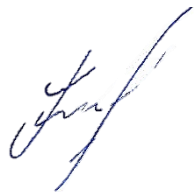


На правах рукописи



ЧУЕВ КИРИЛЛ ВИТАЛЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ
КОЛЕЦ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН НА ОСНОВЕ МОДЕРНИЗАЦИИ
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ

2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы

АВТОРЕФЕРАТ
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» на кафедре технологии машиностроения

Научный руководитель: **Дуюн Татьяна Александровна**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения БГТУ им. В.Г. Шухова

Официальные оппоненты: **Кравченко Игорь Николаевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории цифровых методов управления жизненным циклом ФГБУН «Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук»;
Пастухов Александр Геннадиевич, доктор технических наук, профессор, профессор инженерного факультета Белгородского государственного аграрного университета имени В. Я. Горина.

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

Защита состоится «30» сентября 2026 года в 12 часов 30 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 (https://gos_att.bstu.ru/dis/Chuev)

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
техн. наук, доц.



И. А. Семикопенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Ежегодно в мире образуется более 1,5 млрд единиц отработанных шин. На территории России этот показатель составляет порядка 900 тысяч тонн. Большая часть этих отходов складывается на полигонах или подвергается сжиганию, что приводит к выделению токсичных веществ, загрязняющих почву, воду и атмосферу.

Переработка шин, включая извлечение бортовых колец (БК), позволяет сократить объём отходов, направляемых на захоронение, и способствует реализации принципов циркулярной экономики. Металлические компоненты БК шин, изготовленные из высококачественной стали, могут быть повторно использованы в металлургии. Однако существующие технологии извлечения БК характеризуются значительными энергозатратами (15–20 кВт на цикл) и низкой производительностью. Кроме того, при извлечении часто происходит разрыв кольца, что существенно увеличивает трудозатраты процесса и повышает себестоимость переработки всей шины.

Реализация национального проекта «Экология» и стратегии научно-технологического развития РФ предусматривает достижение 60%-го уровня переработки отходов к 2030 году. Модернизация оборудования для извлечения БК, ориентированная на энергосбережение, решает сразу несколько задач: снижает эксплуатационные расходы, повышает рентабельность утилизации шин и стимулирует создание новых рабочих мест.

Степень разработанности темы исследования. основополагающие исследования в области переработки изношенных автомобильных шин и извлечения БК в нашей стране выполнены Д. А. Упоровым, А. В. Румянцевой, В. Б. Епифановым, Е. И. Сыч, С. В. Рединым, С. И. Сухановым, А. В. Глазковым, Р. М. Долинской, Н. Р. Прокопчук, А. А. Вещевым, А. Г. Пастуховым, А. Е. Соколовым, А. О. Панкратовским, И. В. Лукиным, И. Н. Кравченко, М. Ю. Конкиным и И. А. Золотовым. В их работах рассмотрены экологические аспекты утилизации шин, способы их переработки, методы отделения металлических компонентов, включая БК, а также моделирование процессов переработки отработанных шин.

Объект исследования – процесс извлечения бортовых металлических колец из бортовой зоны изношенных автомобильных шин при их утилизации и предварительной переработке.

Предмет исследования – конструктивно-технологические параметры оборудования для извлечения БК, особенности силового взаимодействия оборудования и шины, энергетические и динамические характеристики процесса извлечения.

Цель работы: повышение эффективности процесса извлечения БК автомобильных шин на основе модернизации оборудования для утилизации путём определения рациональных конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих снижение энергозатрат, повышение производительности и универсальности.

Задачи исследования:

1. Анализ современного состояния технологий предварительной переработки изношенных автомобильных шин, существующих способов извлечения БК и применяемого оборудования, выявление их основных недостатков и технологических ограничений.
2. Разработка аналитической модели динамики процесса извлечения БК на основе критериев эффективности с целью теоретического обоснования влияния конструктивно-технологических параметров оборудования на силовые характеристики, энергозатраты и производительность процесса.
3. Разработка компоновочных и кинематических схем оборудования для извлечения БК, обладающих высокой энергоэффективностью и производительностью.
4. Определение рациональных значений конструктивно-технологических параметров оборудования на основе теоретических и экспериментальных исследований.
5. Разработка лабораторного прототипа установки для извлечения БК, экспериментальное подтверждение конструктивно-технологических параметров и верификации теоретических моделей и разработка инженерной методики для проектирования и эксплуатации оборудования.
6. Оценка эффективности предложенных конструктивно-технологических решений.

Научная новизна заключается в получении:

- аналитической модели процесса извлечения БК в виде баланса сил, учитывающей этапы упругопластической и пластической деформации и условие неразрывности металлического кольца;
- численной модели начальной стадии деформации кольца и имитационной модели упругопластического преобразования БК из круговой формы в эллиптическую с учетом влияния конструктивно-технологических параметров шины и оборудования;
- гибридной математической модели максимального усилия извлечения, построенной с учётом теоретических исследований и натурных испытаний.

Теоретическая значимость работы:

- построена аналитическая модель процесса БК в виде баланса сил, позволяющая вычислить перемещение, скорость и мощность извлечения;
- вычислена гибридная математическая модель максимального усилия извлечения, которая позволяет определить оптимальные силовые параметры для обеспечения эффективности технологического процесса извлечения
- разработаны численная модель начальной стадии деформации кольца и имитационная модель упругопластического преобразования БК, позволяющие определить рациональные конструктивно-технологические параметры оборудования для извлечения;

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны и защищены патентами РФ на полезную модель две оригинальные электромеханические установки (№ 201698 U1 от 28.12.2020 и № 236885 U1 от 28.08.2025) с регулируемым электромеханическим приводом,

обеспечивающие извлечение кольца из цельной шины без предварительной резки шин.

2. Разработана методика расчета основных технологических и конструктивных параметров оборудования для извлечения БК на базе разработанных математических выражений с учетом полученных экспериментальных данных.

Методы исследований. Использовались общепринятые для технических наук теоретические (анализ, обобщение, идеализация, формализация), экспериментальные (наблюдение, эксперимент, сравнение) и специальные (математическое, имитационное и физическое моделирование) методы исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитическая модель процесса извлечения БК на основе баланса сил, учитывающая этапы упругопластической и пластической деформации, условие неразрывности металлического кольца.

2. Численная модель начальной стадии деформации БК с учетом влияния конструктивно-технологических параметров шины и оборудования.

3. Имитационная модель упругопластического преобразования БК из круговой формы в эллиптическую с учетом влияния конструктивно-технологических параметров шины и оборудования.

4. Гибридная математическая модель максимального усилия извлечения БК, построенная с учётом теоретических исследований и натурных испытаний

Соответствие паспорту специальности. Материалы диссертации соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.5.21 «Машины, агрегаты и технологические процессы»:

п. 4. «Исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций с использованием моделирования, численных и физических экспериментов»;

п. 6. «Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин агрегатов и технологических процессов и оценки их экономической и энергетической эффективности и ресурса».

Степень достоверности полученных результатов 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 апробацией результатов исследований.

Реализация результатов исследования. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы реализованы и апробированы на действующей лабораторной установке по извлечению БК, созданной в рамках договора №19702ГУ/2025 о предоставлении гранта на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив коммерческого использования результатов работ в рамках реализации инновационного проекта по итогам конкурса «УМНИК-2025». Теоретические

результаты диссертации внедрены в учебный процесс кафедры «Технология машиностроения» БГТУ им. В. Г. Шухова для лабораторных практикумов на базе лаборатории кафедры технологии машиностроения. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены и используются в проектно-конструкторской и производственной деятельности ООО «Экоутилизация-31» (Белгородская обл., Корочанский р-н, с. Алексеевка).

Апробация результатов работы. Основные результаты представлены на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук. (Белгород, 2022); VIII Всероссийская конференция молодых ученых. «Наука и инновации XXI века». (Сургут, 2022); XIV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство.» (Белгород, 2022); Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова. (Белгород, 2023); XV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство.» (Белгород, 2023); Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. (Белгород, 2024); Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. (Белгород, 2025).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 19 печатных работах, 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 13 статей в изданиях, индексируемых в РИНЦ, получены 2 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем работы диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации: 198 страниц. Диссертационная работа содержит 34 таблицы, 64 рисунка и 6 приложений. Список литературы включает 112 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, представлены цель и задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассмотрены основные методы переработки изношенных автомобильных шин и резинотехнических изделий (РТИ): механический, термический и альтернативные подходы. Проведенный сравнительный анализ показал, что механическое измельчение, является наиболее сбалансированным по критериям экологической безопасности, технологической доступности и экономической целесообразности, а доля его внедрения среди всех перерабатывающих технологий составляет 63 %. Установлено, что во многих способах переработки, таких как пиролиз, газификация, а также при механическом измельчении, обязательной технологической операцией является предварительное извлечение БК шины. Данная операция определяет ресурс работы последующего дробильного и режущего оборудования.

Выполнен анализ существующего оборудования для извлечения БК, представленного на рынке РФ и за рубежом. Рассмотрены три основные группы устройств: механические устройства (валки), режуще-вырубные и гидравлические установки. Выявлены характерные недостатки каждой группы оборудования. Установлено, что наиболее перспективным направлением развития является модернизация гидравлических установок, обладающих универсальностью применения для шин различных типоразмеров и высокой надёжностью, однако характеризующихся значительными габаритами и повышенным энергопотреблением. На основании проведенного анализа была сформулирована цель диссертационного исследования и определены задачи для её достижения.

Вторая глава посвящена разработке теоретических моделей и методологических основ, направленных на повышение эффективности извлечения БК из изношенных автомобильных шин.

Для количественной оценки эффективности процесса извлечения БК предложены три параметра: максимальное усилие извлечения (F_{max} , Н), скорость извлечения ($v_{изв}$, м/с) и мощность извлечения (P , Вт). Максимальное усилие извлечения (F_{max} , Н) характеризует пиковую силу, необходимую для полного отделения БК от резиновой оболочки, и определяет конструктивную прочность оборудования и энергозатраты. Скорость извлечения ($v_{изв}$, м/с) напрямую влияет на производительность установки, сокращая время цикла и увеличивая объём перерабатываемых шин за единицу времени. Мощность извлечения (P , Вт) отражает интенсивность энергопотребления оборудования, включая как потребляемую электроэнергию, так и механическую мощность на преодоление сопротивления материалов шины

На основе анализа физических факторов усилие извлечения представлено аналитической моделью в виде баланса сил из условия неравновесия БК (1):

$$\sum \bar{F}_{kx} = \bar{F} + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_3 + \bar{F}_4 + \bar{F}_5 = F + \sigma_c \cdot \pi \cdot h \cdot l + \\ + \left(\sigma_p \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{крит}} \right)^n + \eta \cdot \frac{v}{h} \right) \cdot A_p + \frac{\varepsilon_p \cdot A'_p}{L_p} \cdot \Delta x_p + \sigma_y \cdot A_{БК} \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d}{3h} \right) + \\ + \mu \cdot N + F_{пот} < K_p \cdot \sigma_{пч} \cdot A_k \cdot z \quad (1)$$

где F_{kx} – усилие необходимое для извлечения БК; Н; F – усилие, развиваемое оборудованием, Н; F_1 – усилия для преодоления адгезии между стальной проволокой и резиновой оболочкой, Н; F_2 – усилия для разрыва резиновой оболочки бортовой части колеса., Н; F_3 – усилие, затрачиваемое на деформацию резиновой оболочки, Н; F_4 – усилие, затрачиваемое на деформацию БК, Н; F_5 – усилия для преодоления силы трения и других негативных факторов, Н; σ_c — сдвиговое напряжение, Па; h — толщина БК, м; l — длина участка контакта проволоки с резиной, м; σ_p — предел прочности резины на разрыв, Па; A_p — площадь сечения разрываемого участка резины, м²; K_p — коэффициент, учитывающий геометрию кольца; k_k — коэффициент жесткости кольца, Н/м; Δx_k — деформация кольца, м; ε_p — модуль упругости резины, Па; A'_p — площадь сечения резины, м²; L_p — длина деформируемого участка, м; Δx_p —

деформация резины, м; μ — коэффициент трения; N — нормальная сила, Н; $F_{\text{пот}}$ — потери усилия, Н.

Внешнее усилие F зависит от динамики установки и геометрии рабочего зуба. Ему противодействуют: адгезия F_1 , обусловленная химическим сцеплением с покрытием проволоки; усилие разрыва резиновой оболочки F_2 , определяемое прочностью и толщиной резины; упругие деформации резины F_3 и БК F_4 , а также трение F_5 , возникающее при прохождении БК через упорную плиту с учетом загрязнений и коррозии.

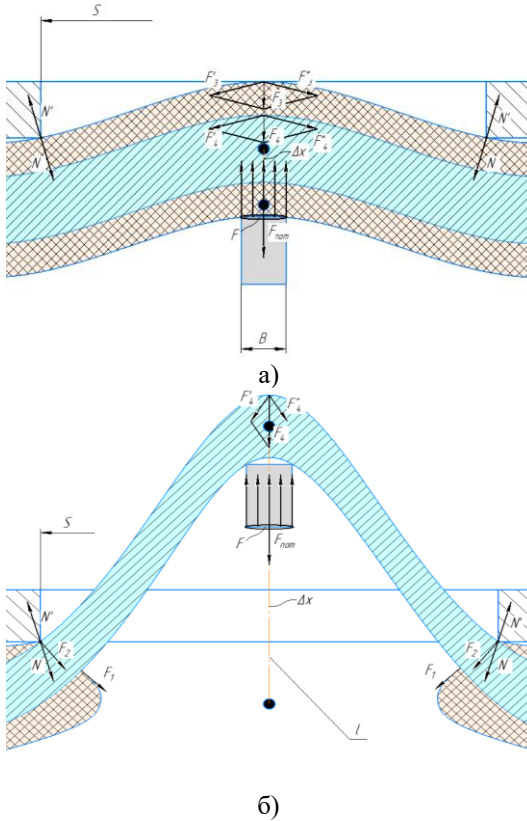


Рисунок 1. Схема действующих сил при извлечении БК: а) в начальный момент процесса извлечения; б) на протяжении рабочего процесса;

Процесс извлечения БК представлен в виде двух этапов: упругая деформация до разрыва резиновой оболочки (рисунок 1, а) и последующее пластическое деформирование БК при протягивании (рисунок 1, б).

На этапе упругой деформации резиновый бортовой каток и БК деформируется без разрыва резиновой оболочки. Суммарное усилие извлечения F определяется только деформационными и фрикционными компонентами F_3 , F_4 и F_5 . Силы адгезии (F_1) и разрыва (F_2) равны нулю. Такая ситуация сохраняется до достижения локальным напряжением в резиновой оболочке ($\sigma_{\text{лок}}$) предела прочности ($\sigma_{\text{пр.р.}}$), после чего происходит разрыв резиновой части борта шины. Система уравнений (2) описывает изменения перемещения, скорости и мощности извлечения для этапа упругопластической деформации:

$$\left\{ \begin{array}{l} t < t_1; \sigma_{\text{лок}} < \sigma_{\text{пр.п.}} \\ \sum F_{kx} = F - F_3 - F_4 - F_5 = F - K_1 x - K \\ x(t) = \frac{F - K}{K_1} \left(1 - \cos \left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t \right) \right) \\ v(t) = \frac{F - K}{\sqrt{K_1 \cdot m}} \sin \left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t \right) \\ K_1 = \frac{\varepsilon_p \cdot A'_p}{L_p}; K = \sigma_y \cdot A_{\text{БК}} \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d}{3h} \right) + \mu \cdot N + F_{\text{пот}} \\ P(t) = \frac{F - K}{\sqrt{K_1 \cdot m}} \sin \left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t \right) [(F - K) \left(1 - \cos \left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t \right) \right) + K] \end{array} \right. \quad (2)$$

На этапе протягивания БК через отверстие упорной плиты при постоянной скорости (рисунок 1, б) усилие деформации резинового слоя F_3 практически отсутствует, так как разрушенная оболочка больше не создает упругое сопротивление, а её остаточные эффекты учитываются в F_1 и F_2 . В результате общее сопротивление определяется преимущественно адгезией F_1 , разрывом резины на локальных участках F_2 , деформацией БК F_4 и трением F_5 .

$$\left\{ \begin{array}{l} t > t_1; \sigma_{\text{лок}} \geq \sigma_{\text{пр.п.}} \\ \sum F_{kx} = F - F_1 - F_2 - F_4 - F_5 = F - K_2 v - K' \\ x(t) = x_{\text{кр}} + \frac{F - K'}{K_2} \cdot (t - t_1) + \frac{m}{K_2} \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) (1 - e^{-\lambda(t-t_1)}) \\ v(t) = \frac{F - K'}{K_2} + \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) e^{-\lambda(t-t_1)} \\ K_2 = \eta \frac{A_p}{h}; K' = \sigma_c \cdot \pi \cdot h \cdot l + \sigma_p \cdot A_p \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{крит}}} \right)^n + \\ + \sigma_y \cdot A_{\text{БК}} \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d}{3h} \right) + \mu \cdot N + F_{\text{пот}} \\ P(t) = K_2 \cdot \left[\frac{F - K'}{K_2} + \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) e^{-\lambda(t-t_1)} \right]^2 + K' \cdot \left(\frac{F - K'}{K_2} + \right. \\ \left. + \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) e^{-\lambda(t-t_1)} \right) \end{array} \right. \quad (3)$$

Максимальное пиковое усилие извлечения БК возникает при переходе от упругой деформации к разрушению резиновой оболочки и определяется совокупностью всех сил, представленных в выражении (1). Значение усилия изменяется в зависимости от типоразмерных характеристик шин: площади БК ($A_{\text{БК}}$), площади резинового борта (A_p), посадочного диаметра ($d_{\text{пос}}$) и конструктивно-технологических параметров оборудования: ширины щели ($s_{\text{щ}}$), скорости движения рабочего зуба (v). Данные параметры выражены из

аналитической модели (1) при помощи обобщенных коэффициентов (K_0 , $K_{\text{БК}}$, $K_{\text{рез}}$, K_3 , K_5), что позволило получить гибридную модель (4):

$$F = K_0 + K_{\text{БК}} \cdot \sqrt{A_{\text{БК}}} \cdot (s_{\text{щ}} + d_{\text{пос}}) + K_{\text{рез}} \cdot A_{\text{р}} + K_3 \cdot v \cdot \sqrt{A_{\text{р}}} + K_5 \cdot A_{\text{БК}} \quad (4)$$

Для определения коэффициентов гибридной модели $K_0 - K_5$ был проведён натурный эксперимент на предприятии ООО «Экоутилизация - 31». Объектом исследования стало оборудование «Гидровывратель бортовых колец» для извлечения БК из утилизируемых шин. Выполнена серия опытов по извлечению БК из изношенных грузовых и крупногабаритных шин с посадочными диаметрами от 495,3 мм до 660,4 мм. В ходе экспериментов регистрировались максимальные значения рабочего давления и рассчитывалось усилие извлечения. Анализ результатов показал прямую зависимость усилия извлечения от типоразмера шины. С увеличением посадочного и внешнего диаметров, а также площади поперечного сечения БК усилие возрастало. Наиболее сильная корреляция (коэффициент 0,94) наблюдалась между максимальным усилием и площадью БК.

По результатам множественной линейной регрессии методом наименьших квадратов получена эмпирическая зависимость максимального усилия извлечения БК F (5) от конструктивно-технологических параметров шины и оборудования:

$$F = (-0,149 - 2,35 \cdot \sqrt{A_{\text{БК}}} \cdot (s_{\text{щ}} + d_{\text{пос}}) - 106,6 \cdot A_{\text{р}} + 200,8 \cdot v \cdot \sqrt{A_{\text{р}}} + 360,9 \cdot A_{\text{БК}}) \cdot 10^6 \quad (5)$$

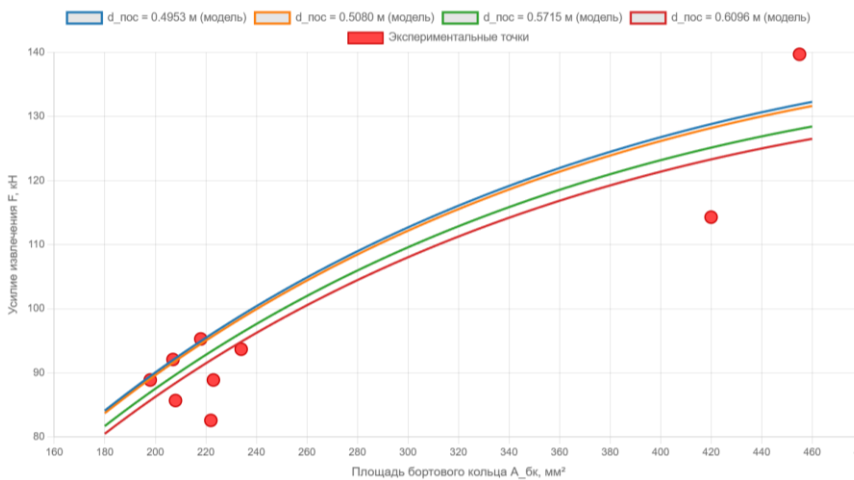


Рисунок 2. Зависимость усилия извлечения от площади БК при различных посадочных диаметрах

Графическое представление гибридной модели для исследованных типоразмеров шин (4, 5) при фиксированной ширине щели и скорости движения рабочего зуба представлено на рисунке 2. Наибольший вклад в формирование

максимального усилия вносят линейная составляющая, пропорциональная площади поперечного сечения бортового кольца, и нелинейная составляющая, связанная с площадью резиновой оболочки.

В третьей главе разработаны две оригинальные установки для извлечения БК без предварительного разрезания шины, защищенные патентами РФ № 201698 U1 и № 236885 U1.

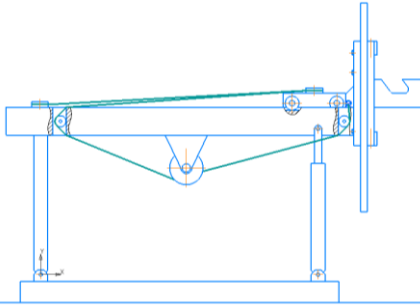


Рисунок 3. Общий вид установки для извлечения бортовых колец с тросовой системой

установки выполнено численное моделирование начальной стадии процесса извлечения методом конечных элементов с применением рототабельного униформ-планирования второго порядка.

В качестве факторов эксперимента выбраны: ширина щели мишени $s_{щ}$, мм; ширина рабочего зуба оборудования – b , мм; площадь поперечного сечения БК $A_{БК}$, мм². В качестве параметров выбраны максимальная деформация БК в

направлении вытягивания Dx , мм и максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу $[\sigma]$, МПа.

Для определения рациональных конструктивно-технологических параметров

В ходе исследования был построен ряд параметрических моделей в программном комплексе NX12.0, на которые в дальнейшем была наложена конечно-элементная сетка, применены ограничения и приложены нагрузки (рисунок 4).

Регрессионные модели зависимости функций отклика от варьируемых фактор в натуральном виде:

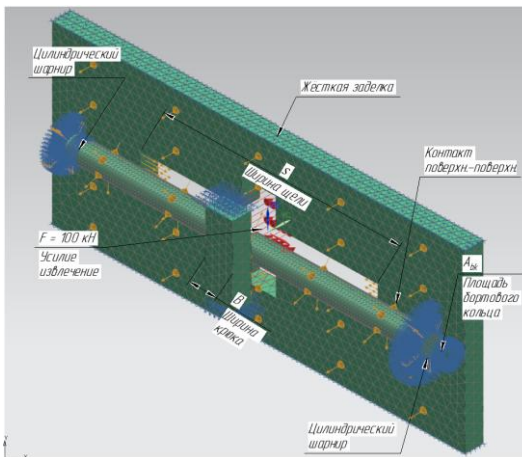


Рисунок 4. КЭ модель БК с упорной плитой в сборе с наложенными ограничениями, нагрузками и объектами симуляции

$$Dx = 0,882 + 0,2342 \cdot s_{\text{щ}} - 0,1178 \cdot A_{\text{БК}} - 0,000475 \cdot s_{\text{щ}} \cdot A_{\text{БК}} + 0,000262 \cdot A_{\text{БК}}^2 \quad (6)$$

$$[\sigma] = 1714,1 - 3,05 \cdot s_{\text{щ}} - 5,934 \cdot A_{\text{БК}} - 0,00535 \cdot s_{\text{щ}} \cdot A_{\text{БК}} + 0,0157 \cdot s_{\text{щ}}^2 + 0,00863 \cdot A_{\text{БК}}^2 \quad (7)$$

На основе зависимостей (6), (7) построены поверхности отклика от варьируемых параметров при ширине рабочего зуба 20 мм (рисунок 5).

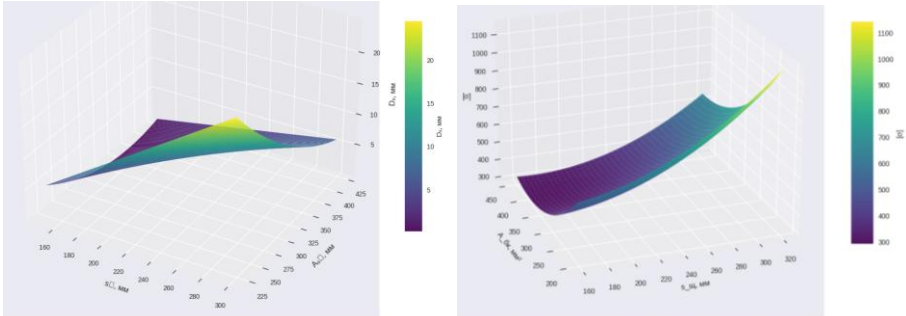


Рисунок 5. Поверхности отклика для перемещения Dx и максимального эквивалентного напряжения $[\sigma]$ от ширины щели $s_{\text{щ}}$ и площади сечения БК $A_{\text{БК}}$.

Анализ зависимостей (6), (7) и рисунка 5 показал, что ширина щели $s_{\text{щ}}$ и площадь сечения БК $A_{\text{БК}}$ оказывают противоположное направленное влияние на целевые отклики. Выявлено, что влияние ширины рабочего зуба b статистически незначимо. На основании этого рекомендовано фиксированное значение ширины рабочего зуба $b = 20$ мм. По результатам анализа поверхностей отклика определён рациональный диапазон ширины щели для грузовых шин типоразмера 22-26 составляющий 220–260 мм, который обеспечивает начальное перемещение $Dx \approx 10\text{--}15$ мм при уровне напряжений $\sigma \approx 500\text{--}700$ Мпа, удовлетворяющему условию неразрывности БК.

Разработана и реализована в виде программ на Python имитационная модель упругопластической деформации БК при его преобразовании из круговой формы в эллиптическую в процессе пластического деформирования (рисунок 6). Показано монотонное снижение усилия деформирования с

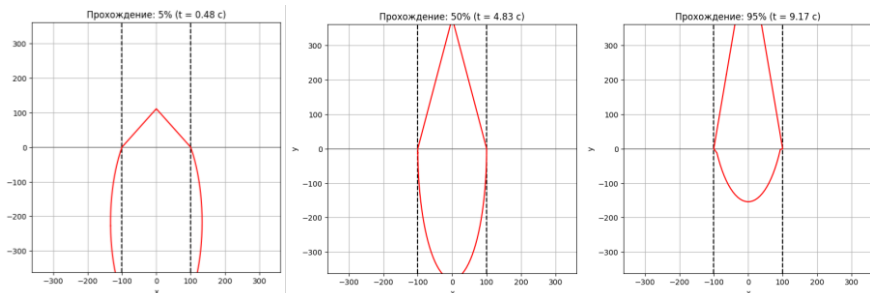


Рисунок 6. Графики изменения формы БК при протягивании через щель оборудования

увеличением ширины щели (на 9–11 % при изменении с 100 до 400 мм) и пропорциональный рост усилия с увеличением площади поперечного сечения кольца (рисунок 7).

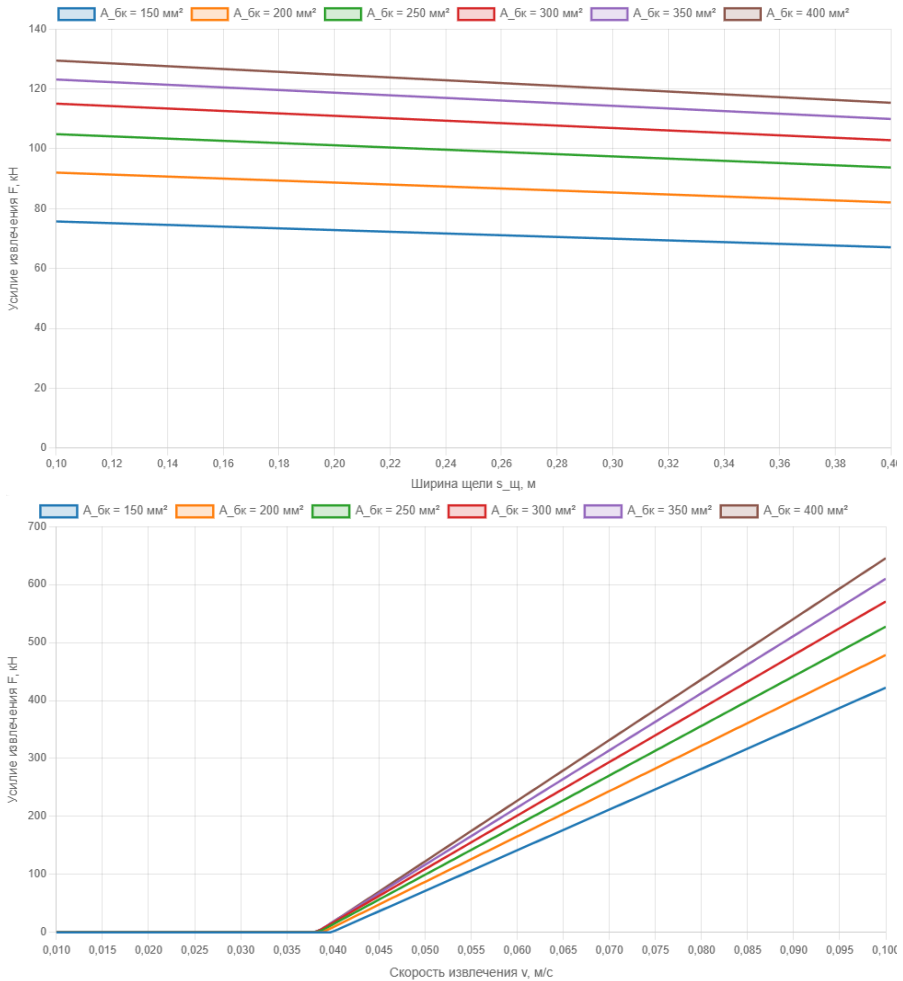


Рисунок 7. Графики зависимости усилия деформирования БК от ширины щели оборудования $s_{щ}$ и скорости извлечения v .

Выявлена зависимость усилия извлечения от скорости движения рабочего органа. Определен рациональный диапазон рабочих скоростей — 40–60 мм/с, при котором усилие находится в пределах 100–250 кН, а риск разрушения БК минимален. Определена максимальная ширина щели для извлечения БК из шин до 21 типоразмера: 150 мм. Обоснованы минимально необходимые габаритные параметры рабочей зоны установки для переработки шин до типоразмера R21: ширина 500–800 мм, высота не менее 1000 мм, ход рабочего органа не менее 850–900 мм.

В четвёртой главе проведены экспериментальные исследования с использованием установки (рисунок 8), являющейся физическим прототипом конструкции, предложенной в 3 главе.

Проведён комплекс натурных экспериментов на шинах посадочных диаметров 14–16 дюймов, в результате которых получены зависимости перемещения, скорости, усилия извлечения и энергопотребления от времени за один цикл. Подтвержден принятый рациональный диапазон конструктивного параметра ширины щели для легковых шин $s_{щ} = 100–150$ мм, установлено устойчивое снижение пикового усилия извлечения на 8–14,7 % при изменении ширины щели. Анализ экспериментальных данных, полученных на физическом прототипе установки, подтвердил высокую адекватность разработанной гибридной модели (5) процесса извлечения БК. Среднеквадратичная ошибка составила 5,5%.



Рисунок 8. Установка для извлечения БК из шин легковых автомобилей

разработанной установки достигает 35–45 штук в час, что на 20 процентов превышает показатели существующих аналогов с диапазоном 25–40 штук в час. Кроме того, эксплуатационные расходы снижены благодаря отсутствию гидравлической системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований решена научно-техническая задача повышения эффективности процесса извлечения бортовых колец автомобильных шин, получены следующие основные результаты:

1. Систематизация технологических и технических ограничений существующего оборудования для извлечения БК выявила необходимость его совершенствования, так как исследованные конструкции не обеспечивают требуемого сочетания производительности, энергоэффективности и способности работать с шинами всех типоразмеров. В качестве перспективного

Выполненная	оценка
экономической	эффективности
промышленного	варианта
предложенной конструкции установки	
показала, что при номинальной	
загрузке предприятия, составляющей	
35 000 шин в год, простой срок	
окупаемости равен 14,6 месяца, а при	
оптимальной нагрузке — 9,7 месяца.	
При этом энергопотребление за один	
цикл находится в диапазоне от 0,054 до	
0,061 кВт·ч, что в 3,5–4 раза ниже по	
сравнению с гидравлическими	
аналогами, потребляющими от 0,19 до	
0,25 кВт·ч. Производительность	

направления приняты установки с электромеханическим приводом и регулируемой кинематикой рабочего органа.

2. На основе анализа динамики процесса извлечения бортового кольца из изношенной шины определены критерии эффективности исследуемого процесса: максимальное усилие извлечения (F_{max}), скорость извлечения (v) и мощность привода (P). Для их оценки построена аналитическая модель процесса извлечения в общем виде, представленная балансом сил (1) с учётом ограничения на сохранение целостности бортового кольца. Модель включает пять основных составляющих сопротивления и устанавливает связь внешних параметров оборудования с внутренними конструктивными и физико-механическими параметрами шины. Процесс извлечения представлен в виде двух этапов: упругая деформация до разрыва резиновой оболочки и последующее пластическое деформирование при протягивании. Для каждого этапа получены системы уравнений (2) и (3), включающие дифференциальные уравнения движения рабочего органа, аналитические решения для перемещения $x(t)$, скорости извлечения $v(t)$, а также мощности необходимой для извлечения. Таким образом, основные энергозатраты приходятся на стадию разрыва резиновой оболочки.

3. Разработаны две оригинальные электромеханические установки для извлечения бортовых колец без предварительного разрезания шины (защищены патентами РФ № 201698 U1 и № 236885 U1). Конструкции используют электромеханические приводы, обеспечивают универсальность по типоразмерам шин, регулирование скоростей рабочего и холостого хода, снижение динамических нагрузок и сокращение длительности цикла на 20–35 % по сравнению с традиционными гидравлическими выдергивателями.

4. Разработана гибридная математическая модель для определения максимального усилия извлечения (4), учитывающая геометрические параметры шины: площадь сечения бортового кольца и резиновой оболочки, посадочный диаметр и технологические параметры оборудования - ширину щели и скорость извлечения. Выявлено доминирующее влияние площади металлического бортового кольца и нелинейный вклад резиновой оболочки. Выполнены натурные экспериментальные исследования.

5. Выполнено численное моделирование начальной стадии процесса извлечения бортового кольца методом конечных элементов с применением полного трёхфакторного ротatableльного униформ-планирования второго порядка. Получены статистически адекватные регрессионные модели ($R^2 = 0,986$ и $0,906$) зависимостей максимального перемещения бортового кольца D_x (6) и эквивалентного напряжения по Мизесу σ (7) от ширины щели, ширины рабочего зуба и площади поперечного сечения кольца. Установлено, что ширина щели и площадь сечения бортового кольца оказывают доминирующее, но противоположно направленное влияние на целевые отклики. Выявлено, что влияние ширины рабочего зуба статистически незначимо и рекомендовано фиксированное значение $b = 20$ мм. По результатам анализа поверхностей отклика определён рациональный диапазон ширины

щели 220–260 мм, который обеспечивает начальное перемещение $D_x \approx 10\text{--}15$ мм при уровне напряжений $\sigma \approx 500\text{--}700$ МПа.

6. Разработана и реализована в виде программ на Python имитационная модель упругопластической деформации БК при его преобразовании из круговой формы в эллиптическую в процессе пластического деформирования. Получено монотонное снижение усилия деформирования с увеличением ширины щели (на 9–11 % при изменении с 100 до 400 мм) и пропорциональный рост усилия с увеличением площади поперечного сечения кольца. Выявлена зависимость усилия извлечения от скорости движения рабочего органа при $v > 40$ мм/с. Определен рациональный диапазон рабочих скоростей — 40–60 мм/с, при котором усилие находится в пределах 100–250 кН, а риск разрушения БК минимален. Обоснованы минимально необходимые габаритные параметры рабочей зоны установки для переработки шин до типоразмера R21: ширина 500–800 мм, высота не менее 1000 мм, ход рабочего органа не менее 850–900 мм.

7. На основе запатентованной конструкции (патент РФ № 236885 U1) и теоретических исследований изготовлен лабораторный прототип электромеханической установки с тросовой системой. Экспериментально подтверждена адекватность разработанной в главе 2 гибридной модели: расхождения между расчётными и измеренными значениями максимального усилия не превышают 12 %. На основе теоретических моделей (глава 2), результатов численного и имитационного моделирования (глава 3) и натурных экспериментов (глава 4) разработана унифицированная инженерная методика, которая может быть использована на этапах проектирования и эксплуатации оборудования для извлечения БК.

8. Выполнена оценка экономической эффективности промышленного варианта электромеханической установки. Себестоимость изготовления одной установки составляет около 515 000 руб., отпускная цена – 700 000 руб. По сравнению с гидравлическими аналогами разработанная установка характеризуется в 3,5–4 раза меньшим энергопотреблением за цикл (0,054–0,061 кВт·ч против 0,19–0,25 кВт·ч для шины R22.5), более высокой производительностью (35–45 шт/ч против 25–40 шт/ч) и существенно меньшими эксплуатационными расходами за счёт отсутствия гидросистемы.

Рекомендации. Результаты диссертационной работы рекомендуются для использования на предприятиях по переработке резинотехнических отходов, а также для проведения лабораторных и практических работ кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО БГТУ им. В. Г. Шухова при подготовке студентов по направлениям бакалавриата 15.03.05 и магистратуры 15.04.05 – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», а также специалитета 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов».

Перспективы дальнейшего развития темы заключаются в масштабировании оборудования для предварительной переработки грузовых и крупногабаритных шин, а также в интеграции разработанного устройства в

состав автоматизированных комплексов по утилизации резинотехнических отходов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В российских рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Разработка установки с полиспастной системой для извлечения бортовых колец изношенных автомобильных шин / **К. В. Чуев**, Т. А. Дуюн, В. Я. Дуганов, Ю. А. Чуева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 2. – С. 3-12. – DOI 10.24412/2071-6168-2026-2-3-4. – EDN ZNWIXP.

2. Имитационное динамическое моделирование процесса извлечения бортового кольца / **К. В. Чуев**, Т. А. Дуюн, В. Я. Дуганов [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 4. – С. 133-143. – DOI 10.34031/2071-7318-2025-10-4-133-143. – EDN AXСJON.

3. **Чуев, К. В.** Технологические аспекты извлечения металлических компонентов из резинотехнических изделий / К. В. Чуев // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 12. – С. 106-115. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-12-106-115. – EDN DCQССK.

4. 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. – DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112. – EDN RBILLM.

В объектах интеллектуальной собственности:

5. Патент на полезную модель № 236885 U1 Российская Федерация, МПК В29В 17/02, В29В 17/00. Установка для удаления бортового металлического кольца из боковой части шины : заявл. 29.05.2025 : опубл. 28.08.2025 / **К. В. Чуев**, В. Я. Дуганов, Т. А. Дуюн [и др.]. – EDN ADBJRZ.

6. Патент на полезную модель № 201698 U1 Российская Федерация, МПК В29В 17/02. установка для удаления троса из боковой части шины при утилизации : № 2020133204 : заявл. 08.10.2020 : опубл. 28.12.2020 / В. Я. Дуганов, Н. А. Архипова, **К. В. Чуев**, Ю. А. Чуева ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – EDN LGNDPI.

Публикации в других изданиях:

7. **Чуев, К. В.** Основные виды утилизации резинотехнических изделий / К. В. Чуев, В. М. Кравченко, Э. А. Мутовалов // Образование. Наука. Производство : сборник докладов XV Международного молодежного форума (Белгород, 23–24 окт. 2023 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 49–52. – EDN OAQGN.

8. **Чуев, К. В.** Предварительная разделка изношенных шин / К. В. Чуев // Образование. Наука. Производство : сборник докладов XV Международного

молодежного форума (Белгород, 23–24 окт. 2023 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 45–48. – EDN ZQTXNH.

9. 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 : межвуз. сб. ст. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 168–174. – EDN DRXNGM.

10. **Чуев, К. В.** Особенности переработки резинотехнических изделий механическим способом / К. В. Чуев, О. В. Усачев, М. А. Макушева // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова : сб. докл. (Белгород, 20–21 мая 2024 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2024. – С. 95–100. – EDN NQQSHK.

11. **Чуев, К. В.** Способы и оборудование для механической утилизации резинотехнических изделий / К. В. Чуев, О. В. Усачев, М. А. Макушева // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова : сб. докл. (Белгород, 20–21 мая 2024 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2024. – С. 92–95. – EDN OXMIIN.

12. **Чуев, К. В.** Классификация автомобильных шин и оборудование для их переработки / К. В. Чуев, О. В. Усачев, М. А. Макушева // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова : сб. докл. (Белгород, 20–21 мая 2024 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2024. – С. 88–92. – EDN PWCNHP.

13. **Чуев, К. В.** Способы и оборудование для переработки изношенных шин / К. В. Чуев, О. В. Усачев, М. А. Макушева // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова : сб. докл. (Белгород, 20–21 мая 2024 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2024. – С. 82–88. – EDN RMHOUY.

14. **Чуев, К. В.** Геометрическая модель процесса извлечения бортового кольца из шины / Д. В. Лучников, К. В. Чуев, Е. Ю. Третьякова // Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова. Ч. 7: Высокоэффективные технологические процессы машиностроительных производств, технологическая робототехника (Белгород, 29–30 мая 2025 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2025. – С. 64–68. – EDN DIKCSX.

15. **Чуев, К. В.** Определение усилия для разрыва борта покрышки и начала извлечения БК / Д. В. Лучников, К. В. Чуев, П. С. Горохов // Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова. Ч. 7: Высокоэффективные технологические процессы машиностроительных производств, технологическая робототехника (Белгород, 29–30 мая 2025 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2025. – С. 68–73. – EDN SUVIBN.

16. **Чуев, К. В.** Определение ограничения по неразрыву бортовой проволоки при утилизации автомобильных шин / Д. В. Лучников, К. В. Чуев, Е. Ю. Третьякова // Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова. Ч. 7:

Высокоэффективные технологические процессы машиностроительных производств, технологическая робототехника (Белгород, 29–30 мая 2025 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2025. – С. 73–77. – EDN AKYXSG.

17. **Чуев, К. В.** Имитационное динамическое моделирование процесса извлечения бортового кольца из крупногабаритных шин / Д. В. Лучников, К. В. Чуев, Е. Ю. Третьякова // Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова (Белгород, 29–30 мая 2025 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2025. – С. 77–81. – EDN VTZYWQ.

18. **Чуев, К. В.** Разработка CAE-симуляции деформирования проволоки бортового кольца в процессе утилизации шины / Д. В. Лучников, К. В. Чуев, Е. Ю. Третьякова // Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова. Ч. 7: Высокоэффективные технологические процессы машиностроительных производств, технологическая робототехника (Белгород, 29–30 мая 2025 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2025. – С. 81–85. – EDN LZGTZO.

19. **Чуев, К. В.** Многостадийный процесс измельчения резинотехнических изделий / К. В. Чуев, О. В. Усачев, М. А. Макушева // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова : сб. докл. (Белгород, 20–21 мая 2024 г.). – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2024. – С. 77–82. – EDN BILKZS.

Подписано в печать 02.07.2026

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ №76

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