

На правах рукописи

КРАВЧЕНКО ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА
ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ В КРОШКУ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель: **Лозовая Светлана Юрьевна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механического оборудования БГТУ им. В.Г. Шухова

Официальные оппоненты: **Сиваченко Леонид Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортных и технологических машин МОУ ВО «Белорусско-Российский университет»
Качаев Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, заведующий отделом эксплуатации гидромелиоративных систем и гидротехнических сооружений ФГБНУ «ВНИИ систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донбасский государственный технический университет»

Защита состоится «01» июля 2026 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.276.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 242 ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова» и на сайте (URL: https://gos_att.bstu.ru/dis/Kravchenko)

Автореферат размещен на сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

И.А. Семикопенко
канд. техн. наук, доц.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В условиях глобального экологического кризиса проблема утилизации резинотехнических отходов (РТО) приобретает особую значимость для РФ. Отрицательной особенностью РТО является их исключительная устойчивость к биологическому разложению, что превращает их в долговременный источник загрязнения. С 1 января 2019 года в РФ запрещено принимать на захоронение все виды РТО, поэтому проблема их переработки приобретает особую актуальность.

Современные методы переработки позволяют трансформировать отходы в продукт для вторичного использования. Перспективным направлением является механическая переработка с целью получения крошки для использования в строительной, горнорудной, дорожной, химической и других отраслях промышленности. На основании анализа проведенных исследований установлено, что для вторичного использования целесообразно получать крошку размером частиц 1-3 и 3-5 мм. Однако при получении указанного фракционного состава образуются и частицы размером менее 1 мм, процентное содержание которых не должно превышать 15 %. Крошка 3-5 мм используется в качестве травмобезопасных покрытий (резиновая плитка, рулонное покрытие), резиновых ковриков, наполнителя боксерских мешков, мульчи, демпфирующего слоя под искусственным покрытием (искусственный газон, покрытие под теннисный корт). Крошка 1-3 мм получила более широкое распространение: в строительстве (кровельные покрытия, тротуарная плитка, шумоизоляция), в спортивной индустрии (обустройство спортивных объектов, добавки в асфальт для велодорожек), в дорожном строительстве (резиновые бордюры, шумопоглощающие барьеры), в производстве напольных покрытий (ковровые покрытия, противоскользкие покрытия).

Механический способ измельчения РТО чаще реализуется в шредерах, валковых дробилках, роторных и шнековых измельчителях. Общими недостатками данного оборудования являются горизонтальная компоновка, при которой материал контактирует только с 2-3 элементами режущего инструмента (что увеличивает стадийность технологической линии), а также повышение содержания некондиционной фракции (крошки более 5 мм и менее 1 мм), достигающее 25 % в готовом продукте, что свидетельствует о необеспечении необходимого качества измельчения. Таким образом, создание измельчительного оборудования, обеспечивающего выход крошки 1-3 мм более 70 % при содержании частиц менее 1 мм не более 10-12 %, является актуальной задачей. Данные условия можно реализовать в измельчителе, имеющем вертикальный ротор с режущими и регулировочными ножами и переменным количеством зубьев, разделенных шайбами, которые увеличивают рабочую зону. Количество режущих ножей обеспечивает необходимое число стадий измельчения, а количество зубьев и толщина регулировочного ножа увеличивают контакты с материалом.

Степень разработанности темы исследования. В ходе выполнения диссертационной работы использовались научные труды отечественных и зарубежных ученых, в работах которых отражены проблематика и вопросы совер-

шенствования 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 в настоящее время еще недостаточно проработан вопрос стадийного измельчения и повышения качества готового продукта в измельчительном оборудовании.

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.

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 варьлируемых 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 резино-технических отходов, подтвержденную патентом РФ на полезную модель.

Степень достоверности 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 результатов 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. (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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, степень разработанности, объект, предмет, цель, задачи исследования, соответствие паспорту специальности, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация результатов и публикации.

В первой главе выполнен аналитический обзор существующих способов и технических средств переработки резинотехнических отходов. Рассмотрены физико-механические характеристики исходного сырья, установлено, что на процесс измельчения основное влияние оказывают твердость и эластичность материала. Проанализированы виды получаемой крошки и области ее применения, выявлено, что наиболее востребованной является фракция 1–3 мм.

Выполнен сравнительный анализ методов переработки РТО. Установлено, что механический способ имеет наибольшее распространение. При этом существующее оборудование характеризуется ограниченной стадийностью разрушения и высоким содержанием некондиционных фракций до 25 % (крошки более 5 мм и менее 1 мм). Проведен анализ математических моделей процесса измельчения, учитывающих показатели производительности, энергоемкости и физико-механические свойства перерабатываемого материала. Определена цель научных исследований и поставлены задачи для достижения этой цели.

Во второй главе установлено, что для переработки резинотехнических отходов необходимо изучить 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. Необходимо рассмотреть именно процесс получения крошки, а не стружкообразование.

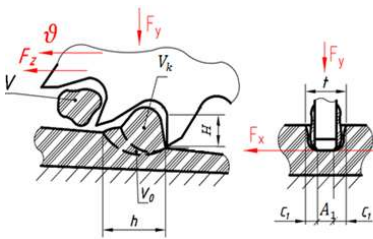


Рисунок 1. Схема к описанию разрушения резинового массива

Для представления описания энергетических параметров вторичной переработки резинотехнических отходов было предположено, что при внедрении зуба ножа в резиновый образец максимальные напряжения концентрируются в объеме материала непосредственно над вершиной зуба, интенсивность напряжений возрастает по мере увеличения глубины резания. Растягивающие напряжения, действующие вдоль поверхности образца и боков зуба, достигают наибольших значений вблизи режущей кромки (рисунок 1).

Используя термодинамический подход, определена величина работы, затрачиваемая на увеличение объема резины и накопленной энергии упругости деформации в объеме резины от ее физико-механических свойств:

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

где β – коэффициент (параметр) объемного расширения при введении в рассматриваемый объем резины энергии dW , Дж¹; V_0 – объем зоны уплотнения материала перед зубом, м³; W – энергия, вводимая зубом ножа в массив резины, Дж; E – модуль Юнга, МПа; σ – напряжение, возникающее в зоне уплотнения, МПа; ν – коэффициент Пуассона, $\nu = 0,46-0,5$.

Первое значение в выражении (1) 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, а первое слагаемое описывает «чистое» резание без дополнительных эффектов. Второе значение характеризует энергию упругой деформации, которая накапливается в объеме резины перед фронтом резания. Так при $\nu<0,5$ накопленная энергия приводит к отрыву частицы от массива резины, а не к отрезу, что влияет на конечную форму отделяемой частицы.

Теоретически получено выражение для определения работы, затрачиваемой на разрушение исходного массива резины в зависимости от геометрических и энергосиловых параметров измельчителя вертикального типа:

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

где k – коэффициент, учитывающий форму отрезаемого объема, $k_{\sigma} = \frac{\pi}{6}$, $k_{\alpha} = 1$; Δl – путь пройденный зубом ножа, м; α – угол между зубьями ножа, рад; A_1 – толщина ножа, м; σ_p – предел прочности резины на растяжение, МПа; V_k – объем, отрезаемый зубом ножа в зависимости от формы частицы, м³; S – площадь контакта зуба ножа с массивом резины, м²; R – радиус ножа, м; H – высота зуба ножа, м; W_0 – величина энергии для отделения куска резины объемом V_k , Дж.

Максимальная мощность, затрачиваемая на измельчение массива резины в общем виде:

$$P_{max} = \frac{\beta^2 \cdot V_0 \cdot W^2 \cdot E \cdot n}{6(1-2\nu)}, \quad (3)$$

где n – частота вращения ротора, с⁻¹.

Анализ значений расчетной максимальной мощности P_{max} , затрачиваемой на процесс разрушения резинового образца (рисунок 2), показал, что как с повышением частоты вращения n с 2,2 с⁻¹ (130 об/мин) до 4,5 с⁻¹ (270 об/мин), так и с увеличением объема отделяемой частицы V_k с $5,2 \cdot 10^{-10}$ м³ (частица 1 мм) до $6,5 \cdot 10^{-8}$ м³ (частица 5 мм) максимальная мощность P_{max} , затрачиваемая на получение крошки размером 1–5 мм, возрастает. Так, при минимальной частоте вращения $n=2,2$ с⁻¹ мощность P_{max} , затрачиваемая на получение крошки, возрастает с 30 до 60 Вт, а при максимальной частоте $n=4,5$ с⁻¹ она возрастает со 130 до 300 Вт.

Математически получено выражение, описывающее изменение производительности (массовой) при прохождении материала через рабочую зону с учетом изменения компоновки ротора. Увеличение количества ножей ведет к более

интенсивному и тонкому измельчению материала, за счет чего возрастает его насыпная плотность и, как следствие, повышается массовая производительность:

$$Q(z_h) = \pi(r_k^2 - r_1^2) \left(\gamma_0 + \frac{\gamma_k - \gamma_0}{h} \cdot z_h \right) n_\Omega \cdot h_w, \quad (4)$$

где h – высота статора вертикального измельчителя, м; γ_0 – насыпная плотность загрузки, кг/м^3 ; γ_k – конечная насыпная плотность в зоне выгрузки, кг/м^3 ; z_h – расстояние от верхней точки загрузки до рассматриваемого поперечного сечения, м; r_1 – радиус верхнего ряда режущих ножей, м; r_k – радиус последнего нижнего ряда режущих ножей, м; n_Ω – частота вращения шнекового питателя, с^{-1} ; h_w – шаг шнека, м.

Для согласованной работы шнекового питателя с пропускной способностью вертикального измельчителя необходимо, чтобы шнековый питатель подавал материал в количестве, не превышающем пропускную способность измельчителя. Указанные условия определяются выражением:

$$v_\Omega = n_\Omega \cdot h_w, \quad (5)$$

где v_Ω – скорость подачи материала шнековым питателем, м/с.

Получено выражение (6), описывающее изменение производительности при прохождении материала через рабочую область измельчителя. При разных конструктивно-технологических параметрах насыпная плотность загрузки γ_0 изменяется до конечной насыпной плотности γ_k , которая зависит от толщины регулировочного ножа z_b .

Так, при минимальной толщине регулировочного ножа $z_b = 2$ мм, конечная насыпная плотность γ_k будет равна 400 кг/м^3 . При этом преобладают частицы кубовидной формы размером 3 мм. При увеличении толщины регулировочного ножа до $z_b = 10$ мм, конечная насыпная плотность γ_k достигает 490 кг/м^3 . Наблюдается преобладание частиц рваной формы размером 1 мм.

На основании (4) получено значение итоговой производительности измельчителя:

$$Q(h) = \pi(r_k^2 - r_1^2) \cdot \gamma_k \cdot n_\Omega \cdot h_w. \quad (6)$$

Максимальная производительность $Q=26,5 \text{ кг/ч}$ достигается при частоте вращения шнекового питателя $n_\Omega=4,5 \text{ с}^{-1}$ и насыпной плотности материала в зоне измельчения $\gamma_k = 490 \text{ кг/м}^3$ (рисунок 3).

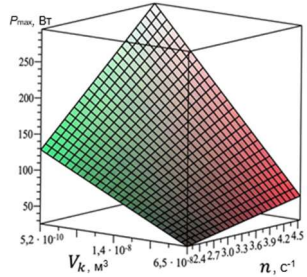


Рисунок 2. Максимальная мощность P_{max} , затрачиваемая на разрушение резинового образца, от частоты вращения ротора n и необходимого объема частиц V_k (1, 3 и 5 мм)

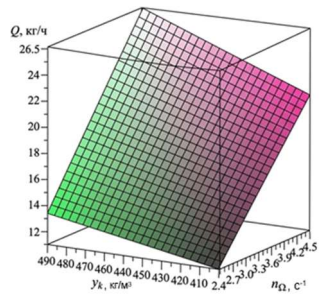


Рисунок 3. Зависимость производительности Q , от насыпной плотности материала в зоне измельчения γ_k и частоты вращения шнекового питателя n_Ω

В третьей главе представлена разработанная конструкция вертикального измельчителя (рисунок 4), защищенная патентом РФ на полезную модель. Также в рамках выполнения диссертационной работы были дополнительно получены два патента на полезную модель, которые отражают отдельные технические решения конструкции вертикального измельчителя.

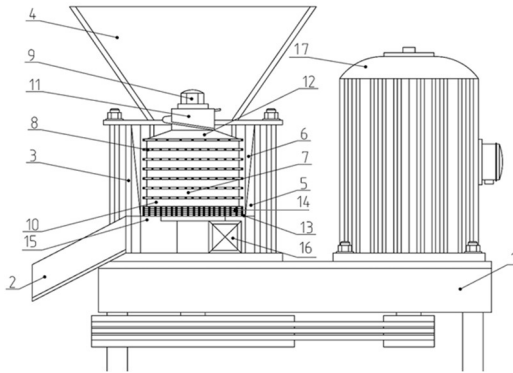


Рисунок 4. Схема вертикального измельчителя для переработки резинотехнических отходов:

- 1 – рама; 2 – выгрузочный желоб; 3 – корпус; 4 – загрузочный бункер; 5 – статор; 6 – противорежущие ребра; 7 – ротор; 8 – режущий нож; 9 – вертикальный вал; 10 – шайба; 11 – шнековый питатель; 12 – конусная втулка; 13 – варьлируемый зазор (между ротором и статором); 14 – регулировочный нож; 15 – зона выгрузки; 16 – вращающаяся лопасть; 17 – электродвигатель

Устройство работает следующим образом. В загрузочный бункер 4, расположенный над цилиндрическим корпусом 3, подается материал, например, резиновые чипсы размером $25 \times 25 \times 5$ мм. Чипсы шнековым питателем 11 через конусную втулку 12 равномерно подаются в рабочую зону измельчения между ротором 7 и статором 5. Равномерная подача устраняет застойные зоны и повышает производительность. Измельчение происходит стадийно между статором 5 и ротором 7. Материал задерживается противорежущими ребрами 6 в клиновидных пазах статора 5, а выступающие части срезаются режущими кромками ножей 8, размещенных между шайбами 10 на вертикальном валу 9. Количество ножей обеспечивает стадийность измельчения от 3 до 7. Постепенно измельчаясь, материал перемещается вниз по клиновидным пазам статора 5 между противорежущими ребрами 6. Готовый продукт заданной фракции через варьлируемый зазор 13 между статором 5 и регулировочным ножом 14 поступает в зону выгрузки 15. Вращающаяся лопасть 16 ускоряет вывод продукта, что также повышает производительность измельчителя. Далее готовый продукт попадает в выгрузочный желоб 2, закрепленный на раме 1. Ротор 7 приводится во вращение с помощью клиноременной передачи от электродвигателя 17.

Разработан алгоритм исследования процесса переработки резинотехнических отходов в измельчителе вертикального типа (рисунок 5), обеспечивающий структурированный подход к изучению ключевых параметров. На его основе

создана и изготовлена лабораторная установка, позволяющая проводить весь комплекс запланированных экспериментальных исследований.

Определен перечень контрольно-измерительного оборудования для фиксации рабочих параметров, установлены технические требования к режущим и регулировочным ножам ротора, влияющих на эффективность измельчения. Представлена методика пробоотбора и гранулометрического анализа резиновой крошки, позволяющая получить объективные и достоверные экспериментальные данные.

Анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния вертикального ротора методом конечных элементов показал, что условия прочности и деформативности соблюдаются: максимальные напряжения по Мизесу (на шпонке под шкив) составляют $5,74 \text{ МПа}$ при 130 мин^{-1} и $2,87 \text{ МПа}$ при 270 мин^{-1} , максимальные линейные перемещения (на зубьях ножей) – 10^{-3} мм и $5 \cdot 10^{-4} \text{ мм}$.



Рисунок 5. Измельчитель вертикального типа для переработки резинотехнических отходов

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса измельчения резинотехнических отходов в измельчителе вертикального типа на натурной модели. Подтверждена адекватность теоретических исследований и положений, а также целесообразность использования многоступенчатой компоновки режущих ножей. Это обеспечивает стадийность измельчения и позволяет получать однородную крошку размером 1-3 мм на выходе более чем 70 % при минимальном количестве брака менее 11 %.

Для более углубленного изучения процесса измельчения материала в разработанном агрегате был использован полнофакторный эксперимент (ПФЭ), на основе которого в дальнейшем построен центральный композиционный ротативный план (ЦКРП) для трех факторов (2^3). Определены функции отклика: $K\%$ (процентное содержание крошки 1-3 мм, %), $B\%$ (процентное содержание крошки менее 1 мм, %), Q (производительность измельчителя, кг/ч), $P_{изм}$ (мощность, затрачиваемая на измельчение, Вт). Установлены варьируемые факторы, влияющие на процесс изменения функций отклика. В качестве основных факторов выбраны: n – частота вращения ротора, об/мин; z – количество режущих ножей, шт; z_b – толщина регулировочного ножа, мм.

После обработки результатов экспериментальных исследований получены уравнения регрессии в кодированном виде, которые были переведены в натуральную форму и характеризуют зависимость функций отклика от варьируемых факторов:

$$K\% = 7 + 6,94z - 0,06n + 5,5z_b + 0,003zn - 0,32zz_b - 0,005nz_b - 0,13z^2 + 0,0003n^2 - 0,03z_b^2. \quad (7)$$

$$B_{\%} = -1,45 + 0,06z + 0,044n - 0,00325zn + 0,065zz_b + 0,001625nz_b + 0,1z^2 - 0,0000625n^2 - 0,025z_b^2. \quad (8)$$

$$Q = 21,8 + 0,46z - 0,1n - 1,8z_b - 0,02zn - 0,06zz_b + 0,002nz_b + 0,3z^2 + 0,0004n^2 + 0,15z_b^2. \quad (9)$$

$$P_{изм} = 1057 - 556z + 1,6n + 146z_b + 1,9zn + 4,2zz_b - 0,3nz_b + 14,6z^2 - 0,024n^2 - 9,8z_b^2. \quad (10)$$

В результате анализа полученных уравнений после оценки значимости каждого фактора построен ряд графических зависимостей, отражающих влияние каждого из факторов при фиксировании и варьировании их поочередно, на основании чего выбраны наиболее рациональные режимы работы измельчителя (рисунок 6–9).

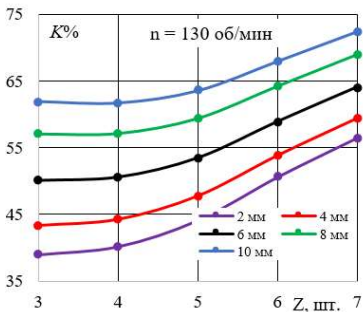


Рисунок 6. Графические зависимости процентного содержания крошки 1-3 мм $K\%$ от количества режущих ножей z при фиксированном значении частоты вращения ротора n

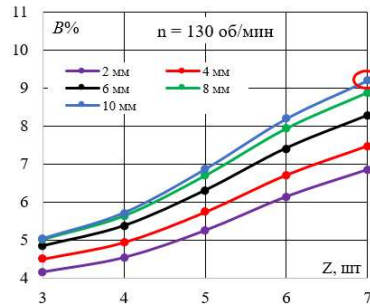


Рисунок 7. Графические зависимости процентного содержания крошки менее 1 мм $B\%$ от количества режущих ножей z при фиксированном значении частоты вращения ротора n

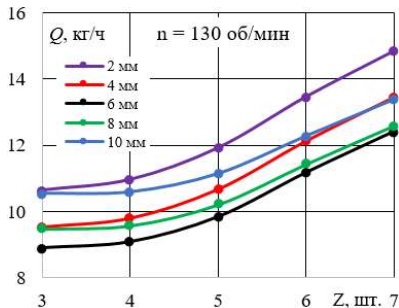


Рисунок 8. Графические зависимости производительности Q от количества режущих ножей z при фиксированном значении частоты вращения ротора n

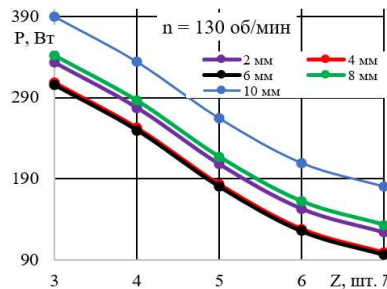


Рисунок 9. Графические зависимости мощности, затрачиваемой на измельчение $P_{изм}$ от количества режущих ножей z при фиксированном значении частоты вращения ротора n

Проведенный анализ графических зависимостей показывает, что максимальное значение содержания фракции 1–3 мм в готовом продукте достигает $K\% = 73\%$ при частоте вращения ротора $n = 130 \text{ мин}^{-1}$. При этом преобладают частицы размером 1 мм рваной формы. Частицы размером 3–5 мм присутствуют в готовом продукте в количестве 17,8 % и имеют преимущественно кубовидную форму. Содержание частиц менее 1 мм составляет $B\% = 9,2\%$. Указанные показатели получены при использовании семи ножей $z = 7$ с толщиной регулировочного ножа $z_b = 10 \text{ мм}$. Установлено, что производительность, равная $Q = 13,5 \text{ кг/ч}$, достигается при мощности, затрачиваемой на измельчение $P_{\text{изм}} = 180 \text{ Вт}$, и удельном расходе энергии $q_{\text{изм}} = 13,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$.

В пятой главе представлены результаты опытно промышленных испытаний измельчителя вертикального типа производительностью 25 кг/ч. Полученные результаты отражены в акте опытно промышленных испытаний ОАО «Машиностроитель» (с. Ливенка, Белгородская обл.). Принято решение о проектировании и интеграции измельчителя в существующий участок для переработки резинотехнических отходов. Проектная производительность предусматривает производство резиновой крошки в объеме 16 т/год. 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 с⁻¹ и насыпной плотности в зоне измельчения 490 кг/м³. 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 с⁻¹ до 4,5 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 $5,2 \cdot 10^{-10}$ м³ (1 мм) до $6,5 \cdot 10^{-8}$ м³ (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 $n = 130$ мин⁻¹ максимальные напряжения по Мизесу составляют $\sigma = 5,74$ МПа, максимальные линейные перемещения $\delta = 10^{-3}$ 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 – 2³) 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, 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⁻¹. 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 из-

мельчение, $P_{\text{изм}} = 180$ 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В российских рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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.

2. **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.

3. Лозовая, С. Ю. Математическое описание процесса переработки резинотехнических изделий рабочим органом с изменяемой компоновкой ножей / С. Ю. Лозовая, В. П. Воронов, **В. М. Кравченко** // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 195–202.

В зарубежных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus:

4. 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.

В объектах интеллектуальной собственности

5. Пат. № 203639 РФ. Двухстадийный измельчитель / Лозовая С. Ю., **Кравченко В. М.**, Лозовой Н. М., Тулина А. В. // заявитель Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – заявл. 02.02.2021; опубл. 14.04.2021.

6. Пат. № 224979 РФ. Двухстадийный измельчитель для переработки техногенных отходов / **Кравченко В. М.**, Лозовая С. Ю., Солодков П. Г., Топчий Я. П. // заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – заявл. 06.02.2024; опубл. 10.04.2024.

7. Пат. № 237123 РФ. Вертикальный измельчитель для переработки резинотехнических изделий / **Кравченко В. М.**, Лозовая С. Ю., Чмулев В. А. // заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – заявл. 29.05.2025; опубл. 11.09.2025.

Публикации в других изданиях

8. Лозовая, С. Ю. Область применения продуктов вторичной переработки резинотехнических изделий в строительстве / С. Ю. Лозовая, **В. М. Кравченко**, С. А. Сацки // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвузовский сборник статей. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2019. – Вып. XVIII. – С. 216–220.

9. 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 : межвузовский сборник статей. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2020. – Вып. XIX. – С. 139–142.

10. 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 : межвузовский сборник статей. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2020. – С. 143–146.

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 : межвузовский сборник статей. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2021. – Вып. XX. – С. 110–113.

12. 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 : межвузовский сборник статей. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2021. – Вып. XX. – С. 104–109.

13. **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 : межвузовский сборник статей. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2022. – С. 215–226.

14. **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 : межвузовский сборник статей. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 168–174.

15. 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.

16. **Кравченко, В. М.** Обзор режущих элементов для измельчения твердых бытовых отходов / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, М. С. Рысков // Машины, агрегаты и технологические процессы в строительной индустрии : сборник докладов IV Национальной конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 60–67.

17. **Кравченко, В. М.** Аналитический обзор для повышения эффективности измельчителей для переработки резинотехнических отходов / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, М. С. Рысков // Машины, агрегаты и технологические процессы в строительной индустрии : сборник докладов IV Национальной конференции. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 56–59.

18. **Кравченко, В. М.** Анализ переработки резинотехнических изделий с помощью ножевых измельчителей / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, Я. П. Топчий // Наукоемкие технологии и инновации : сборник докладов XXV Международной научно-практической конференции "XXV научные чтения". – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 1145–1149.

19. 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.

20. 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. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2024. – С. 153–157.

КРАВЧЕНКО ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ
ПЕРЕРАБОТКИ В КРОШКУ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 27.04.2026.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ № 57.

Отпечатано в Белгородском государственном
технологическом университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46