниз (рис. 3.8), реализует три стадии измельчения материала, при этом итоговый размер и форма частиц варьируются за счет изменения количества ножей в сборке. Такая компоновка обеспечивает последовательное (стадийное) измельчение резиновых чипсов в крошку фракцией 1–3 мм. Кроме того, температура крошки после измельчения не превышает 50 °С, что является

допустимым значением для ее дальнейшего использования в качестве вторичного сырья.

Выбор разного количества зубьев, соответствующего радиуса при вершине и заднего угла обусловлен необходимостью согласования шага между резами, формы режущей кромки и условий трения для исключения "проскока" неразрезанных частиц и обеспечения свободного выхода готовой продукции. В вертикальной схеме с клиновидным статором это особенно важно, так как материал движется по пазам клиновидной формы и последовательно измельчается каждой фрезой.

В основе расчета лежит окружной шаг зуба ( $t_z = \frac{\pi \times D}{z_a}$ ), радиус при вершине, определяющий характер внедрения зуба в материал, и задний угол, обеспечивающий снижение трения задней поверхности зубьев об обрабатываемый материал.



Рисунок 3.8 Ротор с режущими и регулировочными ножами с сборе

Стадия первичного измельчения (режущий нож  $z$  с количеством зубьев  $z_a = 32$  шт., шаг зубьев  $\approx 12,3$  мм, толщина ножа  $A_l = 2$  мм, радиус при вершине  $r = 1,5$  мм, передний угол  $\gamma = 10^\circ$ , задний угол  $\alpha_b = 20^\circ$ ) (рис. 3.5, а). Нож с крупным

зубом и большими стружечными канавками выполняет грубое измельчение. Увеличенный радиус при вершине 1,5 мм повышает прочность зуба при ударных нагрузках от крупных фрагментов и предотвращает сколы. Передний угол  $\gamma = 10^\circ$  обеспечивает прочность режущего клина при сохранении способности захвата крупного материала. Задний угол  $\alpha_b = 20^\circ$  минимизирует трение задней поверхности при внедрении зуба в крупнокусковой материал. Большой шаг между зубьями (12,3 мм) предотвращает заклинивание и обеспечивает беспрепятственный отвод крупных фрагментов, минимизируя нагрузку на привод. Противорежущие ребра статора на этом уровне имеют максимальный шаг и ответный радиус скругления, соответствующий геометрии фрезы.

Стадия вторичного измельчения (режущие ножи  $z = 1-5$  шт. с количеством зубьев  $z_a = 48$  шт., толщина ножа  $A_l = 2$  мм, шаг зубьев  $\approx 8,2$  мм, радиус при вершине  $r = 0,8$  мм, передний угол  $\gamma = 5^\circ$ , задний угол  $\alpha_b = 20^\circ$ ) (рис. 3.5, б). Полученная на первой стадии крупная фракция поступает на ножи со средним зубом. Здесь происходит промежуточное измельчение. Шаг 8,2 мм перекрывает зоны, необработанные верхней фрезой (12,3 мм), обеспечивая доизмельчение фрагментов. Радиус при вершине 0,8 мм обеспечивает более чистое резание и лучшее проникновение в материал без чрезмерного разрыва материала. Передний угол  $\gamma = 5^\circ$  обеспечивает хорошее скольжение резины по передней поверхности зуба и минимизирует трение. Задний угол  $\alpha_b = 20^\circ$  балансирует снижение трения и прочность режущей кромки. Клиновидные пазы статора на этом уровне сужаются, направляя частицы размером 8–12 мм точно в зону реза.

Стадия окончательного (калибрующего) измельчения (регулируемый нож  $z_b$  с количеством зубьев  $z_a = 64$  шт., шаг зубьев  $\approx 6,1$  мм, радиус при вершине  $r = 0,4$  мм, передний угол  $\gamma = 5^\circ$ , задний угол  $\alpha_b = 20^\circ$ ; толщина ножа  $A_l = 2$  мм, комплект состоит из 1, 2, 3, 4, 5 ножей для толщины 2, 4, 6, 8, 10 мм соответственно) (рис. 3.5, в). Регулируемый нож с мелким зубом выполняет финальное измельчение. Минимальный шаг 6,1 мм перекрывает шаг промежуточной фрезы (8,2 мм), гарантируя, что ни одна частица размером более 5 мм не выйдет из рабочей зоны. Радиус при вершине 0,4 мм обеспечивает острую

режущую кромку для финишного среза и калибровки частиц до фракции 1–3 мм. Передний угол  $\gamma = 5^\circ$  (максимальное значение) обеспечивает наилучшие условия для схода материала без налипания и снижает тепловыделение. Задний угол  $\alpha_b = 20^\circ$  при уменьшенном радиусе между зубьями повышает жесткость и прочность зуба, обеспечивая стабильность положения кромки и минимальную вибрацию. Сочетание толщины фрезы 2 мм, малого шага 6,1 мм, острой кромки и умеренного заднего угла обеспечивает сход частиц целевой фракции с минимальной деформацией. Узкие клиновидные пазы нижнего уровня статора выполняют финальную калибровку, отсеивая готовую крошку и направляя ее в сборный бункер.

Материал ножей — быстрорежущая сталь P5M5 (HSS M2). Высокая ударная вязкость данной стали компенсирует вибрационные и импульсные нагрузки, характерные для консольного крепления инструмента на вертикальном валу и его взаимодействия с массивным статором. Теплостойкость P5M5 ( $\sim 600^\circ\text{C}$ ) достаточна для обеспечения надежности режущего инструмента на всех стадиях измельчения [112].

Таким образом, последовательная установка ножей с разным количеством зубьев позволяет разделить энергоемкий процесс измельчения резинотехнических отходов на стадии, повышая общую эффективность установки, снижая удельные нагрузки на каждый инструмент и обеспечивая получение на выходе резиновой крошки заданного гранулометрического состава и морфологии.

### **3.4 Приборы и оборудование для контроля и регистрации, исследуемых параметров, техника отбора проб**

Для проведения экспериментальных исследований подобраны контрольно-измерительные приборы и оборудование, обеспечивающие изучение процесса при варьировании основных конструктивных и технологических параметров экспериментальной установки в заданных диапазонах с требуемой точностью измерений.

Мощность, потребляемая экспериментальной установкой, измерялась счетчиком электрической энергии трехфазного типа «Меркурий 230 ART-01-RN» (рис. 3.9). Данный счетчик может работать в составе автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии, имеет встроенный интерфейс CAN или GSM-модем. Счетчик в составе системы всегда является ведомым, то есть не может передавать информацию в канал без запроса ведущего, в качестве которого выступает управляющий компьютер (ПК). Управляющий компьютер направляет адресные запросы счетчикам в виде последовательности двоичных байт, на что адресованный счетчик отправляет ответ. Число байт запроса и ответа не является постоянной величиной и зависит от характера запроса [113].



Рисунок 3.9 Счетчик электрической энергии трехфазного типа «Меркурий 230 ART-01-RN»

Для программирования счетчика и считывания данных по интерфейсу используется программное обеспечение «Конфигуратор счетчиков трехфазных Меркурий», работающее в операционной среде Windows. Подключение счетчика к ПК осуществлялось с помощью преобразователя интерфейсов. По рекомендациям производителя использовался преобразователь «Меркурий 221», поддерживающий подключение через USB. Назначение разъемов преобразователя следующее:

- USB - подключение к компьютеру;

- CAN - подключение счетчиков с CAN интерфейсом: 1 (+5V), 2 (+DATA), 3 (-DATA), 4 (GND);
- RS-485 - подключение устройств с RS-485 интерфейсом: 1 (+5V), 2 (+DATA), 3 (-DATA), 4 (GND);
- RS-232 - подключение устройств с RS-232 интерфейсом: 2 (RX), 3 (TX), 5 (GND).

Для решения эксплуатационных задач была организована система сбора и обработки мгновенных значений по каждой фазе: токов, фазных напряжений, активных и реактивных мощностей, частоты сети, межфазных углов (рис. 3.10). В программном обеспечении предусмотрена форма «Мгновенные значения», предназначенная для мониторинга текущих параметров электрической сети, а также для просмотра векторной диаграммы.

**Мгновенные значения** 20.02.2026, M230 (0),

На данной вкладке можно посмотреть мгновенные значения параметров электроэнергии.

Наименование	Фаза-1	Фаза-2	Фаза-3	Сумма
Мощн. P(Вт)				
Мощн. Q(вар)				
Мощн. S(ВА)				
Козф. мощн.				
Напряж. U(В)				
Uab, Ubc, Uca (В)				
Козф. искажения напряжения (%)				
Ток I(A)				
Угол м-ду ф. 1 и 2				
Угол м-ду ф. 1 и 3				
Угол м-ду ф. 2 и 3				
Частота F(Гц)				
Температура (°C)				

Зафиксировать | Прочитать зафиксированные | Прочитать | Диаграммы

Рисунок 3.10 Система для сбора и обработки мгновенных значений электрических величин

Настройка и управление частотным преобразователем осуществлялась с помощью программного обеспечения «CTSoft Version 01.10.04». Подключение к частотному преобразователю «AC Motor speed controller LS600-4007» возможно с помощью преобразователя интерфейсов USB-RS232 (рис. 3.11) (табл. 3.2) [114].

С помощью панели управления в окне настроек производится запуск частотника, регулирование частоты тока и осуществляются другие необходимые настройки. В процессе проведения экспериментов с помощью отдельных окон программы производится регистрация необходимых параметров для расчета расхода электроэнергии при измельчении.



Рисунок 3.11 Частотный преобразователь «AC Motor speed controller LS600»

Таблица 3.2

Технические характеристики частотного преобразователя «AC Motor Speed Controller L5600»

Параметр	Значение / Описание
Входное напряжение	~ 400 В, (3-фазы)
Максимальное выходное напряжение	380 ~ 460 В (по трем фазам)
Номинальное напряжение и частота	3 фазы 380/400/415/440/460 В 50/60 Гц
Максимальная мощность двигателя	5,5 кВт (7,5 л.с.)
Номинальная выходная мощность	9,5 кВт
Номинальный выходной ток	12 А
Диапазон частот управления	0,5 Гц ~ 240 Гц
Погрешность по частоте	Цифровая команда: 0.1 % (-10-40С) Аналоговая команда: 0.5% (25С ±10С)
Степень защиты (IP)	IP20 (стандартно для таких моделей)
Способы управления	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Потенциометр на лицевой панели</li> <li>• Внешний потенциометр (0-5 В / 0-10 В)</li> <li>• Клеммы управления (Вперед/Стоп/Реверс)</li> </ul>

Дополнительные измерения регулировки частоты вращения ротора проводились с использованием цифрового бесконтактного тахометра «АТ-6» (табл. 3.3). Принцип действия прибора основан на оптическом измерении количества прохождений метки на валу через фиксированную точку в единицу времени. Полученные данные о количестве оборотов в минуту [115] использовались для точной калибровки системы привода. Прибор оснащен лазерным целеуказателем, что обеспечивает точное позиционирование при измерениях, и встроенной памятью для фиксации результатов. Для исключения влияния внешней засветки применялся специальный отражающий маркер.

Таблица 3.3

## Технические характеристики цифрового тахометра «АТ-6»

Параметр	Значение / Описание
Диапазон измерений	Бесконтактно: 100 ÷ 20 000 об/мин Контактно: 50 ÷ 100 000 об/мин (с множителями)
Количество диапазонов	5 (с ручным переключением)
Основная погрешность	±(1 ед. младшего разряда + 1 импульс)
Время измерения	Фиксированное: 1 секунда
Индикация	5-разрядный светодиодный дисплей (LED)
Рабочее расстояние (бесконтакт.)	50–300 мм (оптимально 100–200 мм)
Требование к объекту	Одна контрастная метка на детали
Питание	Сеть 220 В, 50 Гц (через встроенный блок питания)

Время опыта замерялось с помощью секундомера «С-11-16». Взвешивание отобранных проб проводилось на настольных электронных весах типа ЕК - 200 предназначенные для статического измерения массы от 0,2 до 200 г, с пределом допускаемой погрешности взвешивания  $\pm 0,01$  г.

Рассев измельченного материала проводили на ситах из нержавеющей стали с круглыми отверстиями 5,0; 3,0; 2,5; 1,25; 1,0 мм [116]. Процедура рассева включала последовательное разделение материала по фракциям. Для обеспечения точности результатов просеивание крошки проводили при строго контролируемых условиях: время рассева составляло 5 минут, а амплитуда колебаний лабораторной виброплощадки «ВПУ-Ф» (рис. 3.12) поддерживалась в типовом диапазоне от 1,0 до 2,5 мм при частоте колебаний 45 Гц. Особое

внимание уделялось предотвращению забивания ячеек, для чего применялись малярные кисти [117].

Полученные данные о распределении частиц по фракциям использовались для последующего анализа гранулометрического состава измельченного материала с помощью полулогарифмического метода.



Рисунок 3.12 Лабораторная виброплощадка «ВПУ-Ф»

В качестве измельчаемого материала при проведении экспериментальных исследований было принято использовать резинотехнические чипсов без посторонних включений (рис. 1.1) с максимальным размером  $25 \times 25 \times 5$  мм.

Для обеспечения стабильной подачи резиновых чипсов и эффективной работы измельчителя требуется оборудование, обеспечивающее дозированную и непрерывную подачу. Для реализации данного процесса выбран электромагнитный вибрационный питатель «GZV-2» (рис. 3.13).

Основная функция вибрационного питателя — преобразование сыпучих резиновых чипсов склонных к слеживанию в равномерный поток. Это достигается за счет высокочастотной низкоамплитудной вибрации лотка. Вибрация обеспечивает транспортировку материала и его разрыхление, разрушая возможные пустоты и слеживания.

Регулировка привода позволяет настраивать производительность подачи материала в измельчитель, что обеспечивает стабилизацию нагрузки на электродвигатель, предотвращает заклинивание ротора, снижает износ режущих элементов и повышает общую производительность оборудования. Точность подачи является критическим параметром для получения готового продукта заданного качества.



Рисунок 3.13 Вибрационный питатель «GZV-2»

Единого документа, по которому регламентируется резиновая крошка не существует, поэтому технические характеристики крошки регламентируются предприятиями потребителями [118].

Размер резиновой крошки определяем ситовым анализом – рассев сыпучего материала, с целью определения его гранулометрического состава, через стандартный набор сит и определение процентного содержания остатка на каждом из них по отношению к массе исходной пробы. При этом средний диаметр крошки определяется размером отверстия, через которое оно проходит.

Применяемые приборы:

- весы настольные электрические «ЕК – 200», допускаемая погрешность  $\pm 0,01$ г;
- секундомер С-11-16;

- лабораторная виброплощадка «ВПУ-Ф»;
- сита из нержавеющей стали с круглыми отверстиями 5,0; 3,0; 1,0 мм;
- кисти малярные диаметром 10-40 мм.

Описание отсева резиновой крошки:

1. Подготовка. Набор стандартных сит с разным размером ячеек собирают в колонку ("ситовый штабель"). Снизу ставится сито с самыми мелкими ячейками (поддон), сверху — с самыми крупными. Взвешивается пустая тара для каждой фракции.

2. Загрузка. На верхнее сито помещается точная навеска исходной резиновой крошки.

3. Просеивание. Просеивание проводили на лабораторной виброплощадке «ВПУ-Ф» (рис. 3.11). После загрузки пробы колонку сит закрывали крышкой, устанавливали на виброплощадку и фиксировали прижимной плитой. Процесс встряхивания и постукивания обеспечивался механическим приводом станда в течении трех минут.

4. Взвешивание. После просеивания каждое сито аккуратно снимают, а крошку, оставшуюся на нем, вытряхивают на чашку и взвешивают, после чего сито протирают кисточкой. Получаем массу фракции, соответствующую размеру ячеек используемого сита.

5. Расчет. Суммируют массы всех полученных фракций и сравнивают с массой исходной навески для контроля потерь. Результаты представляют в виде распределения массовых долей (%) по фракциям.

По результатам ситового анализа (табл. 3.4) вычисляется средний диаметр крошки в классе и суммарные выходы, представляющие сумму выходов всех классов крупнее (суммарный выход по плюсу) и мельче (суммарный выход по минусу) отверстий данного сита.

Максимальная масса пробы (кг) резиновой крошки для гранулометрического состава рассчитывается по формулам:

$$M = 0,02d^2 + 0,5d; \quad (3.2)$$

$$M = kd^2, \quad (3.3)$$

где  $d$  – размер максимальный размер крошки, м;

$k$  – коэффициент, зависящий от однородности состава.

Таблица 3.4

## Результаты ситового анализа

Общий вес, кг	>5 мм		5-3 мм		3-1 мм		<1 мм		Q кг/ч
	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	
0,098	0,004	4	0,054	55	0,034	35	0,006	6	5,88
0,101	0,003	3	0,058	57	0,036	36	0,004	4	6,06
0,114	0,005	4	0,063	55	0,042	37	0,005	4	6,48
0,121	0,002	2	0,070	58	0,041	34	0,007	6	7,26
0,156	0,011	7	0,103	66	0,037	24	0,005	3	9,36

Гранулометрический состав резиновой крошки может быть изображен суммарной кривой или кривой неоднородности. Для этого строят график гранулометрического состава в полулогарифмической форме; по оси абсцисс откладывают десятичные логарифмы диаметров частиц, а по оси ординат – процентное содержание частиц менее данного диаметра (рис. 3.14). По кривой неоднородности определяют степень (коэффициент) неоднородности, а также действующий эффективный диаметр [119].

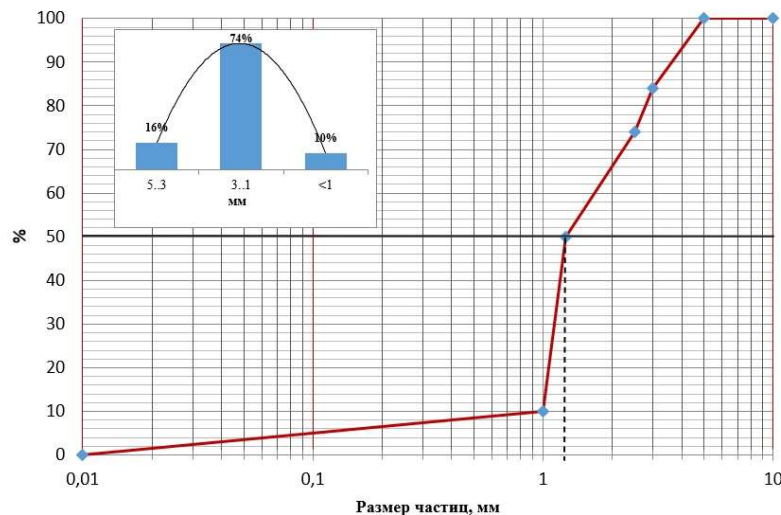


Рисунок 3.14 Суммарная кривая гранулометрического состава резиновой крошки

За действующий диаметр принимают размер частиц, соответствующий ординате 10 % ( $d_{10}$ ).

По размеру частиц резиновой крошки подразделяют на [28]:

– резиновую пыль < 1 мм;

- крошку кубической и равной формы 1-3 мм;
- крошку кубической и равной формы 3-5 мм.

В начале координат ставят число 0,01, принимают  $\lg 10$  в произвольном масштабе, откладывают этот отрезок в правую сторону 3 раза, делая отметки и ставя против них последовательно 0,1; 1; 10,0. Расстояние между каждыми двумя метками делят на девять частей пропорционально логарифмам чисел 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. В первом интервале выделенные отрезки будут отвечать диаметрам частиц от 0,02 до 0,09 мм, во втором – от 0,2 до 0,9 мм, в третьем – от 2 до 9 мм. Например, если принять, что  $\lg 10 = 1$  соответствует 3 см, то получим отрезки  $\lg 2 = 0,301$ , умножая на принятый масштаб  $0,301 \times 3 = 0,9$  см и т.д. Найденные отрезки откладывают по оси абсцисс от начала координат и от каждой метки, ограничивающей отрезок длиной 3 см. Данные гранулометрического состава по полным проходам процентам наносят на сетку и получают суммарную кривую (кривую неоднородности) [120].

### **3.5 Статический анализ вертикального ротора в *CAD/CAE* – системе *SOLIDWORKS CAD Simulation***

Программный продукт *SOLIDWORKS* представляет собой *CAD/CAE* – систему для инженерного анализа, позволяющую проводить статические и динамические испытания конструкций в среде *SOLIDWORKS CAD Simulation* [121, 122, 123, 124]. Этот инструмент дает возможность оценивать прочность, жесткость и долговечность элементов конструкции на этапе проектирования. Благодаря интеграции с системой трехмерного моделирования, любые изменения геометрии автоматически учитываются в расчетах, это обеспечивает возможность устранять недостатки конструкции, что ускоряет процесс разработки, поддерживая различные виды анализа, включая статические нагрузки, усталостные воздействия и кинематику, что позволяет комплексно оценивать поведение конструкции при эксплуатации. [125, 126, 127, 128].

Необходимо провести статический анализ ротора в сборе (рис. 3.15) состоящего из: вала 1; гайки 2; шнека 3; конусной втулки 4; режущих ножей 5;

регулирующего ножа 6, состоящего из набора режущих ножей; втулок 7; шпонки под ременную передачу 8; шпонки под режущую часть 9.

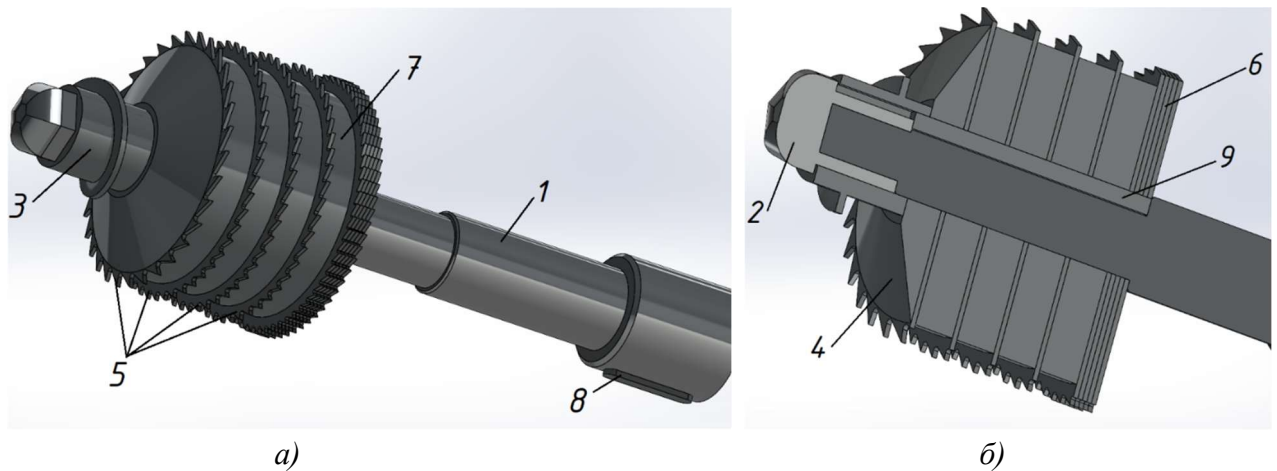


Рисунок 3.15 Вертикальный ротор в сборе (а); разрез ротора со шпонкой под режущую часть (б):  
1 – вал; 2 – гайка; 3 – шнек; 4 – конусная втулка; 5 – режущие ножи; 6 – регулировочный нож,  
состоящий из набора режущих ножей; 7 – втулка; 8 – шпонка под ременную передачу;  
9 – шпонка под режущую часть

Для статического расчета ротора в сборе необходимо: проверить правильность совмещения деталей сборки ротора; зафиксировать ротор шпонкой в нижней части вала с помощью фиксируемой геометрии и поместить в подшипниковое крепление; приложить на режущие ножи, вал и шпонки, действующие минимальные и максимальные нагрузки вращающего момента ротора под нагрузкой, которые равны  $90 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$  при  $130 \text{ мин}^{-1}$  и  $85 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$  при  $270 \text{ мин}^{-1}$ .

После задания геометрии модели выполняется автоматическое построение конечно-элементной сетки (рис. 3.16), на основе заданных параметров дискретизации. В расчете используется тетраэдральная сетка, где в качестве базовых элементов применяются тетраэдры, при этом процесс разбиения регулируется следующими настройками [129]:

- максимальной длиной стороны элемента, которая определяет основной размер тетраэдра (рекомендуется выбирать значение в 2–4 раза меньше минимальной толщины детали, чтобы обеспечить корректное описание геометрии и градиентов напряжений);

- максимальным коэффициентом сгущения сетки на поверхности, который задает степень уменьшения элементов на поверхностях (например, в

зонах концентраторов напряжений), чем выше коэффициент, тем мельче сетка в критических областях;

– коэффициентом разрежения в объеме, который контролирует плавность увеличения размера элементов от поверхности вглубь тела (меньшие значения обеспечивают более равномерную слоистую структуру сетки).

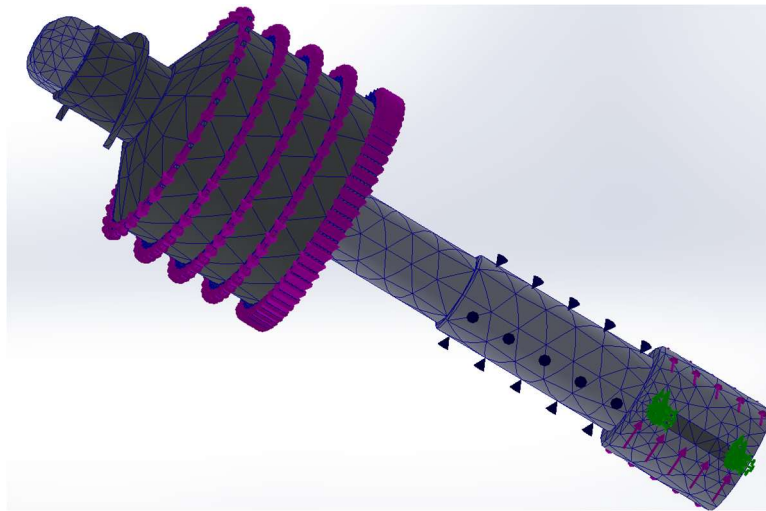


Рисунок 3.16 Построение конечно-элементной сетки ротора

Нужно отметить, что настройки применяются ко всей сборке целиком, что упрощает процесс подготовки модели, но требует внимательного выбора общих значений для разнородных деталей. После получения готовой расчетной модели запускается процесс статического расчета, который дает представление о напряженно-деформированном состоянии конструкции, выявляя потенциально опасные участки и зоны максимальных нагрузок (табл. 3.5, 3.6).

По результатам моделирования установлено, что локализация максимальных напряжений по Мизесу располагаются на шпонке под шкив ременной передачи, при этом для стали 40ХН максимально допустимое значение равно  $[\sigma] = 520 \text{ МПа}$  [130]. В местах максимального напряжения есть выраженная обратно пропорциональная зависимость между частотой вращения и величиной возникающих напряжений, так при изменении частоты вращения в пределах от  $130 \text{ мин}^{-1}$  до  $270 \text{ мин}^{-1}$  напряжение уменьшается в 2 раза изменяясь с  $5,63 \text{ МПа}$  до  $2,815 \text{ МПа}$  (табл. 3.7, рис. 3.17), это можно объяснить тем, что увеличение крутящего момента при измельчении резинотехнических отходов приводит к

более равномерному распределению напряжений ротора по сечению вала, с ростом увеличения частоты вращения происходит перераспределение нагрузок и уменьшается влияние статических составляющих нагружения.

Таблица 3.5

Результирующие силы при 130 мин<sup>-1</sup>

Название	Набор	Ед. изм	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результир ующая
Силы реакции	Вся модель	<i>H</i>	-323,035	-7,30297	-0,377036	323,118
Силы свободных тел	Вся модель	<i>H</i>	9,18976e <sup>-05</sup>	-2,33043e <sup>-05</sup>	-7,65373e <sup>-07</sup>	9,48095e <sup>-05</sup>

Таблица 3.6

Результирующие силы при 270 мин<sup>-1</sup>

Название	Набор	Ед. изм	Сумма X	Сумма Y	Сумма Z	Результир ующая
Силы реакции	Вся модель	<i>H</i>	-161,518	-3,65149	-0,188518	161,559
Силы свободных тел	Вся модель	<i>H</i>	4,59488e <sup>-05</sup>	-1,16521e <sup>-05</sup>	-3,8269e <sup>-07</sup>	4,74047e <sup>-05</sup>

Основными причинами снижения напряжения на валу при увеличении частоты вращения являются:

1. Проскальзывание и инерционное отбрасывание резины.
2. Размягчение материала из-за нагрева, если он имеет место быть.
3. Изменение эффективного угла резания из-за центробежных сил.
4. Аэродинамические эффекты, снижающие сопротивление.

Таблица 3.7

## Расчетные напряжения ротора в сборе

Наименование	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Максимальное значение, МПа
Напряжение	130	5,6
	270	2,8

Необходимо определить запас прочности в зоне максимальных напряжений:

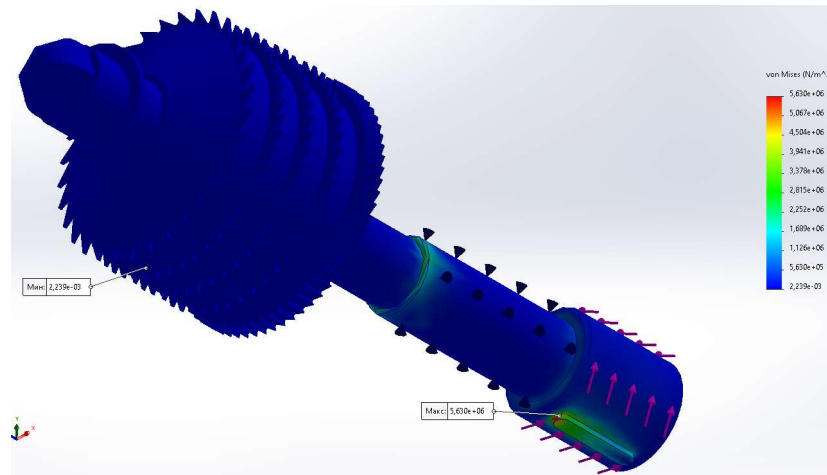
$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{max}} \geq [n] , \quad (3.4)$$

где  $n$  – коэффициент запаса прочности, МПа;

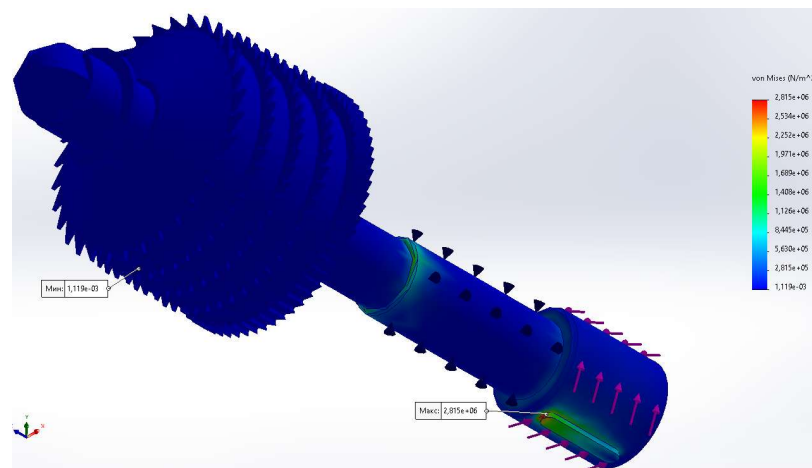
$[\sigma]$  – допускаемое напряжение материала ротора [131];

$\sigma_{max}$  – максимальное расчетное напряжение, МПа;

$[n]$  – допустимый коэффициент запаса прочности (для вала ротора из стали 40ХН принимается  $[n] = 3$ ).



а)



б)

Рисунок 3.17 Расчетные напряжения ротора по Мизесу в области шпонки под шкив ременной передачи:

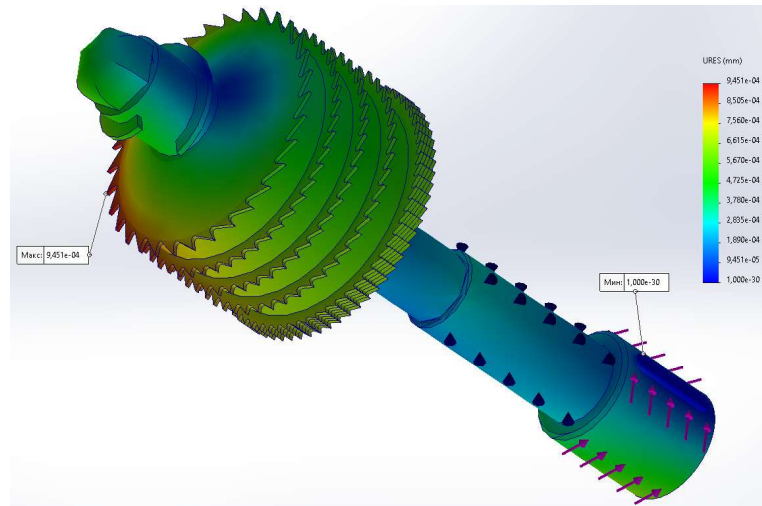
а - 5,63 МПа при  $130 \text{ мин}^{-1}$ ; б - 2,815 МПа при  $270 \text{ мин}^{-1}$

Условие прочности для  $130 \text{ мин}^{-1}$   $n = \frac{520}{5,63} > [n] = 3$  – выполняется.

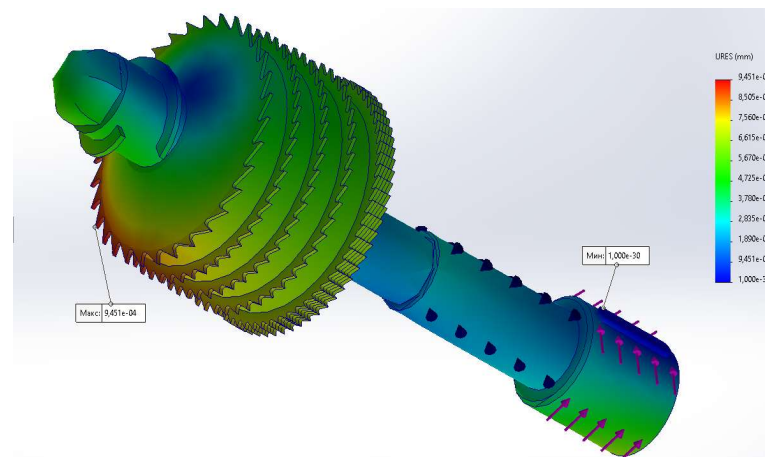
Условие прочности для  $270 \text{ мин}^{-1}$   $n = \frac{520}{2,815} > [n] = 3$  – выполняется.

Расчеты линейных перемещений ротора в сборе (табл. 3.8, рис. 3.18) выявили характерные особенности поведения конструкции. Величины перемещений имеют максимальные значения на зубьях режущих ножей в области их соединения шпонкой с валом, что определено концентрациями максимальных деформаций в шпоночном соединении режущей части и обусловлена

особенностями его работы. Эта зона испытывает комплексное нагружение от сочетания крутящих, изгибающих и контактных напряжений. Наличие шпоночного паза создает концентратор напряжений, а технологические зазоры приводят к локальной микродвижности режущих ножей, что в совокупности вызывает повышенные деформации в этом узле [132].



а)



б)

Рисунок 3.18 Линейные перемещения элементов ротора в сборе:  
а -  $10^{-3}$  при  $130 \text{ мин}^{-1}$ ; б -  $5 \cdot 10^{-4}$  при  $270 \text{ мин}^{-1}$

Максимальные величины перемещения ротора в сборе имеют значения:

- при  $130 \text{ мин}^{-1}$  перемещение равно  $10^{-3}$  мм;
- при  $270 \text{ мин}^{-1}$  перемещение равно  $5 \cdot 10^{-4}$  мм.

Полученные значения показывают обратную пропорциональную зависимость между скоростью вращения и величиной перемещений.

Перемещение элементов ротора

Наименование	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Максимальное значение, мм
Перемещение	130	10 <sup>-3</sup>
	270	5 · 10 <sup>-4</sup>

При определении условий жесткости максимальное перемещение должно быть меньше допустимого:

$$\delta_{max} = \frac{a}{1000} \leq [\delta], \quad (3.5)$$

где  $\delta_{max}$  – максимальное расчетное перемещение, мм;

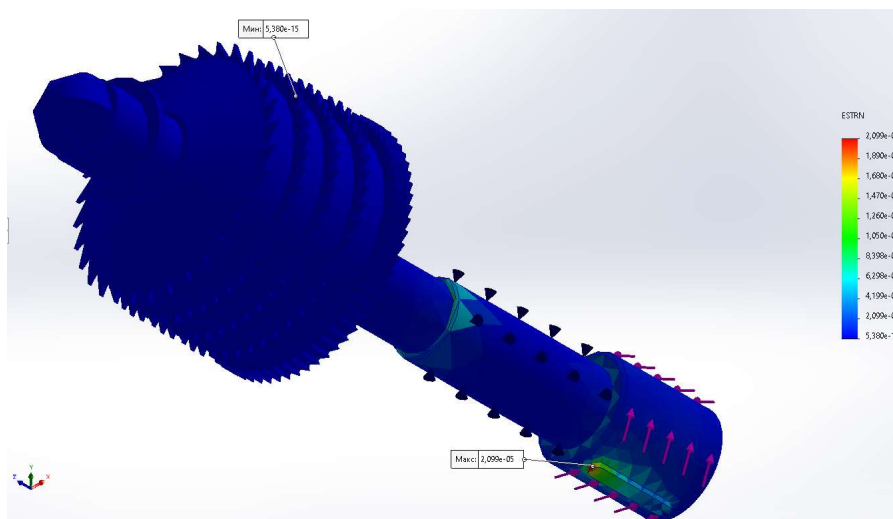
$[\delta]$  – допускаемое перемещение, мм;

$a$  – максимально габаритный размер конструкции, мм.

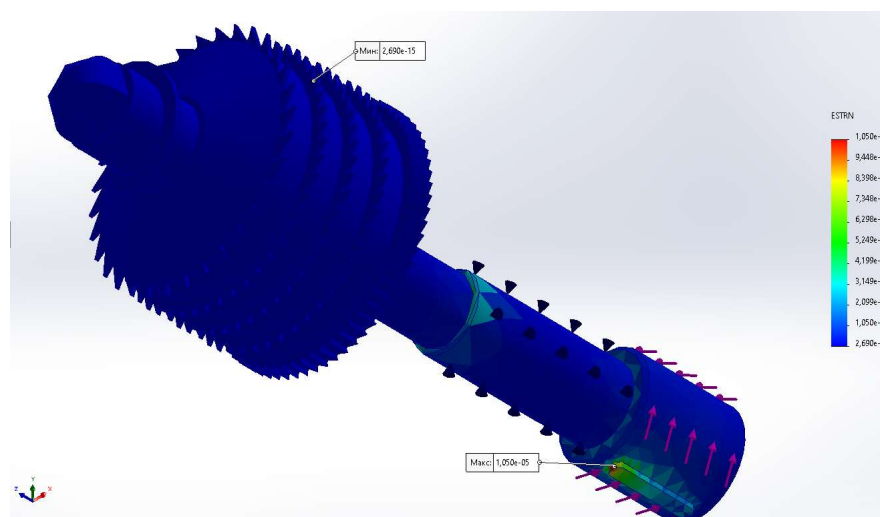
$$[\delta] = \frac{365}{1000}. \quad (3.6)$$

Т.о. при 130 мин<sup>-1</sup>  $\delta_{max} = 0,0009 \leq 0,365$  мм, а при 270 мин<sup>-1</sup>  $\delta_{max} = 0,0005 \leq 0,365$  мм.

Исследование деформационных изменений ротора в сборе (табл. 3.9, рис. 3.19) показало, что величина максимальной эквивалентной деформации зависит от частоты вращения ротора. При скорости 130 мин<sup>-1</sup> деформация составляет 0,002%, тогда как при 270 мин<sup>-1</sup> этот показатель равен 0,001%, что в 2 раза меньше, это объясняется тем, что уменьшение эквивалентной деформации при росте частоты вращения ротора связано с изменением характера нагружения системы в зоне соединения вала шпонкой под ременную передачу. При увеличении скорости происходит перераспределение нагрузок – центробежные силы вызывают самоцентрирование ротора, снижая влияние изгибающих моментов. Одновременно возрастает радиальная жесткость системы, что уменьшает относительные перемещения и деформации элементов всего ротора.



а)



б)

Рисунок 3.19 Изменение эквивалентной деформации ротора в сборе:  
а - 0,002% при 130 мин<sup>-1</sup>; б - 0,001% при 270 мин<sup>-1</sup>

Анализ результатов расчета показал, что условия прочности и жесткости выполняются.

Таблица 3.9

### Эквивалентная деформация ротора

Наименование	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Максимальное значение, %
Эквивалентная деформация	130	0,002
	270	0,001

Таким образом статический расчет вертикального ротора в сборе показал, что:

1. Эквивалентные напряжения по Мисерсу составили:
  - при 130 мин<sup>-1</sup>  $\sigma_{min} = 2,2 \cdot 10^{-9}$  МПа,  $[\sigma]_{max} = 5,6$  МПа;

- при 270 мин<sup>-1</sup>  $\sigma_{min} = 1,1 \cdot 10^{-9}$  МПа,  $[\sigma]_{max} = 2,8$  МПа.
- 2. Суммарное линейное перемещение составило:
  - при 130 мин<sup>-1</sup>  $\delta_{min} = 0$  мм,  $[\delta]_{max} = 0,0009$  мм;
  - при 270 мин<sup>-1</sup>  $\delta_{min} = 0$  мм,  $[\delta]_{max} = 0,0005$  мм.
- 3. Эквивалентная деформация ротора в сборе:
  - при 130 мин<sup>-1</sup>  $n_{max} = 0,002\%$ ;
  - при 270 мин<sup>-1</sup>  $n_{max} = 0,001\%$ .

Анализ результатов расчета показал, что условия прочности и жесткости выполняются.

### 3.6 Выводы по главе

1. Разработан алгоритм исследования процесса переработки резинотехнических отходов в измельчителе вертикального типа, обеспечивающий системный подход к изучению ключевых параметров.

2. Разработана, запатентована и изготовлена лабораторная установка измельчителя вертикального типа, позволяющая проводить весь комплекс запланированных экспериментальных исследований.

3. Определен и приведен перечень контрольно-измерительного оборудования и аппаратуры для фиксации рабочих параметров установки, а также установлены основные требования к конструкции ножей ротора, влияющие на эффективность измельчения.

4. Определены технические требования к режущим и регулировочному ножам, а также представлена методика пробоотбора и гранулометрического анализа резиновой крошки, применение которой гарантирует объективность и достоверность экспериментальных данных.

5. По результатам моделирования статического нагружения ротора в сборе условия прочности и жесткости выполняются. При увеличении частоты вращения максимальные напряжения, линейные перемещения и эквивалентная деформация снижаются в два раза, что объясняется перераспределением нагрузок и повышением радиальной жесткости под действием центробежных сил.

## ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ В КРОШКУ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

### 4.1 Обоснование выбора функций отклика и основных факторов, влияющих на процесс измельчения

Для проверки правильности выбора расчетных схем, допущений и предположений, а также на основании анализа техники и технологий вторичной переработки резинотехнических отходов были определены функции отклика [133, 134, 135] для натуральных исследований. На основании проведенного анализа технологии изготовления изделий из резиновой крошки было выявлено, что наиболее востребована крошка вторичной переработки с размером частиц 1-3 мм [36, 37, 38, 39]. При получении данной крошки так же имеют место быть частицы размером менее 1 мм что есть брак, их процентное соотношение от массы готового продукта не должно превышать 12% [28]. Поэтому необходимо знать сколько процентов крошки  $K\%$  нужного диапазона будет находится в готовом продукте, количество частиц размером менее 1 мм  $B\%$  и более 5 мм, а также количество крошки 3-5 мм, т.к. она образуется в процессе измельчения и выделяется вместе с частицами более 5 мм и далее используется в изделиях. На состав крошки и образование брака (частицы размером менее 1 мм и более 5 мм) влияет большое количество параметров: физико-механические свойства резины, температура измельчения, вид и тип измельчителя, его геометрические и технологические параметры.

Суммарное количество частиц в крошке в процентах определяется:

$$K\% (1-3 \text{ мм}) + B\% (<1\text{мм}) + \% \text{ содержание крошки } 3-5 \text{ мм} + \\ + \% \text{ содержание крошки } > 5 \text{ мм} = 100\% \quad (4.1)$$

В данной работе подробному анализу подвергаются только максимальное процентное содержание крошки 1-3 мм  $K\%$ , а также количество частиц размером менее 1 мм  $B\%$  [28] в готовом продукте без анализа их среднего размера  $d_{cp}$ .

Основными характеристиками нового оборудования является его производительность  $Q$  и мощность, которая состоит из мощности, затрачиваемой на процесс измельчения  $P_{изм}$  и мощности холостого хода, на которые влияют: габаритные размеры установки, физико-механические свойства измельчаемого материала; частота вращения привода, его кинематика, которая может быть разной у одного и того же устройства; конструкции рабочих органов и параметров передачи крутящего момента, поэтому исследованию и анализу подвергается только мощность, затрачиваемая на процесс измельчения  $P_{изм}$ .

На изменение функций отклика:  $K\%$ ,  $B\%$ ,  $Q$ , и  $P_{изм}$  влияют следующие факторы:

$$K\%, B\%, Q, P_{изм} = f(D, H_c, H_p, b_y, b_a, B_y, R_k, z, z_b, d_e, h_j, M, C, N, n, d_z, b, z_i, z_a), \quad (4.2)$$

где  $D$  – внутренний диаметр статора, мм;

$H_c$  – высота статора, мм;

$H_p$  – высота рабочей зоны, мм;

$b_y$  – ширина клиновидных пазов статора, мм;

$b_a$  – глубина клиновидных пазов, мм;

$B_y$  – угол проточки клиновидных пазов статора, град.;

$R_k$  – количество противорежущих ребер внутри статора, шт;

$z$  – количество ножей ротора, шт.;

$d_e$  – диаметр шайб между ножами, мм;

$h_j$  – толщина шайб между ножами, мм;

$M$  – максимальный размер измельчаемого материала, мм;

$C$  – минимальный зазор между ротором и статором в нижней части измельчающей зоны, мм;

$N$  – расстояние между ротором и статором в рабочей зоне, мм;

$n$  – частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$z_b$  – толщина регулировочного ножа, мм;

значения, соответствующие [28]

$d_z$  – диаметр ножей, мм;

$b$  – толщина режущих ножей, мм;

$z_i$  – размер зуба ножей, мм;

$z_a$  – количество зубьев ножа, шт.

Анализ существующего оборудования с вертикальным расположением ротора показал, что наиболее целесообразно использовать:

1. Размер внутреннего диаметра статора, который определяется (рис. 3.4):

$$D = d_z + N \quad (4.3)$$

где  $d_z$  – диаметр режущего ножа (используется отрезная фреза [110, 111]);

$N$  – расстояние между ротором и статором, которое зависит от максимального размера измельчаемого материала  $M$ , количества ножей ротора  $z$  и размера их зубьев  $z_i$ .

2. Высота статора измельчителя  $H_c = (0,8 \dots 1)H_p$ , расстояние между ротором и статором  $H_p = d_z$ . Ротор расположен внутри рабочей зоны и состоит из вертикального вала, на котором размещены: регулировочная шайба, комплект регулировочных и режущих ножей с шайбами между ними и конусная втулка (сборка ротора осуществляется в порядке перечисления элементов).

3. Противорежущие ребра статора образованы за счет проточки клиновидных пазов, расположенных острием вниз по всей высоте внутренней поверхности статора, ширина  $b_y$ , глубина  $b_a$  и угол проточки  $B_y$  (рис. 3.4). Размер клиновидных пазов выбраны таким образом, чтобы в них мог подаваться измельчаемый материал максимального размера. За счет клиновидных пазов происходит постепенное измельчение материала, так как более крупный материал задерживается противорежущими ребрами статора и срезается зубьями ножей ротора. Количество противорежущих ребер  $R_k$  зависит от ширины клиновидных пазов. Таким образом, материал подвергается измельчению по всей высоте между ротором и статором, после чего просыпается к минимальному зазору  $C$ , который расположен в нижней части рабочей зоны (рис. 3.3). Величина минимального зазора  $C$  выбрана равной 1 мм, так как данный размер является оптимальным для получения требуемого процентного содержания фракции крошки размером 1–3

мм. При необходимости этот размер зазора может быть скорректирован путем изменения толщины регулировочного ножа ротора  $z_b$ .

4. Для получения готового продукта размером 1–3 мм использовалась следующая компоновка, где на вертикальный вал размещаются (рис. 3.6): регулировочный нож, комплект режущих и регулировочных ножей с шайбами между ними и конусная втулка (сборка ротора осуществляется в порядке перечисления элементов).

Диаметр, толщина и количество зубьев  $z_a$  ножей ротора [110], количество ножей ротора зависит от подаваемого в рабочую зону максимального размера измельчаемого материала и размера готового продукта на выходе. Расстояние между ножами зависит от толщины регулировочного ножа ротора  $z_b$ , количества шайб между ножами  $j = z - 1$  и толщины шайб  $h_j = \frac{H_p - z_a \cdot b - z_b}{j}$ , где диаметр шайб подобран как  $d_s = d_z - z_{imax}$ , что позволяет избежать застойных зон между ножами.

На основании поискового эксперимента определено, что толщина регулировочного ножа будет влиять на процент крошки необходимого диапазона 1-3 мм, поэтому он комплектуется из комплекта режущих ножей, которые состоят из набора отрезных фрез с количеством зубьев 64 шт. [111] от 1 до 5 шт. с толщиной 2 мм, поэтому их толщина варьируется 2, 4, 6, 8, 10 мм, что даст возможность измельчать резиновые чипсы различного размера и толщины.

5. Интервал варьирования частоты вращения  $n$  ротора измельчителя был принят 130-270 мин<sup>-1</sup>, исходя из того, что при уменьшении частоты вращения менее 130 мин<sup>-1</sup> происходит закусывание материала, а при ее увеличении более 270 мин<sup>-1</sup> уменьшается производительность. Снижение производительности установки при скорости ротора свыше 200 мин<sup>-1</sup> обусловлено эластичными свойствами перерабатываемого материала. Высокоскоростное воздействие ротора снижает эффективное разрушение структуры резины из-за возникновения эффекта упругого отбрасывания частиц. Что вызывает их хаотическую циркуляцию в рабочей камере, увеличивая время транспортировки к выгрузочному патрубку и снижая общую пропускную способность оборудования.

Здесь нужно обратить внимание на то, что мощность, затрачиваемая на процесс измельчения гораздо меньше, суммарной, т.е. основная часть мощности затрачивается на кинематику или к.п.д. измельчителя.

На основании вышеизложенного, в качестве основных факторов были приняты:

- количество режущих ножей на валу ротора, шт ( $z$ );
- число оборотов ротора, мин<sup>-1</sup> ( $n$ );
- толщина регулировочного ножа, мм ( $z_b$ ).

#### **4.2 Исследование влияния основных факторов на процесс переработки резинотехнических отходов в измельчителе вертикального типа**

В соответствии с принятым планом 3х факторного эксперимента центрально-композиционного ротатбельного  $2^3$  (ПФЭ ЦКРП  $2^3$ ) принято пять уровней варьирования факторов (табл.4.1): -1 – минимальный; 0 – средний; +1 – максимальный; -1,68, +1,68 – звездные точки (табл. 4.1).

На вертикальном валу (рис. 3.6) размещаются: регулировочный нож, комплект ножей с шайбами между ними и конусная втулка (сборка ротора осуществляется в порядке перечисления элементов). Частота вращения и компоновка набора ротора позволяет осуществлять постепенное измельчение материала различного размера по всей высоте рабочей зоны статора и получать необходимый размер крошки в диапазоне 1-3 мм, при этом (табл. 4.1):

- $n$  - частота вращения ротора изменяется в пределах 130-270 мин<sup>-1</sup>;
- $z$  - количество режущих ножей ротора варьируются от 3 до 7 в зависимости от размера измельчаемого материала и нужного размера готового продукта, диаметры ножей ротора  $d_z = 125$  мм, толщина  $b = 2$  мм; верхний нож ротора имеет 32 зуба; следующие ножи ротора имеют по 48 зубьев [28];
- $z_b$  - толщина регулировочного ножа на выходе равна 2, 4, 6, 8, 10 мм (комплект из 1 до 5 ножей, соответственно, с количеством зубьев – 64 шт.) [28].

Расстояние между ножами в зависимости от их количества изменяется за счет толщины втулок  $h = 7,5...26$  мм при их диаметре  $d_g = 100$  мм, которые

располагаются между режущими ножами. В результате проведения экспериментов получены значения функций отклика (табл. 4.2).

Таблица 4.1

Исследуемые факторы и уровни их варьирования ПФЭ ЦКРП 2<sup>3</sup>

Факторы	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования				
			-1,68	-1	0	+1	+1,68
Количество режущих ножей, $z$	$x_1$	шт.	3	4	5	6	7
Частота вращения ротора, $n$	$x_2$	мин <sup>-1</sup>	130	160	200	240	270
Толщина регулировочных ножей, $z_b$	$x_3$	мм.	2	4	6	8	10

Таблица 4.2

Матрица планирования ПФЭ ЦКРП 2<sup>3</sup> с результатами экспериментов

№	$x_1$ $z$	$x_2$ $n$	$x_3$ $z_b$	>5 мм		5-3 мм		3-1 мм		<1 мм		$Q$ сумм кг/ч	$P_{изм.}$ Вт
				кг	%	кг	%	кг	%	кг	%		
1	-1/4 (3/29)	-1/160	-1/4	0,4	2	9,1	46	9,1	46	1,2	6	19,8	259,3
2	+1/6 (5/16)	-1/160	-1/4	0,4	2	6,8	36	10,6	56	1,1	6	18,9	82,7
3	-1/4 (3/29)	+1/240	-1/4	0,4	2	9,2	42	10,7	49	1,5	7	21,8	146,1
4	+1/6 (5/16)	+1/240	-1/4	0,3	2	5,3	32	9,7	59	1,2	7	16,4	274,7
5	-1/4 (3/28)	-1/160	+1/8	0,0	0	5,5	35	9,1	58	1,1	7	15,7	278,5
6	+1/6 (5/16)	-1/160	+1/8	0,0	0	4,2	27	10,1	65	1,2	8	15,5	135,1
7	-1/4 (3/28)	+1/240	+1/8	0,0	0	5,8	31	11,2	60	1,7	9	18,7	85,3
8	+1/6 (5/16)	+1/240	+1/8	0,0	0	3,5	24	9,7	67	1,3	9	14,5	247,1
9	-1,68/3 (2/44)	0/200	0/6	0,0	0	7,9	43	9,2	50	1,3	7	18,4	299,4
10	1,68/7 (6/13)	0/200	0/6	0,0	0	3,7	26	9,2	65	1,3	9	14,2	287,0
11	0/5 (4/21)	-1,68/ 130	0/6	0,0	0	6,3	36	9,9	57	1,2	7	17,4	143,6
12	0/5 (4/21)	1,68/ 270	0/6	0,0	0	5,5	31	10,9	61	1,4	8	17,9	142,5
13	0/5 (4/22)	0/200	-1,68/ 2	0,4	2	9,5	45	10,1	48	1,1	5	21,0	144,3
14	0/5 (4/20)	0/200	1,68/ 10	0	0	2,8	20	10,1	71	1,3	10	14,2	137,2
15	0/5 (4/21)	0/200	0/6	0	0	5,1	35	8,4	58	1,0	7	14,5	144,3
16	0/5 (4/21)	0/200	0/6	0	0	5,1	35	8,4	58	1,0	7	14,5	144,3
17	0/5 (4/21)	0/200	0/6	0	0	5,1	35	8,4	58	1,0	7	14,5	144,3
18	0/5 (4/21)	0/200	0/6	0	0	5,1	35	8,4	58	1,0	7	14,5	144,3
19	0/5 (4/21)	0/200	0/6	0	0	5,1	35	8,4	58	1,0	7	14,5	144,3
20	0/5 (4/21)	0/200	0/6	0	0	5,1	35	8,4	58	1,0	7	14,5	144,3

Для кодирования факторов в уравнениях регрессий использовалась формула [104, 105]:

$$x_i = \frac{\chi_i - \chi_{i0}}{\tau_i} \quad (4.4)$$

где  $x_i$  – кодированное значение фактора;

$x_i$  – натуральное (текущее) значение фактора;

$x_{i0}$  – натуральное значение основного (нулевого) фактора;

$\tau_i$  – интервал варьирования  $i$ -го параметра.

На основании формулы (4.4) получим значение каждого фактора в кодированном виде:

$$x_1 = \frac{z-5}{1}; \quad (4.5)$$

$$x_2 = \frac{n-200}{40}; \quad (4.6)$$

$$x_3 = \frac{z_b - 6}{2}. \quad (4.7)$$

#### 4.2.1 Исследование изменения процентного содержания фракции 1-3 мм и частиц менее 1 мм в крошке в измельчителе вертикального типа

Для получения уравнения регрессии зависимости процентного содержания фракции 1–3 мм в крошке  $K\%$  от количества режущих ножей  $z$ , частоты вращения ротора  $n$ , толщины регулировочного ножа на выходе  $z_b$  были приняты уровни варьирования названных факторов (табл. 4.1) и использовалась матрица планирования (табл. 4.2), по результатам, проведенных экспериментов получено адекватное уравнение регрессии (Приложение 4):

$$K\% = 56,7 + 4,4x_1 + 1,2x_2 + 5,2x_3 + 0,13x_1x_2 - 0,63x_1x_3 - 0,38x_2x_3 + 0,13x_1^2 + 0,41x_2^2 + 0,12x_3^2. \quad (4.8)$$

Анализ данного уравнения регрессии показал, что наибольшее влияние на процентное содержание фракции 1-3 мм в крошке  $K\%$  по линейным коэффициентам регрессии оказывает толщина регулировочного ножа  $x_3$  ( $z_b$ ) и увеличение количества режущих ножей  $x_1$  ( $z$ ), так как их коэффициенты имеют наибольшие значения, а знак «+», означает, что при увеличении значений этих факторов будет увеличиваться процентное содержание данного размера крошки, так же нужно обратить внимание на, то что при коэффициенте их совместного влияния  $x_1x_3$  знак «-», это указывает на то, при экстремальных совместных

значениях могут увеличиваться доли частиц меньше 1 мм или больше 3 мм, что снизит процент частиц с необходимыми размерами.

Значимость факторов (рис. 4.1) по линейным коэффициентам  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  регрессии распределяются следующим образом:

- количество режущих ножей  $E_z=41\%$ ;
- частота вращения ротора  $E_n= 11\%$ ;
- толщина регулировочного ножа  $E_{zb} =48\%$ .

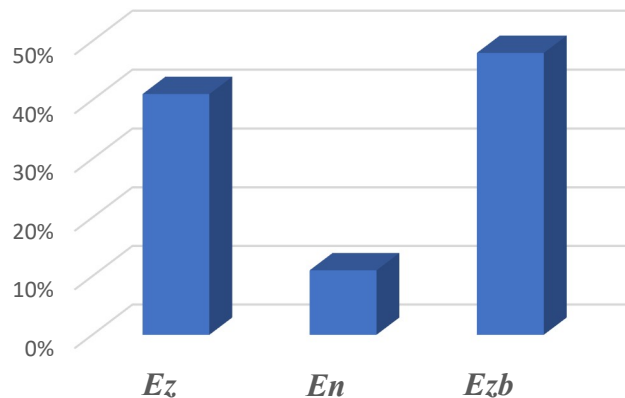


Рисунок 4.1 Значимость основных факторов для процентного содержания фракции 1-3 мм в измельченной крошке

Наибольшее влияние на процентное содержание фракции 1-3 мм в крошке  $K\%$  по линейным коэффициентам регрессии оказывает толщина регулировочного ножа  $E_{a3} = 48\%$  и количество режущих ножей = 41%, а наименьшее значение частота вращения ротора  $E_{a1} = 11\%$ , которое в 4,4 и в 3,7 раз меньше, соответственно. Но увеличение этих факторов не приведет к увеличению процента содержания необходимой фракции в крошке. Здесь нужно обратить внимание на значимость коэффициента совместного влияния факторов  $x_1 \cdot x_3$ , равный  $E_{a13}=55\%$ , он показывает, что если совместно использовать только максимальные или минимальные значения этих факторов, то в конечном итоге суммарное их влияние уменьшит содержание крошки нужного размера ( $E_{a3}+E_{a1}-E_{a13}=48+41-55$ ), как правило, из-за увеличения переизмельченных частиц менее 1 мм или неизмельченных более 3 мм, что уменьшит содержание фракции 1-3 мм.

Уравнение регрессии в декодированном виде имеет вид:

$$K_{\%} = 7 + 6,94z - 0,06n + 5,5z_b + 0,003zn - 0,32zz_b - 0,005nz_b -$$

$$-0,13z^2 + 0,0003n^2 - 0,03z_b^2. \quad (4.9)$$

Так же получено адекватное уравнение регрессии содержание в крошке частиц менее 1 мм  $B_{\%}$  (Приложение 4):

$$B_{\%} = 7,4 + 0,8x_1 + 0,5x_2 + 0,7x_3 - 0,13x_1x_2 + 0,13x_1x_3 + 0,13x_2x_3 + 0,1x_1^2 - 0,1x_2^2 - 0,1x_3^2. \quad (4.10)$$

Анализ данного уравнения регрессии показал, что из-за небольшого диапазона изменения процентного содержания частиц с 6 до 10% разница между линейными коэффициентами не велика, а квадратичные коэффициенты и коэффициенты совместного влияния равны, соответственно. Значимость факторов (рис. 4.2) по линейным коэффициентам  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  регрессии распределяются следующим образом:

- количество режущих ножей  $E_z=40\%$ ;
- частота вращения ротора  $E_n = 25\%$ ;
- толщина регулировочного ножа  $E_{zb}=35\%$ .

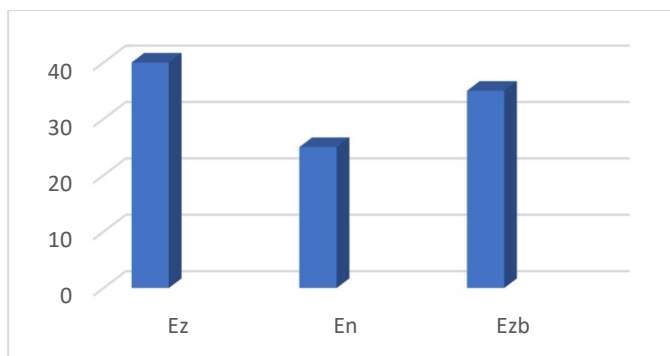


Рисунок 4.2 Значимость основных факторов по линейным коэффициентам для процентного содержания фракции менее 1 мм в крошке

По сравнению с количеством частиц в крошке размером 1-3 для частиц менее 1 мм значимость частоты вращения ротора больше в 2,5 раза, толщины регулировочного ножа в 1,4 раза меньше, а влияние количества режущих ножей примерно равны.

Используя аналитический пакет Maple 13, построена поверхность (рис. 4.3), показывающая зависимость максимального процентного содержания фракции 1-3 мм  $K_{\%}=75\%$  в общей массе крошки от изменения основных факторов (табл. 4.1).

Так максимальное количество крошки в интервале 1-3 мм равно 75% можно получить (рис. 4.3), используя:

- 6 режущих ножей с 10 мм регулировочным ножом при изменении частоты вращения ротора 240-270 мин<sup>-1</sup>;
- 7 режущих ножей при толщине регулировочных ножей 8, 10 мм на всем диапазоне изменения частоты вращения ротора.

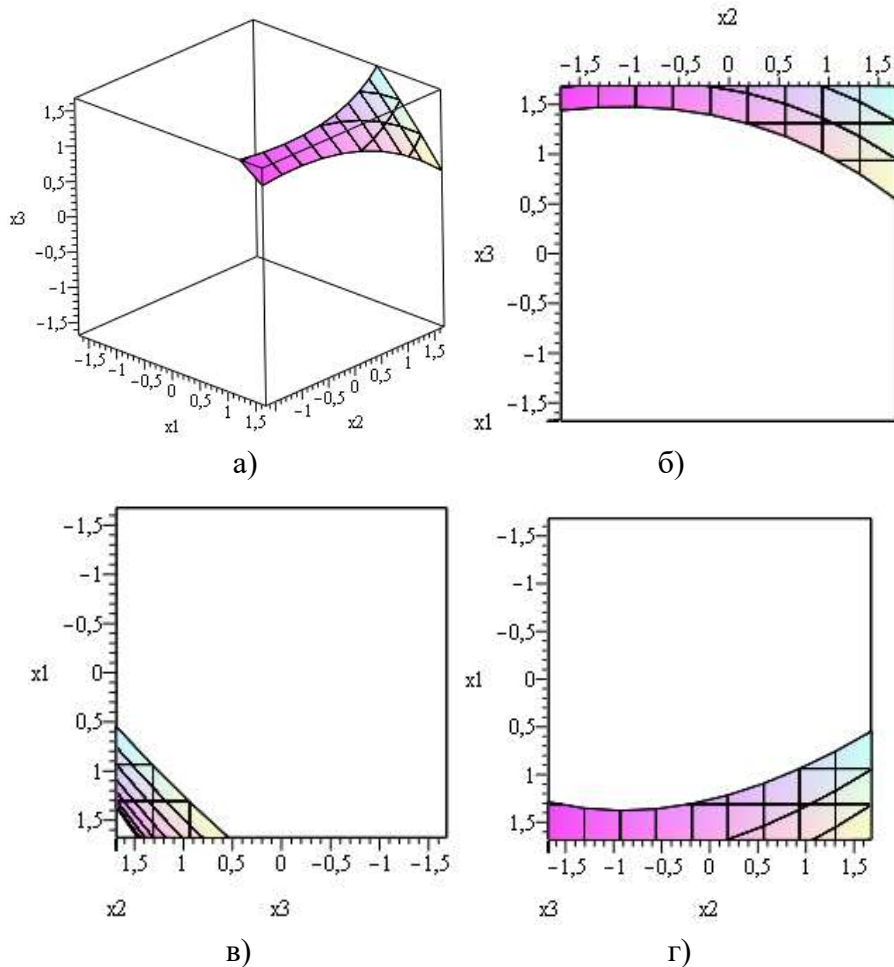


Рисунок 4.3 Поверхности, отображающие:

*a* - зависимость максимального процентного содержания фракции 1-3 мм в крошке от изменения основных факторов; *б, в, г* - проекции поверхности (*a*) на оси  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , соответственно

При необходимости можно построить указанную поверхность для любой функции отклика с любым значением параметров (при наличии соответствующего уравнения регрессии). Таким образом, можно определить *max* и *min* геометрические и технологические параметры измельчителя вертикального типа, т.е. при таких значениях основных факторов получим, то или иное значение максимального процентного содержания фракции 1-3 мм  $K\%$  в крошке, частиц

менее 1 мм  $B\%$  производительность измельчителя  $Q$  и мощность, затрачиваемую на процесс измельчения  $P_{изм}$  и другие если потребуется.

На рисунках 4.4 и 4.5 (Приложения 5 и 6) представлены графики изменения максимального процентного содержания фракции 1-3 мм  $K\%$  и количества частиц менее 1 мм  $B\%$ , соответственно, в крошке в зависимости от количества режущих ножей  $z = 3, 4, 5, 6, 7$  шт при фиксированном значении частоты вращения ротора  $n = 130, 160, 200, 240, 270$  мин<sup>-1</sup>.

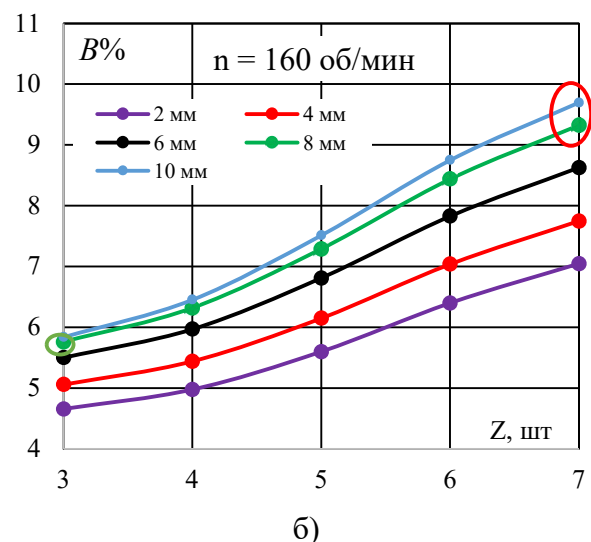
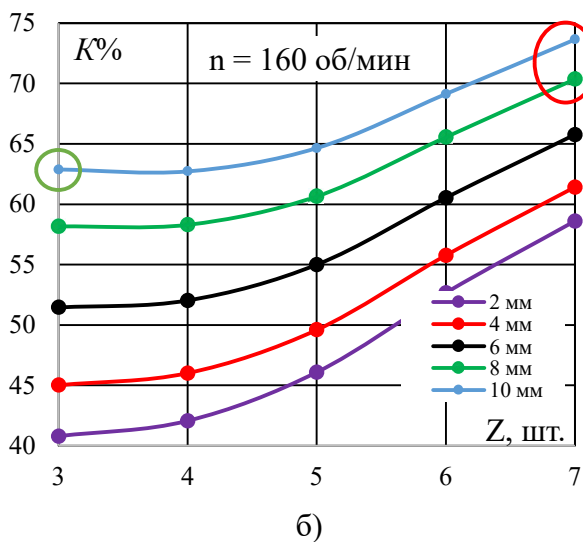
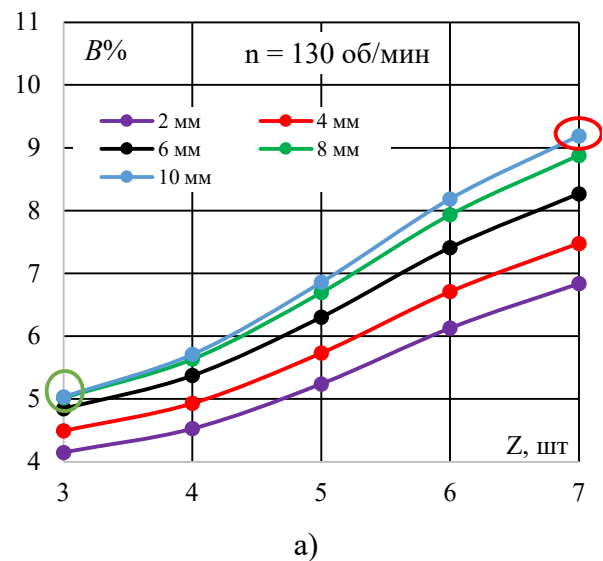
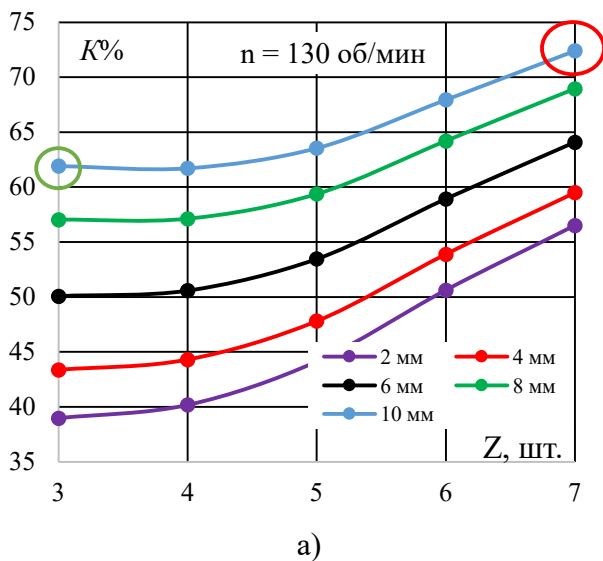
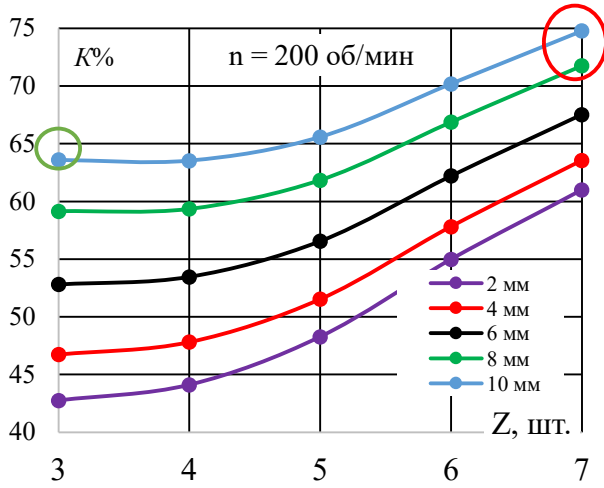
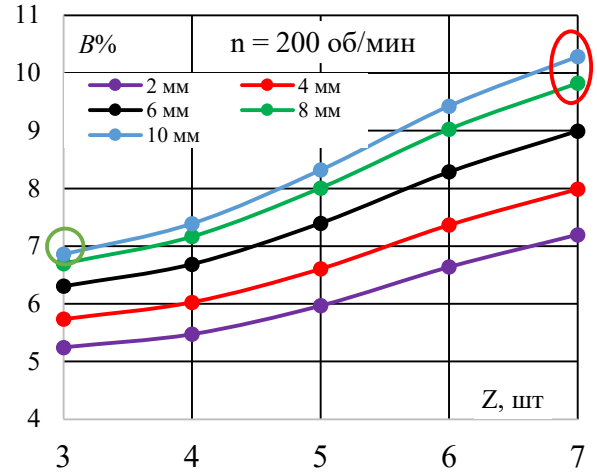


Рисунок 4.4 Графические структуры, показывающие зависимость максимального процентного содержания фракции 1-3 мм  $K\%$  в крошке в зависимости от количества режущих ножей  $z$  при фиксированном значении частоты вращения ротора  $n$ :  
 ○ и ○ - выделяет предпочтительные значения функции отклика

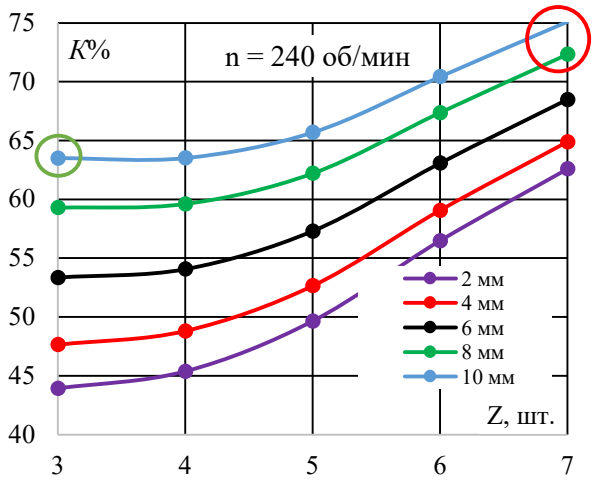
Рисунок 4.5 Графические структуры, показывающие зависимость процентного содержания брака фракции менее 1 мм в крошке в зависимости от количества режущих ножей  $z$  при фиксированном значении частоты вращения ротора  $n$ :  
 ○ и ○ - выделяет предпочтительные значения функции отклика



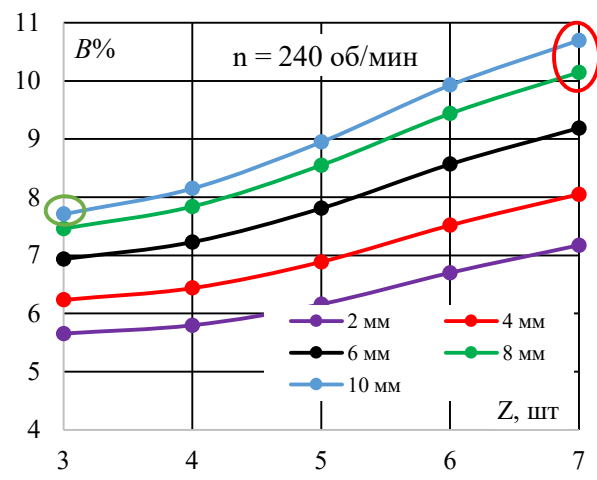
в)



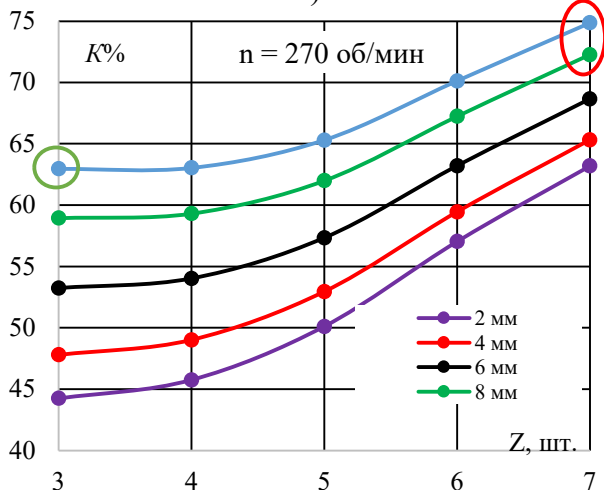
в)



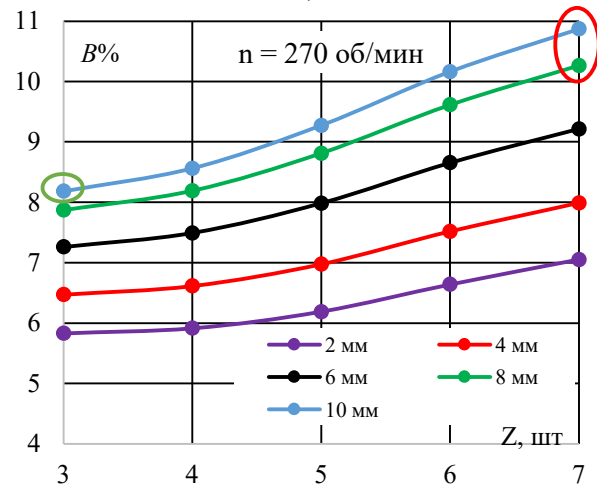
г)



г)



д)



д)

Рисунок 4.4 Графические структуры, показывающие зависимость максимального процентного содержания фракции 1-3 мм  $K\%$  в крошке в зависимости от количества режущих ножей  $z$  при фиксированном значении частоты вращения ротора  $n$ :  
 ○ и ○ - выделяет предпочтительные значения функции отклика

Рисунок 4.5 Графические структуры, показывающие зависимость процентного содержания брака фракции менее 1 мм в крошке в зависимости от количества режущих ножей  $z$  при фиксированном значении частоты вращения ротора  $n$ :  
 ○ и ○ - выделяет предпочтительные значения функции отклика

Общий характер графиков однотипен, и они имеют возрастающий характер, их анализ показал, что:

1) при увеличении количества ножей с 3 до 7 процентное содержание фракции увеличивается в 1,2-1,6 раз, соответственно, на что влияет толщина регулировочного ножа  $z_b$ , например для частоты вращения ротора  $n=130 \text{ мин}^{-1}$ :

-при  $z_b=2 \text{ мм}$ :

а)  $z=3 \text{ шт}$  –  $K_{\%}=39\%$ ;  $V_{\%}=4,2$ ;

б)  $z=7 \text{ шт}$  –  $K_{\%}=56\%$  в 1,4 раз и  $V_{\%}=6,9\%$  в 1,6 раз больше, соответственно;

-при  $z_b=10 \text{ мм}$ :

а)  $z=3 \text{ шт}$  –  $K_{\%}=62\%$ ;  $V_{\%}=6,9\%$ ;

б)  $z=7 \text{ шт}$  –  $K_{\%}=73\%$  в 1,2 раза больше и  $V_{\%}=9,2\%$  в 1,3 раза больше,

соответственно.

2) при увеличении толщины регулировочного ножа с 2 до 10 мм процентное содержание фракции увеличивается:

а) при  $n=130 \text{ мин}^{-1}$  и  $n=270 \text{ мин}^{-1}$ :

– для 3 режущих ножей  $K_{\%}$  в 1,6 раза (39% и 62%) и в 1,4 раза (44% и 63%), больше соответственно; а  $V_{\%}$  в 1,6 раза (4,2% и 6,9%) и в 1,8 раз (6% и 11%) больше, соответственно;

– для 7 режущих ножей  $K_{\%}$  в 1,4 раза (56% и 73%) и в 1,2 раза (64% и 75%) больше, соответственно; а  $V_{\%}$  в 1,3 раза (6,9%, 9,2%) и в 1,4 раза (8,1%, 11%) больше, соответственно;

б) при  $n = 240 \text{ мин}^{-1}$  и  $z_b = 10 \text{ мм}$  для 7 режущих ножей  $K_{\%} = 76\%$ ,  $V_{\%}=11\%$ .

Здесь нужно отметить, что  $100\%-K_{\%}-V_{\%}$ =количество крошки размером 3-5 мм.

Количество крошки в интервале 1-3 мм равно  $K_{\%}=70-75\%$  можно получить на всем диапазоне изменения частоты вращения ротора при использовании 7 режущих ножей при этом количество частиц размером менее 1 мм равно  $V_{\%}=9-11$ . При  $n=130 \text{ мин}^{-1}$  только с регулировочным ножом в 10 мм ( $K_{\%}=72\%$ , а  $V_{\%}=10,7\%$ ), а при других частотах вращения с регулировочными

ножами 8, 10 мм, причем максимальное значение  $K_{\%}=75\%$  при  $V_{\%}=11\%$ . При данных компоновках ротора крошка содержит большее количество частиц с размером, преобладающим 1 мм и частицы, будут иметь рваную форму. При использовании 3 режущих ножей с толщиной регулировочного ножа 10 мм на всем диапазоне частот вращения ротора получим  $K_{\%}=63\%$  при  $V_{\%}=5-8\%$ , при этом в крошке в диапазоне 1-3 мм будут преобладать частицы 3 мм кубовидной формы при частотах 130-200 мин<sup>-1</sup>.

Т.о. анализ полученных адекватных уравнений регрессии (Приложение 4) зависимости максимального количества крошки  $K_{\%}$  в интервале 1-3 мм и частиц менее 1 мм  $V_{\%}$ , от основных факторов. Анализ которого показал, что:

- значимость основных факторов для максимального количества крошки  $K_{\%}$  в интервале 1-3 мм по коэффициентам линейной регрессии распределяется следующим образом (рис. 4.3): количество режущих ножей  $E_z = 41\%$ ; частота вращения ротора  $E_n = 11\%$ ; толщина регулировочного ножа на выходе  $E_{zb} = 48\%$ ;

- сравнение основных факторов по коэффициентам линейной регрессии количества крошки размером 1-3 и для крошки менее 1 мм значимость частоты вращения ротора больше в 2,5 раза, толщины регулировочного ножа в 1,4 раза меньше, а влияние количества режущих ножей равны;

- количество крошки в интервале 1-3 мм равно  $K_{\%}=70-75\%$ , а  $V_{\%}=9-11\%$ ,  $\Sigma_{\%}=79\%-86\%$ , а процент частиц 3-5 мм равны 21-14%, соответственно (рис. 4.4, 4.5) можно получить на всем диапазоне изменения частоты вращения ротора при использовании 7 режущих ножей, при  $n=130$  мин<sup>-1</sup> только с регулировочным ножом в 10 мм ( $K_{\%}=72\%$ ,  $V_{\%}=10,7\%$ ,  $\Sigma_{\%}=82,7$ , а процент частиц 3-5 мм равен 17,3%), а при других частотах вращения с регулировочными ножами 8, 10 мм;

- максимальное количество крошки 1-3 мм  $K_{\%}=76\%$  при  $V_{\%}=11\%$ ,  $\Sigma_{\%}=86\%$ , а процент частиц 3-5 мм равен 14% получим при использовании 7 режущих ножей с толщиной регулировочного ножа 10 мм при 240 мин<sup>-1</sup>;

- количество крошки кубовидной формы в интервале 1-3 мм  $K_{\%}=63\%$  при  $V_{\%}=5-8\%$ ,  $\Sigma_{\%}=68\%-71\%$ , а процент частиц 3-5 мм равны 32-29%, соответственно,

где будут преобладать частицы 3 мм можно получить при  $n=130-270$  мин<sup>-1</sup> с 3 режущими ножами и с толщиной регулировочного ножа 10 мм.

#### 4.2.2 Исследование изменения производительности в измельчителе вертикального типа

При проведении экспериментальных исследований для получения уравнения регрессии зависимости производительности от количества режущих ножей  $z$ , частоты вращения ротора  $n$ , толщины регулировочного ножа  $z_b$  были приняты уровни варьирования названных факторов (табл. 4.1), по результатам, проведенных экспериментов (табл. 4.2) получено адекватное уравнение регрессии (Приложение 4). После обработки результатов получено адекватное уравнение регрессии в кодированном виде:

$$Q = 8,4 + 0,004x_1 + 0,3x_2 + 0,007x_3 - 0,62x_1x_2 - 0,12x_1x_3 + 0,12x_2x_3 + 0,3x_1^2 + 0,7x_2^2 + 0,6x_3^2 . \quad (4.11)$$

По критерию Стьюдента линейные коэффициенты регрессии  $a_1$  и  $a_3$  незначимы, поэтому уравнение примет вид:

$$Q = 8,4 + 0,3x_2 - 0,62x_1x_2 - 0,12x_1x_3 + 0,12x_2x_3 + 0,3x_1^2 + 0,7x_2^2 + 0,6x_3^2 . \quad (4.12)$$

Анализ данного уравнения регрессии показал, что основное влияние на производительность имеет частота вращения ротора  $x_2$  ( $n$ ) со знаком «+», т.к. линейные коэффициенты регрессии  $a_1$  и  $a_3$  незначимы (рис. 4.6) для количества режущих ножей  $x_1$  ( $z$ ) и толщины регулировочного ножа  $x_3$  ( $z_b$ ). Но тут нужно обратить внимание на, то что коэффициенты регрессии при квадратичных переменных значимы  $x_1^2$ ,  $x_2^2$ ,  $x_3^2$  для всех факторов имеют знак «-», так же нужно обратить внимание, что коэффициент при совместном влиянии  $x_1x_2$  в 5 раз больше других таких же коэффициентов, поэтому суммарная значимость фактора  $x_2$  ощутимо снизиться (численный анализ проводится по модулю, а суммарное воздействие фактора с учетом знака).

Значимость факторов (рис. 4.6) распределяется следующим образом:

а) по линейным коэффициентам  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  регрессии:

- количество режущих ножей – незначим;
  - частота вращения ротора  $E_{a2} = 100\%$ ;
  - толщина регулировочного ножа – незначим;
- б) все коэффициенты регрессии при квадратичных переменных значимы:
- количество режущих ножей  $E_{a11} = 19\%$ ;
  - частота вращения ротора  $E_{a22} = 44\%$ ;
  - толщина регулировочного ножа  $E_{a33} = 37\%$ .

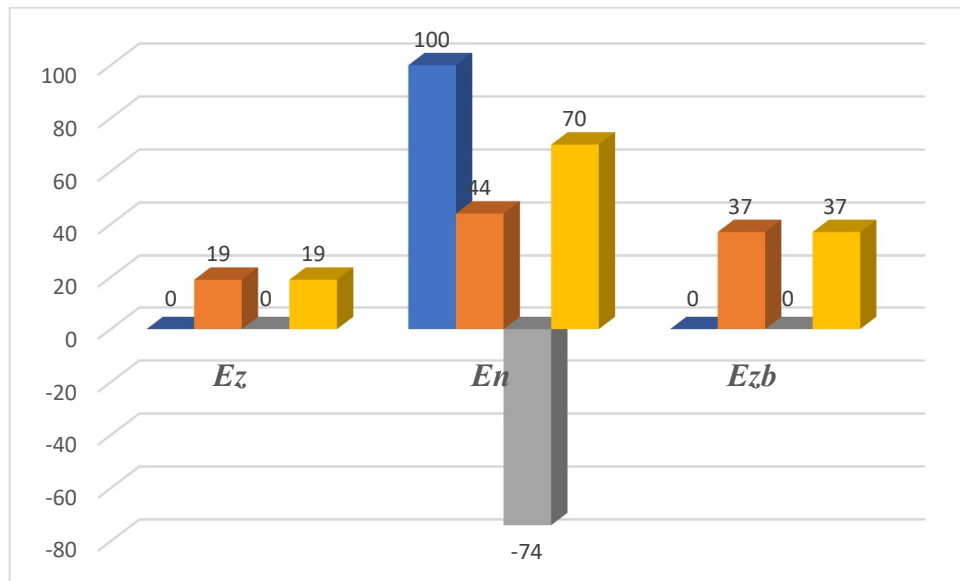


Рисунок 4.6 Значимость основных факторов для производительности вертикального измельчителя

Нужно отметить, коэффициент при совместном влиянии  $x_1x_2$  имеет знак «-», где доля влияния фактора  $x_2$ , есть 74%, поэтому суммарная значимость фактора снизиться до 70% (рис. 4.6).

Уравнение регрессии в декодированном виде имеет вид:

$$Q = 21,8 + 0,46z - 0,1n - 1,8z_b - 0,02zn - 0,06zz_b + 0,002nz_b + 0,3z^2 + 0,0004n^2 + 0,15z_b^2. \quad (4.13)$$

Используя аналитический пакет Maple 13, построена поверхность (рис. 4.7, 4.8), показывающая зависимость производительности  $Q$  от изменения основных факторов (табл. 4.1).

Так производительность с 13,5 до 15 кг/ч можно получить (рис. 4.7), используя:

– 3, 4 режущих ножа при толщине регулировочных ножей 2, 4 мм при изменении частоты вращения ротора 240, 270 мин<sup>-1</sup> (рис. 4.7, зеленая поверхность), крошки в интервале 1-3 мм будут преобладать частицы с размером 3 мм кубовидной формы;

– 3, 4 режущих ножа при толщине регулировочных ножей 6, 8, 10 мм при изменении частоты вращения ротора 240, 270 мин<sup>-1</sup> (рис. 4.7, голубая поверхность), крошки в интервале 1-3 мм будут преобладать частицы с размером 1 мм рваной формы;

– 6, 7 режущих ножей при толщине регулировочных ножей 2, 4 мм при изменении частоты вращения ротора 130, 160 мин<sup>-1</sup> (рис. 4.7, красная поверхность), крошки в интервале 1-3 мм будут частицы всех размеров содержание, которых в среднем примерно одинакова, при этом крошка будет иметь смешанный вид (кубовидные и рваные частицы).

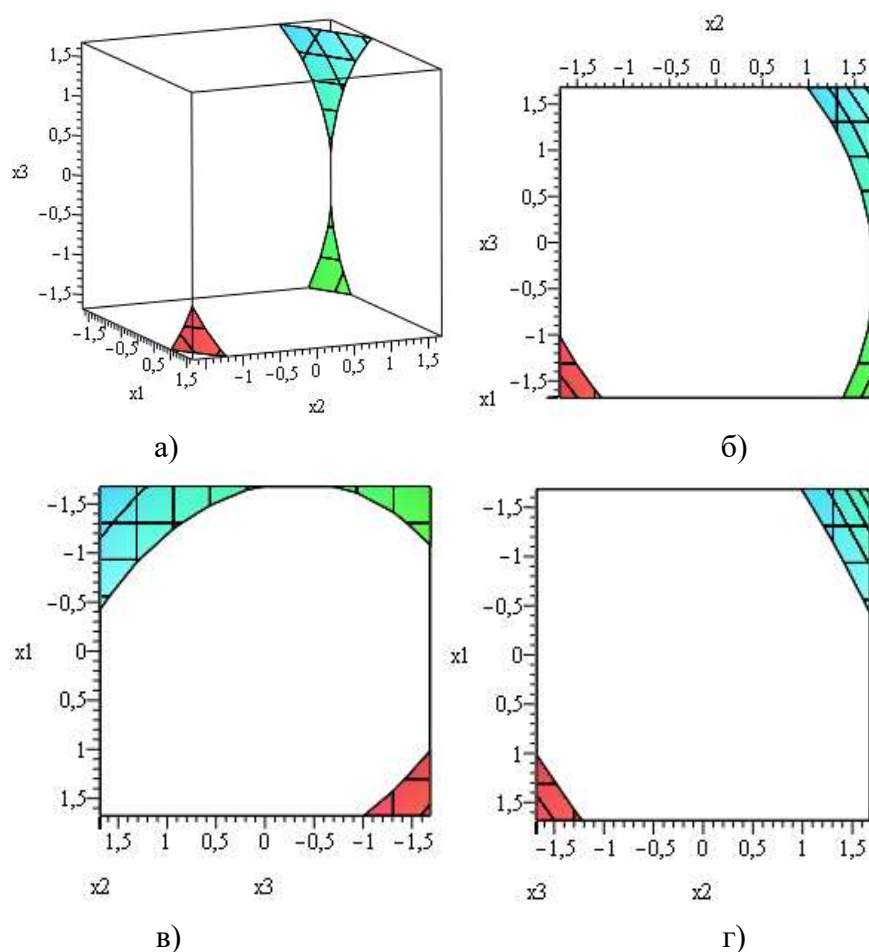


Рисунок 4.7 Поверхности, отображающие:

а - зависимость изменения значений производительности  $Q$  с 13,5 до 15 кг/ч от изменения основных факторов; б, в, г - проекции поверхностей (а) на оси  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , соответственно

Рассмотрим графики (рис. 4.8), показывающие зависимость производительности  $Q$  от количества режущих ножей  $z = 3, 4, 5, 6, 7$  шт с изменением толщин регулировочных ножей 2, 4, 6, 8, 10 мм при фиксированных значениях частоты вращения ротора  $n$ , которая существенно меняет характер графиков, анализ которых показал:

1) при  $n=130-160$  мин<sup>-1</sup> и  $n=240-270$  мин<sup>-1</sup> они носят возрастающий (рис. 4.7, а, б) и убывающий (рис. 4.8, г, д) характеры, соответственно;

2) при  $n=200$  мин<sup>-1</sup> значения производительности с учетом толщин регулировочных ножей (рис. 4.8, в):

– изменяется в интервале  $Q=9-11$  кг/ч для минимального 3 и максимального 7 величин ножей, а минимальное значение  $Q=9$  кг/ч получаем при средней толщине регулировочного ножа  $z_b=6$  мм;

– минимальная изменяется в интервале  $Q=8,5-10$  кг/ч для среднего значения режущих ножей  $z=5$  шт, а наименьшая  $Q=8,5$  кг/ч получаем так же при средней толщине регулировочного ножа  $z_b=6$  мм.

Режим измельчения при  $n=200$  мин<sup>-1</sup>,  $z=5$  шт,  $z_b=6$  мм (рис. 4.8, в, черная линия) соответствует точки бифуркации (Приложение 4) [136], на что показывает принципиальное изменение характера графиков, в данном случае она разделяет 2 устойчивых режима работы вертикального измельчителя для изменения производительности.

Рассмотрим значения изменения основных факторов вертикального измельчителя при изменении производительности  $Q=13,5-16$  кг/ч с учетом толщины регулировочных ножей:

1) при  $n=130$  мин<sup>-1</sup> (рис. 4.8, а):

– 7 режущих ножей с  $z_b=2$  мм -  $Q=13,5-15$  кг/ч;

– 7 режущих ножей с  $z_b=10$  мм -  $Q=13,5$  кг/ч;

2) при  $n=160$  мин<sup>-1</sup> (рис. 4.8, б) величина производительности меньше, рассматриваемого интервала;

3) при  $n=200$  мин<sup>-1</sup> (рис. 4.8, в) величина производительности меньше, рассматриваемого интервала;

4) при  $n=240 \text{ мин}^{-1}$  3 режущих ножа с  $z_b=10 \text{ мм}$  -  $Q=13,5 \text{ /ч}$  (рис. 4.8, г);

5) при  $n=270 \text{ мин}^{-1}$  (рис. 4.8, д):

– 3 режущих ножа с  $z_b=10 \text{ мм}$  -  $Q=14,5-16 \text{ кг/ч}$ ;

– 3 режущие ножа с  $z_b=8 \text{ мм}$  -  $Q=14,5 \text{ кг/ч}$ ;

– 3 режущие ножа с  $z_b=2 \text{ мм}$  -  $Q=13,5 \text{ кг/ч}$ .

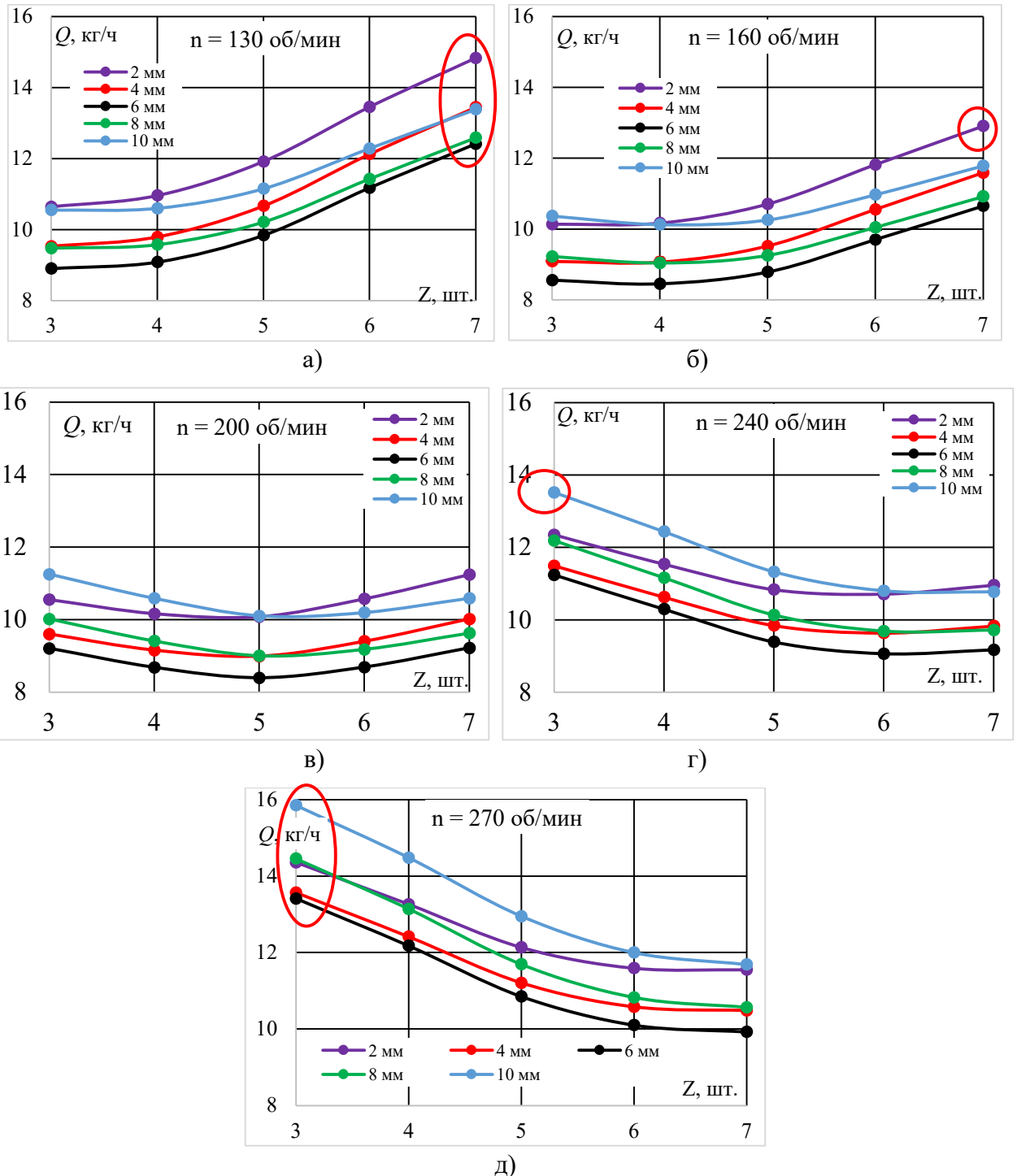


Рисунок 4.8. Графики, показывающие зависимость производительности  $Q$  от количества режущих ножей  $z$  при фиксированном значении частоты вращения ротора  $n$ :  
 ○ - выделяет предпочтительные значения производительности  $Q$  для экспериментальных значений  $K\%$

Нужно обратить внимание, что при частотах вращения 130 и 160 мин<sup>-1</sup> получаем частицы рваной формы с большим количеством частиц около 1 мм, а при максимальных частотах вращения 240 и 270 об/мин получаем частицы кубовидной формы с большим количеством частиц около 3 мм.

Т.о. анализ полученного адекватного уравнения регрессии (Приложение 4) зависимости производительности от основных факторов, анализ которого показал, что:

а) суммарная значимость основных факторов распределяется: количество режущих ножей  $E_z=19\%$ , толщина регулировочного ножа  $E_{z_b}=37\%$ ; частота вращения ротора  $E_n=70\%$ .

б) производительность в интервале с 13,5 до 16 кг/ч можно получить, используя:

1) 3 режущих ножа при частоте вращения ротора 270 мин<sup>-1</sup>, крошки в интервале 1-3 мм с толщинами регулировочных ножей:

- 4 мм - будут иметь место частицы всего диапазона размеров;
- 8, 10 мм ( $Q=16$  кг/ч) - будут преобладать частицы с размером 1 мм;

2) 7 режущих ножей при частоте вращения ротора 130 мин<sup>-1</sup>, крошки в интервале 1-3 мм с толщиной регулировочного ножа:

- 2 мм - будут преобладать частицы размером 3 мм;
- 10 мм - будут преобладать частицы размером 1 мм;

в) максимальные значения производительности крошки в интервале 1-3 мм:

– равную 15 кг/ч можно произвести, используя 7 режущих ножей с  $z_b=2$  мм при  $n=130$  мин<sup>-1</sup>, будут преобладать частицы с размером 3 мм;

– равную 16 кг/ч можно произвести, используя 3 режущих ножа с  $z_b=10$  мм при  $n=270$  мин<sup>-1</sup>, будут преобладать частицы с размером 1 мм.

– при 130 и 160 мин<sup>-1</sup> получаем частицы рваной формы с большим количеством частиц около 1 мм;

– при 240 и 270 мин<sup>-1</sup> получаем частицы кубовидной формы с большим количеством частиц около 3 мм.

#### 4.2.3 Исследование изменения мощности, затрачиваемой на процесс измельчения резинотехнических отходов

При проведении экспериментальных исследований для получения уравнения регрессии зависимости мощности, затрачиваемой на процесс измельчения резинотехнических отходов, от количества режущих ножей  $z$ , частоты вращения ротора  $n$ , толщины регулировочного ножа  $z_b$  были приняты уровни варьирования названных факторов (табл. 4.1), по результатам проведенных экспериментов (табл. 4.2) получено адекватное уравнение регрессии (Приложение 4):

$$P_{изм} = 252 - 3,7x_1 - 0,3x_2 - 2,1x_3 + 76,3x_1x_2 + 8,3x_1x_3 - 20x_2x_3 + 14,6x_1^2 - 38,6x_2^2 - 39,4x_3^2. \quad (4.14)$$

Анализ данного уравнения регрессии показал, что влияние факторов на изменение мощности  $P_{изм}$ , затрачиваемой на измельчение, имеют не однозначное влияние, по линейным коэффициентам регрессии наибольшее влияние имеет фактор количество режущих ножей  $x_1$  ( $z$ ) со знаком «-», а наименьший частота вращения ротора  $x_2$  ( $n$ ) так же со знаком «-», у квадратичных коэффициентов регрессии наименьшее влияние имеет фактор количество режущих ножей  $x_1$  ( $z$ ), а наибольший частота вращения ротора  $x_2$  ( $n$ ) с толщиной регулировочного ножа  $x_3$  ( $z_b$ ) оба со знаком «+». Также нужно обратить внимание на коэффициент совместного влияния  $x_1x_2$  со знаком «+», который в 9,6 и в 3 раза больше, чем при  $x_1x_3$  и при  $x_2x_3$  со знаком «-», соответственно (численный анализ проводится по модулю, а суммарное воздействие фактора с учетом знака).

Т.о. значимость факторов (рис. 4.9) распределяется следующим образом:

а) по линейным коэффициентам регрессии:

- количество режущих ножей  $E_{a1} = -60\%$ ;
- частота вращения ротора  $E_{a2} = -41\%$ ;
- толщина регулировочного ножа –  $E_{a3} = -32\%$ ;

б) все коэффициенты регрессии при квадратичных переменных значимы:

- количество режущих ножей  $E_{a11}=16\%$ ;
- частота вращения ротора  $E_{a22}= -41\%$ ;
- толщина регулировочного ножа  $E_{a33} =-37\%$ ;

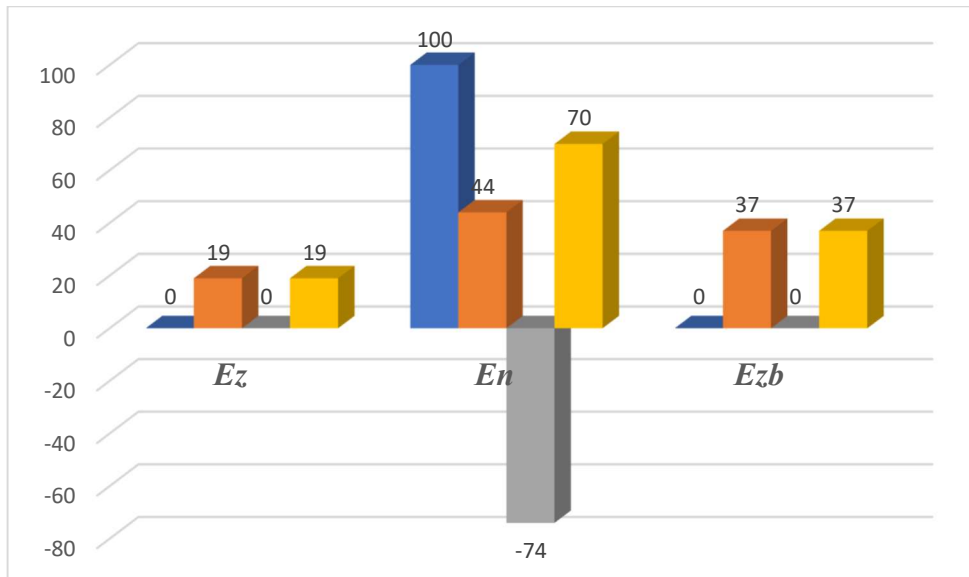


Рисунок 4.9 Значимость факторов в уравнении регрессии изменения мощности, затрачиваемой на процесс измельчения вертикального измельчителя

С учетом значимости линейных коэффициентов регрессии определены доли в коэффициентах при совместных влияниях факторов, затем они суммируются с выше названными, т.о. суммарная значимость коэффициентов регрессии равны:

- количество режущих ножей  $E_z=26\%$ ;
- частота вращения ротора  $E_n= -38\%$ ;
- толщина регулировочного ножа  $E_{z_b} =-50\%$ .

Уравнение регрессии в декодированном виде примет вид:

$$P_{изм} = 1057 - 556z + 1,6n + 146z_b + 1,9zn + 4,2zz_b - 0,3nz_b + 14,6z^2 - 0,024n^2 - 9,8z_b^2. \quad (4.15)$$

На рисунках 4.9 и в Приложении 6 представлены графики мощности  $P_{изм}$ , затрачиваемой на измельчение, в зависимости от основных факторов: частота вращения ротора  $n$ , количество режущих ножей  $z$ , толщина регулировочного ножа  $z_b$ .

Рассмотрим графики (рис. 4.10), показывающие зависимость мощности  $P_{изм}$  от количества режущих ножей  $z = 3, 4, 5, 6, 7$  шт с изменением толщин

регулируемых ножей 2, 4, 6, 8, 10 мм при фиксированных значениях частоты вращения ротора  $n$ , которая существенно, причем, зеркально меняет характер графиков изменения мощности  $P_{\text{изм}}$  относительно производительности  $Q$  (рис. 4.8, в) вертикального измельчителя. Анализ графиков показал:

1) при  $n=130-160 \text{ мин}^{-1}$  и  $n=240-270 \text{ мин}^{-1}$  они носят убывающий (рис. 4.10, а, б) и возрастающий (рис. 4.9, г, д) характеры, соответственно;

2) при  $n=200 \text{ мин}^{-1}$  значения мощности с учетом толщин регулируемых ножей (характер графиков в целом аналогичен графикам производительности (рис. 4.9, в):

– изменяется в интервале  $P_{\text{изм}}=140-200 \text{ Вт}$  для минимального 3 и максимального 7 величин фрез, а минимальное значение  $P_{\text{изм}}=140 \text{ Вт}$  получаем при средней толщине регулируемого ножа  $z_b=6 \text{ мм}$ ;

– минимальная изменяется в интервале  $P_{\text{изм}}=125-180 \text{ Вт}$  для среднего значения режущих фрез  $z=5 \text{ шт}$ , а наименьшая  $P_{\text{изм}}=125 \text{ Вт}$  получаем так же при средней толщине регулируемого ножа  $z_b=6 \text{ мм}$ .

Режим измельчения при  $n=200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $z=5 \text{ шт}$ ,  $z_b=6 \text{ мм}$  соответствует, как для производительности так и для мощности, затрачиваемой на процесс измельчения, является точкой бифуркации [136, 137, 138, 139] на, что показывает принципиальное изменение характера графиков, в данном случае она разделяет 2 устойчивых режима работы вертикального измельчителя (режимы, увеличивающие производительность (рис. 4.8, а, б), снижают мощность (рис. 4.10, а, б), затрачиваемую на измельчение, и наоборот (рис. 4.8, г, д; 4.10, г, д).

Рассмотрим значения изменения мощности  $P_{\text{изм}}$ , затрачиваемой на измельчение, от основных факторов вертикального измельчителя при изменении производительности  $Q=13,5-16 \text{ кг/ч}$  с учетом толщин регулируемых ножей:

1) при  $n=130 \text{ мин}^{-1}$ :

– 7 режущих ножей с  $z_b=2 \text{ мм}$  -  $Q=13,5-15 \text{ кг/ч}$ ; -  $P_{\text{изм}}=150-125 \text{ Вт}$ ;  $q_{\text{изм}} = 1,1-8,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ , соответственно;

– 7 режущих ножей с  $z_b=10 \text{ мм}$  -  $Q=13,5 \text{ кг/ч}$ ;  $P_{\text{изм}}=190 \text{ Вт}$ ;  $q_{\text{изм}} = 14,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ ;

2) при  $n=160$  мин<sup>-1</sup> величина производительности меньше, рассматриваемого интервала;

3) при  $n=200$  мин<sup>-1</sup> величина производительности меньше, рассматриваемого интервала;

4) при  $n=240$  мин<sup>-1</sup> 3 режущих ножа с  $z_b=10$  мм -  $Q=13,5$  кг/ч;  $P_{изм}=140$  Вт;  $q_{имз}=10,4$  кВт·ч/т;

5) при  $n=270$  мин<sup>-1</sup>:

– 3 режущих ножа с  $z_b=10$  мм -  $Q=14,5-16$  кг/ч;  $P_{изм}=120$  Вт;  $q_{имз}=8,3-7,5$  кВт·ч/т;

– 3 режущие ножа с  $z_b=8$  мм -  $Q=14,5$  кг/ч;  $P_{изм}=95$  Вт;  $q_{имз}=6,6$  кВт·ч/т;

– 3 режущие ножа с  $z_b=4$  мм -  $Q=13,7$  кг/ч;  $P_{изм}=95$  Вт;  $q_{имз}=6,9$  кВт·ч/т.

Т.о. анализ полученного адекватного уравнения регрессии зависимости мощности, затрачиваемой на измельчения  $P_{изм}$ , от основных факторов, анализ которого показал, что:

а) суммарная значимость основных факторов распределяется: количество режущих ножей  $E_z=19\%$ , толщина регулировочного ножа  $E_{z_b}=37\%$ ; частота вращения ротора  $E_n=70\%$ .

б) при производительности, изменяющейся в интервале с 13,5 до 16 кг/ч, которую можно получить при различной комплектации ротора на измельчение тратиться  $P_{изм}$  и Вт:

1) 7 режущих ножей при изменении частоты вращения ротора 130 мин<sup>-1</sup>, с толщиной регулировочного ножа:

– 2 мм -  $Q=13,5-15$  кг/ч;  $P_{изм}=150-125$  Вт;  $q_{имз}=11,1-8,3$  кВт·ч/т, соответственно, будут преобладать частицы размером 3 мм кубовидной формы;

– 10 мм -  $Q=13,5$  кг/ч;  $P_{изм}=180$  Вт;  $q_{имз}=13,3$  кВт·ч/т; будут преобладать частицы размером 1 мм рваной формы.

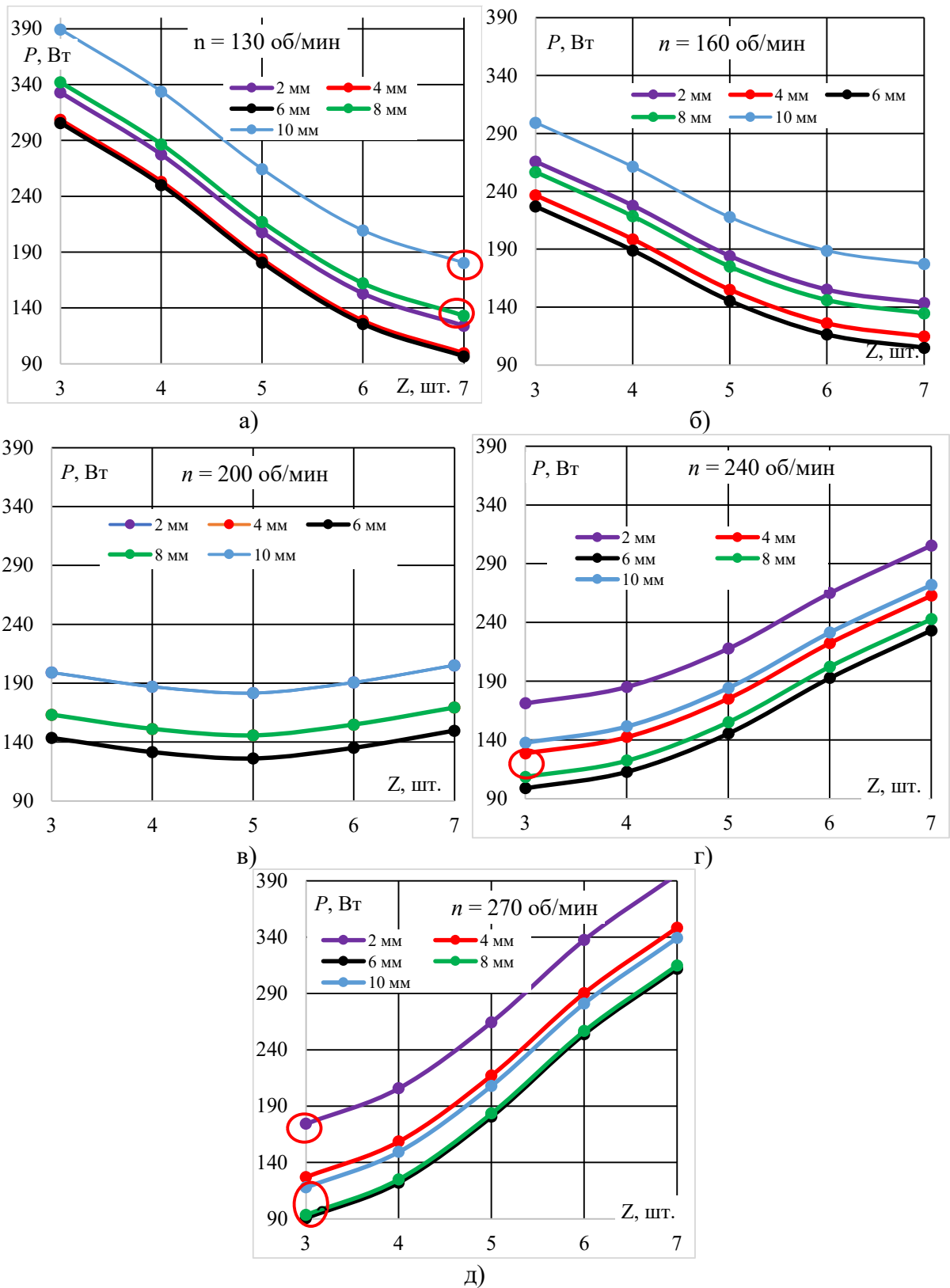


Рисунок 4.10 Графики, показывающие зависимость мощности  $P$ , затрачиваемой на измельчение, от количества режущих ножей  $z$  при фиксированном значении частоты вращения привода ротора  $n$ :

○ - выделяет предпочтительные значения  $P_{изм}$  для  $Q = 13,5-16$  кг/час

2) 3 режущих ножа при изменении частоты вращения ротора  $270 \text{ мин}^{-1}$ , с толщиной регулировочного ножа:

– 2 мм -  $Q=13,7$  кг/ч;  $P_{изм}=180$  Вт;  $q_{изм}=13,1$  кВт·ч/т; будут иметь место частицы всего диапазона размеров от 1 до 3 мм как рваной, но в большей мере кубовидной формы, соответственно;

– 10 мм -  $Q=14,5-16$  кг/ч;  $P_{изм}=150-120$  Вт;  $q_{изм}=10,3$  кВт·ч/т; будут преобладать частицы с размером 1 мм, рваной формы;

В) значения мощности, затрачиваемой на измельчение, для максимальной производительности:

– равной 15 кг/ч -  $P_{изм}=125$  Вт;  $q_{изм}=8,3$  кВт·ч/т; при 7 режущих ножах с  $z_b=2$  мм при  $n=130$  мин<sup>-1</sup>;

– равную 16 кг/ч -  $P_{изм}=125$  Вт;  $q_{изм}=7,8$  кВт·ч/т; при 3 режущих ножах с  $z_b=10$  мм при  $n=270$  мин<sup>-1</sup>.

#### 4.3 Определение рациональных параметров процесса получения максимального процентного содержания фракции 1-3 мм в готовом продукте

Совместный анализ взаимодействия функций отклика от основных факторов, когда

$$K\%, Q, P_{изм} = f(z); \quad (4.16)$$

$$K\%, Q, P_{изм} = f(n); \quad (4.17)$$

$$K\%, Q, P_{изм} = f(z_b), \quad (4.18)$$

даст возможность охарактеризовать процессы, сопутствующие измельчению резинотехнических изделий, при этом нужно учитывать следующие условия:

$$K\% \rightarrow \max; \quad (4.19)$$

$$B\% \rightarrow \min; \quad (4.20)$$

$$Q \rightarrow \max; \quad (4.21)$$

$$P_{изм} \rightarrow \min. \quad (4.22)$$

Влияние основных факторов на функции отклика, т.е. получение минимальных и максимальных их значений реализованы в уравнениях регрессии

(4.8, 4.10, 4.11, 4.14) и их графической интерпретации, что соответствует цели и задачам, решаемым в работе.

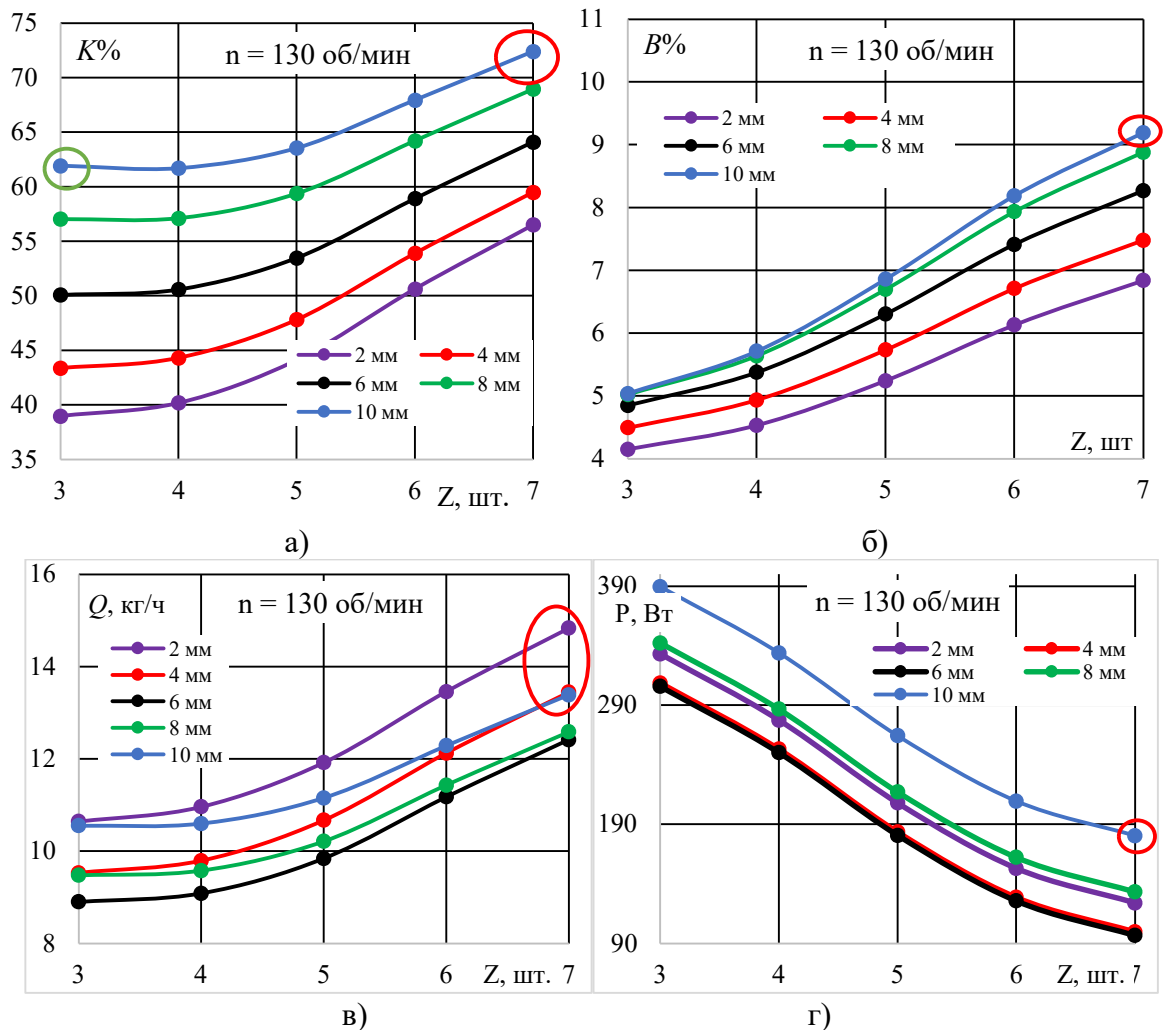


Рисунок 4.11 Графики функций отклика: процентное содержание крошки размером 1-3 мм  $K\%$  и менее 1 мм  $B\%$ , производительность  $Q$  и мощность  $P_{\text{изм}}$ , затрачиваемая на процесс измельчения от основных факторов при частоте вращения ротора  $n=130$  мин<sup>-1</sup>:

○ - выделяет предпочтительные совместные значения функции отклика

Повышение качества готового продукта в цели работы подразумевает получение максимального количества частиц в диапазоне 1-3 мм. [28]. В используемых существующих измельчителях с горизонтальной компоновкой в готовом порошке, как правило, содержится до 15-25% частиц размером менее 1 мм и более 5 мм. В изделиях, где используется вторично полученная крошка с интервалом 1-3 и 3-5 мм частицы менее 1 мм снижают качество готового изделия. Поэтому первично анализу подвергались процентное содержание крошки менее 1 мм как брак и размером 1-3 мм, т.к. как показал анализ данный диапазон частиц

[40] имеет большой спрос на рынке вторичной переработки РТО для получения качественных изделий.

Аналізу подверглись одновременно изменение всех функций отклика (рис. 4.8, 4.10, 4.11, 4.14): процентное содержание крошки размером 1-3 мм для  $K_{\%}=70\%$  и более, процентное содержание крошки менее 1 мм (на всем диапазоне изменения основных факторов не получено  $B_{\%}\leq 11\%$ ), производительность рассматривалась –  $Q\geq 13,5$  кг, после выполнения этих трех ограничений определялась мощность  $P_{\text{изм}}$ , затрачиваемая на процесс измельчения резинотехнических отходов от основных факторов (Приложение 4): при количестве режущих ножей  $z=3, 4, 5, 6, 7$  шт. с изменением толщин регулировочных ножей  $z_b=2, 4, 6, 8, 10$  мм при фиксированном значении частот вращения ротора  $n=130, 160, 200, 240, 270$  мин<sup>-1</sup>. Здесь нужно отметить, что  $100\%-K_{\%}-B_{\%}$ =количество крошки размером 3-5 мм.

Одновременный анализ совместного взаимодействия всех функций отклика от изменения основных факторов показал, что при частоте вращения ротора (рис. 4.11):

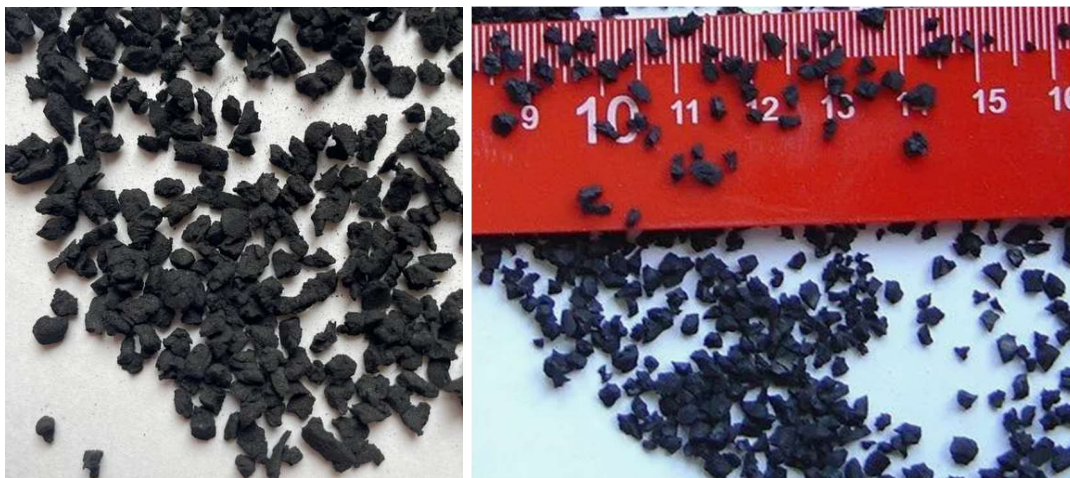
- $n=130$  мин<sup>-1</sup> максимальное значение  $K_{\%}=73\%$  при  $B_{\%}=9,2\%$ ,  $\Sigma_{\%}=82,2$ , а процент частиц 3-5 мм равен 17,8% можно получить только при использовании 7 режущих ножей с толщиной регулировочного ножа 10 мм при этом производительность  $Q=13,2$  кг/ч, а  $P_{\text{изм}}=180$  Вт,  $q_{\text{имз}}=26$  кВт·ч/т, в готовом продукте будут преобладать частицы с размером более 1 мм с рваной формой (рис. 4.12, а) и 9,2% частиц менее 1 мм, что допустимо, т.к. их содержание допускается до 12 % [28], так же 18,8% частиц в интервале от 5 до 3 мм кубовидной формой (рис. 4.12, б), которые отсеиваются и собираются отдельно, т.к. тоже используются в изделиях.

- $n=160$  мин<sup>-1</sup> максимальное значение  $K_{\%}=70-74\%$  при  $B_{\%}=9,4-9,6\%$ , но величина производительности меньше, рассматриваемого интервала;

- $n=200$  мин<sup>-1</sup> максимальное значение  $K_{\%}=71-76\%$  при  $B_{\%}=9,8-10,2\%$ , но величина производительности меньше, рассматриваемого интервала;



а)



б)

Рисунок 4.12 Формы полученной резиновой крошки:  
а – частицы рваной формы; б – частицы кубовидной формы

–  $n=240$  мин<sup>-1</sup> максимальное значение  $K\%=72-76\%$  при  $B\%=10,2-10,8\%$ ,  $\Sigma\%=82,2\%-86,8\%$ , а процент частиц 3-5 мм равны 17,8-13,8%, соответственно (выделено красным) (рис. 4.13) при использовании 7 режущих ножей с толщиной регулировочных ножей 8, 10 мм при этом производительность  $Q=11-10$  кг/ч,  $P_{изм}=280-245$  Вт,  $q_{имз}=25,5-24,5$  кВт·ч/т, а при производительности  $Q=13,5$  кг/ч,  $P_{изм}=140$  Вт,  $q_{имз}=10,4$  кВт·ч/т, (выделено синим) с использованием 3 режущих ножей  $K\%=65\%$  при  $B\%=8\%$ ,  $\Sigma\%=73$ , а процент частиц 3-5 мм равен 17% при толщине регулировочного ножа 10 мм, что во фракции 1-3 мм увеличит содержание частиц с размером 1 мм, т.к. увеличение толщины регулировочных ножей увеличивает количество частиц малого размера рваной формы.

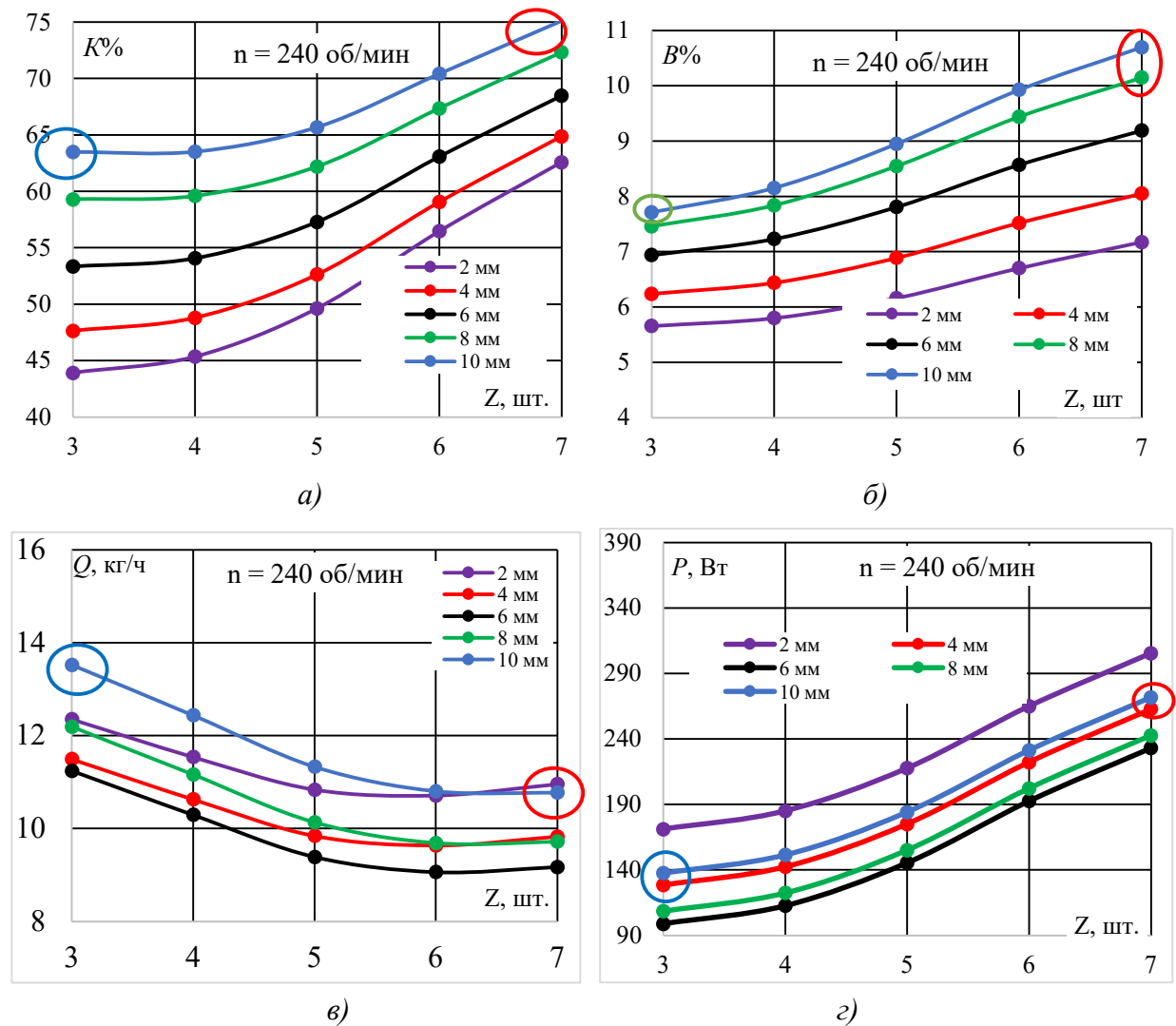


Рисунок 4.13 Графики функций отклика: процентное содержание крошки размером 1-3 мм  $K\%$ , производительность  $Q$  и мощность  $P_{\text{изм}}$ , затрачиваемая на процесс измельчения от основных факторов при частоте вращения ротора  $n=140$  мин<sup>-1</sup>:

○ и ○ - выделяют совместные значения функции отклика

–  $n = 270$  мин<sup>-1</sup> максимальное значение  $K\%=73-75\%$  при  $B\%=10,3-11\%$ ,  $\Sigma\%=83,3\%-86\%$ , а процент частиц 3-5 мм равны 16,7-14%, соответственно, (выделено красным) (рис. 4.14) при использовании 7 режущих ножей с толщиной регулировочных ножей 8, 10 мм при этом производительность  $Q=10,8-11,8$  кг/ч,  $P_{\text{изм}}=310-340$  Вт,  $q_{\text{умз}}=28,7-28,8$  кВт·ч/т, а при производительности  $Q=14,5-16$  кг/ч,  $P_{\text{изм}}=110-140$  Вт,  $q_{\text{умз}}=7,6-8,8$  кВт·ч/т, (выделено синим) с использованием 3 режущих ножей  $K\%=59-62\%$  при  $B\%=7,9-8,2\%$ ,  $\Sigma\%=66,9\%-70,2\%$ , а процент частиц 3-5 мм равны 33,1-29,8%, соответственно, при толщине регулировочных ножей 8, 10 мм, что во фракции 1-3 мм увеличит содержание частиц с размером 1 мм рваной формы.

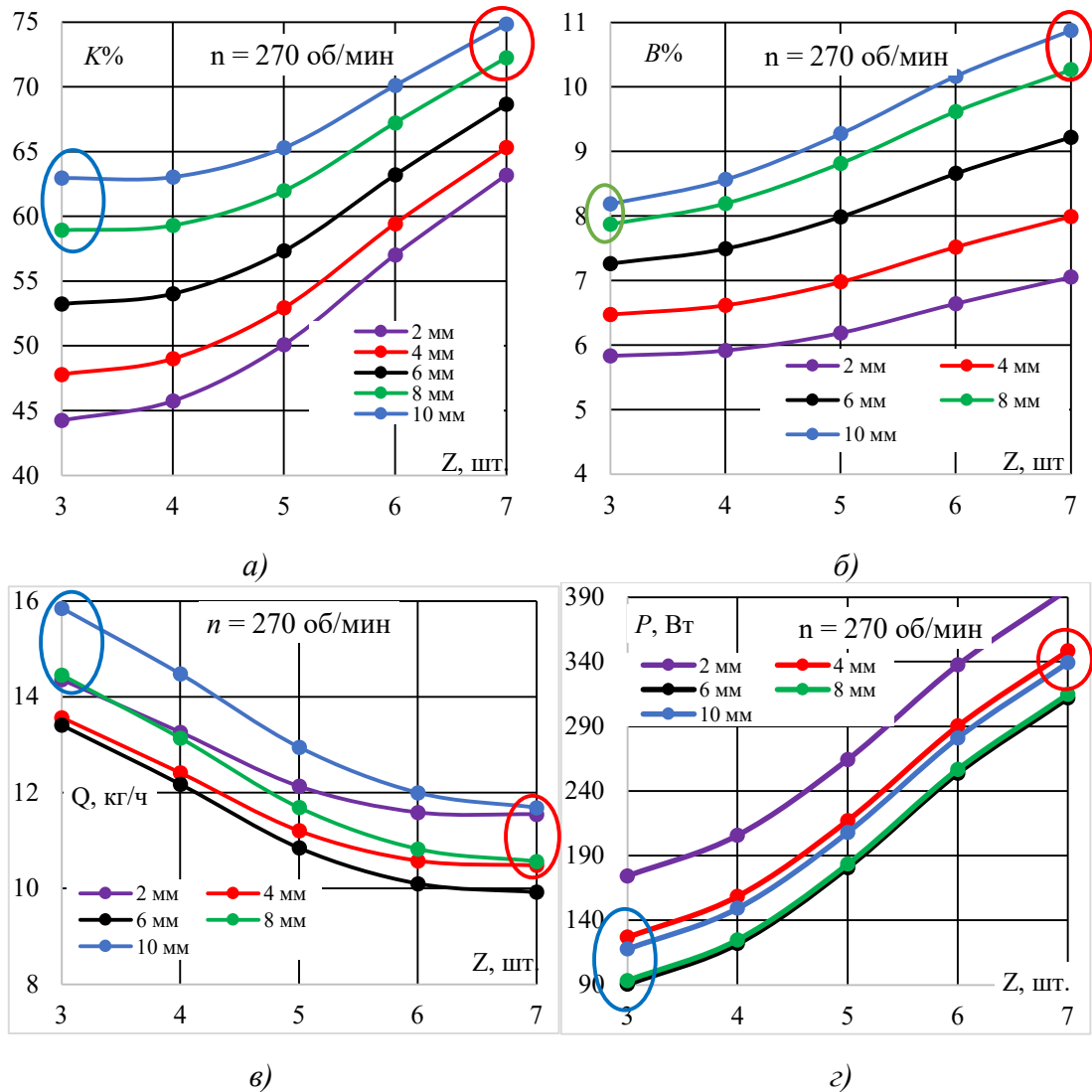


Рисунок 4.14 Графики функций отклика: процентное содержание крошки размером 1-3 мм  $K\%$ , производительность  $Q$  и мощность  $P_{изм}$ , затрачиваемая на процесс измельчения от основных факторов при частоте вращения ротора  $n=140 \text{ мин}^{-1}$ :  
 ○ и ○ - выделяют совместные значения функции отклика

Т.о. совместный анализ одновременного изменения всех функций отклика от основных факторов показал наиболее целесообразные значения основных факторов при соблюдении условий (4.19-4.22), это при частоте вращения ротора  $n=130 \text{ мин}^{-1}$  максимальное значение  $K\%=73\%$  при  $B\%=9,2\%$ ,  $\Sigma\%=82,2$ , а процент частиц 3-5 мм равен 17,8% можно получить только при использовании 7 режущих ножей с толщиной регулировочного ножа 10 мм при этом производительность  $Q=13,5 \text{ кг/ч}$ , а  $P_{изм}=180 \text{ Вт}$ ,  $q_{изм}=13,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ , при этом в готовом продукте будут преобладать частицы с размером более 1 мм с рваной формой и 9,2% частиц менее 1 мм, что допустимо, так же 17,8% частиц с размером 3-5 мм кубовидной

формы, которые отсеиваются и собираются отдельно, т.к. тоже используются в изделиях.

Получение основного размера частиц 1-3 мм при максимальном значении  $K_{\%}=73\%$  при  $B_{\%}=9,2\%$  происходит при следующей компоновке ротора – 7 режущих ножей разделенные шайбами с толщиной регулировочного ножа (седьмого) на выходе 10 мм, тем самым обеспечивая 7 стадий измельчения и большое количество контактов элементов режущего инструмента с материалом:

- первый верхний режущий нож – одна отрезная фреза с 32 зубьями, толщина 2 мм [28];
- второй-шестой режущие ножи – пять отрезных фрез с 48 зубьями и с толщиной по 2 мм;
- седьмой режущий нож – есть регулировочный нож толщиной 10 мм, состоит из комплекта 5 отрезных фрез с 64 зубьями толщиной по 2 мм, где максимальный зазор между зубьями равен 4 мм, но за счет общей толщины происходит образование фракций менее 3 мм, в том числе и переизмельченных частиц менее 1 мм.

При вращении ротора после взаимодействия поступающих чипсов с зубьями первого, второго и далее ножей частицы 5 мм и менее могут выводиться через пространство между противорежущими ребрами статора. А более крупные частицы и чипсы цепляясь за ребра контактируя с зубьями измельчаются далее, проваливаясь в пространство рабочей зоны между зубьями. Толщины режущих ножей с первого до шестого по 2 мм, площади их контакта минимальны, поэтому получаем частицы кубовидной формы (рис. 4.11, б), т.е. имеют грани – здесь происходят процессы резания.

Остатки чипсов, крупные частицы, которых попадают в контакт с регулировочным ножом с 64 зубьями и толщиной 10 мм, установленным так, что между ним и статором имеется зазор 1 мм. После контакта с ним образуется большая часть частиц менее 3 мм, потому что условия их контакта с зубом соответствуют, так называемому «раздиру» [140, 141], т.е. они отделяются по границам кристаллизации, поэтому образуется рваная форма у частиц. А из-за

большой толщины ножа некоторая часть частиц измельчается при истирании скатыванием, посредством постепенного «отдиранья» поверхностного слоя [142], тем самым образуя переизмельченные частицы менее 1 мм, что нежелательно.

#### 4.4 Сравнение экспериментальных и теоретических результатов энергетических параметров

Полученные в ходе экспериментальных исследований результаты зависимости удельного расхода электроэнергии, затрачиваемой оборудованием на измельчение, сравнивались с теоретическими, рассчитанными на основании математической зависимости (рис 4.15). Результаты расчета мощности, расходуемой на процесс измельчения и получения крошки 1-3 мм, переводились в удельный расход электроэнергии  $q_{изм}$  (4.24) с учетом затрачиваемой мощности на измельчение  $P_{изм}$  (кВт) и максимальной производительности  $Q$  (кг/ч).

$$q_{изм} = \frac{P_{изм}}{Q} \quad (4.24)$$

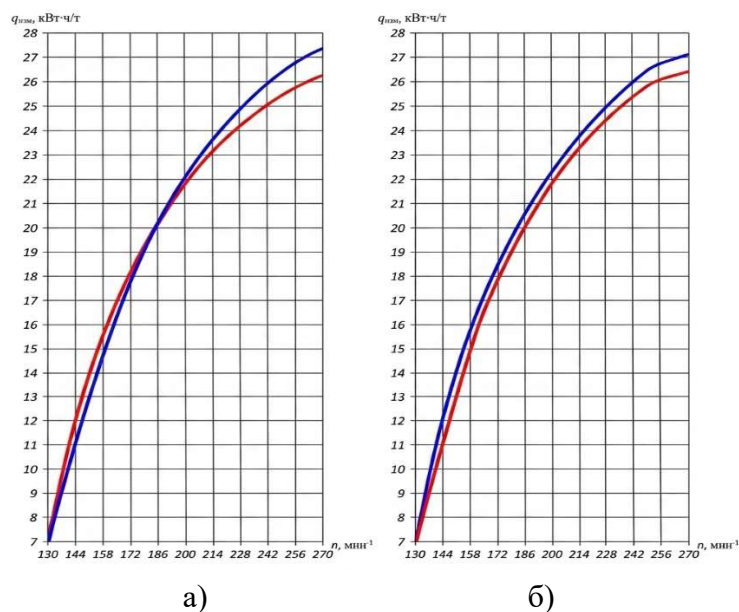


Рисунок 4.15 Графики зависимость удельного расхода электроэнергии, сравнение  
— экспериментальных и — теоретических результатов, для получения:  
а – крошки кубовидной формы; б – крошки рваной формы

Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рисунке 4.14, из которого можно сделать вывод, что наибольшее расхождение между теоретическими и экспериментальными данными наблюдается при числе

оборотов вертикального ротора  $n=270$  мин<sup>-1</sup>. Графики, построенные на основании теоретических расчетов и экспериментальных исследований, носят нелинейный характер.

Наибольшее расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами составило ~10%.

#### 4.5 Выводы по главе

1. На основании анализа оценочных испытаний определены функции отклика: максимальное количество крошки в интервале 1-3 мм,  $K_{\%}$ , количество частиц размером менее 1 мм,  $B_{\%}$ , производительность измельчителя вертикального типа,  $Q$ , мощность,  $P_{изм}$ , затрачиваемая на процесс измельчения; а так же основные факторы и уровни их варьирования (количество режущих ножей на валу ротора  $z=1-7$  шт; частота вращения ротора  $n=130-270$  мин<sup>-1</sup>; толщина регулировочного ножа  $z_b=2, 4, 6, 8, 10$  мм - набор из 1, 2, 3, 4, 5 режущих фрез, соответственно, для получения уравнений регрессий.

2. Анализ адекватных уравнений регрессии зависимости максимального количества крошки в интервале 1-3 мм,  $K_{\%}$ , и количества частиц размером менее 1 мм,  $B_{\%}$ , от основных факторов показал, что:

а) значимость основных факторов для максимального количества крошки  $K_{\%}$  в интервале 1-3 мм по коэффициентам линейной регрессии распределяется следующим образом: количество режущих ножей  $E_z = 41$  %; частота вращения ротора  $E_n = 11$  %; толщина регулировочного ножа на выходе  $E_{z_b} = 48$  %;

б) сравнение основных факторов по коэффициентам линейной регрессии количества крошки размером 1-3 мм и для крошки менее 1 мм значимость частоты вращения ротора больше в 2,5 раза, толщины регулировочного ножа в 1,4 раза меньше, а влияние количества режущих ножей равны;

в) количество крошки в интервале 1-3 мм равно  $K_{\%}=70-75$  %,  $B_{\%}=9-11$  %,  $\Sigma_{\%}=79$  % - 86 %, а процентное содержание частиц 3-5 мм равно 21-14 %, соответственно можно получить на всем диапазоне изменения частоты вращения ротора при использовании 7 режущих ножей, при  $n=130$  мин<sup>-1</sup> только с

регулирующим ножом в 10 мм ( $K_{\%}=72\%$ ,  $B_{\%}=10,7\%$ ,  $\Sigma_{\%}=82,7$ , а процент частиц 3-5 мм равен 17,3 %), а при других частотах вращения с регулирующими ножами 8, 10 мм;

г) максимальное количество крошки 1-3 мм  $K_{\%}=76\%$  при  $B_{\%}=11\%$ ,  $\Sigma_{\%}=86\%$ , а процент частиц 3-5 мм равен 14 % получим при использовании 7 режущих ножей с толщиной регулирующего ножа 10 мм при  $240 \text{ мин}^{-1}$ ;

д) количество крошки кубовидной формы в интервале 1-3 мм  $K_{\%}=63\%$  при  $B_{\%}=5-8\%$ ,  $\Sigma_{\%}=68\%-71\%$ , а процент частиц 3-5 мм равны 32-29 %, соответственно, где будут преобладать частицы 3 мм можно получить при  $n=130-270 \text{ мин}^{-1}$  с 3 режущими ножами и с толщиной регулирующего ножа 10 мм.

3. Анализ адекватного уравнения регрессии зависимости производительности от основных факторов показал, что:

а) суммарная значимость основных факторов распределяется: количество режущих ножей  $E_z=19\%$ , толщина регулирующего ножа  $E_{zb}=37\%$ ; частота вращения ротора  $E_n=70\%$ .

б) производительность в интервале с 13,5 до 16 кг/ч можно получить, используя:

1) 3 режущих ножа при изменении частоты вращения ротора  $270 \text{ мин}^{-1}$ , в крошки в интервале 1-3 мм с толщиной регулирующего ножа:

- 4 мм будут иметь место частицы всего диапазона размеров;
- 8, 10 мм ( $Q=16 \text{ кг/ч}$ ) будут преобладать частицы с размером 1 мм;

2) 7 режущих ножей при изменении частоты вращения ротора  $130 \text{ мин}^{-1}$ , в крошки в интервале 1-3 мм с толщиной регулирующего ножа:

- 2 мм будут преобладать частицы размером 3 мм;
- 10 мм будут преобладать частицы размером 1 мм;

в) максимальные значения производительности крошки в интервале 1-3 мм:

– равную 15 кг/ч можно произвести, используя 7 режущих ножей с  $z_b=2$  мм при  $n=130 \text{ мин}^{-1}$ , будут преобладать частицы с размером 3 мм кубовидной формы;

– равную 16 кг/ч можно произвести, используя 3 режущих ножа с  $z_b=10$  мм при  $n=270$  мин<sup>-1</sup>, будут преобладать частицы с размером 1 мм рваной формы.

4. Анализ адекватного уравнения регрессии зависимости мощности, затрачиваемой на измельчение, от основных факторов, анализ которого показал, что:

а) суммарная значимость основных факторов распределяется: количество режущих ножей  $E_z=19$  %, толщина регулировочного ножа  $E_{z_b}=37$  %; частота вращения ротора  $E_n=70$  %.

б) мощность при производительности, изменяющейся в интервале с 13,5 до 16 кг/ч, равна:

1) при 7 режущих ножах при частоте вращения ротора 130 мин<sup>-1</sup>, в крошке в интервале 1-3 мм с толщиной регулировочного ножа:

– 2 мм –  $Q=13,5-15$  кг/ч;  $P_{изм}=150-125$  Вт;  $q_{изм}=11,1-8,3$  кВт·ч/т соответственно будут преобладать частицы размером 3 мм;

– 10 мм –  $Q=13,5$  кг/ч;  $P_{изм}=180$  Вт;  $q_{изм}=13,3$  кВт·ч/т будут преобладать частицы размером 1 мм;

2) при 3 режущих ножах при частоте вращения ротора 270 мин<sup>-1</sup>, в крошке в интервале 1-3 мм с толщиной регулировочного ножа:

– 2 мм –  $Q=13,7$  кг/ч;  $P_{изм}=180$  Вт;  $q_{изм}=13,1$  кВт·ч/т будут иметь место частицы всего диапазона размеров от 1 до 3 мм;

– 10 мм –  $Q=14,5-16$  кг/ч;  $P_{изм}=150-120$  Вт;  $q_{изм}=7,5-10,3$  кВт·ч/т будут преобладать частицы с размером 1 мм;

в) значения мощности, затрачиваемой на измельчение, для максимальной производительности:

– равной 15 кг/ч –  $P_{изм}=125$  Вт;  $q_{изм}=8,3$  кВт·ч/т при 7 режущих ножах с  $z_b=2$  мм при  $n=130$  мин<sup>-1</sup>;

– равную 16 кг/ч –  $P_{изм}=125$  Вт;  $q_{изм}=7,8$  кВт·ч/т при 3 режущих ножах с  $z_b=10$  мм при  $n=270$  мин<sup>-1</sup>.

5. Совместный анализ одновременного изменения всех функций отклика от основных факторов показал, что при частоте вращения ротора  $n=130$  мин<sup>-1</sup>

максимальное значение процентного соотношения частиц размером 1-3 равно  $K_{\%}=73$  % при  $B_{\%}=9,2$  %,  $\Sigma_{\%}=82,2$ , а процент частиц 3-5 мм равен 17,8 % можно получить только при использовании 7 режущих ножей с толщиной регулировочного ножа 10 мм при этом производительность  $Q=13,5$  кг/ч, а  $P_{изм}=180$  Вт,  $q_{имз}=13,3$  кВт·ч/т, при этом в готовом продукте будут преобладать частицы с размером 1 мм с рваной формой и 9,2 % частиц менее 1 мм, что допустимо, так же 17,8% частиц с размером 3-5 мм кубовидной формы, которые отсеиваются и собираются отдельно, т.к. тоже используются в изделиях.

6. Экспериментально определена рациональная компоновка ротора при получении основного размера частиц 1-3 мм при максимальном значении  $K_{\%}=73$  % и при  $B_{\%}=9,2$  % получим при следующей компоновке ротора – 7 режущих ножей разделенные шайбами с толщиной седьмого регулировочного ножа на выходе 10 мм, тем самым обеспечивая 7 стадий измельчения и большое количество контактов элементов режущего инструмента с материалом:

- первый верхний режущий нож – одна отрезная фрез с 32 зубьями, толщина 2 мм;

- второй-шестой режущие ножи – пять отрезных фреза с 48 зубьями и с толщиной по 2 мм;

- седьмой режущий нож – есть регулировочный нож толщиной 10 мм, состоит из комплекта 5 отрезных фрез с 64 зубьями толщиной по 2 мм, где максимальный зазор между зубьями равен 4 мм, но за счет общей толщины происходит образование фракций менее 3 мм, в том числе и переизмельченных частиц менее 1 мм.

## ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

### 5.1 Актуальность и постановка проблемы на предприятии

Промышленный потенциал Белгородской области, включающий в себя предприятия машиностроительного, металлургического и горно-обогатительного комплексов, характеризуется использованием крупных технологических линий со значительным парком станков и агрегатов. Интенсивная эксплуатация такого оборудования порождает комплекс взаимосвязанных экологических и экономических проблем, требующих эффективных решений.

Одним из таких предприятий является ОАО «Машиностроитель», расположенное в с. Ливенка, Белгородская обл. Это среднее промышленное предприятие по производству машин и оборудования для добычи полезных ископаемых, и строительства, с численностью персонала 127 человек, прибыль предприятия за 2024 год составила 252 миллионов. Данное предприятие столкнулось с двумя системными проблемами, характерными для всего региона:

1. Образование значительного объема резинотехнических отходов. В процессе основного производства и планово-предупредительных ремонтов накапливаются бракованные, отработавшие свой ресурс резиновые изделия (уплотнители, манжеты, приводные ремни, транспортерные ленты и т.д.), требующие утилизации. Существующая практика их захоронения или сжигания не только влечет за собой возрастающие экологические проблемы, но и напрямую противоречат принципам современной ресурсосберегающей экономики, формируя негативную экологическую нагрузку на район [3, 143].

2. Существует потребность в специализированных вибро- и шумопоглощающих элементах, а также в надежной и экологичной упаковке для безопасной транспортировки готовой продукции [144]. Закупка подобных материалов у сторонних поставщиков составляет значительную статью переменных расходов, создает устойчивую логистическую и внешнюю

зависимость, снижая тем самым общую экономическую устойчивость предприятия.

Таким образом, возникает необходимость в разработке и внедрении технологии, которая позволит пересмотреть проблему отходов в ресурсную базу, одновременно решив вопросы виброизоляции и элементов упаковки при транспортировке и складировании. Опытно-промышленное использование разработанного оборудования для переработки РТИ на ОАО «Машиностроитель» является не только частным техническим решением, но и проектом, демонстрирующим путь оптимизации для других промышленных предприятий Белгородской области.

На ОАО «Машиностроитель» уже существует участок для переработки резинотехнических изделий, включающий: гидравлические ножницы, транспортеры и шредер для первичного измельчения. Однако существует необходимость в получении из резиновых чипсов качественной крошки фракции 1-3 и 3-5 мм, которую в дальнейшем можно использовать для изготовления виброизоляции, упаковки и др.

Технический совет ОАО «Машиностроитель» на основании результатов проведенных испытаний [Приложение 5] принял решение о включении в технологический комплекс для переработки резинотехнических отходов разработанного измельчителя вертикального типа.

Целью внедрения является интеграция разработанного в диссертации измельчителя вертикального типа в существующий технологический комплекс (рис. 5.1), что позволит обеспечить замкнутый цикл переработки и производства резиновой крошки с дальнейшим ее использованием в создании: вибро- и шумопоглощающих элементов, а также в надежной и экологичной упаковке для безопасной транспортировки готовой продукции.

## 5.2 Интеграция разработанного вертикального измельчителя для получения резиновой крошки

Предлагаемое решение об опытно-промышленном использовании измельчителя подразумевает модернизацию существующего на ОАО «Машиностроитель» технологического комплекса (рис. 5.1). Базовый комплекс сохраняет функцию первичной переработки и очистки резинотехнических отходов, а использование измельчителя позволяет реализовать финишную стадию измельчения с соблюдением гранулометрического состава, то есть с получением максимально процентного содержания в готовом продукте фракций 1–3 или 3–5 мм.



Рисунок 5.1 Схема участка ОАО «Машиностроитель» для переработки РТИ

Использование оборудования на технологическом участке:

1. Сортировка и подготовка РТИ.
2. Гидравлические ножницы «ГН-350». Предварительное разрезание крупных резинотехнических изделий (уплотнители, манжеты, приводные ремни, транспортерные ленты и т.д.) на куски, предназначенные для дальнейшей загрузки в шредер.
3. Промышленный шредер «DB-500». Выполняет первоначальное измельчение подготовленных резинотехнических изделий до размера 10-25 мм (резиновые чипсы).
4. Вертикальный измельчитель (рис. 5.2). Используется для преобразования измельчения резиновых чипсов в крошку фракции 1-3 и 3-5 мм, именно это оборудование обеспечивает достижение целевых параметров конечного продукта.

## 5. Складирование и использование крошки в производстве.



Рисунок 5.2. Вертикальный измельчитель

Полупромышленный образец вертикального измельчителя имеет следующие технические характеристики:

Габаритные размеры:

высота.....	750 мм;
ширина.....	310 мм;
длина.....	620 мм;
масса оборудования.....	83 кг.
Частота вращения ротора.....	от 130 до 270 мин <sup>-1</sup> .
Внутренний диаметр статора .....	127 мм.
Высота статора.....	115 мм.
Высота рабочей зоны.....	105 мм.
Количество противорежущих ребер внутри статора.....	13 шт.
Количество режущих ножей ротора.....	от 3 до 7 шт.
Диаметр режущих ножей ножей.....	125 мм.
Толщина режущих ножей.....	2 мм.
Количество зубьев режущих ножей.....	от 32 до 64 шт.
Количество втулок между режущими ножами.....	от 2 до 6 шт.
Диаметр втулок между режущими ножами.....	110 мм.
Толщина втулок между режущими ножа.....	от 12,5 до 42 мм.

Толщина регулировочного ножа.....от 2 до 10 мм.

Опытно-промышленное использование измельчителя на действующем участке обеспечит производство резиновой крошки фракций 1–3 и 3–5 мм для изготовления изделий из вторичных ресурсов на предприятии ОАО «Машиностроитель»:

- виброизолирующие маты, предназначенные для установки под промышленное оборудование (станки, прессы и т.д.). Их применение позволит обеспечить снижение уровня вибрации на 25–30% и повысить коэффициент звукопоглощения на 15–20 дБ;
- резиновые напольные покрытия для монтажа в зонах с повышенными требованиями к эргономике и безопасности труда;
- технологические и транспортировочные прокладки, их производство и использование позволит сократить процент повреждений изделий и оборудования при логистических операциях и др.

### **5.3 Внедрение результатов работы в учебный процесс**

Разработанная патентно-защищенная конструкция измельчителя используется для проведения лабораторных и практических работ кафедры «Механическое оборудование» ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке кадров по направлениям 15.03.02 – «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов», 15.04.02 – «Технологические машины и оборудование» и 15.05.01 – «Проектирование технологических машин и комплексов» (Приложение 6).

Разработанная и изготовленная экспериментальная установка измельчителя вертикального типа применяется в комплексе с другими существующими установками для измельчения и получения резиновой крошки нужного размера. Составляя и выбирая оборудование для измельчительного комплекса, с использованием лабораторной установкой самого измельчителя студенты получают навыки компоновки технологических линий и возможность расчета

цепей оборудования, а также производить расчет отдельного оборудования в том числе вертикального измельчителя.

#### 5.4 Технико-экономическая эффективность внедрения разработанного измельчителя вертикального типа

В условиях устойчивой рыночной тенденции, решение о опытно-промышленном использовании измельчителя приобретает актуальность, характеризующуюся постоянным возрастанием спроса и цен на готовую резиновую крошку (рис. 5.3) [145]. При текущей рыночной цене 35-40 рублей за килограмм на крошку фракции 1-3 мм, ОАО «Машиностроитель» ежегодно затрачивало на ее закупку порядка ~2 100 000 рублей (при среднемесечном потреблении 4,5 тонн по цене 38 руб/кг). Однако для обеспечения полной производственной программы достаточно 16 тонн качественной крошки в год.

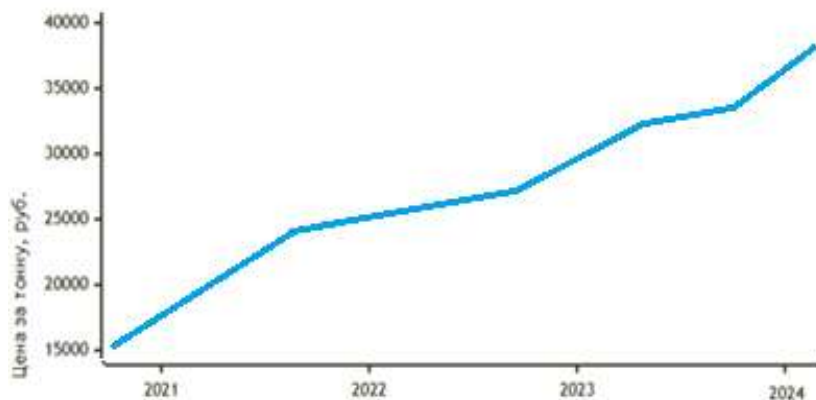


Рисунок 5.3 Динамика цен на резиновую крошку

Данное решение позволит предприятию отказаться от внешних закупок дорогостоящего сырья и организовать замкнутый производственный цикл, изготавливая необходимую крошку самостоятельно из доступного сырья по себестоимости. Основным экономическим преимуществом является значительная экономия на закупках и повышение независимости от колебаний рынка. Так, вертикальный измельчитель является оптимальным решением для финальной стадии переработки, так как он обеспечивает повышенную степень однородности и контроля размера готовых частиц.

Целевой объем производства в месяц: ~1333 кг (из расчета 16 000 кг / 12 месяцев).

Производительность измельчителя: 25 кг/час.

Количество рабочих дней в году: ~247 дней.

Количество смен в день: 1.

Продолжительность смены: 8 часов.

Экономическое обоснование и расчет окупаемости (табл. 5.1 и 5.2):

1. Расчет времени работы и объемов в год:

– Время работы в год для производства 16 000 кг потребуется:  $16\,000\text{ кг} / 25\text{ кг/час} = 640\text{ часов}$  в год.

– Время работы в месяц:  $640\text{ ч/год} / 12\text{ мес} \approx 53,3\text{ часа}$  в месяц.

– Объем производства в год: 16 000 кг (16 тонн) в год.

2. Единовременные инвестиции (капитальные затраты):

– стоимость измельчителя: 300 000 руб;

– затраты на монтаж: 50 000 руб;

– итого единовременные инвестиции: 350 000 руб (не изменились).

3. Эксплуатационные расходы в год:

3.1. Затраты на электроэнергию:

– потребление в год:  $2,2\text{ кВт} \cdot 640\text{ часов} = 1408\text{ кВт/ч}$ ;

– стоимость электроэнергии в год:  $1408\text{ кВт/ч} \cdot 6\text{ руб/кВт/ч} = 8\,448\text{ руб/год}$ .

3.2. Затраты на техобслуживание и запчасти:  $5000\text{ руб/мес} \cdot 12\text{ месяцев} = 60\,000\text{ руб/год}$ . (Примечание: расходы на ТО не привязаны жестко к часам работы, поэтому оставлены как есть, хотя при снижении загрузки они могут быть чуть ниже).

3.3. Итого эксплуатационные расходы в год:  $8\,448\text{ руб} + 60\,000\text{ руб} = 68\,448\text{ руб/год}$ .

4. Экономия и дополнительный доход в год:

4.1. Прямая экономия на закупках (доход):

– годовые закупки (замещаем собственным производством): 16 000 кг;

– цена закупки: 38 руб/кг;

- стоимость закупаемой крошки в год:  $16\ 000\ \text{кг} \cdot 38\ \text{руб} = 608\ 000\ \text{руб/год}$ ;
- экономия равна стоимости сырья, которое мы больше не покупаем:  $608\ 000\ \text{руб/год}$ .

4.2. Чистая экономия в год:  $608\ 000\ \text{руб}$  (экономия) –  $68\ 448\ \text{руб}$  (расходы) =  $539\ 552\ \text{руб/год}$ .

5. Расчет срока окупаемости:

- Чистая экономия в месяц:  $539\ 552\ \text{руб/год} / 12\ \text{мес} \approx 44\ 963\ \text{руб/мес}$ .
- Срок окупаемости:  $350\ 000\ \text{руб} / 44\ 963\ \text{руб/мес} \approx 7,8\ \text{месяца}$ .

Учитывая единовременные инвестиции в размере  $350\ 000\ \text{руб}$  и эксплуатационные расходы, расчетный срок окупаемости проекта при производстве 16 тонн продукции в год составляет около 7,8 месяца.

Таблица 5.1

#### Результаты внедрения

Наименование показателя	Ед. изм.	До внедрения	После внедрения
Месячный объем потребления крошки	кг	2000	2000 (производится самостоятельно)
Годовой объем потребления крошки	т/год	16	16 (производится самостоятельно)
Производительность оборудования	кг/час	–	25
Требуемое время работы для выполнения плана	час/год	–	640

Таблица 5.2

#### Технико-экономические показатели

Экономический эффект	Единица измерения	Значение
Единовременные капитальные вложения	руб.	350 000
Эксплуатационные расходы в год:	руб/год	68 448
в т.ч. электроэнергия	руб/год	8 448
в т.ч. техническое обслуживание и запчасти	руб/год	60 000
Прямая экономия на закупках	руб/год	608 000
Чистая экономия в год	руб/год	539 552
Расчетный срок окупаемости	мес.	~7,8
Годовой экономический эффект (после окупаемости)	руб./год	539 552

После достижения окупаемости, в оставшиеся месяцы первого года работы чистая экономия будет способствовать формированию дополнительной прибыли предприятия. На полную годовую программу предприятие будет получать чистую

экономии в размере ~539 600 рублей в год. При этом оборудование используется не на полную мощность (640 часов из возможных 1976 часов при односменной работе).

Результаты анализа и расчетов по опытно-промышленному использованию вертикального измельчителя с производительностью 25 кг/ч были рассмотрены технической дирекцией ОАО «Машиностроитель» и были подтверждены Актом (Приложение 5). Принято решение о проектировании и интеграции оборудования в существующий участок для переработки резинотехнических отходов. Новая производительность обеспечит самостоятельное производство резиновой крошки в объеме 16 т/год. Предполагаемый прямой экономический эффект составит 45 000 руб/мес или 540 000 руб/год при сроке окупаемости инвестиций 8 месяцев.

### **5.5 Выводы по главе**

1. На ОАО «Машиностроитель» в существующий технологический комплекс переработки резинотехнических отходов внедрен разработанный измельчитель вертикального типа. Его интеграция с действующим оборудованием позволила организовать выпуск резиновой крошки фракций 1–3 мм, которая полностью соответствует потребностям предприятия.

2. Практической апробацией подтверждены преимущества разработанного оборудования, в частности стадийный принцип измельчения, что позволило наладить выпуск продукции из собственного вторичного сырья.

3. Результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедры «Механическое оборудование» ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова.

4. Проведенные опытно-промышленные испытания вертикального измельчителя производительностью 25 кг/ч подтвердили его работоспособность в промышленных условиях ОАО «Машиностроитель». Принято решение о проектировании и интеграции устройства в действующий участок переработки резинотехнических отходов для проектной производительности 16 т/год резиновой крошки. Экономический эффект от использования выполненных научно-технических разработок составляет 540 000 руб/год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенного анализа техники и технологии в области переработки резинотехнических отходов установлено, что наиболее распространенным методом получения резиновой крошки фракцией 1–3 мм является механический способ, реализуемый в аппаратах с горизонтальной компоновкой. При этом материал контактирует с минимальным количеством зубьев (1–3 ед.) режущего инструмента. Существующее оборудование не обеспечивает требуемого качества измельчения из-за высокого содержания брака (до 25 % частиц менее 1 мм) и необходимости увеличения стадийности технологического процесса. Обосновано, что получение более 70 % крошки в диапазоне 1–3 мм с содержанием частиц менее 1 мм не более 12–15 % возможно в измельчителе с вертикальной компоновкой ротора. Последний целесообразно оснащать режущими ножами с переменным количеством зубьев, разделенными шайбами, что обеспечивает увеличение рабочей зоны и стадийность измельчения.

2. На основе анализа кинетики процесса разрушения резины при механическом воздействии с применением термодинамического подхода установлены три стадии процесса резания: упругое деформирование, необратимые структурные преобразования с образованием микронадрезов и окончательное разрушение с формированием единой трещины. Получены аналитические выражения для определения максимальных значений работы и мощности, затрачиваемых на отрыв частицы, учитывающие физико-механические свойства резины, геометрию зуба и частоту вращения ножа. Разработана математическая модель производительности вертикального измельчителя, основанная на линейном изменении насыпной плотности материала по высоте рабочей зоны. Установлено, что максимальная производительность  $Q$  достигает 26,5 кг/ч при частоте вращения шнекового питателя  $4,5 \text{ с}^{-1}$  и насыпной плотности в зоне измельчения  $490 \text{ кг/м}^3$ . Получен график зависимости общей максимальной мощности  $P_{max}$  от частоты вращения ротора и объема отделяемой частицы, анализ которого показал, что при увеличении частоты вращения  $n$  с  $2,2 \text{ с}^{-1}$  до  $4,5 \text{ с}^{-1}$  максимальная мощность возрастает с 30 до 60 Вт и со

130 до 300 Вт, соответственно, а при увеличении объема отделяемой частицы  $V_0$  с  $5,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$  (1 мм) до  $6,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$  (5 мм) максимальная мощность увеличивается с 30 Вт до 130 Вт и с 60 Вт до 300 Вт, соответственно.

3. Разработан и запатентован измельчитель вертикального типа для вторичной переработки резинотехнических отходов, обеспечивающий получение более 70 % крошки размером 1–3 мм в готовом продукте. Создана лабораторная установка, определен перечень контрольно-измерительного оборудования для фиксирования рабочих параметров, и разработана методика пробоотбора и гранулометрического анализа материала.

4. По результатам моделирования напряженно-деформированного состояния вертикального ротора условия прочности и деформативности выполняются: при  $n = 130 \text{ мин}^{-1}$  максимальные напряжения по Мизесу составляют  $\sigma = 5,74 \text{ МПа}$ , максимальные линейные перемещения  $\delta = 10^{-3} \text{ мм}$ . При увеличении частоты вращения ротора указанные показатели снижаются в два раза, что объясняется перераспределением нагрузок и повышением радиальной жесткости под действием центробежных сил.

5. С использованием планирования центрального композиционного рототабельного многофакторного эксперимента (ЦКРП –  $2^3$ ) исследован процесс вторичной переработки резинотехнических отходов в измельчителе вертикального типа. Получены адекватные уравнения регрессии, описывающие зависимости –  $K\%$ ,  $B\%$ ,  $Q$ ,  $P_{изм} = f(z, n, z_b)$ , обеспечивающие рациональные параметры работы измельчителя для получения готового продукта заданного размера и геометрической формы:  $K\%$  – количество крошки размером 1–3 мм;  $B\%$  – количество крошки менее 1 мм;  $Q$  – производительность вертикального измельчителя;  $P_{изм}$  – мощность, затрачиваемая на процесс измельчения. Основными факторами, влияющими на указанные показатели, являются:  $z$  – количество режущих ножей на валу ротора, шт;  $n$  – частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $z_b$  – толщина регулировочного ножа, мм.

6. Анализ выходных показателей при варьируемых параметрах показал, что максимальное значение процентного содержания частиц в готовом продукте размером 1–3 мм, равное  $K = 73 \%$ , достигается при частоте вращения ротора  $n = 130$

мин<sup>-1</sup>. В готовом продукте присутствуют частицы размером 3–5 мм, процент которых составляет 17,8 %, и крошка размером менее 1 мм,  $B = 9,2$  %. Данные показатели получены при использовании семи режущих ножей,  $z = 7$ , и толщиной регулировочного ножа  $z_b = 10$  мм. При этом производительность составляет  $Q = 13,5$  кг/ч, мощность, затрачиваемая на измельчение,  $P_{\text{изм}} = 180$  Вт, а удельный расход энергии  $q_{\text{изм}} = 13,3$  кВт·ч/т. В готовом продукте преобладают частицы размером 1 мм.

7. Проведенные опытно-промышленные испытания вертикального измельчителя производительностью 25 кг/ч подтвердили его работоспособность в промышленных условиях ОАО «Машиностроитель». Принято решение о проектировании и интеграции устройства в действующий участок переработки резинотехнических отходов для проектной производительности 16 т/год резиновой крошки. Экономический эффект от использования выполненных научно-технических разработок составляет 540 000 руб/год.

**Рекомендации.** Результаты диссертационной работы рекомендуются для использования на предприятиях по переработке резинотехнических отходов, а также для проведения лабораторных и практических работ кафедры «Механическое оборудование» ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке кадров по направлениям 15.03.02 – «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов», 15.04.02 – «Технологические машины и оборудование» и 15.05.01 – «Проектирование технологических машин и комплексов».

**Перспективы дальнейшей разработки темы** заключаются в масштабировании процесса производства переработки резинотехнических отходов и расширения областей использования получаемой продукции заданного фракционного состава.

### Список сокращений и условных обозначений

- $A$  – работа, затрачиваемая на разрушение массива материала, Дж;
- $A_l$  – толщина ножа, м;
- $A_{max}$  – максимальная работа, затрачиваемая на отрыв частицы, Дж;
- $A_p$  – величина работы, затрачиваемой на разрушение исходного массива резины одним зубом отрезной фрезы, Дж;
- $b$  – толщина режущих ножей, м;
- $b_a$  – глубина клиновидных пазов статора, м;
- $b_y$  – ширина клиновидных пазов статора, м;
- $b_n$  – ширина ножей, м;
- $B_y$  – угол проточки клиновидных пазов статора, град.;
- $C$  – минимальный зазор между ротором и статором в нижней части измельчающей зоны, м;
- $C_o$  – константа интегрирования;
- $d$  – характерный размер частиц после измельчения, м;
- $d_m$  – характерный размер частиц до измельчения, м;
- $d_с$  – диаметр шайб между ножами, м;
- $d_{max}$  – максимальный размер куска исходного материала, м;
- $d_z$  – диаметр ножей, м;
- $d_{ср}$  – средний диаметр готового продукта, м;
- $d_σ$  – изменение напряжения в куске резины в результате воздействия силы  $dF$ ;
- $D$  – внутренний диаметр статора, м;
- $D_b$  – диаметр валка, м;
- $D_r$  – диаметр ротора, м;
- $D_k$  и  $d_k$  – характерные размеры частиц до и после измельчения, м;
- $e$  – ширина зазора между валками в зоне измельчения, м;
- $E$  – модуль упругости (модуль Юнга), МПа;
- $E_z$  – суммарная значимость фактора «количество режущих ножей» при линейном коэффициенте регрессии, %;

$E_n$  – суммарная значимость фактора «частота вращения ротора» при линейном коэффициенте регрессии, %;

$E_{zb}$  – суммарная значимость фактора «толщина регулировочного ножа на выходе» при линейном коэффициенте регрессии, %;

$E_{a1}$  – значимость фактора «количество режущих ножей» при линейном коэффициенте регрессии, %;

$E_{a2}$  – значимость фактора «частота вращения ротора» при линейном коэффициенте регрессии, %;

$E_{a3}$  – значимость фактора «толщина регулировочного ножа на выходе» при линейном коэффициенте регрессии, %;

$E_{a11}$  – значимость фактора «количество режущих ножей» при квадратичном коэффициенте регрессии, %;

$E_{a22}$  – значимость фактора «частота вращения ротора» при квадратичном коэффициенте регрессии, %;

$E_{a33}$  – значимость фактора «толщина регулировочного ножа на выходе» при квадратичном коэффициенте регрессии, %;

$E_{a12}, E_{a13}, E_{a23}$  – значимость факторов при совместном влиянии, %;

$E_0$  – мгновенный модуль упругости, Па;

$f$  – коэффициент трения материала о валок;

$F$  – сила, действующая со стороны зуба ножа на материал, Н;

$F_p$  – площадь поперечного сечения загрузочного окна, м<sup>2</sup>;

$h$  – высота корпуса измельчителя, м;

$h_j$  – толщина шайб между ножами, м;

$h_r$  – ширина разгрузочной щели, м;

$h_w$  – шаг шнека, м;

$H$  – высота зуба ножа, м;

$H_c$  – высота статора, м;

$H_p$  – высота рабочей зоны, м;

$k$  – коэффициент, учитывающий форму отделяемого объема;

$k_e$  – коэффициент, характеризующий удельную поверхностную энергию;

$k_3$  – коэффициент заполнения;

$K_K$  – коэффициент пропорциональности в законе Кирпичева–Кика;

$K_P$  – коэффициент пропорциональности в законе Риттингера;

$L_N$  – длина ножа, м;

$L_B$  – длина валка, м;

$l$  – длина дуги, описываемой зубом в массиве материала, м;

$j$  – номер ряда ножей, шт.

$m$  – масса зуба, кг;

$M$  – максимальный размер измельчаемого материала, м;

$n$  – частота вращения,  $c^{-1}$ ;

$n$  – минимальное значение частоты вращения,  $c^{-1}$ ;

$n_\Omega$  – частота вращения шнекового питателя,  $c^{-1}$ ;

$N$  – мощность привода измельчителя, Вт;

$N_{общ}$  – общая мощность привода, Вт;

$N_{пр}$  – мощность на протягивание материала, Вт;

$N_{рез}$  – мощность на разрезание материала, Вт;

$N_{тр}$  – мощность на преодоление трения, Вт;

$P$  – мощность, затрачиваемая на измельчение, Вт;

$P_{max}$  – максимальная мощность, необходимая для разрушения образца, Вт;

$Q$  – производительность, кг/ч;

$r$  – радиус основания цилиндра, м;

$r_i$  – радиус верхнего ряда режущих ножей, м;

$r_k$  – радиус нижнего ряда режущих ножей, м;

$R$  – радиус ножа, м;

$R_r$  – радиус ротора, м;

$R_a$  – параметр шероховатости поверхности валка, мкм;

$R_{Ia}$  – параметр равновесной шероховатости для пары трения сталь–резина;

$R_k$  – количество противорежущих ребер внутри статора, шт;

$S$  – площадь контакта зуба ножа с массивом материала,  $m^2$ ;

$S_\sigma$  – поверхность, полученная в результате среза зубом новой поверхности;

$S_p$  – поверхность, образованная в результате среза зубом, м<sup>2</sup>;

$S_{V_0}$  – поверхность зоны уплотнения, м<sup>2</sup>;

$t_n$  – шаг установки ножей на роторе, м;

$T$  – расстояние между ротором и статором в рабочей зоне, м;

$v$  – оптимальная скорость резания, м/с;

$V$  – объем (деформируемый, отделяемой частицы), м<sup>3</sup>;

$V_k$  – объем, отрезаемый зубом ножа в зависимости от формы частицы, м<sup>3</sup>;

$V_z$  – объем зуба ножа, м<sup>3</sup>;

$V_0$  – объем зоны уплотнения материала перед зубом, м<sup>3</sup>;

$W$  – энергия, вводимая зубом ножа в массив материала, Дж;

$W_0$  – величина энергии для отделения куска объемом  $V_k$ , Дж;

$W_p$  – предельное значение энергии для отделения куска резанием, Дж;

$x_i$  – кодированное значение фактора;

$z$  – количество ножей (режущих), шт.;

$z_a$  – количество зубьев ножа, шт.;

$z_b$  – толщина регулировочного ножа, мм;

$z_h$  – расстояние от верхней точки загрузки до рассматриваемого поперечного сечения, м;

$z_i$  – размер зуба ножей, м;

$\alpha$  – угол между зубьями ножа, рад;

$\alpha_b$  – угол заточки ножей, град.;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения при введении энергии  $dW$ , Дж<sup>-1</sup>;

$\gamma$  – коэффициент объемного модуля упругости, Па;

$\gamma_i$  – коэффициент объемного модуля упругости, МПа;

$\gamma_j$  – насыпная плотность после прохождения  $j$ -го ряда ножей, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma(z)$  – функция изменения насыпной плотности по высоте, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_0$  – начальная насыпная плотность загрузки, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_k$  – конечная насыпная плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\delta$  – регулировочный зазор, м;

$\delta_A$  – элементарная работа, Дж;

$\Delta\varphi$  – бесконечно малый поворот зуба отрезной фрезы, м/рад;

$\Delta F$  – приращение поверхности, м<sup>2</sup>;

$\Delta V$  – деформированный объем, м<sup>3</sup>;

$\varepsilon$  – относительная деформация при разрушении;

$\varepsilon_l$  – относительная деформация вдоль дуги пройденного пути;

$\varepsilon_{\perp}$  – относительная деформация в направлении, перпендикулярном движению;

$\eta$  – КПД привода;

$\eta_k$  – коэффициент вязкости, Па;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\rho$  – плотность (материала, насыпная), кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_m$  – насыпная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

$\sigma$  – напряжение, возникающее в зоне уплотнения, Па;

$\sigma_v$  – временное сопротивление разрушению, Па;

$\sigma_{сж}$  – предел прочности материала при сжатии, Па;

$\sigma_n$  – пороговое значение напряжения, МПа;

$\sigma_p$  – предел прочности материала на растяжение, МПа;

$\sigma_m$  – экстремальное значение нагрузки, МПа;

$\tau$  – удельное сопротивление сдвигу (резанию) резины, Па;

$\varphi$  – угол трения резины о материал валков, град.;

$\psi$  – коэффициент, учитывающий проскальзывание и упругие свойства резины;

$\mathcal{V}$  – линейная скорость вращения зуба, м/с;

$\mathcal{V}_z$  – скорость движения материала вдоль оси  $Oz$ , м/с;

$\mathcal{V}_{\Omega}$  – скорость подачи материала шнековым питателем, м/с;

$\chi_{i0}$  – натуральное значение основного (нулевого) фактора;

$\chi_i$  – натуральное (текущее) значение фактора;

$\tau_i$  – интервал варьирования  $i$ -го параметра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильева, А.М. Отходы резинотехнических изделий: анализ способов их утилизации и экологические аспекты / А.М. Васильева, Р.Ф. Шакуров // Тинчуринские чтения - 2022 «Энергетика и цифровая трансформация» : сборник статей по материалам конференции : в 3 т. / под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань : [б.и.], 2022. – Т. 1. – С. 486-488.
2. Афиногенов, И.А. Переработка шин и их элементов / И.А. Афиногенов, Н.В. Бышов, С.Н. Борычев [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 124. – С. 366–389.
3. Об утверждении перечня видов отходов производства и потребления, в которых содержатся полезные компоненты, захоронение которых запрещается : распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 июля 2017 г. № 1589-р // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201707280028> (дата обращения: 01.11.2023).
4. Постановление Правительства РФ от 30.08.2018 № 1342 «О внесении изменений в ставки экологического сбора по каждой группе товаров, подлежащих утилизации» // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2018. – № 36. – Ст. 5614.
5. Свидерская, Т.Д. Утилизация отходов резиновой промышленности / Т.Д. Свидерская, Р.М. Долинская, Е.И. Щербина [и др.] // Ресурсо- и энергосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии : материалы Международной научно-технической конференции / Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский государственный технологический университет. – 2010. – Ч. 1. – С. 42–44.
6. Кравченко, В.М. Анализ измельчения резины механическим способом / В.М. Кравченко, П.А. Горьковец, В.А. Чмулев, А.В. Спесивцева // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2024. – С. 27-31.

7. Антонова, Т.Л. Правовое регулирование обращения с отходами производства и потребления в России: состояние и перспективы / Т.Л. Антонова // Молодой ученый. – 2019. – № 32 (270). – С. 45-49.

8. Гусев, А. Д. Современный рынок резиновой крошки в России / А. Д. Гусев, Н. А. Петухова, А. П. Самошин, В. М. Мельникова // Международный научный журнал. – 2014. – № 5. – С. 41–44.

9. Лозовая, С.Ю. Критерии качества крошки из резинотехнических отходов / С.Ю. Лозовая, В.М. Кравченко, Я.П. Топчий // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвузовский сборник статей / Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2024. – С. 153–157.

10. Пустошная, Л.С. Проблема переработки отходов резинотехнических изделий / Л.С. Пустошная // Техносферная безопасность, надежность, качество, энерго- и ресурсосбережение : материалы 21 Международной научно-практической конференции. – 2019. – Т. 1. – Вып. 21. – С. 552-559.

11. Лозовая, С.Ю. Возможные направления использования продуктов переработки механическим способом резинотехнических изделий / С.Ю. Лозовая, В.М. Кравченко, Н.М. Лозовой, Я.П. Топчий // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – Вып. XX. – С. 110–113.

12. Жихалкина, В.М. Экологически безопасные способы утилизации отходов резиновых изделий в производстве эффективных строительных материалов / В.М. Жихалкина, М.М. Косухин // Международный студенческий строительный форум-2017 : сборник докладов : в 2 т. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. – Т. 2. – С. 155-158.

13. Гусев, А.Д. Инвестиционная привлекательность использования отходов резинотехнических изделий / А.Д. Гусев, М.А. Дерина, Л.Н. Петрянина // Международный научный журнал. – 2020. – № 6. – С. 30–36.

14. Лозовая, С.Ю. Область применения продуктов вторичной переработки резинотехнических изделий в строительстве / С.Ю. Лозовая, В.М. Кравченко, С.А. Сацк // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. – Вып. XVIII. – С. 216-220.

15. Кравченко, В.М. Анализ воздействия многолезвийного инструмента на перерабатываемый материал / В.М. Кравченко, С.Ю. Лозовая, К.В. Чуев, Я.П. Топчий // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 168–174.

16. Кравченко, В.М. Анализ переработки резинотехнических изделий с помощью ножевых измельчителей / В.М. Кравченко, С.Ю. Лозовая, Я.П. Топчий // Научные технологии и инновации : сборник докладов XXV Международной научно-практической конференции "XXV научные чтения" / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 1145-1149.

17. Кравченко, В.М. Повышение эффективности измельчительного оборудования для переработки техногенных отходов и вторичного сырья / В.М. Кравченко, С.Ю. Лозовая // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 215–226.

18. 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 : сборник докладов IV Национальной конференции / Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 60–67.

19. Самошин, А. П. Исследование влияния метода переработки отходов резин на свойства резиновой крошки / А. Д. Гусев, Н. А. Петухова,

А. П. Самошин, В. М. Мельникова // Международный научный журнал. – 2015. – № 1. – С. 74–77.

20. Кравченко, В. М. Вертикальный измельчитель для переработки резинотехнических изделий : патент на полезную модель RU 237123 / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, В. А. Чмулев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – № 2025114653 ; заявл. 29.05.2025 ; опубл. 11.09.2025.

21. Лозовая, С. Ю. Двухстадийный измельчитель : патент на полезную модель RU 203639 U1 / С. Ю. Лозовая, В. М. Кравченко, Н. М. Лозовой, А. В. Тулина ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – № 2021102280 ; заявл. 02.02.2021 ; опубл. 14.04.2021, Бюл. № 11.

22. Кравченко, В. М. Двухстадийный измельчитель для переработки техногенных отходов : патент на полезную модель RU 224979 / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, П. Г. Солодков, Я. П. Топчий ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – № 2024102933 ; заявл. 06.02.2024 ; опубл. 10.04.2024, Бюл. № 10.

23. Щербина, Е. И. Структура и свойства резин : учебное пособие для студентов вузов по специальности «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий» / Е. И. Щербина, Р. М. Долинская. – Минск : БГТУ, 2004. – 135 с.

24. Дик, Джон С. Технология резины: рецептуростроение и испытания / под ред. Джона С. Дика ; пер. с англ. под ред. В. А. Шершнева. – Санкт-Петербург : Научные основы и технологии (НОТ), 2010. – 617 с.

25. Поветкина, Ю. С. Сравнительные характеристики резин на основе натурального и синтетического каучука / Ю. С. Поветкина, М. А. Фунбаю, А. А. Чуприкова // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сборник научных статей молодых ученых, аспирантов и студентов. – Тамбов, 2020. – Вып. 12. – С. 86–89.

26. Гусев, А.Д. Влияние характеристик резиновой крошки на свойства уличных травмобезопасных покрытий / А.Д. Гусев, Л.Н. Петрянина, М.А. Дерина // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 12–17.
27. Шехавцова, Т.Н. Применение продуктов деструкции отходов каучука СКД-НД в качестве технологической добавки в резиновые смеси на основе СКД-НД / Т.Н. Шехавцова, В.Н. Папков, Т.И. Игуменова [и др.] // Резиновая промышленность: сырье, материалы, технологии : доклады XXVIII научно-практической конференции. – Москва, 2023. – С. 144-146.
28. ГОСТ 8407-89. Крошка резиновая. Технические условия. – Введ. 1990-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 8 с.
29. Кравченко, В.М. Имитационное динамическое моделирование процесса извлечения бортового кольца / В. М. Кравченко, К.В. Чуев, Т.А. Дуюн [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 4. – С. 133–143.
30. Чуев, К.В. Проблемы утилизации крупногабаритных автомобильных шин / В. Я. Дуганов, Т.А. Дуюн, К.В. Чуев [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 11. – С. 103–112.
31. Бобович, Б.Б. Анализ технологий утилизации изношенных автопокрышек / Б.Б. Бобович // Вестник транспорта. – 2021. – № 9. – С. 14–17.
32. Смычагин, Е.О. Анализ способа утилизации отработанных автомобильных покрышек методом механического измельчения / Е.О. Смычагин // Механика, оборудование, материалы и технологии : электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции / редкол.: А.Е. Литвинов [и др.]. – 2019. – С. 525-531.
33. Селицкая, Н.В. Технология получения вулканизированной резиновой крошки в процессе переработки автомобильных покрышек / Н.В. Селицкая, М.В. Лашин, А.А. Решетко, Е.А. Титов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 165-летию

В.Г. Шухова : материалы конф. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 2498-2502.

34. Левченко, Э.П. Возможные пути решения экологических проблем техносферы путем переработки отходов резины с использованием процессов резания / Э.П. Левченко, А.М. Зинченко, О.А. Левченко, В.Н. Онопченко // Машиностроение и техносфера XXI века : сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции. – Донецк, 2024. – С. 188-192.

35. 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 : сборник докладов IV Национальной конференции. – Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 56-59.

36. Соловьев, Е.М. Применение измельченной резиновой крошки в изделиях резиновой промышленности / Е.М. Соловьев, Ю.Ю. Соловьева, Т.Н. Насиаловская // Каучук и резина. – 1994. – № 4. – С. 36-46.

37. Селицкая, Н.В. Технология получения вулканизированной резиновой крошки в процессе переработки автомобильных покрышек / Н.В. Селицкая, М.В. Лашин, А.А. Решетко, Е.А. Титов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : сборник трудов конференции. – Белгород, 2018. – С. 2498-2502.

38. Прокопчук, Н.Р. Изготовление формовых резинотехнических изделий на основе вторичного сырья / Н.Р. Прокопчук, Р.М. Долинская // Нефтехимия - 2020 : материалы III Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. – Минск, 2020. – С. 75-76.

39. Коротыч, Н.С. Резиновая крошка из автопокрышек для строительных изделий / Н.С. Коротыч // Управление отходами - основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе : сборник докладов третьей Международной научно-практической конференции / под ред. Е.П. Волынкиной. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2010. – С. 350-352.

40. Чапалда, Д.И. Разработка технологии утилизации изношенных автомобильных шин : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Д.И. Чапалда ; науч. рук. Т.Ф. Тарасова, Ю.Р. Абдрахимов ; офиц. опп. Ф.Р. Исмагилов, Н.А. Самойлов ; Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т. – Оренбург, 2007. – 154 с.

41. Щербаков, А. С. Производство резиновой крошки для бесшовных покрытий на основе этилен-пропилен-диенового каучука / А. С. Щербаков, И. И. Захлебная, О. В. Копнина, Н. В. Ключникова // Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2022. – С. 160-163.

42. Лозовая, С.Ю. Анализ основных технологических схем и линий по переработке и утилизации резинотехнических изделий / С.Ю. Лозовая, В.М. Кравченко, Н.М. Лозовой, Я.П. Топчий // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – Вып. XX. – С. 104–109.

43. Зубарь, Н.В. Анализ инвестиционного потенциала предприятия по производству плиток из резиновой крошки в Казахстане / Н.В. Зубарь // Экономический научный журнал: оценка инвестиций. – 2018. – № 4 (12). – С. 45-55.

44. Прокопец, В.С. Повышение эффективности дорожно-строительных материалов механоактивационным модифицированием исходного сырья : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / В. С. Прокопец ; Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). – Омск, 2005. – 34 с.

45. Валуев, Д.В. Перспективы переработки автомобильных покрышек / Д.В. Валуев, О.Р. Ананьева // Вестник науки Сибири. – 2011. – № 1 (1). – С. 699–704.

46. Тарабрина, Н. Ю. Зависимость этиологии футбольных травм от качества игровых покрытий / Н. Ю. Тарабрина // Культура физическая и здоровье. – 2020. – № 3 (75). – С. 92-96.

47. Кушкимбаева, И.Н. Исследование возможности применения отходов резины для изготовления шумоизолирующего материала / И.Н. Кушкимбаева, Е.А. Кунавина // Актуальные вопросы в науке и практике : сборник статей по материалам XIV международной научно-практической конференции. – 2019. – Ч. 1(3). – С. 9–12.

48. 05.09-19П.228 Кровля из битумно-резиновой композиции // РЖ 19П. Химия и переработка горючих полезных ископаемых и природных газов : реферативный журнал / ООО "НТИ-КОМПАКТ". – 2005. – № 9. – № 228.

49. Иванова, К.М. Оценка целесообразности использования резиновой черепицы в России / К.М. Иванова, П.М. Иванова // Alfabuild. – 2018. – № 3 (5). – С. 66–75.

50. Галышев, А. Б. Обоснование необходимости использования асфальта с добавлением резиновой крошки при создании объектов велотранспортной инфраструктуры / А. Б. Галышев // МАДИ. – 2016. – № 15-1. – С. 19-22.

51. Прокопец, В.С. Модификация дорожного асфальтобетона резиновыми порошками механоактивационного способа получения : монография / В.С. Прокопец, Т.Л. Иванова ; Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). – Омск : СибАДИ, 2012. – 116 с.

52. Смирнов, А.В. Разработка композиционных дорожных материалов на основе механоактивированных резиновых наполнителей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / А.В. Смирнов ; Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). – Москва, 2018. – 320 с.

53. Иванова, Т.Л. Современные технологии модификации дорожных битумов резиновыми добавками : монография / Т.Л. Иванова ; под науч. ред. В.С. Прокопца. – Москва : Транспорт, 2015. – 180 с.

54. Долинская, Р.М. Рециклинг отходов резинотехнических изделий (обзор) / Р.М. Долинская, Н.Р. Прокопчук // Полимерные материалы и технологии. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 6–24.

55. Резниченко, С.В. Новое в области науки, технологии и производства каучука и резины VIII Всероссийская конференция с международным участием

"Каучук и резина - 2018: традиции и новации". Ч. 1 / С.В. Резниченко, Ю.Л. Морозов, Т.Б. Коникина, А.Ю. Юрченко // Каучук и резина. – 2018. – Т. 77, № 3. – С. 206–216.

56. Измайлов, В.Д. Технологический цикл использования резиновой крошки в качестве сорбента разлитой нефти / В.Д. Измайлов, Н.Е. Чернышова, Е.В. Володина, О.А. Самарина // Химическая промышленность сегодня. – 2011. – № 4. – С. 38-40.

57. Вачев, И.А. Резиновая крошка - альтернативный сорбент нефтепродукта : тез. докл. / И.А. Вачев, А.И. Коваленко, П.Е. Нор // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф. – 2017. – С. 201-202.

58. Нурмадов, Г.Н. Влияние дробленой резиновой крошки на свойства битума / Г.Н. Нурмадов, Р.Х. Сайрахмонов, М.С. Пирумшохи, Х.К. Бобоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 2 (46). – С. 135–138.

59. Духовный, Г.С. Принципы нивелирования различий свойств резиновой крошки для производства резинобитумного вяжущего / Г.С. Духовный, А.В. Сачкова // Научные технологии и инновации : материалы конференции : в 2 т. / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. – Т. 1. – С. 84-87.

60. Балабанов, В.Б. Улучшение качества асфальтобетонной смеси путем введения битума с резиновой крошкой / В.Б. Балабанов, А.В. Стратикапулова // Молодой ученый. – 2023. – № 17 (464). – С. 63-67.

61. Попов, А.Ю. Анализ экономической целесообразности развития проектов по утилизации автомобильных шин / А.Ю. Попов // Современные проблемы науки и образования : материалы Международной (заочной) научно-практической конференции / Научно-издательский центр «Мир науки». – 2019. – С. 27-34.

62. Кравченко, В.М. Основы теории расчета технологических комплексов для производства резиновой крошки, шамотного кирпича и асфальтобетонной

массы / Р.В. Зыбин, В.М. Кравченко, А.С. Немыкин [и др.] // Молодежь и научно-технический прогресс / Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 74–77.

63. Новичков, Ю.А. Повышение эффективности технологического оборудования для переработки изношенных автотракторных шин способом низкотемпературного пиролиза / Ю.А. Новичков // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 127–134.

64. Сибирев, М.С. Пиролиз резины: технология и перспективы / М.С. Сибирев, М.Г. Руденко // Прикладные исследования в области физики : материалы конференции. – Иркутск : Изд-во Иркут. нац. исслед. техн. ун-та, 2023. – С. 21-25.

65. Якунин, И.Н. Пиролитический метод переработки автомобильных шин / И.Н. Якунин, С.Г. Безрядин // Химическая технология. – 2013. – Т. 14, № 4. – С. 252–256.

66. Рулькова, Ю.В. Способ получения регенерата : пат. 2337929 Рос. Федерация : МПК C08J 11/10, C08L 7/02 / Ю.В. Рулькова, Д.В. Рульков, А.Е. Коваль [и др.] ; заявитель и патентообладатель ЗАО "ФПК Промразвитие". – № 2007121914/04 ; заявл. 14.06.2007 ; опубл. 10.11.2008. – 10 с.

67. Аюпов, Д.А. Современные способы регенерации резин и возможности использования их в строительной отрасли / Д.А. Аюпов, А.В. Мурафа, Ю.Н. Хакимуллин, В.Г. Хозин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 1 (13). – С. 260–263.

68. Мартынова, Д.В. Пути увеличения доли процесса криогенного измельчения в общем объеме переработки эластомеров искусственного происхождения / Д.В. Мартынова, Л.В. Боярова, С.В. Антимонов, Н.Н. Мартынов // Современный научный вестник. – 2015. – Т. 4, № 1. – С. 42–48.

69. Ерофеева, Д.А. Физические и химические основы технологии утилизации автопокрышек с использованием криогенных установок /

Д.А. Ерофеева, Г.В. Ларина // Бюллетень результатов научных исследований. – 2012. – № 3 (4). – С. 32–41.

70. Крапивина, П.С. Анализ технологий по переработке автошин: бародеструкционная технология / П.С. Крапивина, А.А. Владыкин // Наука и образование в условиях мировой нестабильности: проблемы, новые этапы развития : материалы II международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2022. – Ч. 1. – С. 204–209.

71. Людсков, Д.И. Методы переработки изношенных автомобильных шин / Д.И. Людсков, Н.В. Неприн // Новая наука: теоретический и практический взгляд : материалы международной научно-практической конференции. – 2017. – Ч. 1. – С. 21–25.

72. Большакова, М.А. Обзор современных методов утилизации шин / М.А. Большакова, А.С. Домнина // Современные технологии: проблемы и перспективы : сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. для аспирантов, студентов и молодых ученых / гл. ред. О.В. Мухина. – Севастополь : Изд-во СевГУ, 2019. – С. 157-160.

73. Дурнев, Д.А. Современные методы переработки автомобильных шин / Д.А. Дурнев, В.В. Тарасов, Г.В. Бурых // Наука, образование, производство для противодействия техногенным угрозам и решения экологических проблем (Техносферная безопасность-2023) : материалы XX Международной научно-практической конференции. – Уфа, 2023. – С. 456-459.

74. Матеев, О.А. Анализ инновационных технологий переработки отработанных шин / О.А. Матеев, Е.Г. Раковская, Н.Г. Занько // Вестник МАНЭБ. – 2021. – Т. 26, № 4. – С. 32–34.

75. Усков, Л.А. Современные тенденции проектирования многофункциональных объектов переработки шин / Л.А. Усков // Инновационная наука. – 2024. – № 6-2. – С. 200–202.

76. Кравченко, В.М. Обзор существующего инструмента измельчительного оборудования для переработки вторичного сырья / В.М. Кравченко, Я.П. Топчий // Информационные технологии и инжиниринг :

сборник материалов студенческой научно-практической конференции / Национальный исследовательский университет "БелГУ". – Белгород : НИУ "БелГУ", 2023. – С. 165-167.

77. Лозовая, С.Ю. Анализ рынка строительных изделий с использованием техногенного сырья / С.Ю. Лозовая, В.М. Кравченко, А.В. Тулина // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – Вып. XIX. – С. 139–142.

78. Лозовая, С.Ю. Анализ способов переработки резинотехнических изделий / С.Ю. Лозовая, В.М. Кравченко, С.А. Сацик // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. – Вып. XVIII. – С. 211-215.

79. Сердцов, Р. В. Надежные универсальные промышленные шредеры / Р. В. Сердцов // Твердые бытовые отходы. – 2013. – № 6 (84). – С. 22-23.

80. Калимуллин, С. Р. Промышленные шредеры для переработки твердых бытовых отходов / С. Р. Калимуллин, А. М. Пашали // Мавлютовские чтения : материалы XV Всероссийской молодежной научной конференции, Уфа, 2021 г. : в 7 т. – Уфа, 2021. – Т. 3. – С. 327-330.

81. Лукач, Ю. Е. Валковые машины для переработки пластмасс и резиновых смесей / Ю. Е. Лукач, Д. Д. Рябинин, Б. Н. Метлов. – Москва : Машиностроение, 1967. – 155 с.

82. Сабиев, У. К. Повышение однородности гранулометрического состава измельченного материала в измельчителе центробежно-роторного действия / У. К. Сабиев, В. В. Фомин, И. У. Сабиев // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2011. – № 4 (78). – С. 82–84.

83. Пеленко, В. В. Математическое моделирование процесса формирования реального острия лезвийной кромки ножа шнекового измельчителя твердообразных материалов / В. В. Пеленко, В. В. Нечитайлов, В. П. Иваненко [и др.] // Название журнала. – 2022. – № 1 (51). – С. 47–60.

84. Горюнов, Ю. В. Эффект Рибендера / Ю. В. Горюнов, Н. В. Перцов, Б. Д. Сумм. – Москва : Наука, 1966. – 128 с.
85. Технология переработки полимеров. Инженерная оптимизация оборудования : учебник для вузов / А. С. Клинков, М. А. Шерышев, М. В. Соколов, В. Г. Однолько. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2026. – 386 с.
86. Поскребышев, В.А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий : учеб. пособие / В.А. Поскребышев, А.А. Зиновьев, Н.А. Лохова [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск : ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 378 с.
87. Кербера, М. Л. Технология переработки полимеров. Физические и химические процессы : учебник для среднего профессионального образования / под ред. М. Л. Кербера. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2026. – 316 с.
88. Клищенко, В.П. Разрушение резин при различных способах механического воздействия / В.П. Клищенко, Ю.Р. Абдрахимов, Н.В. Вадулина // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 12. – С. 419-429.
89. Протасов, Ю.И. Теоретические основы механического разрушения горных пород : научное издание / Ю.И. Протасов. – Москва : Недра, 1985. – 242 с. : ил. – Библиогр.: с. 240.
90. Осовская, И. И. Эластомеры : учебное пособие / И. И. Осовская, Е. В. Савина, В. Е. Левич ; ВШТЭ СПбГУТД. – Санкт-Петербург : Изд-во ВШТЭ СПбГУТД, 2016. – 126 с.
91. Лепетов, В. А. Расчеты и конструирование резиновых изделий и технологической оснастки : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Технология переработки пластических масс и эластомеров" / В. А. Лепетов, Л. Н. Юрцев ; под ред. Л. Н. Юрцева. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ИСТЕК, 2006. – 417 с.
92. Лозовая, С.Ю. Проблема информационного обеспечения математических моделей в технических задачах при измельчении резинотехнических изделий / С.Ю. Лозовая, В.М. Кравченко, А.В. Тулина //

Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – Вып. XIX. – С. 143-146.

93. Морозов, В.В. Фрезерный инструмент : учебное пособие / В.В. Морозов, С.Н. Григорьев, А.Г. Схиртладзе [и др.] ; Владимирский государственный университет. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2014. – 215 с.

94. Клищенко, В. П. Механическое разрушение поверхности резин резцом / В. П. Клищенко, А. Д. Проскурин // Научная жизнь. – 2010. – № 1. – С. 20–28.

95. Лобанов, Д.В. Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе / Д.В. Лобанов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2015. – № 3. – С. 45-52.

96. Белобородова, Т.Г. Разработка конструкции и метода расчета установки для измельчения полимерных отходов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Т.Г. Белобородова. – Уфа, 2001. – 159 с.

97. Клищенко, В.П. Разрушение резин при различных способах механического воздействия / В.П. Клищенко, Ю.Р. Абдрахимов, Н.В. Вадулина // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 5. – С. 124-138.

98. Кравченко, В. М. Исследование работоспособности вертикального ротора измельчителя при получении резиновой крошки / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, Ю. А. Бондаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3 (99). – С. 214-222.

99. Поскребышев, В.А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий : учебное пособие / В.А. Поскребышев, А.А. Зиновьев, Н.А. Лохова [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Братск : БрГУ, 2009. – 378 с.

100. Красовский, Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.

101. Григорович, В.Г. Информационно-статистические методы в технологии машиностроения : Пособие по обработке результатов эксперимента / В.Г. Григорович, В.Я. Кершенбаум, Д.А. Козочкин [и др.]. – М. : ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. – 184 с.

102. Лозовая, С.Ю. Применение аналитического пакета Maple для исследования конструктивно-технологических параметров оборудования и моделирования техпроцессов на предприятиях стройиндустрии : учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлению 270100 «Строительство» / С.Ю. Лозовая, В.П. Воронов ; Федер. агентство по образованию, БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2007. – 179 с.

103. Александр, М. Программирование в Excel 2016 с помощью VBA / М. Александр, Д. Куслейко. – М. : Вильямс, 2016. – 767 с.

104. Lozovaya, S.Y. Simulation of particle motion in a two-stage mill / S.Y. Lozovaya, V.M. Kravchenko // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42, No. 5. – P. 523-525.

105. Lozovaya, S.Y. Investigation of particle kinematics and strength characteristics of a set of multi-knife tools for the disposal of rubber products / S.Y. Lozovaya, Y.P. Topchy, V.M. Kravchenko // Practice Oriented Science: UAE - Russia - India : proceedings of the International University Scientific Forum, UAE, May 8, 2024. – Dubai : Infinity, 2024. – P. 140-144.

106. Лозовая, С.Ю. Моделирование кинематики частиц с наборным многолезвийным инструментом при переработке резинотехнических изделий / С.Ю. Лозовая, А.Н. Афонин, В.М. Кравченко, Я.П. Топчий // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 12-1. – С. 40–45.

107. Лозовая, С.Ю. Моделирование перемещения частиц в двухстадийном измельчителе в зависимости от его технологических параметров / С.Ю. Лозовая, В.М. Кравченко // СТИН. – 2022. – № 3. – С. 24–27.

108. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических

факторов внешней среды. – Введ. 1971-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1969. – 47 с.

109. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – Введ. 1971-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1969. – 47 с.

110. Батяев, А.А. Выбор асинхронного двигателя по мощности и расчет механических характеристик асинхронного электропривода с использованием персонального компьютера : методические указания по выполнению расчетно-графической работы для студентов всех специальностей / А.А. Батяев, А.В. Новотельнова ; под ред. Л.П. Булата. – СПб. : СПбГУНиПТ, 2006. – 19 с.

111. Красовский, А. Б. Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором : методические указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Электротехника и электроника» / А. Б. Красовский, С. А. Васюков, О. И. Мисеюк, Ю. В. Трунин. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 31 с.

112. ГОСТ 2679-2022. Фрезы отрезные. Технические условия. – Введ. 2023-01-01. – М. : Стандартиформ, 2022. – 24 с.

113. ГОСТ 19265-73. Фрезы отрезные и прорезные из быстрорежущей стали. Технические условия. – Введ. 1975-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1973. – 12 с.

114. Конфигуратор счетчиков Меркурий (универсальный) : руководство пользователя / Инкотекс. – Версия 1.2. – Москва, 2021. – 127 с.

115. Евсиков, А. А. Автоматизированный электропривод с частотным управлением : учебное пособие / А. А. Евсиков, В. А. Коковин, А. П. Леонов. – Дубна : Гос. ун-т «Дубна», 2020. – 121 с.

116. Лобах, В.П. Прибор для измерения частоты вращения вала : тез. докл. / В.П. Лобах, А.С. Слива // Материалы, оборудование и

ресурсосберегающие технологии : материалы конф. / Белорусско-Российский ун-т. – Могилев, 2022. – С. 239–240.

117. Винтер, К. Лабораторные сита и виброгрохоты: современные решения для классического метода / К. Винтер // Лаборатория и производство. – 2019. – № 3 (7). – С. 56–59.

118. ГОСТ Р 51568-99. Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. – Введ. 2000-07-01. – М. : Госстандарт России, 1999. – 16 с.

119. Технические условия ТУ 2519-001-77811074-07 Крошка резиновая из изношенных шин, утильной резины и отходов резинотехнических производств. – № 52.НЦ.14.251.Т.001377.07.09 от 09.07.2009. – 20 с.

120. Беляев, З.А. Результаты исследований гранулометрического состава песка различными способами / З.А. Беляев, О.М. Пеля, Т.П. Бубнова, Ю.В. Никонова // Ресурсосберегающие технологии, материалы и конструкции : сборник трудов конференции. – 2023. – С. 113-119.

121. Дубовец, А.А. Построение графических моделей / А.А. Дубовец // Современные информационные технологии в науке и образовании : сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции, 15-17 мая 2023 г. / под ред. В.П. Иванова. – М. : Изд-во МГТУ, 2023. – С. 45-52.

122. Воячека, И.И. Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сборник статей XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / под ред. И.И. Воячека, А.Е. Зверовщикова, Д.В. Кочеткова. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2021. – Вып. 12. – 128 с.

123. Емельянова, И.В. Геометрическое 3D-моделирование и CAD/CAM-технологии САПР / И.В. Емельянова, Н.В. Емельянов, В.Л. Зубенко // Инновационные технологии в металлообработке : сборник научных трудов / отв. ред. Н. И. Веткасов. – Самара : СамГТУ, 2017. – С. 19-23.

124. Лукина, С.В. Моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния осевых режущих инструментов численным методом

конечных элементов в CAD/CAM/CAE/PDM-системе SolidWorks / С.В. Лукина, М. В. Крутякова, М.Р. Рыбакова // Вестник Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ). Серия "Машиностроение". – 2013. – № 10-11. – С. 2431-2435.

125. Щуров, И.А. Расчет дисковой модульной фрезы для нарезания косозубого колеса классическим (в SolidWorks) и дискретным твердотельным типами моделирования / И.А. Щуров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Машиностроение". – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 52-62.

126. Балина, А.Е. Применение CAD-системы в качестве одного из средств повышения эффективности аналитических расчетов / А.Е. Балина // Студенческий вестник. – 2020. – № 20-10 (118). – С. 83-89.

127. Лукина, С. В. Моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния протяжного инструмента в CAD/CAM/CAE/PDM-системе SolidWorks / С. В. Лукина, А. Н. Феофанов, М. В. Крутякова, М. Р. Рыбакова // [Название журнала]. – 2011. – № 12. – С. 57-59.

128. Смоленцев, Е.В. Технология машиностроения. САПР в машиностроении : курс лекций : учебное пособие / Е.В. Смоленцев, В.Г. Грицюк, С.В. Ковалев ; Воронежский государственный технический университет. – Воронеж : ВГТУ, 2020. – 135 с.

129. Петров, Н.И. Методика расчета напряженно-деформированного состояния деталей двигателя внутреннего сгорания в системе SolidWorks / Н.И. Петров, Т.Л. Антонова, М.Э. Суняева // Вестник Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева. – 2024. – Т. 18, № 4. – С. 22-31.

130. Витюнин, М.А. Сопротивление материалов : учебное пособие для студентов / М.А. Витюнин, О.А. Чикова ; Уральский государственный педагогический университет. – Екатеринбург : [б. и.], 2014. – 136 с.

131. Колоско, Д.Н. Применение критерия Мизеса в прочностных расчетах систем инженерного анализа / Д.Н. Колоско, И.С. Хаустович, В.А. Щербаченя //

Вестник Белорусского государственного аграрного технического университета. – 2023. – № 4. – С. 45-52.

132. Новиков, А.А. Сплавы в машиностроении : учебное пособие / А.А. Новиков, Д. А. Седых. – Москва : [б. и.], 2022. – 125 с.

133. Каирбай, О. Т. Разработка конструкции инструмента для оборудования по переработке твердых отходов / О. Т. Каирбай, А. В. Маздубай, С. И. Дервягин // Наука и техника Казахстана. – 2023. – № 1. – С. 73–85.

134. Спириин, Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / Н. А. Спириин, В. В. Лавров, Л. А. Зайнуллин [и др.] ; под общ. ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург : Изд-во Урал. инновац. науч.-образоват. центра, 2015. – 290 с.

135. Емельянов, А. М. Статические методы обработки, планирования инженерного эксперимента : учебное пособие / А. М. Емельянов, Н. П. Кидяева, Е. А. Подолько, Е. М. Шпилев ; сост. А. М. Емельянов [и др.]. – Благовещенск : ДальГАУ, 2015. – 93 с.

136. Бойко, Н. Г. Теория и методы инженерного эксперимента : курс лекций / Н. Г. Бойко, Т. А. Устименко. – Донецк : ДонНТУ, 2009. – 158 с.

137. Андронон, А.А. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости / А.А. Андронон, Е.А. Леонтович, И.И. Гордон, А.Г. Майер. – М. : Наука, 1967. – 488 с.

138. Арнольд, В.И. Теория бифуркаций / В.И. Арнольд, В.С. Афраимович, Ю.С. Ильяшенко, Л.П. Шильников // Итоги науки и техники. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. – М. : ВИНТИ, 1986. – Т. 5: Динамические системы–5. – С. 5–218.

139. Фомичев, А.В. Элементы теории бифуркаций и динамических систем. Ч. 1 : учебно-методическое пособие по курсу «Аналитическая механика» / А. В. Фомичев ; Московский физико-технический институт. – М. : МФТИ, 2019. – 42 с.

140. Хазова, Ю.А. Элементы теории бифуркаций. Ч. 1. Динамические системы : учебно-методическое пособие / Ю.А. Хазова ; Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского. – Симферополь : КФУ, 2019. – 55 с.

141. Усс, Е.П. Эксплуатационные свойства резин, модифицированных в олигомерных средах / Е.П. Усс, Ж.С. Шашок, А.В. Касперович, О.А. Кротова // Вестник Белорусского государственного технологического университета. – 2019. – № 2 (223). – С. 41-46.

142. ГОСТ 262-93 (ISO 34-79). Резина. Метод определения сопротивления раздиру (метод раздвоенных, угловых и прямых образцов). – Введ. 1995-01-01. – М. : Стандартиформ, 1993. – 12 с.

143. Клищенко, В.П. Разрушение резин при различных способах механического воздействия / В.П. Клищенко, Ю.Р. Абдрахимов, Н.В. Вадулина // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2013. – № 12. – С. 419-429.

144. Середкин, А. Н. Методологические аспекты переработки и утилизации резинотехнических отходов / А. Н. Середкин, А. А. Горячева, Р. А. Дярькин // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2013. – № 4. – С. 156-159.

145. ГОСТ ISO 2230-2013. Изделия резиновые. Руководство по хранению = Rubber products. Guidelines for storage. – Введ. 2016-01-01. – М. : Стандартиформ, 2014. – IV, 18 с.

146. Адырхаева, Э. А. Российский рынок резиносодержащих отходов / Э. А. Адырхаева // Форум молодых ученых. – 2019. – № 2. – С. 84-88.

## Патент на полезную модель № 237123

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 237123

**ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ ДЛЯ  
ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова" (RU)*

Авторы: *Лозовая Светлана Юрьевна (RU), Кравченко  
Владимир Михайлович (RU), Чмулев Владислав  
Андреевич (RU)*

Заявка № 2025114653

Приоритет полезной модели 29 мая 2025 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 11 сентября 2025 г.Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 29 мая 2035 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

## Патент на полезную модель № 203639



## Патент на полезную модель № 224979

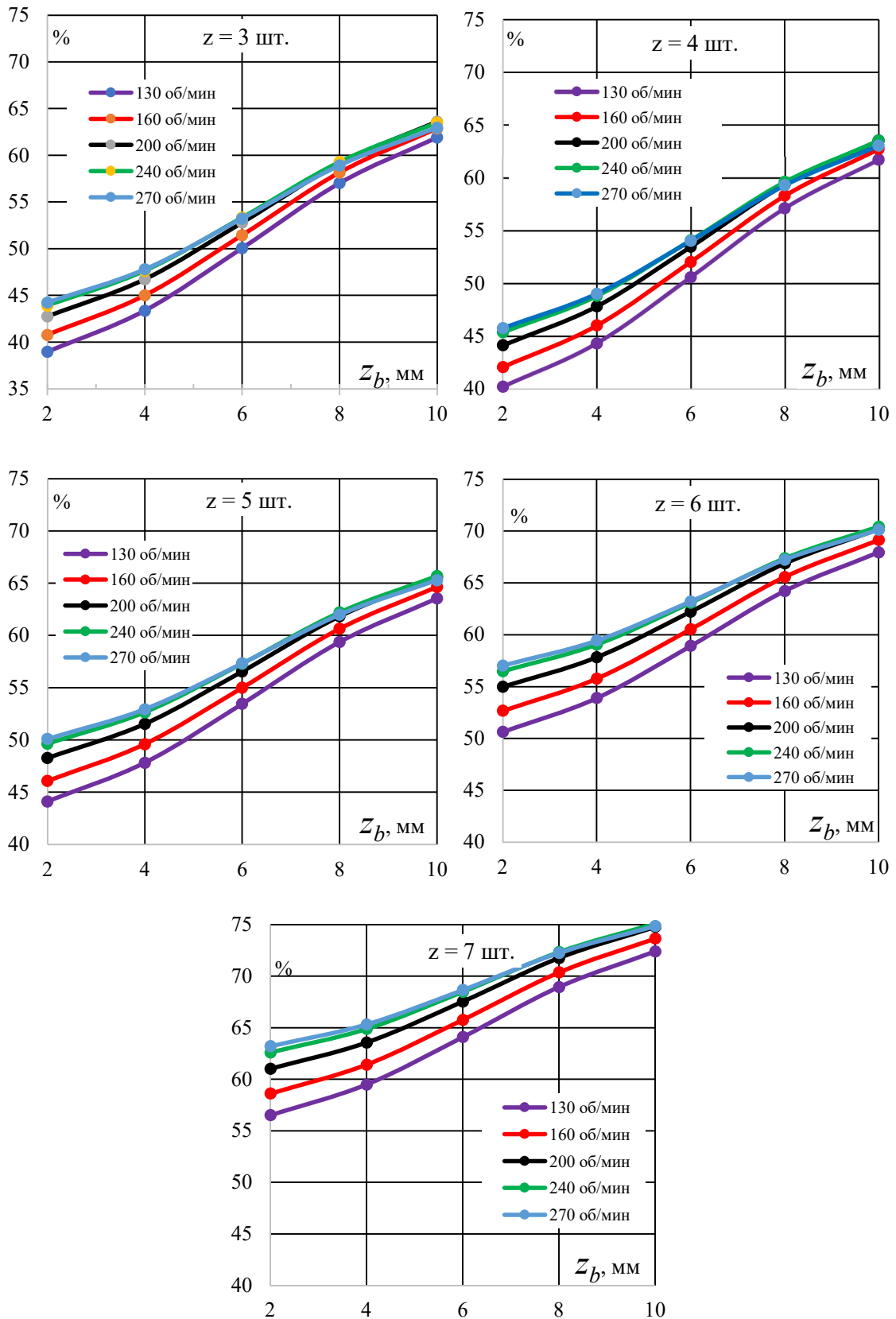


## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

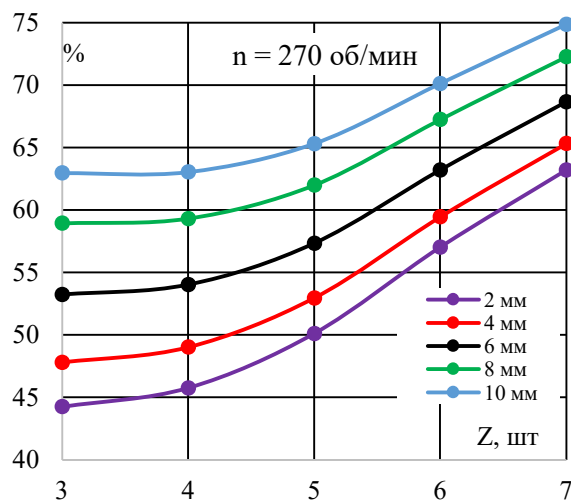
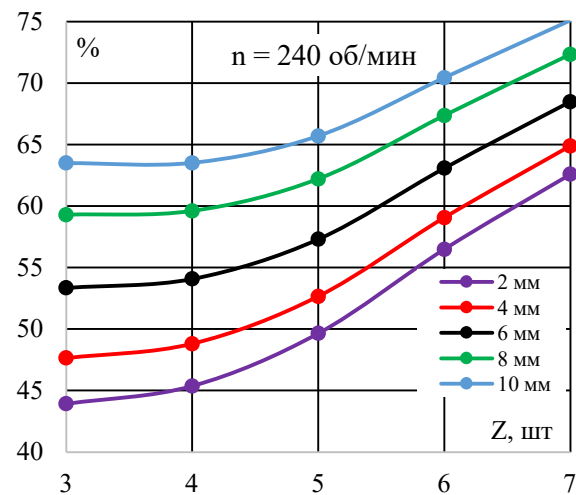
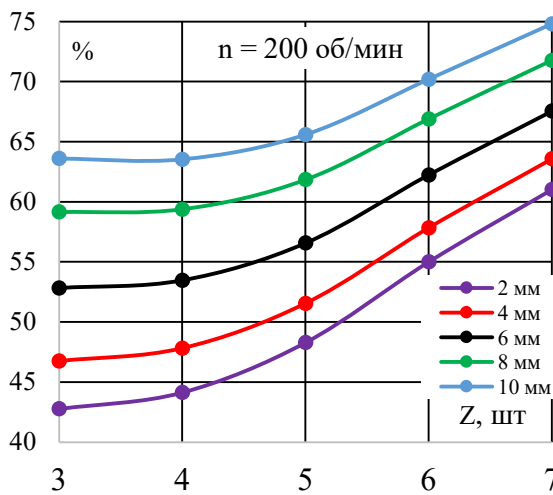
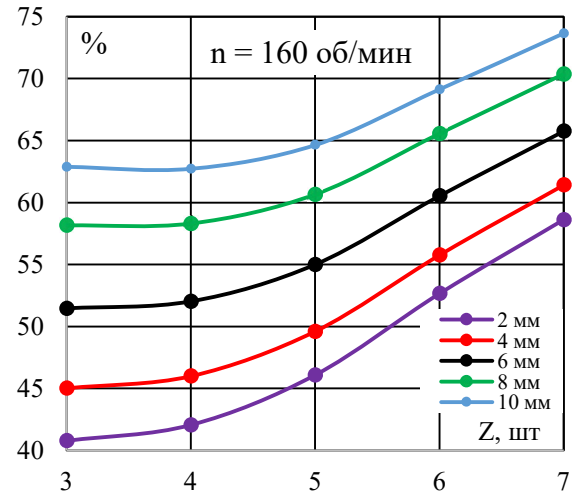
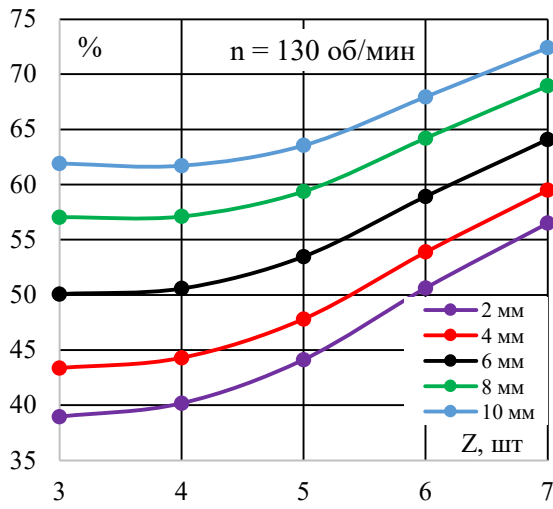
### Определение адекватности уравнения регрессии максимального процентного содержания фракции 1-3 мм в крошке $K\%$

№оп	x1	x2	x3	y	s1=x1*y	s2=x2*y	s3=x3*y	x1x2*y	x1x3*y	x2x3*y	x1x1*y	x2x2*y	x3x3*y		yэ	yp	(yэ-yp)^2	
1	-1	-1	-1	49,000	-49	-49	-49	49	49	49	49	49	49		49	48,048	0,906296	
2	1	-1	-1	54,000	54	-54	-54	-54	-54	54	54	54	54		54	51,982	4,072888	
3	-1	1	-1	52,000	-52	52	-52	-52	52	-52	52	52	52		52	50,849	1,323852	
4	1	1	-1	57,000	57	57	-57	57	-57	-57	57	57	57		57	55,283	2,947168	
5	-1	-1	1	65,000	-65	-65	65	65	-65	-65	65	65	65		65	66,216	1,479678	
6	1	-1	1	67,000	67	-67	67	-67	67	-67	67	67	67		67	67,650	0,422859	
7	-1	1	1	66,000	-66	66	66	-66	-66	66	66	66	66		66	67,518	2,303802	
8	1	1	1	69,000	69	69	69	69	69	69	69	69	69		69	69,452	0,204019	
9	-1,68	0	0	60,000	-100,8	0	0	0	0	0	169,344	0	0		60	59,194	0,648835	
10	1,68	0	0	63,000	105,84	0	0	0	0	0	177,8112	0	0		63	64,123	1,261971	
11	0	-1,68	0	57,000	0	-95,76	0	0	0	0	0	160,8768	0		57	57,236	0,055883	
12	0	1,68	0	61,000	0	102,48	0	0	0	0	0	172,1664	0		61	61,103	0,01056	
13	0	0	-1,68	41,000	0	0	-68,88	0	0	0	0	0	115,7184		41	44,094	9,575902	
14	0	0	1,68	74,000	0	0	124,32	0	0	0	0	0	208,8576	(yэ-yp)^2	74	71,257	7,521666	
15	0	0	0	58,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	58	57,541	0,210485	
16	0	0	0	58,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	58	57,541	0,210485	
17	0	0	0	58,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	58	57,541	0,210485	
18	0	0	0	57,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	57	57,541	0,292913	
19	0	0	0	57,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	57	57,541	0,292913	
20	0	0	0	57,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	57	57,541	0,292913	
				s0	s1	s2	s3	s12	s13	s23	s11	s22	s33	сумма	сумма	сумма		
				1180,0	20,0	15,7	110,4	1,0	-5,0	-3,0	826,2	812,0	803,6	1,500	1179,255	34,246		
Сумма sii																		
Коэффициенты уравнений регрессии																		
A	B	C		a0	a1	a2	a3	a12	a13	a23	a11	a22	a33					
0,453704	0,857143	1,428571																
Дисперсия воспроизводимости				56,7	4,4	1,2	5,2	0,13	-0,63	-0,38	0,13	0,41	0,12					
y	sy^2	Дисперсии																
57,500	0,3	sb0^2	sb1^2	sb2^2	sb3^2	sb12^2	sb13^2	sb23^2	sb11^2	sb22^2	sb33^2							
Дисперсия адекватности				0,058333	0,021429	0,021429	0,021429	0,030612	0,030612	0,030612	0,019841	0,019841	0,019841					
	сад^2	число степ	коэф.	число степ	Табл.кр-й													
	6,549115	свободы	студент	свободы	Фишера													
		f	t	fад	F													
		5	2,57	5	5,05													
Проверка значимости коэффициентов																		
		0,149917	0,055071	0,055071	0,055071	0,078673	0,078673	0,078673	0,050992	0,050992	0,050992							
проверка значимости коэффициентов: "да" - значим, "нет" - незначим:																		
		да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	нет	
адекватность																		
		Расчетная	Fp															
		Фишера	21,83038	Адекватно?	да													

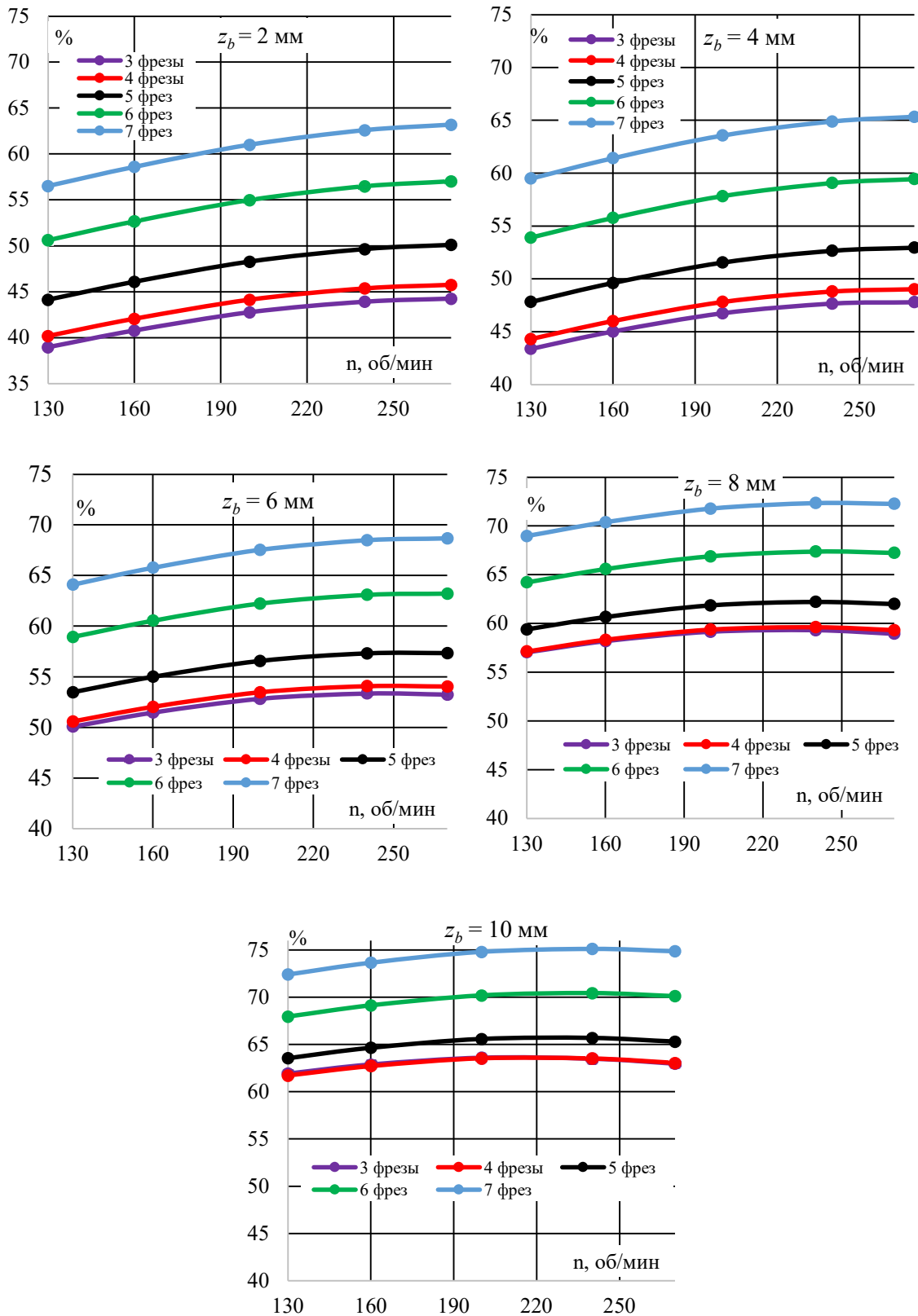
Графики, показывающие зависимость максимального процентного содержания фракции 1-3 мм в крошке  $K_{\%}$  в зависимости от толщины регулировочного ножа  $z_b$  при фиксированном количестве режущих ножей  $z$



Графики, показывающие зависимость максимального процентного содержания фракции 1-3 мм  $K_{\%}$  в крошке в зависимости от количества режущих фрез  $z$  при фиксированном значении частоты вращения ротора  $n$

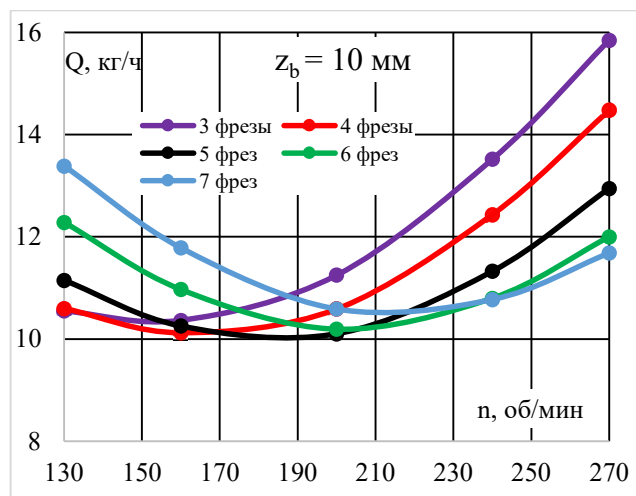
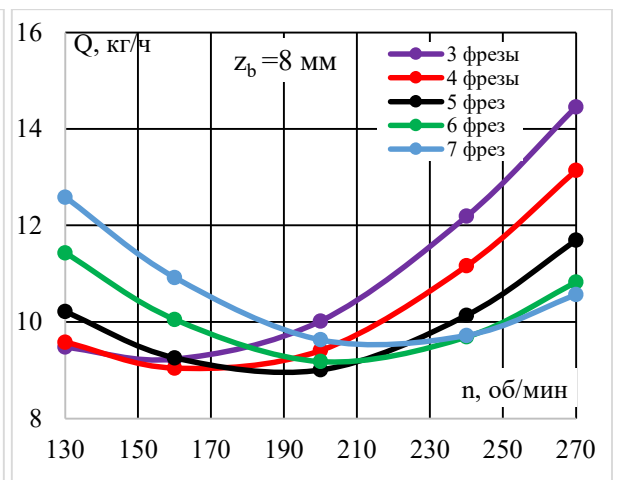
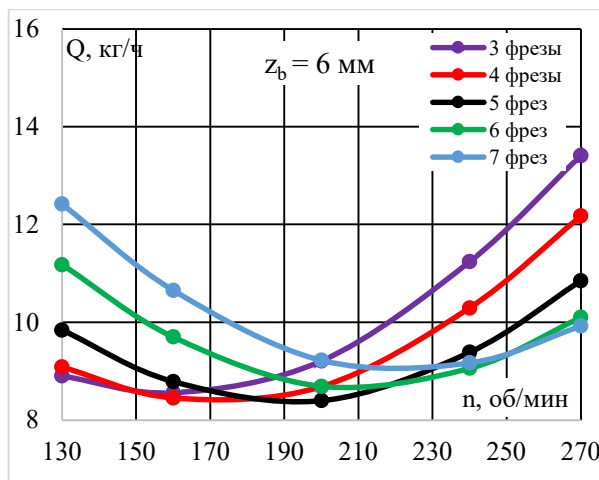
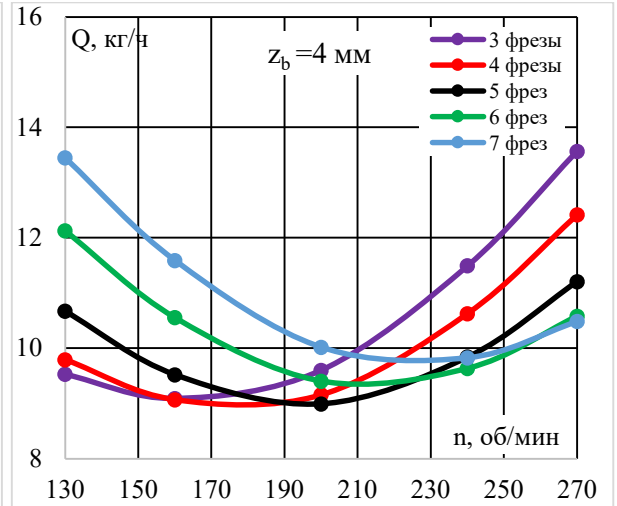
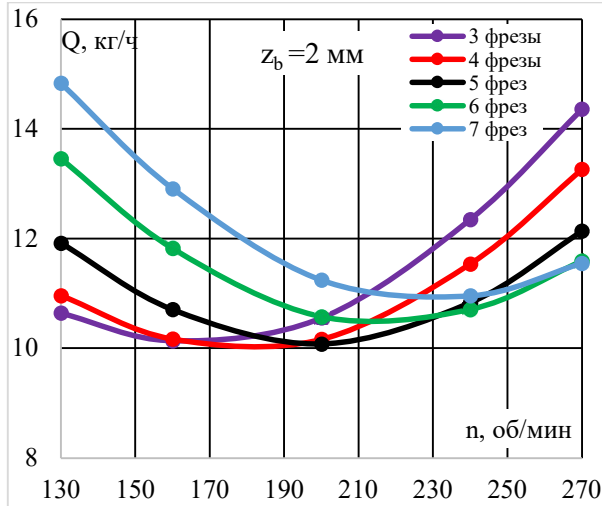


Графики, показывающие зависимость максимального процентного содержания фракции 1-3 мм  $K_{\%}$  в крошке в зависимости от частоты вращения ротора  $n$  при фиксированном значении толщины регулировочного ножа  $z_b$

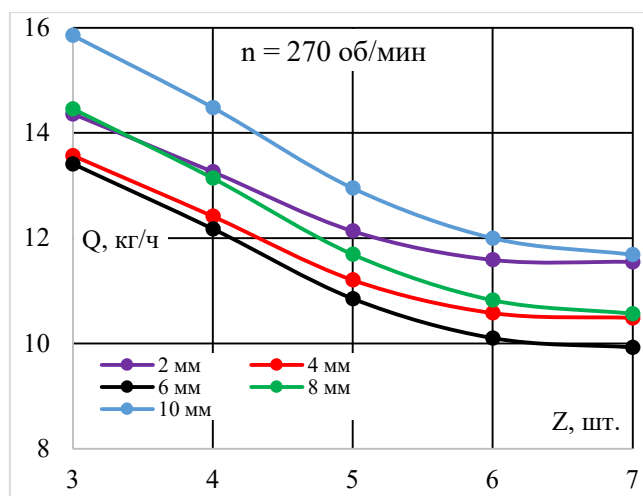
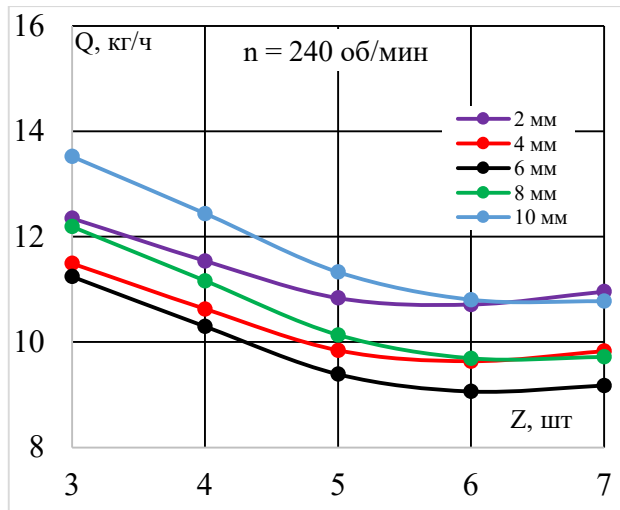
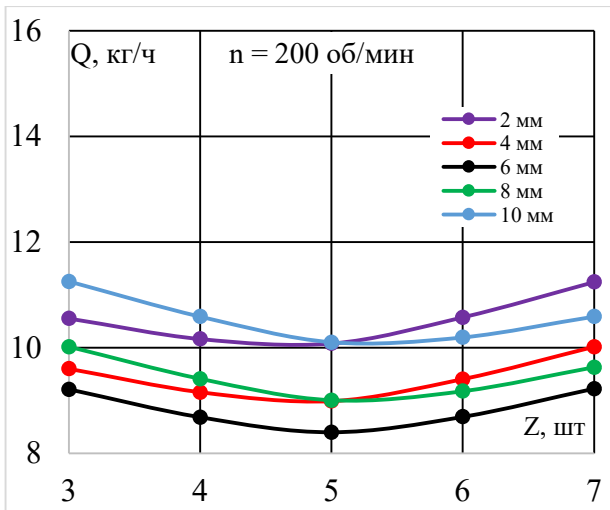
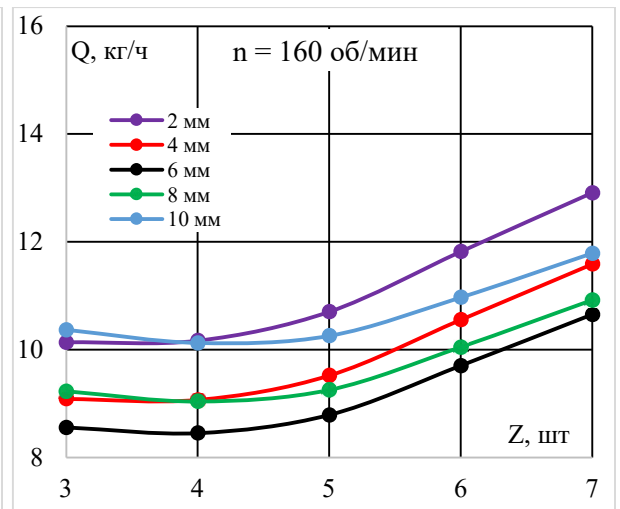
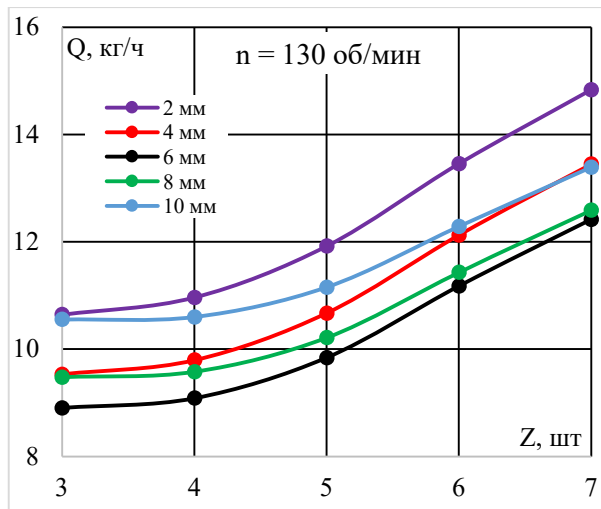




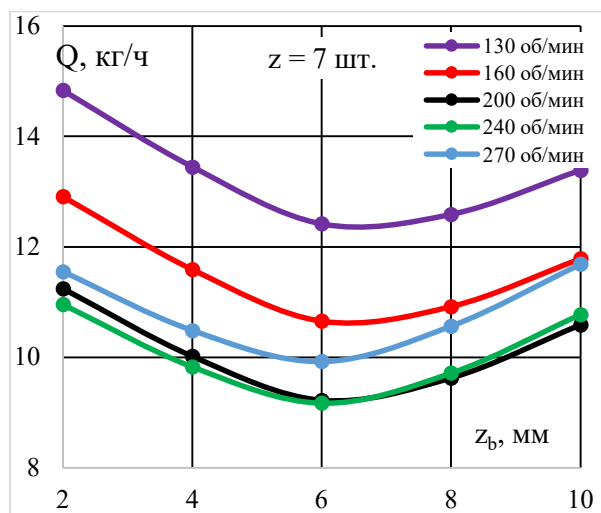
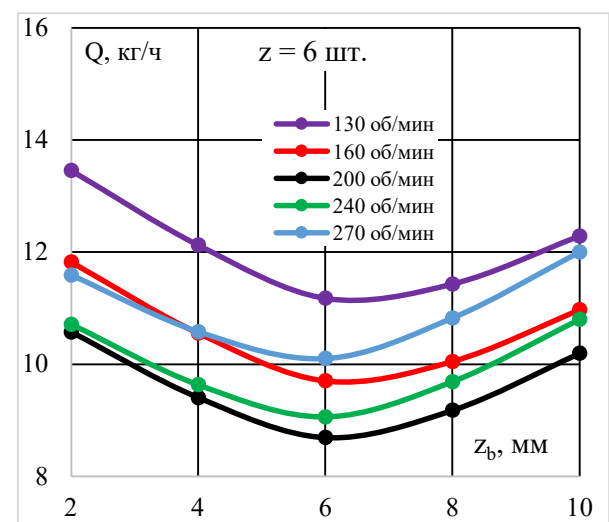
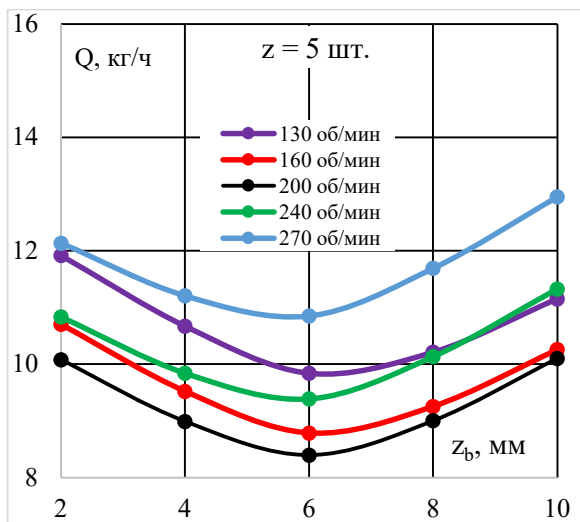
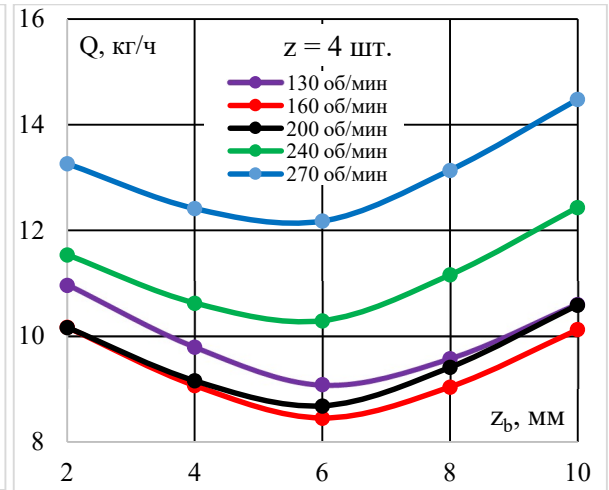
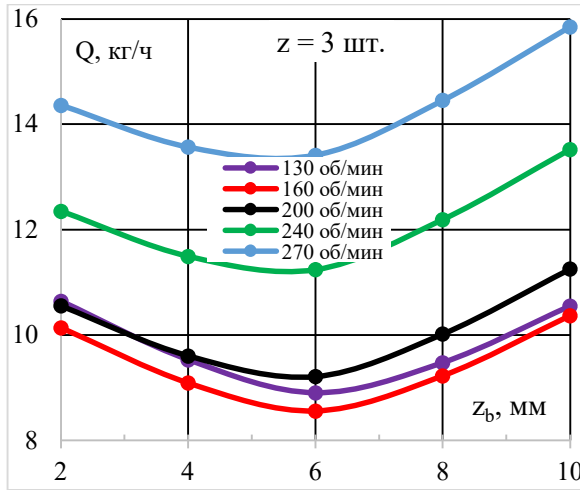
Графики, показывающие зависимость производительности  $Q$  от частоты вращения ротора  $n$  при фиксированном значении толщины регулировочного ножа  $z_b$



Графики, показывающие зависимость производительности  $Q$  от количества режущих ножей  $z$  при фиксированном значении частоты вращения ротора  $n$

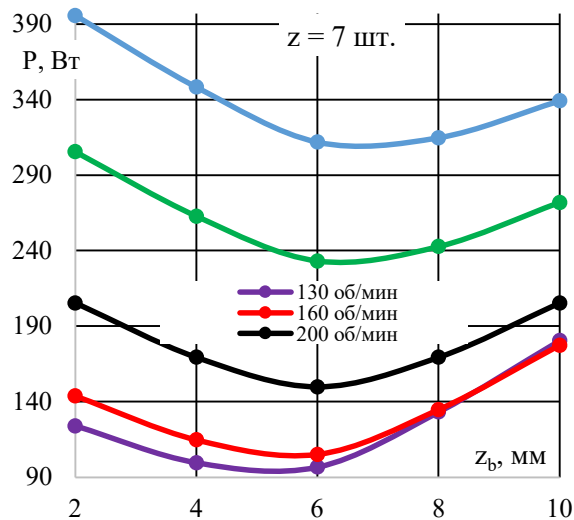
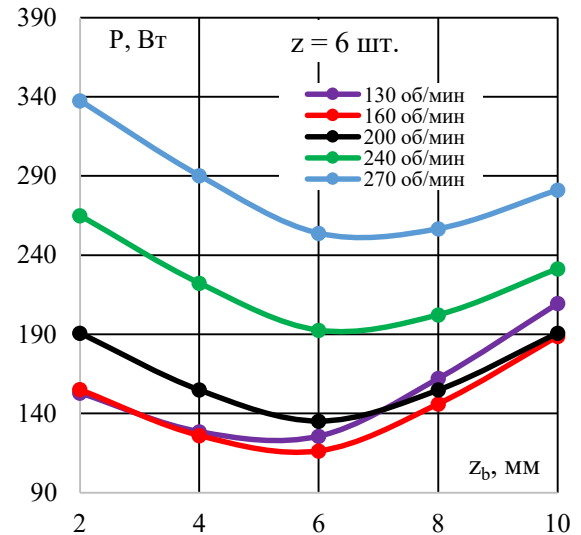
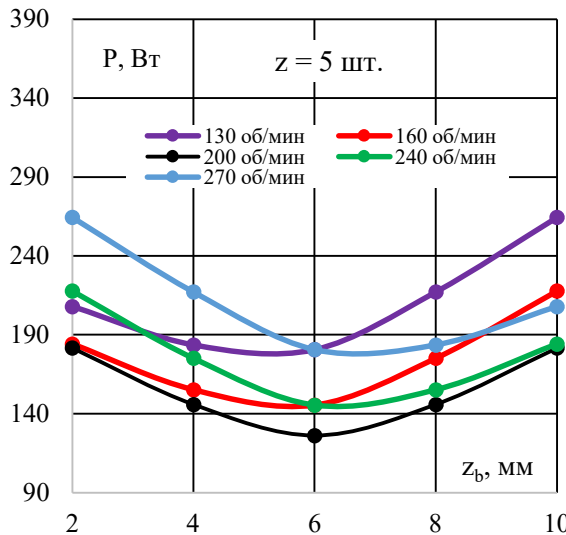
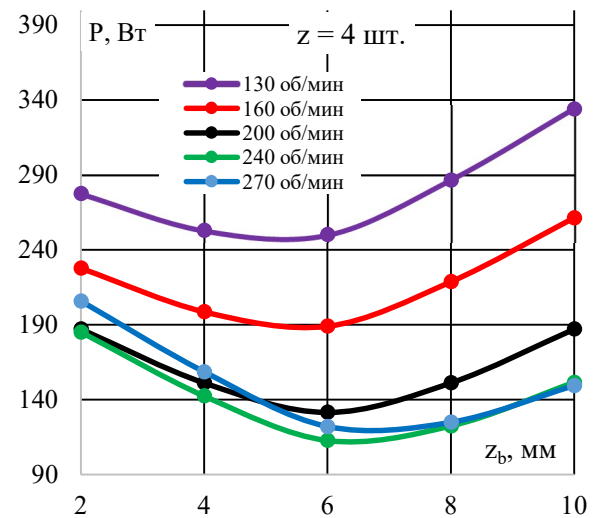
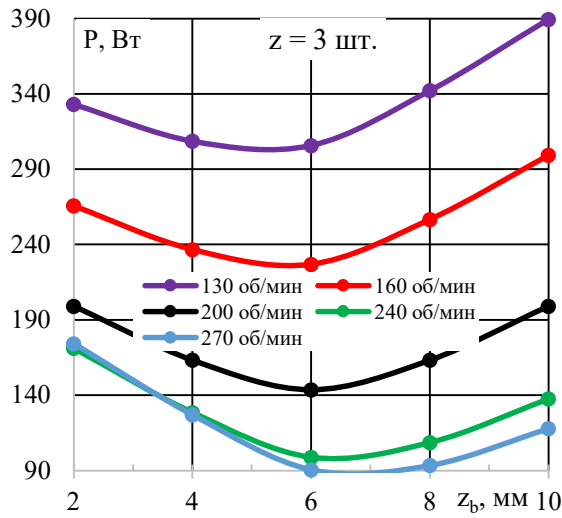


Графики, показывающие зависимость производительности  $Q$  от толщины регулировочного ножа  $z_b$  при фиксированном количестве режущих ножей  $z$

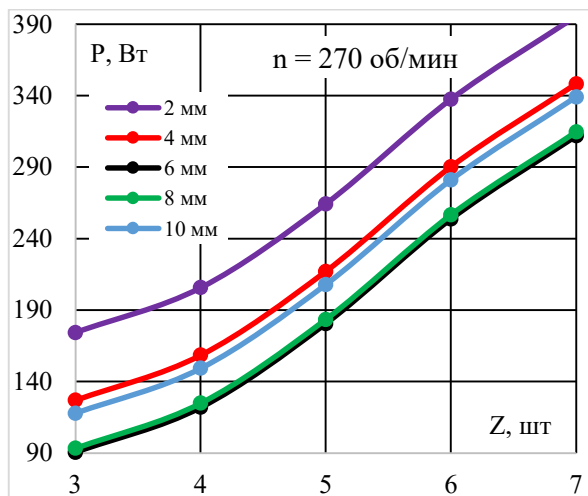
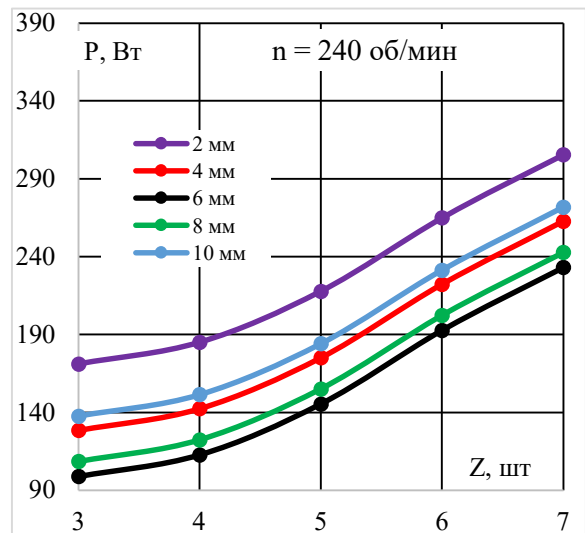
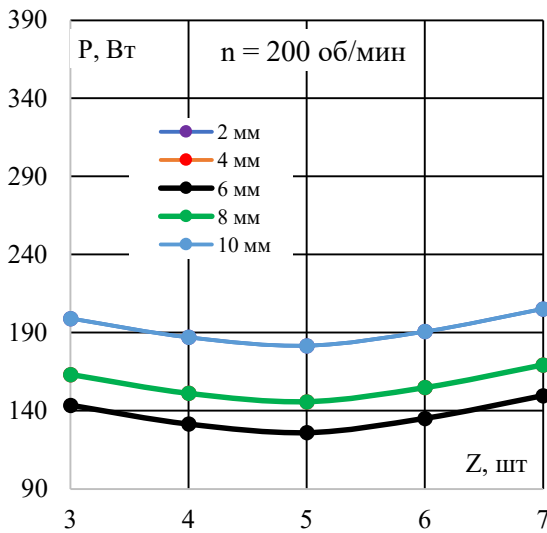
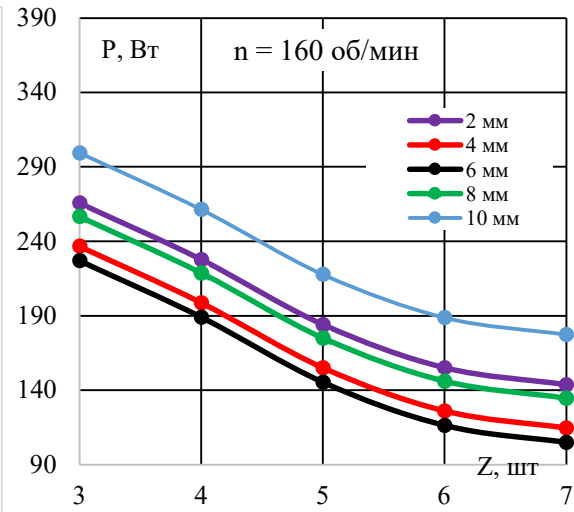
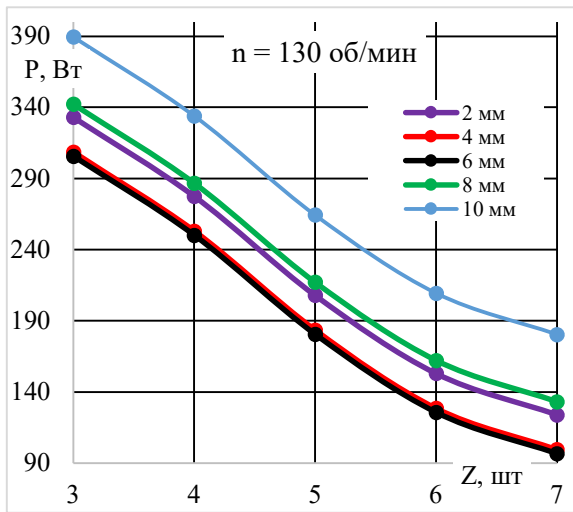




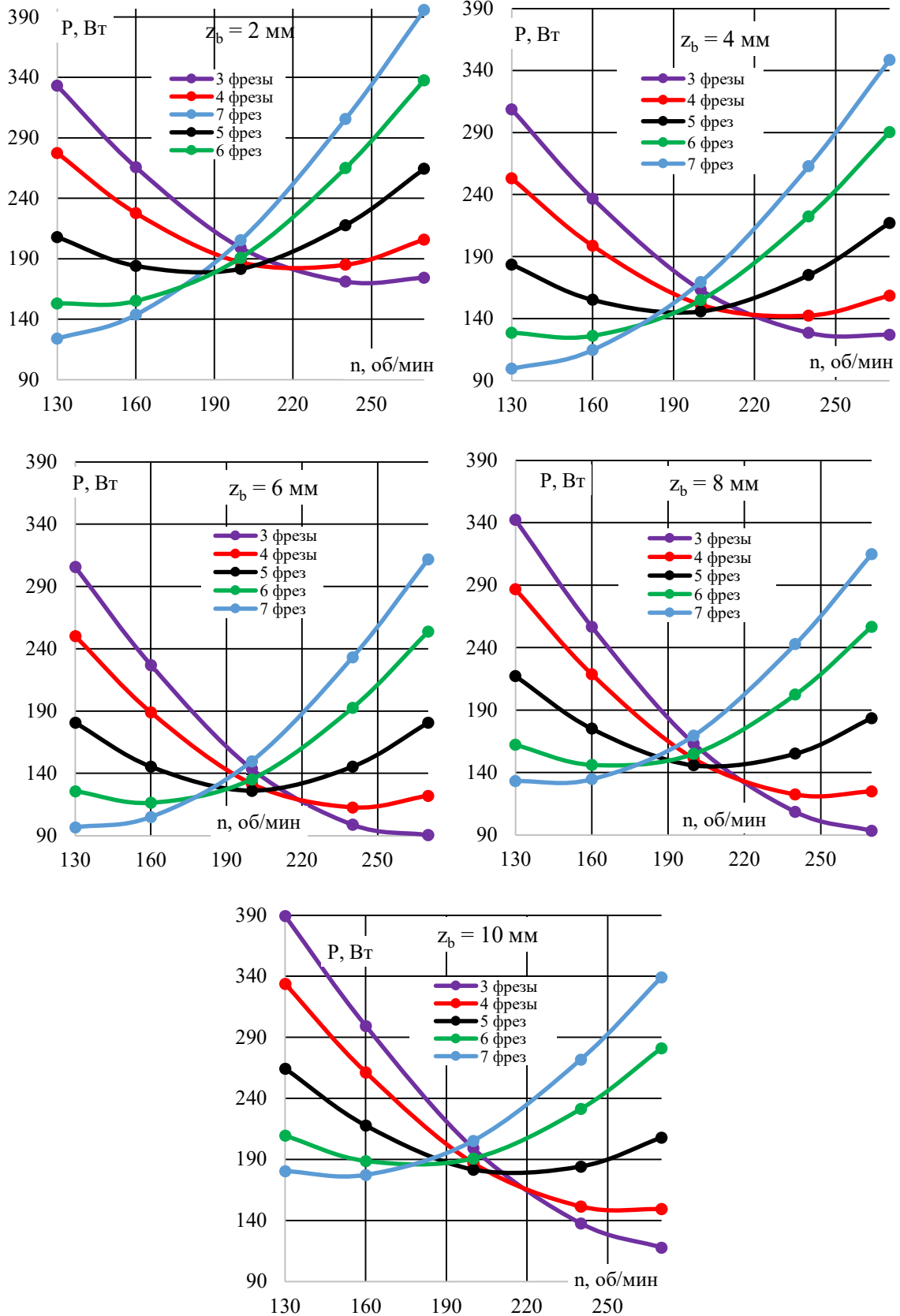
Графики, показывающие зависимость мощности, затрачиваемой на измельчение  $P_{изм}$ , от толщины регулировочного ножа  $z_b$  при фиксированном количестве режущих фрез  $z$



Графики, показывающие зависимость мощности, затрачиваемой на измельчение  $P_{изм}$ , от количества режущих фрез  $Z$  при фиксированном значении частоты вращения привода ротора  $n$



Графики, показывающие зависимость мощности, затрачиваемой на измельчение  $P_{изм}$ , от частоты вращения ротора  $n$  при фиксированном значении толщины регулировочного ножа  $z_b$



## Акт внедрения на предприятии ОАО «Машиностроитель»

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор  
ОАО «Машиностроитель»  
Ирина Григорьевна Чмулева

«01» сентября 2025 года



### АКТ

внедрения измельчителя вертикального типа с целью модернизации технологического комплекса для получения резиновой крошки «Организация участка самостоятельного производства резиновой крошки»

Настоящий акт составлен в том, что на предприятии ОАО «Машиностроитель» в период с 15.09.2025г по 23.09.2025г была успешно проведена работа по внедрению вертикального измельчителя для организации собственного производства резиновой крошки.

#### 1. Основание для внедрения:

Приказ по ОАО «Машиностроитель» от 01.09.2025 № 45-П/2025 «О модернизации технологической линии с целью снижения себестоимости продукции».

#### 2. Цель внедрения:

Внедрение вертикального измельчителя в имеющуюся технологическую линию с целью самостоятельного производства резиновой крошки для внутренних нужд, полное замещение внешних закупок, снижение производственных издержек и получение дополнительного экономического эффекта.

#### 3. Внедренное оборудование и изменения:

В существующую технологическую линию внедрен вертикальный измельчитель с производительностью 25 кг/час. Оборудование смонтировано, встроено в линию и прошло пуско-наладочные работы. Обеспечен выпуск продукции, соответствующей требуемым техническим параметрам.

#### 4. Результаты внедрения и достигнутые технико-экономические показатели:

##### 1. Предмет внедрения

Вертикальный измельчитель, предназначенный для финишного измельчения резиновых чипсов (размер 10-25 мм) в резиновую крошку фракций 1–3 мм. Оборудование интегрировано в существующую технологическую линию после промышленного шредера «DB-500».

## 2. Технические характеристики внедренного оборудования

В ходе приемки установлены следующие фактические параметры оборудования:

- Габаритные размеры (ДхШхВ): 620 x 310 x 750 мм.
- Масса оборудования: 83 кг.
- Частота вращения ротора: от 130 до 270 мин<sup>-1</sup>.
- Количество ножей ротора: от 3 до 7 шт. (регулируется).
- Мощность электродвигателя (потребляемая): 3,2 кВт.
- Производительность: 25 кг/час.

## 3. Результаты внедрения и экономическая эффективность

В результате запуска оборудования в эксплуатацию были достигнуты следующие производственно-экономические показатели:

Производственная мощность: Обеспечено производство резиновой крошки в объеме 16 тонн в год, что полностью покрывает потребности предприятия в качественном сырье для выпуска виброизолирующих матов, напольных покрытий и технических прокладок.

Режим работы: Оборудование загружено на 640 часов в год (при односменной работе), что составляет часть от возможного фонда рабочего времени.

Экономический эффект:

Фактическая годовая экономия на закупке крошки (исходя из цены 38 руб/кг) составляет 608 000 (Шестьсот восемь тысяч) рублей.

Эксплуатационные затраты (электроэнергия, техобслуживание) составляют 68 448 (Шестьдесят восемь тысяч четыреста сорок восемь) рублей в год.

Чистая экономия предприятия в год: 539 552 (Пятьсот тридцать девять тысяч пятьсот пятьдесят два) рубля.

## Технико-экономические показатели

Экономический эффект	Единица измерения	Значение
Единовременные капитальные вложения	руб.	350 000
Эксплуатационные расходы в год:	руб/год	68 448
в т.ч. электроэнергия	руб/год	8 448
в т.ч. техническое обслуживание и запчасти	руб/год	60 000
Прямая экономия на закупках	руб/год	608 000
Чистая экономия в год	руб/год	539 552
Расчетный срок окупаемости	мес.	~7,8
Годовой экономический эффект (после окупаемости)	руб./год	539 552

**5. Заключение:**

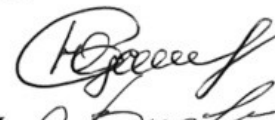
Внедрение вертикального измельчителя в технологический процесс ОАО «Машиностроитель» выполнено в соответствии с проектом. Оборудование работает в штатном режиме, обеспечивая заданную производительность и качество конечного продукта (резиновая крошка). Полученный экономический эффект в виде чистой экономии (~540 тыс. руб./год) позволяет рекомендовать данное конструктивное решение к дальнейшему использованию.

От ОАО «Машиностроитель»

Чмулева И.Г.


От ФГБОУ ВО БГТУ  
им. В. Г. Шухова

Лозовая С.Ю.



Кравченко В.М.



**Акт об использовании результатов диссертационной работы  
в учебном процессе**

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор

БГТУ им. В.Г. Шухова

д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_  
Е.И. Евтушенко



«20» января 2020г.

**АКТ**

об использовании результатов диссертационной работы Кравченко  
Владимира Михайловича в учебном процессе БГТУ им. В. Г. Шухова

**Комиссия в составе:**

Сергей Игоревич Анциферов – заведующий кафедрой механического оборудования, к.т.н., доцент – председатель комиссии,

Юрий Михайлович Фадин – к.т.н., профессор кафедры механического оборудования – член комиссии,

Дмитрий Владимирович Карпачев – к.т.н., доцент кафедры механического оборудования – член комиссии

составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Кравченко В.М. «Совершенствование измельчителя вертикального типа для переработки в крошку резинотехнических отходов» используются в учебном процессе кафедры «Механическое оборудование» ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке студентов по направлениям 15.03.02 – «Технологические машины и комплексы предприятий строительных материалов», 15.04.02 – «Технологические машины и оборудование» и 15.05.01 – «Проектирование технологических машин и комплексов».

Председатель комиссии:

Анциферов С.И. \_\_\_\_\_

Члены комиссии:

Фадин Ю.М. \_\_\_\_\_

Карпачев Д.В. \_\_\_\_\_