

ОТЗЫВ

**Официального оппонента на диссертационную работу
Кравченко Владимира Михайловича
«Совершенствование измельчителя вертикального типа
для переработки в крошку резинотехнических отходов», представленной
на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 2.5.21 - «Машины, агрегаты и технологические процессы»**

Актуальность темы диссертационной работы Кравченко В.М. обусловлена прежде всего экологической и законодательной повесткой: с 2019 года в Российской Федерации запрещено захоронение резинотехнических отходов (РТО), которые обладают исключительной устойчивостью к биологическому разложению и представляют собой долговременный источник загрязнения окружающей среды. Существующие механические способы переработки РТО в резиновую крошку, реализуемые преимущественно в аппаратах с горизонтальной компоновкой, не обеспечивают требуемого качества готового продукта из-за ограниченной стадийности разрушения и высокого содержания некондиционной фракции (частиц менее 1 мм и более 5 мм), достигающего 25 %. При этом наибольшим спросом в строительной, дорожной и спортивной индустрии пользуется крошка фракции 1–3 мм, получение которой в объеме более 70 % при минимальном выходе частиц менее 1 мм (не более 10–12 %) остается нерешенной технологической задачей. Перспективным направлением решения данной проблемы является создание измельчителя вертикального типа с наборным ротором, режущими и регулировочными ножами, разделенными шайбами, что позволяет увеличить рабочую зону, обеспечить многостадийность измельчения и повысить количество контактов зубьев ножей с материалом. Несмотря на имеющиеся научные труды отечественных и зарубежных ученых в области переработки РТО, вопрос стадийного измельчения и повышения качества готового продукта проработан недостаточно, что и определяет необходимость проведения настоящих исследований. Дополнительным подтверждением актуальности служит выполнение работы в рамках государственного контракта и поддержка грантом программы «УМНИК», а также востребованность результатов на промышленных предприятиях по переработке вторичного сырья. Таким образом, диссертационная работа направлена на решение важной народно-хозяйственной задачи – создание эффективного оборудования для переработки резинотехнических отходов в качественную крошку заданного фракционного состава, что имеет как экологическое, так и экономическое значение.

Научная новизна научная и практическая значимость работы заключается в разработке математической модели процесса разрушения резинотехнических отходов при воздействии вертикального ротора, учитывающей физико-механические свойства материала и позволяющей переходить от режима резания к режиму отрыва частицы через коэффициент Пуассона, а также в получении аналитических выражений для энергетических

параметров и производительности измельчителя в зависимости от его конструктивно-технологических характеристик. Впервые получены уравнения регрессии, количественно описывающие влияние количества режущих ножей, частоты вращения ротора и толщины регулировочного ножа на выход целевой фракции 1–3 мм, содержание некондиции, производительность и мощность измельчения. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана и патентно защищена (три патента РФ) конструкция вертикального измельчителя с наборным ротором, обеспечивающая стадийность измельчения и увеличение рабочей зоны. Определены рациональные режимы работы устройства: частота вращения 130 мин^{-1} , семь режущих ножей, толщина регулировочного ножа 10 мм, позволяющие получать более 70 % крошки фракции 1–3 мм при содержании частиц менее 1 мм не более 9,2 % и производительности 13,5 кг/ч. Опытные-промышленные испытания на ОАО «Машиностроитель» подтвердили работоспособность измельчителя, экономический эффект от внедрения составил 540 000 руб/год при проектной производительности 16 т/год. Результаты работы также внедрены в образовательный процесс БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке инженерных кадров, что подтверждает высокую практическую ценность выполненного исследования.

Достоверность и новизна диссертационной работы исследований, выводов и рекомендаций базируется на использовании современных методов исследования в испытательных лабораториях. Воспроизводимости экспериментальных данных в пределах заданной точности измерений. В диссертации использовался комплексный метод исследований, включающий математическое и физическое моделирование, а также корректное применение пакетов прикладных программ для моделирования и прочностных расчетов деталей и сборочных единиц измельчителя.

Обоснованность научных результатов диссертационной работы, степень достоверности полученных выводов и рекомендаций обеспечена правильностью постановки задач, грамотным использованием существенных научных положений, современным математическим аппаратом, обоснованным количеством проведенных экспериментальных исследований, которые подтверждают теоретические результаты разработанные автором диссертации.

Теоретическая значимость полученных результатов диссертационной работы заключается в развитии научных основ процесса измельчения резинотехнических отходов: разработана математическая модель деформации и разрушения резины при воздействии вертикального ротора, учитывающая физико-механические свойства материала и геометрию режущих элементов. Получены аналитические выражения для определения энергетических параметров (работы, мощности) и производительности измельчителя в зависимости от его конструктивно-технологических характеристик. Установленные теоретические закономерности позволяют прогнозировать

выход целевой фракции и энергозатраты на стадии проектирования оборудования, что создает научную основу для создания эффективных измельчителей не только резины, но и других вязкоупругих материалов.

Практическая значимость работы диссертационной работы заключается в создании патентно защищенной конструкции вертикального измельчителя (три патента РФ), позволяющей получать более 70 % резиновой крошки фракции 1–3 мм с содержанием некондиционных частиц менее 1 мм не более 9,2 %. Определены рациональные режимы эксплуатации: частота вращения ротора 130 мин⁻¹, семь режущих ножей, толщина регулировочного ножа 10 мм, обеспечивающие производительность 13,5 кг/ч при удельных энергозатратах 13,3 кВт·ч/т. Опытно-промышленные испытания на ОАО «Машиностроитель» подтвердили работоспособность устройства, экономический эффект от внедрения составил 540 000 руб/год при проектной производительности 16 т/год. Кроме того, результаты работы внедрены в образовательный процесс БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке инженеров по направлениям технологических машин и оборудования.

Оценка содержания работы и ее завершенности

По материалам диссертационной работы опубликована 17 статей, в том числе 3 в рецензируемых изданиях, включённых в Перечень ВАК РФ, 1 в рецензируемых изданиях, включённых в Перечень Scopus, 13 статей в научных журналах, индексируемых в РИНЦ. Получено 3 патента РФ на полезную модель.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 146 наименования и 6 приложений. Каждая глава заканчивается сформулированными выводами, которые соотносятся с задачами проводимых исследований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, научная и практическая значимость работы, получена общая структура работы и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации выполнен аналитический обзор существующих способов и технических средств переработки резинотехнических отходов (РТО). Рассмотрены физико-механические характеристики исходного сырья, установлено, что на процесс измельчения основное влияние оказывают твердость и эластичность материала. Проанализированы виды получаемой резиновой 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, однако существующее оборудование характеризуется ограниченной стадийностью разрушения и высоким содержанием некондиционных фракций (до 25 %). Проведен анализ математических моделей процесса измельчения, на основании

чего определены цель научных исследований и сформулированы задачи для ее достижения.

Во второй главе автором обосновано, что для переработки резинотехнических отходов необходимо изучать процесс разрушения резины в крошку с точки зрения ее вторичного использования, а не как процесс резания с позиций механической обработки. Предложена схема взаимодействия зуба ножа с резиновым массивом, согласно которой максимальные напряжения концентрируются в объеме материала непосредственно над вершиной зуба и возрастают по мере увеличения глубины резания. С использованием термодинамического подхода получено аналитическое выражение для определения работы, затрачиваемой на увеличение объема резины и накопленной энергии упругости деформации, учитывающее физико-механические свойства материала. Теоретически выведено выражение для расчета работы разрушения исходного массива резины в зависимости от геометрических и энергосиловых параметров измельчителя вертикального типа, включающее предел прочности, объем отделяемой частицы, радиус ножа, высоту зуба и угол между зубьями. Получена формула для определения максимальной мощности, затрачиваемой на измельчение массива резины, которая зависит от частоты вращения ротора и физико-механических характеристик материала. Математически выведено выражение, описывающее изменение массовой производительности при прохождении материала через рабочую зону с учетом изменения компоновки ротора, насыпной плотности и параметров шнекового питателя. Кроме того, получено условие согласованной работы шнекового питателя с пропускной способностью измельчителя, а также выражение для итоговой производительности, анализ которого показал максимальное значение 26,5 кг/ч при определенных режимах.

В третьей главе показана разработанная конструкция вертикального измельчителя для переработки резинотехнических отходов, защищенная патентом РФ на полезную модель, а также два дополнительных патента, отражающих отдельные технические решения устройства. Описан принцип работы измельчителя: материал из загрузочного бункера шнековым питателем через конусную втулку равномерно подается в рабочую зону между ротором и статором, где происходит стадийное измельчение за счет режущих ножей, размещенных между шайбами на вертикальном валу. Разработан алгоритм исследования процесса переработки РТО, обеспечивающий структурированный подход к изучению ключевых параметров, на основе которого создана и изготовлена лабораторная установка для проведения экспериментальных исследований. Определен перечень контрольно-измерительного оборудования, установлены технические требования к режущим и регулировочным ножам ротора, а также представлена методика отбора проб и гранулометрического анализа резиновой крошки. Проведен анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния вертикального ротора методом конечных элементов, который показал, что условия прочности и деформации соблюдаются: максимальные напряжения по Мизесу составляют 5,74 МПа при 130 мин^{-1} , а линейные перемещения не превышают 10^{-3} мм.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса измельчения резинотехнических отходов на разработанной лабораторной установке вертикального типа. Подтверждена адекватность теоретических положений и целесообразность использования многоступенчатой компоновки режущих ножей, обеспечивающей стадийность измельчения. Для углубленного изучения процесса был использован полнофакторный эксперимент и центральный композиционный ротатабельный план для трех факторов (частота вращения ротора, количество режущих ножей, толщина регулировочного ножа), определены четыре функции отклика: выход фракции 1–3 мм, содержание частиц менее 1 мм, производительность и мощность измельчения. После обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, описывающие зависимость каждой функции отклика от варьируемых параметров. Анализ полученных графических зависимостей показал, что максимальное содержание фракции 1–3 мм в готовом продукте достигает 73 % при частоте вращения ротора 130 мин^{-1} , семи ножах и толщине регулировочного ножа 10 мм, при этом содержание частиц менее 1 мм составляет всего 9,2 %. Установлено, что производительность $13,5 \text{ кг/ч}$ достигается при мощности 180 Вт и удельном расходе энергии $13,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$, что подтверждает эффективность разработанной конструкции.

В пятой главе показаны результаты опытно-промышленных испытаний разработанного измельчителя вертикального типа производительностью 25 кг/ч , проведенных на базе ОАО «Машиностроитель» (Белгородская область, с. Ливенка). Полученные результаты зафиксированы в акте опытно-промышленных испытаний, на основании которого принято решение о проектировании и интеграции измельчителя в существующий участок переработки резинотехнических отходов. Проектная производительность участка предусматривает выпуск резиновой крошки в объеме 16 тонн в год. Экономический эффект от внедрения выполненных научно-технических разработок составляет 540 000 рублей в год, что подтверждает коммерческую целесообразность использования предлагаемого оборудования. Кроме того, в пятой главе сформулированы рекомендации по внедрению полученных результатов в производственных условиях и образовательном процессе кафедры «Механическое оборудование» БГТУ им. В.Г. Шухова.

Основные замечания по диссертационной работе:

1. В разделе 1.1 отсутствует анализ физико-механических свойств резинотехнических отходов (РТО) применительно к процессу резания. Например, не приведены значения предела прочности резины при срезе, который для ножевых измельчителей важнее предела прочности на растяжение.

2. В разделе 1.4 при анализе технологий переработки РТО не выполнено сравнение по экологическим параметрам (выбросы, класс опасности отходов, энергоэффективность), хотя экологическая компонента заявлена во введении как одна из ключевых.

3. В разделе 1.5 отсутствует анализ износостойкости ножей и обоснование выбора материала (сталь Р5М5). Упоминание марки стали есть в

главе 3, но без технико-экономического обоснования её применения для переработки резины.

4. В теоретической главе 2 имеется ряд необоснованных упрощений, снижающих строгость модели: вывод формулы (2.11) предполагает независимость работы разрушения от траектории внедрения зуба, что для вязкоупругой резины не очевидно; в выражении (2.23) дуга контакта зуба преобразуется в полную окружность, что справедливо только при полном обороте ротора, а не при единичном контакте; кроме того, формула (2.39) для коэффициента объёмного расширения β содержит геометрическую площадь контакта S , тогда как из-за упругого отжатия резины фактическая площадь контакта меньше – поправочный коэффициент не введён.

5. В главе 3 при подборе отрезных фрез по ГОСТ 2679-2014 не указано, использовались ли стандартные фрезы или модифицированные (с изменёнными углами заточки). Приведённые в работе углы ($\gamma = 5...10^\circ$, $\alpha = 20^\circ$) отличаются от стандартных для металлообработки, что требует отдельного пояснения.

6. В главе 3 методика отбора проб описана фрагментарно: не указано количество параллельных проб, способ усреднения результатов и критерий отбраковки аномальных значений, что снижает воспроизводимость эксперимента.

7. Сравнение теории и эксперимента в разделе 4.4 выполнено только графически, без количественной оценки погрешности. Утверждение о расхождении «~10%» не подтверждено расчётами (например, среднеквадратичной ошибкой или максимальным относительным отклонением по всем точкам).

8. В экономическом расчёте (глава 5) не учтены следующие статьи затрат: проектирование, пуско-наладочные работы, обучение персонала, сертификация продукции. Кроме того, срок окупаемости 7,8 месяца рассчитан исходя из полной загрузки оборудования (640 ч/год), однако в тексте указано, что оборудование используется не на полную мощность; при снижении загрузки срок окупаемости увеличится – это не обсуждается.

Замечания и недостатки работы не снижают общей положительной оценки диссертации. Работа изложена грамотным литературным языком на должном научном уровне, основные результаты в полной мере опубликованы в авторитетных научных изданиях.

Квалификационная оценка диссертационной работы

Диссертационная работа Кравченко В.М., соответствует требованиям п. 9 - 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842) и паспорту специальности 2.5.21. - Машины, агрегаты и технологические процессы: п. 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.

Диссертация Кравченко Владимира Михайловича на тему «Совершенствование измельчителя вертикального типа для переработки в крошку резинотехнических отходов» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения по совершенствованию процесса и конструкции измельчителя для промышленного получения резиновой крошки требуемого гранулометрического состава. Автор работы Кравченко В.М. заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы.

Официальный оппонент:

Качаев Александр Евгеньевич,
кандидат технических наук
(05.02.13 – «Машины, агрегаты
и процессы (строительство)»),
заведующий отделом эксплуатации
гидромелиоративных систем и
гидротехнических сооружений,
старший научный сотрудник
ФГБНУ «ВНИИ систем орошения
и сельхозводоснабжения «Радуга»»

Качаев Александр Евгеньевич

Контактная информация:

Адрес: 140483, Московская область, город Коломна, поселок Радужный, стр. 33.

Телефон: +7 977-785-29-35

Email: doctor_cement@mail.ru

Сайт: <https://vniiraduga.ru>

Личную подпись Александра Евгеньевича Качаева удостоверяю.

Начальник отдела кадров



Нина Сергеевна Макеева