

В диссертационный совет 24.2.276.03
при федеральном государственном
бюджетном образовательном учреждении
высшего образования «Белгородский
государственный технологический
университет имени В. Г. Шухова»

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Чуева Кирилла Витальевича «Повышение эффективности процесса извлечения бортовых колец автомобильных шин на основе модернизации оборудования для утилизации», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.21 «Машины, агрегаты и технологические процессы»

Актуальность темы диссертации

В Российской Федерации ежегодно образуется порядка 900 тысяч тонн отработанных автомобильных шин, значительная часть которых по-прежнему направляется на захоронение или сжигание. Наиболее распространенным способом их переработки является физико-механический метод, позволяющий возвращать в хозяйственный оборот вторичные ресурсы – резиновую крошку, металлолом и текстиль. Важным и трудоемким подготовительным этапом этой технологии, особенно при работе с грузовыми и крупногабаритными шинами, является операция извлечения бортовых металлических колец. Наличие в бортовой зоне мощной стальной проволоки делает невозможным прямое дробление покрышки, так как это приводит к быстрому выходу из строя режущего инструмента шредеров и дробилок.

Диссертационное исследование Чуева К.В. посвящено решению прикладной научно-технической задачи по модернизации оборудования для данного этапа. Автор отмечает, что применяемые в отрасли традиционные гидравлические и механические установки имеют ряд эксплуатационных недостатков. К ним относятся высокая энергоемкость, значительные габариты, быстрый износ рабочего инструмента, а также низкая универсальность при переходе между разными типоразмерами шин. Кроме того, существующие конструкции не в полной мере учитывают сложное упругопластическое деформирование бортового кольца, что нередко приводит к его разрыву и увеличению трудозатрат на его извлечение.

В этих условиях разработка более эффективных компоновок оборудования и математических моделей процесса извлечения является востребованной задачей для предприятий перерабатывающей отрасли. Обоснованный в работе переход от громоздких гидравлических систем к компактным установкам с регулируемым электромеханическим приводом позволяет снизить энергопотребление, сократить длительность рабочего цикла и повысить производительность оборудования. Результаты исследования Чуева К.В. имеют практическую направленность и могут быть использованы для совершенствования технологических линий утилизации шин, повышая их общую экономическую целесообразность.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверность и новизна

В диссертационной работе Чуева К.В. реализован системный подход к научным исследованиям, что позволило автору сформулировать цель диссертации, разбить ее на задачи, выполнить их последовательное решение, а также обосновать полученные результаты и выводы.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается корректным использованием апробированного математического аппарата (теория упругопластической деформации стержневых систем, дифференциальные уравнения движения, метод наименьших квадратов, планирование эксперимента), применением современных программных средств для имитационного и конечно-элементного моделирования (Python, NX 12.0), а также согласованностью теоретических зависимостей с данными натурных испытаний на гидравлической установке и на изготовленном лабораторном прототипе.

Основные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы являются новыми и последовательно вытекают из результатов теоретических и экспериментальных исследований. По результатам работы автор сформулировал десять основных выводов:

Вывод 1 содержит систематизацию технологических и технических ограничений существующего оборудования для извлечения бортовых колец и обосновывает целесообразность перехода от гидравлических установок к оборудованию с регулируемым электромеханическим приводом.

Вывод 2 обосновывает применение двух оригинальных компоновок электромеханических установок, защищенных патентами РФ на полезную

модель, использование которых позволяет улучшить технико-экономические показатели процесса извлечения бортовых колец.

Выводы 3 и 4 сделаны по материалам главы 2 и раскрывают разработанный теоретический аппарат исследования. **Вывод 3** описывает аналитическую модель процесса извлечения бортового кольца на основе баланса сил, которая позволяет вычислить критерии эффективности процесса, учитывая этапы упругопластической и пластической деформации. **Вывод 4** описывает гибридную математическую модель максимального усилия извлечения, учитывающую геометрические параметры шины и оборудования, на основе которой установлено доминирующее влияние площади металлического бортового кольца, нелинейный вклад резиновой оболочки и рассчитаны конструктивно-технологические параметры оборудования.

Выводы 5 и 6 посвящены результатам численного и имитационного моделирования, на основе которых определены рациональные характеристики проектируемого оборудования (ширина щели, ширина рабочего зуба и скорость извлечения).

Выводы 7, 8 и 9 сформулированы по материалам главы 4. **Вывод 7** содержит результаты экспериментальной верификации теоретических моделей на лабораторном прототипе электромеханической установки, подтверждающие адекватность разработанных математических моделей реальным условиям процесса извлечения бортового кольца. **Вывод 8** обобщает экономическую оценку эффективности, показавшую, что разработанная установка характеризуется в 3,5–4 раза меньшим энергопотреблением за цикл по сравнению с гидравлическими аналогами при более высокой производительности. **Вывод 9** описывает унифицированную инженерную методику расчета усилия извлечения бортового кольца, объединяющую теоретические, численные и экспериментальные результаты и содержащую рекомендации, позволяющие обоснованно назначать режимы работы, минимизировать риск разрыва кольца и снизить пиковые нагрузки на привод.

Выводы 10 и 11 подтверждают реализацию результатов исследования, которые внедрены в производственную деятельность ООО «Экоутилизация-31», а также используются в учебном процессе БГТУ им. В. Г. Шухова при подготовке студентов бакалавриата и магистратуры.

Отмеченные результаты получены на строгой научной основе, их достоверность подтверждена многократными повторами экспериментов, статистической обработкой данных и внедрением результатов на предприятии.

Значимость для науки и практики полученных результатов

Научную новизну диссертационной работы представляют:

1. Аналитическая модель процесса извлечения бортового кольца, построенная на основе баланса сил. Она учитывает этапы упругопластической и пластической деформации, а также критическое условие неразрывности металлического кольца, что позволяет аналитически вычислять перемещение, скорость и мощность извлечения на каждом этапе цикла.

2. Гибридная математическая модель максимального усилия извлечения, коэффициенты которой определены по результатам натурных испытаний. Модель интегрирует теоретические зависимости с эмпирическими данными, обеспечивая высокую точность прогнозирования нагрузок.

3. Численная модель начальной стадии деформирования бортового кольца реализованная с применением метода конечных элементов и имитационная модель упругопластического преобразования бортового кольца из круговой формы в эллиптическую. Модели позволяют количественно оценить влияние конструктивно-технологических параметров оборудования на процесс извлечения бортового кольца.

Теоретическая значимость работы состоит в обосновании и совершенствовании математического аппарата описания динамики процесса механической утилизации шин. Полученные системы дифференциальных уравнений движения рабочего органа и регрессионные зависимости создают научную базу для прогнозирования силовых и энергетических характеристик процесса без необходимости проведения дорогостоящих натурных экспериментов для каждого нового типоразмера шин.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны и защищены патентами РФ на полезную модель две оригинальные компоновки электромеханических установок для извлечения бортовых колец. Данные конструкции обеспечивают извлечение кольца из цельной шины без предварительной резки, обладают универсальностью по типоразмерам и позволяют сократить длительность рабочего цикла на 20–35% за счет реализации ускоренного холостого хода.

2. Разработана унифицированная инженерная методика расчета усилия извлечения, включающая практические рекомендации по выбору рациональных параметров оборудования и их адаптации при работе с сильно изношенными или крупногабаритными шинами.

3. Предложена электромеханическая установка, которая позволяет снизить энергопотребление за цикл в 3,5–4 раза по сравнению с традиционными гидравлическими аналогами, повысить производительность до 35–45 шт./ч и существенно уменьшить эксплуатационные расходы благодаря отсутствию сложной гидравлической системы.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность и замечания по оформлению

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Работа изложена на 198 страницах машинописного текста и включает 64 рисунка, 34 таблицы, список литературы из 112 наименований и приложения на 17 страницах.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, направленной на решение технико-экономической и экологической задачи по повышению эффективности извлечения бортовых колец при утилизации изношенных автомобильных шин. Четко сформулированы цель и задачи исследований, определены объект и предмет работы. Отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, достоверность научных положений, а также внедрение результатов работы в производственную и учебную деятельность. В полном объеме сформулированы положения, выносимые на защиту

Глава 1 посвящена анализу современного состояния технологий переработки изношенных автомобильных шин, рассмотрению особенностей процесса механического дробления и сравнительному анализу существующего оборудования для извлечения бортовых колец. На основе систематизации технологических и технических ограничений выявлена необходимость совершенствования установок для извлечения бортовых колец, способных обеспечивать оптимальный баланс производительности, энергоэффективности и универсальности при работе с шинами различных типоразмеров.

Замечания по главе:

1. В параграфе 1.2 при классификации шин по типоразмерам и составлении обобщенной схемы технологического процесса переработки (таблица 1.3) не приведены ссылки на действующие межгосударственные стандарты, регламентирующие технические требования к шинам. Сопоставление классификации автора с нормативной терминологией усилило бы обоснованность проведенного анализа.

2. В параграфе 1.3 и сводной таблице 1.4 сравнительный анализ существующего оборудования проведен преимущественно по критериям производительности и энергопотребления. Для более полного обоснования выбранного автором направления модернизации целесообразно было бы дополнить критерии сравнения показателями эксплуатационной надежности и затрат на техническое обслуживание, что напрямую связано с общей экономической эффективностью процесса утилизации.

Глава 2 посвящена математическому описанию энергосиловых и конструктивно-технологических параметров процесса извлечения бортовых колец. Автор разработал аналитическую модель процесса на основе баланса сил, обоснованно разделив его на два этапа: упругую деформацию до разрыва резиновой оболочки и последующее пластическое деформирование при протягивании. На основе натурных экспериментов методом наименьших квадратов получена гибридная математическая модель максимального усилия извлечения.

Замечания по главе:

3. В параграфе 2.2 при построении аналитической модели бортовое кольцо рассматривается как упругопластический стержневой элемент, однако в реальности оно представляет собой пучок стальных проволок с латунным или цинковым покрытием, заключенных в резиновую оболочку. Необходимо кратко оговорить влияние данного резинометаллического композита и защитного покрытия на принятые в уравнениях (2.7) и (2.12) коэффициенты трения и адгезии для повышения физической обоснованности модели.

4. В параграфе 2.3.3 из выборки для модели (2.88) обоснованно исключены шины с предварительным надрезом борта. Поскольку на практике такие надрезы применяются для утилизации сильно изношенных и крупногабаритных шин, целесообразно привести ориентировочную оценку или эмпирический поправочный коэффициент, показывающий снижение пикового усилия извлечения, что повысит универсальность разработанной методики.

Глава 3 посвящена разработке компоновочных решений оборудования для извлечения бортовых колец и обоснованию их конструктивно-технологических параметров. Представлены две оригинальные электромеханические установки, защищенные патентами РФ на полезную модель. Выполнено численное моделирование методом конечных элементов в NX 12.0 с применением ротатбельного планирования второго порядка. Разработана имитационная модель упругопластического преобразования бортового кольца на языке Python.

Замечания по главе:

5. В параграфе 3.2 при численном моделировании бортовое кольцо представлено в виде сплошного стержня, тогда как реально оно состоит из пучка проволок в резиновой матрице. Целесообразно кратко обосновать допущение о приведении пучка к эквивалентному сплошному сечению и оценить влияние этого упрощения на распределение контактных напряжений для повышения воспроизводимости эксперимента.

6. В параграфе 3.3 имитационная модель деформирования бортового кольца реализована в виде программ на языке Python, однако не описана процедура верификации численных алгоритмов. Целесообразно привести сравнение результатов моделирования с аналитическим решением для подтверждения их корректности.

Глава 4 посвящена опытно-экспериментальному исследованию разработанной электромеханической установки. Изготовлен лабораторный прототип и проведены натурные испытания на легковых и легкогрузовых шинах, подтвердившие адекватность гибридной математической модели. Сравнительный экономический анализ показал снижение энергопотребления и рост производительности по сравнению с гидравлическими аналогами. В завершение разработана унифицированная методика расчета усилия извлечения с практическими рекомендациями по адаптации режимов работы оборудования.

Замечания по главе:

7. В параграфе 4.2 верификация моделей выполнена на шинах 14–16 дюймов, тогда как экономическое обоснование (4.3) ориентировано на крупногабаритные шины (до R22.5). Целесообразно обосновать границы экстраполяции экспериментальных данных на крупные шины с учетом нелинейного изменения жёсткости массивного металлокорда и резиновой смеси.

Отмеченные замечания носят преимущественно уточняющий характер и не снижают общей ценности диссертационного исследования. Полученные результаты имеют существенное значение для повышения эффективности переработки резинотехнических изделий.

Основные выводы диссертационной работы соответствуют поставленным задачам.

Считаю, что выполненное диссертационное исследование обладает внутренним единством и содержит новые научно обоснованные технические и технологические решения.

Полученные результаты вносят значительный вклад в развитие теории и практики проектирования оборудования для переработки резинотехнических изделий, а также создают надежную методологическую основу для повышения энергоэффективности и производительности процессов извлечения бортовых колец при утилизации шин.

Основные теоретические и практические результаты диссертационного исследования успешно реализованы и апробированы на действующей лабораторной установке по извлечению бортовых колец. Создание данного экспериментального образца осуществлено в рамках договора № 19702ГУ/2025 о предоставлении гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов по итогам конкурса Фонда содействия инновациям «УМНИК-2025».

Апробация основных положений диссертации и разработанного оборудования проведена в проектно-конструкторской и производственной деятельности ООО «Экоутилизация-31» (Белгородская область), что подтверждается соответствующим актом внедрения. Кроме того, теоретические и практические результаты исследования успешно используются в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова при проведении лабораторных практикумов для студентов направлений подготовки в области конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств, что свидетельствует о высокой востребованности и практической значимости выполненных разработок.

Рекомендации по использованию и реализации полученных результатов

Совокупность полученных результатов диссертационного исследования можно рекомендовать к использованию по следующим направлениям:

1. Промышленное внедрение разработанных компоновочных решений электромеханических установок на предприятиях сферы рециклинга резинотехнических изделий.

2. Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области утилизации резинотехнических изделий с использованием разработанных теоретических моделей извлечения и деформирования бортового кольца.

Полнота опубликованных результатов работы в печати и соответствие автореферата основным положениям диссертации

Материалы диссертационного исследования опубликованы в достаточном объеме. По теме диссертации опубликовано 19 научных трудов, включая 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, и 13 публикаций в сборниках материалов конференций и других изданиях, индексируемых в РИНЦ. Кроме того, получено 2 патента Российской Федерации на полезные модели (№ 201698 U1 и № 236885 U1). Указанное количество публикаций, в которых изложены основные научные результаты диссертации, полностью соответствует требованиям пунктов 12 и 13 Положения о присуждении ученых степеней.

Основное содержание глав диссертации адекватно отражено в опубликованных работах, в частности, в статьях, посвященных аналитическому и имитационному моделированию процесса извлечения бортовых колец, а также разработке и экспериментальной верификации электромеханических установок для утилизации шин.

Результаты исследования успешно прошли апробацию и были представлены на ряде международных и всероссийских научно-практических конференций, среди которых: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (2022–2025 гг.), VIII Всероссийская конференция молодых ученых «Наука и инновации XXI века» (Сургут, 2022 г.), а также XIV и XV Международные молодежные форумы «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2022, 2023 гг.).

Диссертационная работа и автореферат написаны грамотным научным языком, отличаются логичностью и структурированностью изложения. Содержание автореферата полностью соответствует требованиям, предъявляемым к работам данного уровня, и всесторонне отражает основные положения, выводы и научные результаты диссертации, выносимые на защиту.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

1. Диссертационная работа Чуева Кирилла Витальевича «Повышение эффективности процесса извлечения бортовых колец автомобильных шин на основе модернизации оборудования для утилизации» содержит новые научно обоснованные технические и технологические решения. К ним относятся:

разработанные аналитические и гибридные математические модели процесса извлечения, две оригинальные конструкции электромеханических установок, а также унифицированная инженерная методика расчета рациональных параметров оборудования. Внедрение данных решений позволяет отказаться от энергоемких гидравлических систем, сократить длительность технологического цикла на 20–35% за счет реализации ускоренного холостого хода, снизить удельное энергопотребление в 3,5–4 раза и повысить общую производительность линии. Это имеет существенное значение для повышения экономической эффективности, надежности и экологической безопасности предприятий, занимающихся рециклингом резинотехнических изделий.

2. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая по актуальности темы, научной новизне, достоверности результатов и практической значимости, а также по объему выполненных исследований полностью соответствует критериям, изложенным в пунктах 9, 10, 11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842. Считаю, что ее автор, Чуев Кирилл Витальевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.21 «Машины, агрегаты и технологические процессы».

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник лаборатории
цифровых методов управления жизненным
циклом изделий машиностроения ИМАШ РАН,
доктор технических наук,
профессор

Кравченко Игорь
Николаевич

« 07 » сентября 2026 г.



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук.

Адрес организации: 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4.

Тел.: +7 (495) 628-87-30; +7 (916) 242-78-86.

E-mail: info@imash.ru, kravchenko-in71@yandex.ru