

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

На правах рукописи



Чуев Кирилл Витальевич

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

Специальность 2.5.21 Машины, агрегаты и технологические процессы

Диссертация на соискателя ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
д-р техн. наук, доц.
Дуюн Т. А.

Белгород, 2026

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА № 1. СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН.....	11
1.1 Анализ современных технологий переработки резинотехнических изделий.....	11
1.2 Особенности процесса и конструкции оборудования для механического дробления изношенных автомобильных шин.....	23
1.3 Сравнительный анализ оборудования для извлечения бортовых колец из утилизируемых шин.....	29
1.4 Результаты и выводы.....	38
ГЛАВА № 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ И КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ КОЛЕЦ.....	40
2.1 Определение конструкционно-технологических параметров процесса извлечения бортового кольца из борта шины.....	40
2.2 Построение аналитической модели процесса извлечения бортового кольца.....	45
2.2.1. Разработка математической модели с учетом ограничений на основе баланса сил.....	45
2.2.2. Определение усилия для разрыва борта шины и начала извлечения бортового кольца.....	53
2.2.3. Оценка энергетической эффективности процесса извлечения БК.....	61
2.3 Определение усилия извлечения бортового кольца с учетом влияния конструктивных параметров шины и оборудования.....	65
2.3.1. Анализ влияния конструктивных параметров шины и оборудования на максимальное усилие извлечения бортового кольца.....	65
2.3.2. Экспериментальное исследование силовых параметров процесса извлечения бортовых колец.....	72

2.3.3. Определение коэффициентов аналитической модели и статистическая верификация адекватности регрессионной зависимости экспериментальным данным.....	84
2.4 Результаты и выводы.....	90
ГЛАВА № 3. РАЗРАБОТКА КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ КОЛЕЦ.....	93
3.1 Компоновочные решения электромеханических установок для извлечения бортовых колец.....	93
3.2 Численное моделирование процесса начальной стадии деформирования бортового кольца при его извлечении.....	98
3.3 Разработка имитационной модели процесса деформирования бортового кольца.....	120
3.4 Результаты и выводы.....	132
ГЛАВА № 4. ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ КОЛЕЦ С ОЦЕНКОЙ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ.....	135
4.1 Разработка лабораторной установки для извлечения бортовых колец.....	135
4.2 Оценка энергосиловых параметров оборудования и верификация теоретических моделей.....	140
4.3 Экономическая оценка эффективности процесса извлечения бортового кольца предложенной конструкции установки.....	153
4.4 Общие рекомендации и унифицированная методика расчёта усилия извлечения бортового кольца.....	156
4.5 Результаты и выводы.....	158
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	161
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	179

ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	181
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	188
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	194
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	195
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	195

ВВЕДЕНИЕ

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 объем отходов, направляемых на захоронение, и способствует реализации принципов циркулярной экономики. Металлические компоненты БК шин, изготовленные из высококачественной стали, могут быть повторно использованы в металлургии. Существующие технологии извлечения БК характеризуются значительными энергозатратами и низкой производительностью, увеличивает себестоимость переработки.

Модернизация оборудования, направленная на снижение энергопотребления, позволяет сократить эксплуатационные расходы и повысить рентабельность предприятий по утилизации шин.

Технологические ограничения современных методов извлечения БК обуславливают актуальность работы. Традиционные подходы, такие как гидравлическое или механическое воздействие, требуют значительных усилий (до 200–240 кН для крупногабаритных шин) и энергозатрат (15–20 кВт на цикл), а также часто приводят к разрыву кольца, увеличивая трудозатраты на его извлечение. Кроме того, существующее оборудование недостаточно универсально для переработки шин различных типоразмеров, что увеличивает время цикла

В рамках национального проекта «Экология» и Стратегии научно-технологического развития РФ приоритет отдается увеличению доли перерабатываемых отходов до 60% к 2030 году. Модернизация оборудования для извлечения БК способствует достижению этих целей, обеспечивая

экологическую безопасность и создавая новые рабочие места в секторе переработки. Работа также отвечает требованиям государственной политики в области устойчивого развития и развития технологий для экологически чистого производства.

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. Прокопчуком, А. А. Вещевым, 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. Определение критериев эффективности процесса извлечения БК, влияющих на энергоэффективность и производительность.

3. Разработка аналитической модели динамики процесса извлечения БК, учитывающей критерии эффективности, с целью теоретического обоснования влияния конструктивно-технологических параметров оборудования на силовые характеристики и энергозатраты процесса.

4. Разработка компоновочных и кинематических схем оборудования для извлечения БК, обладающих высокой энергоэффективностью и производительностью.

5. Определение рациональных значений конструктивно-технологических параметров оборудования на основе теоретических и экспериментальных исследований.

6. Разработка лабораторного прототипа установки для извлечения БК, экспериментальное подтверждение конструкционно-технологических параметров и верификации теоретических моделей.

Научная новизна:

1. Построена аналитическая модель процесса извлечения БК в виде баланса сил, учитывающая этапы упругопластической и пластической деформации, условие неразрывности металлического кольца, позволяющая вычислить перемещение, скорость и мощность извлечения.

2. Разработаны численная модель начальной стадии деформации кольца и имитационная модель упругопластического преобразования БК из круговой формы в эллиптическую с учетом влияния конструктивно-технологических параметров шины и оборудования.

3. Получена гибридная математическая модель максимального усилия извлечения, построенная с учётом теоретических исследований и натуральных испытаний, которая позволяет определить рациональные

конструктивно-технологических параметры оборудования, и способствует повышению эффективности процесса.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана аналитическая модель процесса БК в виде баланса сил, с учётом этапов упругопластической и пластической деформации.
2. Разработана численная модель начальной стадии деформации БК и имитационная модель упругопластического преобразования БК из круговой формы в эллиптическую с учетом влияния конструктивно-технологических параметров шины и оборудования.
3. Гибридная математическая модель максимального усилия извлечения БК, включающая эмпирические коэффициенты.

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 и переналадки для различных типоразмеров шин.
2. Разработана методика расчета основных технологических и конструктивных параметров оборудования для извлечения бортовых колец 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. Две конструкции на основе электромеханических компоновок, защищенные патентами РФ на полезную модель (№ 201698 U1 от 28.12.2020 и № 236885 U1 от 28.08.2025).

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

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

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

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

6. Методика численного моделирования, разработанная для анализа деформаций БК, позволяющая оптимизировать технико-конструкционные параметры оборудования.

Степень **достоверности полученных результатов** обеспечивается за счет использования точного измерительного и технологического оборудования, применения современного программного обеспечения для имитационного моделирования, применения аттестационных методик исследований, использования многочисленных экспериментальных данных, а также сравнения полученных экспериментальных результатов с теоретическими.

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: 197 страниц. Диссертационная работа содержит 34 таблицы, 64 рисунка и 6 приложений. Список литературы включает 112 источников.

Глава № 1. СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ИЗНОШЕННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

1.1 Анализ современных технологий переработки резинотехнических изделий

Развитие автомобильного транспорта приводит к накоплению большого количества отходов, таких как изношенные шины и резинотехнические изделия (далее РТИ).

Использованные шины являются долговременным экологическим риском, так как не разлагаются более 100 лет и могут нанести вред окружающей среде на десятилетия вперед [1, 2]. Изношенные шины и РТИ выбрасываются на свалки, где они занимают большие площади и становятся источником загрязнения почвы и воды. Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов отработавшие шины относят к IV классу опасности - малоопасные отходы [3], что означает низкую степень негативного воздействия на окружающую среду, время восстановления после ущерба не менее 3 лет.

При больших объемах складирования и воздействии прямых солнечных лучей возможно возгорание утилизируемых шин. При сжигании шин выделяются токсичные вещества, относящиеся уже к I и II классу опасности (токсичные группы опасных отходов), которые могут нанести серьезный вред здоровью человека и окружающей среде. Согласно данным Росстата за 2022 год, на каждые 1000 человек в России приходится 327 собственных автомобилей [4]. Исходя из того, что в России проживает 146,4 миллионов человек, можно предположить, что общее количество личных автомобилей в стране составляет 47,9 миллионов.

Средний срок службы автомобильной шины составляет 5 лет. Это означает, что каждые 4-5 лет количество изношенных легковых шин увеличивается более чем на 191 миллион штук. Если принять во внимание

среднюю массу одной автомобильной шины в 7 кг, то прирост составляет 1,34 миллиона тонн за 5 лет или 268 тысяч тонн в год. Если брать в расчёт грузовой транспорт, то прирост РТИ отходов возрастает в несколько раз. Это связано с тем, что масса шины и их количество на грузовых автомобилях и спецтехнике превышает показатели легковых автомобилей, а срок службы такой шины значительно меньше. Так по данным статьи «Утилизация и переработка шин в крошку» Невядомской А. И. [5], количество отработанных шин на 2015г. достигает порядка 900 тыс. тонн в год (рисунок 1.1.).

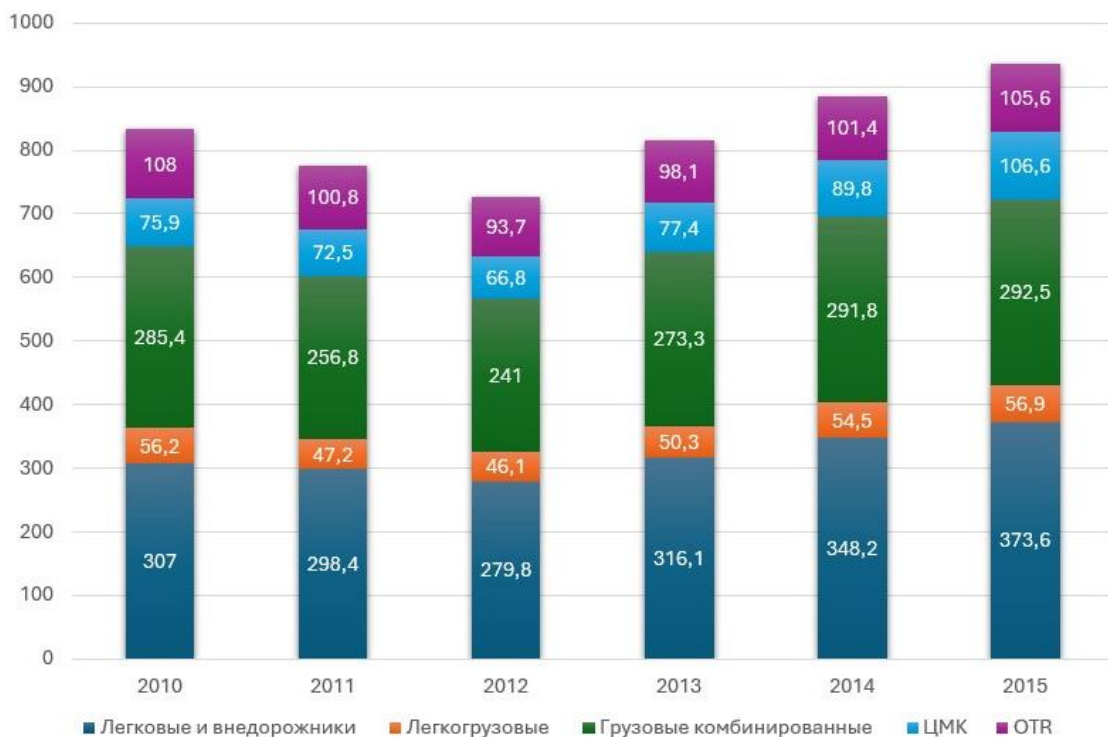


Рисунок 1.1. Общий объём отработанных шин в РФ за 2010-2015 гг., тыс. тонн [5]

В Российской Федерации обращение с отходами, в том числе в области бывших в употреблении шин, регулируется рядом нормативно-правовых документов. В соответствии с Федеральным законом № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [6] деятельность по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и размещению отходов I-IV классов опасности лицензируется. Данный закон регламентирует определенные требования по хранению отходов, требования к лицам, допущенным к данному виду деятельности.

Отработанные автомобильные шины и покрышки в обязательном порядке должны сдаваться в специализированные пункты приема для дальнейшей их переработки, согласно распоряжению Правительства Российской Федерации № 1589-р от 25.07.2017» [7]. В документе утвержден «Перечень запрещенных к захоронению видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты». За несоблюдение этого запрета законодательство предусматривает административную ответственность. Нарушителю грозит штраф в размере до 2 тысяч рублей для физических лиц и до 250 тысяч рублей или административное приостановление деятельности на срок до 90 суток по решению суда для юридических лиц.

Использованные автомобильные шины содержат ценные материалы такие как каучук, металл и текстильный корд, которые остаются неизменными в процессе и после эксплуатации шин. Путем переработки шин можно получить новые продукты, которые находят применение в различных отраслях производства, и снизить влияние отходов на окружающую среду [8, 9, 10]. В настоящее время к продуктам переработки РТИ относят:

1. Регенерат - пластичный материал, который может быть подвергнут технологической обработке и вулканизации при добавлении вулканизирующих агентов. Его добавление в резиновые смеси позволяет сократить использование каучука, наполнителей и пластификаторов. Регенерат повышает стойкость к атмосферному старению, окислению, высокой температуре и увеличивает сопротивление трещинам, что также способствует уменьшению отходов и повышению экологической безопасности производства [11].

2. Резиновая крошка - измельченный материал, получаемый при переработке изношенных шин и резиновых отходов, с размером частиц от 0,2 до 10 мм. Её применение в качестве эластичного наполнителя для покрытий спортивных и промышленных сооружений, добавки в асфальтобитумные

смеси и других резинотехнических изделий позволяет сократить использование первичного каучука и минеральных наполнителей [12, 13].

3. Жидкие углеводородные смеси - продукт термического разложения резинотехнических изделий (преимущественно изношенных шин) в бескислородной среде при температурах 400-800°C. Данные смеси представляют собой сложную комбинацию ароматических, алифатических и гетероциклических соединений с преобладанием фракций, соответствующих по составу тяжелым нефтепродуктам [14].

4. Пиролизный газ - газообразный продукт термического разложения резинотехнических изделий, в бескислородной среде при температурах 450-900°C. Он состоит из метана (15-30%), водорода (5-20%), этилена (10-25%), пропилена (5-15%), а также содержит углекислый газ (5-15%) и азот (до 10%) [15, 16]. Основное применение пиролизного газа включает его использование в качестве топлива для энергетических установок, где он может генерировать тепло и электроэнергию, снижая потребность во внешних энергоресурсах. Часть газа часто возвращается в технологический процесс для поддержания температуры пиролиза, повышая общую энергоэффективность установки [17].

5. Металлический лом – твёрдый продукт переработки изношенных шин и армированных резинотехнических изделий, выделяемый на стадиях механического измельчения или термического разложения. Представлен преимущественно фрагментами стального корда (бортовые кольца, проволока) и частицами металлических включений, извлечёнными из резиновой матрицы. Металлический лом может быть возвращён в металлургический передел для выплавки стали, используется в качестве шихтового материала в литейном производстве или как добавка в тяжёлые бетоны [18, 19].

6. Текстильная масса – волокнистый продукт, образующийся при механической переработке шин и РТИ, содержащих текстильный корд (нейлон, полиэстер, вискоза, реже – арамид). Представляет собой смесь коротких и длинных волокон (1–20 мм), отделённых от резиновой основы при

помощи грохочения, аспирации или пиролиза. Текстильная масса используется в качестве армирующего наполнителя для строительных композитов, добавки в битумные мастики и кровельные материалы, а также как компонент сырья для производства нетканых материалов и топливных гранул низкого качества. [20, 21].

Существует несколько основных методов переработки изношенных шин: восстановление, термический, физико-механический и альтернативный методы [22, 23].

Наиболее экологичным способом переработки шины является восстановление шины: это позволяет использовать существующие материалы и не создавать новые отходы. Стоимость восстановления шины существенно ниже, чем покупка новой [24]. Несмотря на то, что после восстановления шина теряет часть своей первоначальной прочности, её срок службы увеличивается. При восстановлении шины может обновляться как её протектор, так и боковина. Если шина достигает неисправимого износа, её необходимо утилизировать одним из предложенным ниже способов [25].

Термический метод основан на воздействии высоких температур на полимерсодержащее сырьё. Условия проведения процесса (температурный режим, наличие кислорода) и состав конечных продуктов варьируются в зависимости от выбранного способа. В результате образуются следующие продукты: пиролизное масло, технический углерод, горючий газ и металлический корд. Эти методы позволяют полностью утилизировать шины, получая при этом энергоресурсы и сырьё для химической промышленности. Однако они требуют сложного оборудования и контроля за выбросами [26, 27, 28].

К наиболее распространённым способам переработки термического метода относятся: пиролиз [29, 30, 31, 32], газификация [33], простое сжигание [34, 35, 36]. При реализации некоторых из указанных способов термической переработки, в частности при пиролизе и газификации, возникает необходимость предварительного извлечения бортовых колец из шин. Это

связано с тем, что наличие металлических элементов может негативно сказаться на работе оборудования, привести к его износу или засорению конечных продуктов переработки [37].

К альтернативным подходам утилизации изношенных шин можно отнести:

Биологическая деградация - перспективный метод с использованием специализированных микроорганизмов, способных разлагать резиновые компоненты. В настоящее время технология находится в стадии активной разработки и тестирования [38, 39].

Применение целых шин в строительстве представляет собой временное решение, включающее использование покрышек в качестве элементов волнорезов, подпорных стенок и ландшафтных объектов [40]. Хотя такой подход и не является переработкой в полном смысле слова, он позволяет отсрочить необходимость утилизации. Однако данная практика не решает проблему накопления значительного количества отработанных шин, а лишь переносит ее во времени. Более того, при неправильном проектировании или нарушении условий эксплуатации использование целых шин в строительных конструкциях может привести к обратному эффекту и значительно ухудшить экологическую ситуацию [41].

Захоронение на полигонах - наименее экологичный способ, который постепенно выводится из практики в развитых странах. В России и многих других государствах законодательство все более ужесточает требования к такому способу утилизации, стимулируя переход к перерабатывающим технологиям [42].

Физико-механический метод основан на механическом измельчении шин без изменения химического состава резины. Этот процесс включает несколько этапов: удаление металлического корда, резку шин на крупные фрагменты, дробление в специальных установках до получения резиновой крошки различной фракции [43, 44]. Основные преимущества этого метода - экологичность и сохранение ценных свойств резины. Физико-механический

метод включает: дробление шин механическим способом, дробление шин взрывом, бародеструкция и криодеструкция [45].

Механическое дробление – это самый популярный способ переработки РТИ за счёт сочетания высокой экономической эффективности, экологичности и возможности точного контроля фракционного состава (0,2–10 мм), что позволяет перерабатывать до 95% массы сырья. Процесс включает несколько этапов: удаление бортовых колец, резку шин на сегменты, отделение металлокорда и текстиля, а также дробление резины с помощью шредеров, дробилок и сепараторов. Основные ограничения метода – износ режущих элементов оборудования и необходимость предварительной сортировки шин по размерам и типу конструкции [46].

Взрывное дробление шин основано на энергии направленного взрыва в специальной камере. Ударная мгновенно разрушает резиновую оболочку, обеспечивая отделение металлического и текстильного корда. В результате получается резиновая крошка с размером частиц 5–50 мм [47]. Преимуществами подхода являются низкое энергопотребление по сравнению с механическими аналогами и возможность перерабатывать шины без предварительной подготовки. Однако широкое внедрение сдерживают строгие требования безопасности, необходимость лицензирования взрывных работ и высокая капиталоемкость оборудования.

Бародеструкция представляет собой способ утилизации, при котором резина разрушается за счет резкого сброса давления сжатого газа. Этот процесс позволяет получить крошку без нарушения молекулярной структуры полимера [48]. Перед обработкой шины разрезают на фрагменты и удаляют бортовые кольца. Плюсами технологии считаются отсутствие термического воздействия, экологическая чистота процесса и универсальность по отношению к типам армирования. Минусами выступают дороговизна установок и высокие требования к квалификации операторов, работающих с системами высокого давления.

Криогенное дробление основано на охлаждении резины до температур ниже -80°C с помощью жидкого азота или углекислого газа. При переходе в хрупкое состояние материал легко измельчается ударным способом. Это обеспечивает получение фракций с четкими границами и минимальным количеством примесей. Процесс состоит из нескольких этапов: предварительного измельчения шин на крупные куски, заморозки в криокамере, ударного дробления и финальной сепарации корда с использованием специализированного оборудования. Преимущества метода - низкое энергопотребление при больших объёмах, экологическая безопасность и возможность переработки шин любого типа и размера, а ограничения - высокая стоимость криогенных агентов, необходимость тщательной подготовки сырья и повышенные требования к безопасности работы с низкотемпературными материалами [49].

В совокупности проведённого следует заключить, что каждый из рассмотренных подходов утилизации изношенных автомобильных шин обладает как определёнными преимуществами, так и технологическими или экономическими ограничениями. Основные методы переработки и их ключевые особенности приведены в Таблица 1.1.

На Рисунок 1.2 представлена диаграмма по основным методам утилизации РТИ в мире на 01.05.2025г., согласно [50]. Значительную часть утилизации изношенных шин и резинотехнических изделий занимают экологически неблагоприятные процессы — складирование на полигонах (53 %) и простое сжигание (20 %). Эти методы не позволяют эффективно использовать вторичные ресурсы и приводят к дополнительной нагрузке на окружающую среду.

Таблица 1.1 - Сравнительный анализ методов переработки изношенных шин

Метод переработки	Основные продукты на выходе	Преимущества	Ограничения	Стоимость / затраты (руб./т)	Стоимость оборудования (руб.)	Доля внедрения (%) *
<i>1. Дробление шин механическим способом</i>	Резиновая крошка, металл, текстиль	Отработанная технология, простота внедрения, широкий спектр применения	Сильный износ оборудования, необходимость сортировки	7 200 – 27 000 (до 81 000 для спец. применений)	4,5 – 27 млн	17%
2. Дробление шин взрывом	Фрагменты резины, металл	Высокая производительность, возможность переработки крупных шин	Высокая аварийность, шум, дорогостоящая защита	н/д	н/д	<1%
<i>3. Бародеструкция</i>	Резиновая крошка мелкой фракции	Возможность тонкого измельчения, отсутствие азота	Высокая энергоёмкость, опытные образцы	н/д	н/д	<1%
<i>4. Криодеструкция (криогенное дробление)</i>	Мелкодисперсная крошка	Чистое разделение резины, металла и текстиля	Дорогой жидкий азот, нерентабельность	18 000 – 90 000	45 – 180 млн	<1%
<i>5. Пиролиз</i>	Пиролизное масло, газ, технический углерод, металл	Получение энергоносителей и вторичных продуктов	Низкий выход ценных продуктов, необходимость очистки	≈ 18 000	1,8 – 45+ млн	5%
<i>6. Газификация</i>	Синтез-газ, тепло	Высокая степень конверсии (до 90 %), выработка энергии	Высокие капитальные затраты, сложность очистки газа	55 890 – 74 520 (капзатраты)	> 90 млн	2%
7. Простое сжигание (TDF)	Тепло, энергия	Утилизация больших объёмов, возможность применения в цементных печах	Высокие выбросы, потеря ценных компонентов	н/д	Интегрировано в ТЭЦ	20%

* - доля внедрения методов переработки РТИ в мире на 2024 г., согласно [50]

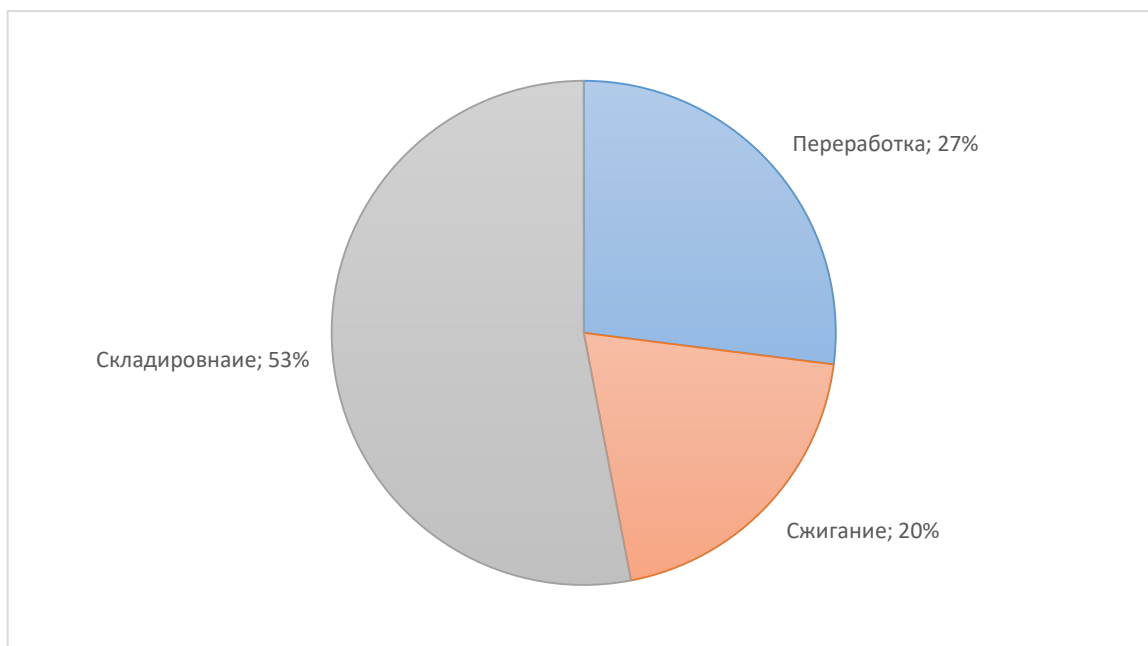


Рисунок 1.2. Методы утилизации РТИ

Вместе с тем наблюдается тенденция к развитию технологий рециклинга и переработки РТИ (Рисунок 1.3). Наибольшую долю среди них занимает механическая переработка (63% от всех перерабатываемых шин), обеспечивающая получение резиновой крошки и вторичных материалов для повторного применения. Несмотря на сравнительно меньший удельный вес по сравнению с «вредными» методами утилизации (17% механической переработки против 73% складирования и сжигания), именно механическая переработка рассматривается как наиболее перспективное направление повышения экологической эффективности обращения с изношенными шинами.

Термические методы (пиролиз, газификация – 26% среди переработки) обеспечивают полное разложение резинотехнических изделий и получение энергетически ценных продуктов, однако их реализация сопряжена с высокой капиталоемкостью, необходимостью многоступенчатой очистки выбросов и повышенными требованиями к экологической безопасности. Альтернативные технологии (биodeградация, применение взрывного воздействия, баро- и криодеструкция – 12% среди переработки) характеризуются высокой степенью новизны, однако находятся на стадии ограниченного

промышленного внедрения ввиду значительных затрат, специфичности оборудования и повышенных требований к условиям эксплуатации. Методы восстановления шин являются экономически оправданными, но их применение ограничено пределами остаточного ресурса покрышек.

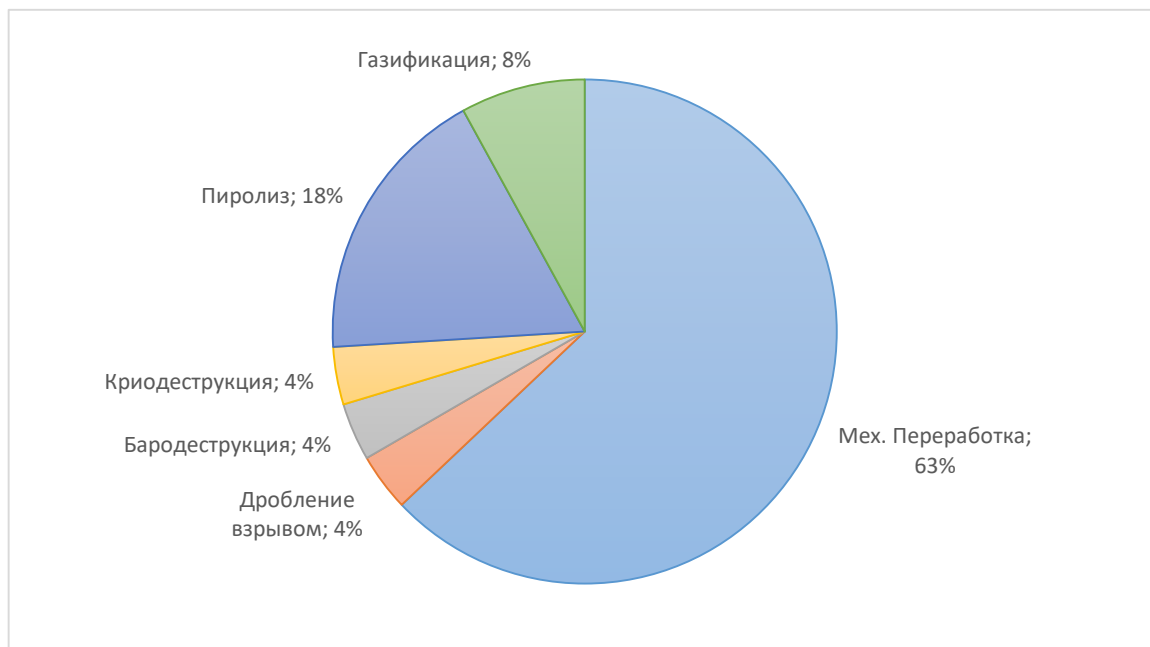


Рисунок 1.3. Методы переработки РТИ

В этом контексте наибольшую практическую и научно-техническую значимость представляет физико-механический метод переработки, в частности механическое измельчение, позволяющее извлекать до 95 % массы исходного сырья в виде резиновой крошки, металлического корда и текстильных волокон. Принципиальное преимущество данного подхода заключается в сохранении исходной структуры полимерной матрицы и, как следствие, в возможности дальнейшего вторичного использования полученных материалов без ухудшения их эксплуатационных характеристик. Экологическая чистота процесса, широкий диапазон фракционного состава конечного продукта, развитая номенклатура технологического оборудования и наличие апробированных промышленных схем делают механическое измельчение наиболее сбалансированным способом утилизации шин. Несмотря на отдельные ограничения, связанные с интенсивным износом режущих элементов и необходимостью предварительной сортировки сырья,

физико-механический метод демонстрирует оптимальное сочетание технологической доступности, экономической целесообразности и экологической безопасности, что обуславливает его распространение в регионах с развитой горной добычей и металлургией, где сосредоточены предприятия, способные обеспечить экономическую целесообразность утилизации резинотехнических изделий, а также в крупнейших агломерациях страны – Москве, Санкт-Петербурге, Татарстане и Нижегородской области.

На Рисунок 1.4 представлен географический обзор переработки шин в России с выделением ключевых регионов, где эта отрасль наиболее развита.

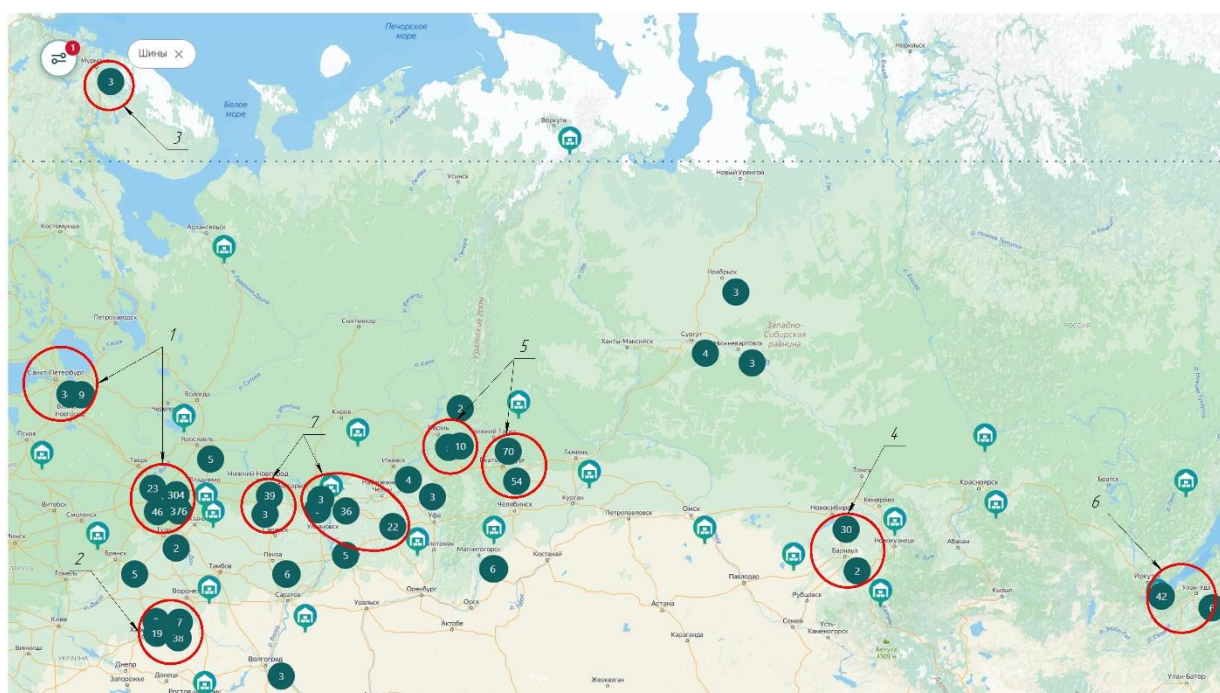


Рисунок 1.4. Карта пунктов сбора использованных шин в части РФ [51]

География пунктов сбора и переработки отработанных шин в России неравномерна и привязана к транспортно-промышленным агломерациям. Большое количество таких пунктов располагаются в Москве и Санкт-Петербурге (Рисунок 1.4, 1), где наблюдается самый высокий уровень автомобилизации и логистическая концентрация. В Белгородской (Рисунок 1.4, 2), Мурманской (Рисунок 1.4, 3) областях, а также на Кузбассе (Рисунок 1.4, 4) и Урале (Рисунок 1.4, 5) количество пунктов приёма и переработки связано с развитой деятельностью горнодобывающих компаний. Иркутская область (Рисунок 1.4, 6) выделяется сочетанием промышленности и

географического положения Отдельный крупный кластер образуют области специализирующиеся на автомобилестроении и добычи полезных ископаемых Республика Татарстан и Нижегородская область. (Рисунок 1.4, 7).

Анализ показывает, что распределение предприятий по переработке носит неравномерный характер: при высокой концентрации мощностей в промышленных и урбанизированных регионах значительная часть территории страны фактически не охвачена этой отраслью. Такое положение препятствует масштабному внедрению современных решений по переработке шин.

1.2 Особенности процесса и конструкции оборудования для механического дробления изношенных автомобильных шин

Классификация шин по типоразмерам имеет принципиальное значение для выбора методов их переработки, так как конструктивные особенности и соотношение содержания резины, текстиля и металла напрямую определяют сложность технологических операций. Усредненные данные по составу шин представлены в Таблица 1.2.

Таблица 1.2 - Содержание материала в шинах разных типоразмерах, %

Материал	Легковые	Грузовые	ЦМК	С/Х	Индустр	КГШ
Металл	7	10	23	3	3	3
Резина	78	76	77	73	70	81
Текстиль	15	14	0	24	27	16

В научной литературе и технических нормативных документах выделяются несколько групп, различающихся по массе, содержанию материалов и конструктивной прочности [52, 53, 54]. В данной работе выделены три основные категории исходя из количества технологических операций, необходимых для их переработки:

1. Легковые шины
2. Некрупные грузовые шины (малотоннажные грузовики, автобусы малого класса)
3. Крупные грузовые, специальные и крупногабаритные шины.

Легковые шины являются наименее массивными изделиями, средняя масса которых составляет 8–15 кг. Их структура характеризуется преобладанием резины при относительно небольшом количестве текстиля и металла. В качестве армирующего материала широко используется текстильный корд, а металлическое бортовое кольцо отличается небольшой толщиной и не создаёт значительных затруднений при переработке. Основной технологический процесс утилизации данной категории шин сводится к прямому измельчению до резиновой крошки или порошка с одновременным отделением металлических и текстильных включений [55].

Некрупные грузовые шины обладают более развитым каркасом и существенно большей массой, достигающей 30–70 кг. В их составе возрастает доля металлокорда, в то время как роль текстильных элементов снижается. Усиленные бортовые кольца и высокая плотность протектора требуют дополнительных операций при переработке. На практике такие шины сначала разделяют на сегменты или чипсы, что облегчает последующее измельчение [56]. После сегментации осуществляется измельчение до фракции резиновой крошки, по аналогии с легковыми шинами.

Крупные грузовые, специальные и крупногабаритные шины (КГШ) представляют собой наиболее сложный объект переработки. Масса таких изделий может варьироваться от 100 кг до нескольких тонн. Их конструкция в основном состоит из резины и текстильного корда, при этом металл сосредоточен в бортовой зоне. Здесь располагаются массивные бортовые кольца из стальной проволоки, которые делают невозможным прямое измельчение шин без предварительной подготовки. Переработка КГШ начинается с извлечения бортовых колец – эта операция обязательна для предотвращения повреждения режущего и дробильного оборудования. После удаления металлических элементов шины разрезаются на сегменты, пригодные для дальнейшего измельчения [57]. На заключительных стадиях материал подвергается многоступенчатой механической обработке с отделением текстильных и резиновых фракций [56].

Следует отметить, что операция извлечения бортовых колец применяется не только при переработке крупногабаритных шин, но и для остальных категорий. Несмотря на то, что в легковых и некрупных грузовых шинах металлические кольца относительно невелики по массе и сечению, их удаление позволяет существенно снизить износ режущих и дробильных узлов, а также увеличить срок службы оборудования. Практика показывает, что предварительное удаление металлических элементов способствует более стабильной работе технологической линии, уменьшает вероятность аварийных остановок и повышает эффективность последующего измельчения. В связи с этим в современных технологических схемах переработки шин извлечение бортовых колец рассматривается как универсальный этап, целесообразный для всех типоразмеров [58].

На основе анализа конструктивных особенностей различных типоразмеров шин была составлена обобщённая схема технологического процесса переработки, представленная в Таблица 1.3.

Таблица 1.3 - Технологический процесс дробления шин механическим способом

Этап переработки	Легковые шины	Некрупные грузовые шины	Крупные грузовые, спецшины, КГШ
Приём и сортировка	Проверка на повреждения, сортировка по типоразмеру		
Извлечение бортового кольца	<i>Рекомендуется для снижения износа оборудования</i>		Обязательная операция
Предварительное разрезание / сегментация	–	Разделение на сегменты или чипсы	
Основное измельчение	Прямое измельчение до крошки или порошка	Измельчение после сегментации	Многостадийное измельчение после удаления бортовых колец
Отделение металлических элементов	Магнитное отделение		
Отделение текстильных фракций	Механическое отделение		
Получение готового продукта	Резиновая крошка Текстиль Металл		

При утилизации изношенных шин посредством переработки в большинстве случаев, используется многостадийный технологический процесс [59]. На его первых операциях получают промежуточный продукт, который в дальнейшем доводят до состояния необходимого сырья.

Предварительная нарезка изношенных шин применяется для облегчения их дальнейшей переработки и заключается в разделении цельной покрышки на более мелкие элементы – кольца, полосы или сегменты. Для этого шину фиксируют на оправке или укладывают в рабочую зону станка, где она удерживается в стабильном положении. Затем к поверхности подводится режущий инструмент или специальный элемент для разрыва, после чего шина приводится во вращение либо на неё создаётся давление. В результате происходит последовательное рассечение резино-ткане-металлической структуры, и покрышка распадается на отдельные части, удобные для последующего дробления и измельчения [60, 61].

Наиболее распространёнными способами предварительной разделки шины являются устройства по разрезанию шин на полосы и кольца [62, 63] или на сегменты [64, 65] (Рисунок 1.5).



Рисунок 1.5. Оборудования для предварительной разделки шин на части [66, 67]

После разрезания полученные элементы направляются к оборудованию для дальнейшего измельчения. Здесь в работу включаются различные механизмы – дробилки, шредеры и барабанные установки, которые уже не режут, а последовательно разрушают и истирают материал, превращая его в

крошку или гранулы. Такие устройства работают с меньшими усилиями, чем при попытке переработки цельной покрышки, поскольку внутренние напряжения и целостность каркаса были нарушены ещё на стадии предварительной нарезки [68].

Один из традиционных способов переработки основан на прокатке элементов шины между вращающимися валками [69, 70, 71]. При прохождении через зазор между цилиндрическими или коническими поверхностями происходит сжатие и раздавливание материала, что приводит к его разрушению и отделению металлических элементов от резиноканевой массы. На выходе получается крошкообразная смесь, включающая резину, остатки текстиля и выделенный металлокорд. Такой метод позволяет максимально использовать давление и сдвиговые усилия, что делает его эффективным для первичного измельчения. (Рисунок 1.6).



Рисунок 1.6. Оборудование для переработки изношенных покрышек с использованием валков [72]

Другим распространённым подходом являются использование шредеров, которые применяются на большинстве производственных линий [73, 74]. Их работа основана на вращении режущих элементов в горизонтальной или вертикальной плоскости, благодаря чему покрышка дробится на более мелкие фрагменты. Для достижения требуемого размера гранул обычно используется многостадийная схема, включающая каскад измельчителей разного типа, систему конвейеров и сепараторов. В более современных установках несколько стадий совмещены в одной машине:

сначала происходит грубое резание и разрыв материала, а затем – тонкий помол с получением однородной фракции плоскости (Рисунок 1.7).

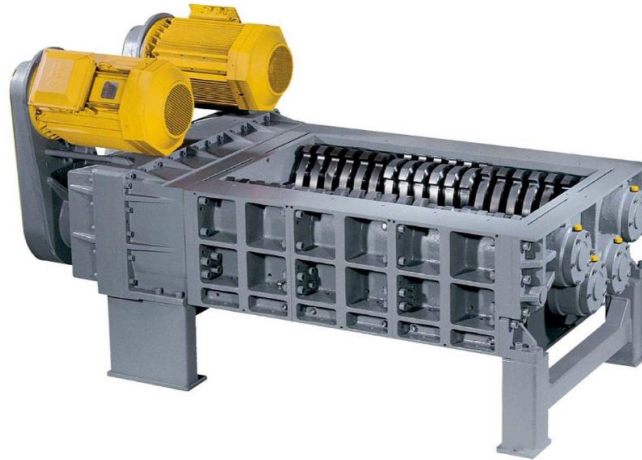


Рисунок 1.7. Шредер горизонтальной конструкции [74]

Третий способ – фрезерование резинового корда [75]. В этом случае покрышка фиксируется в зажимном устройстве, которое может поворачиваться вдоль оси колеса для удобства обработки. Рабочим органом выступает фреза или шарожка, которая вращается и по поступательной траектории внедряется в поверхность резины. Постепенно снимаются слои материала, а металлический корд высвобождается. Такой метод обеспечивает более контролируемое измельчение и позволяет получать материал с заданными характеристиками, но требует точной настройки оборудования (рисунок 1.8.).

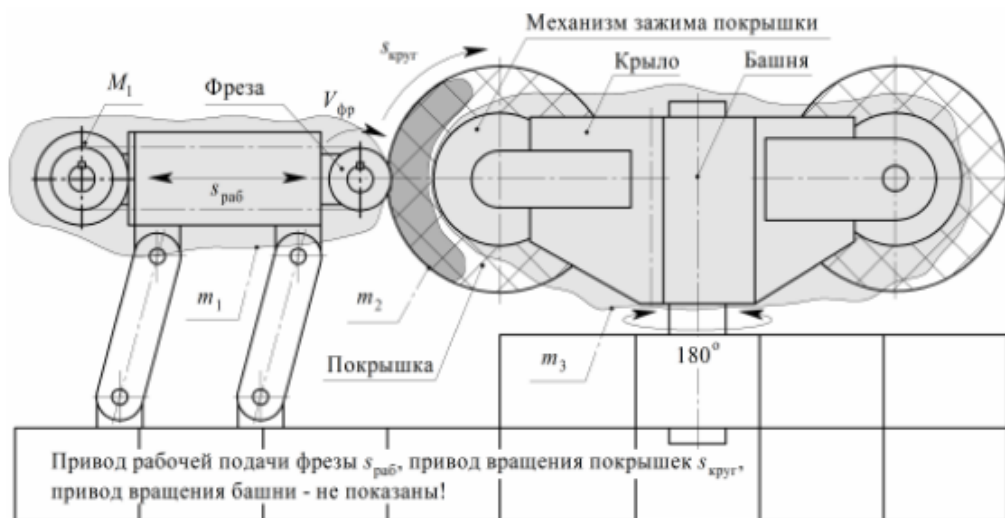


Рисунок 1.8. Схема оборудования для переработки шин фрезерованием [76]

Оборудование для измельчения в резиновую крошку предназначено для переработки тонкой кордной проволоки, а не толстой проволоки бортового кольца. Поэтому отдельного внимания заслуживает операция извлечения бортовых колец, без которой весь процесс переработки не может считаться эффективным и безопасным.

Таким образом, рассмотренные способы предварительной нарезки и последующего измельчения позволяют подготовить шину к дальнейшей переработке, существенно снижая энергозатраты и нагрузку на оборудование, но только при условии удаления бортовых колец.

1.3 Сравнительный анализ оборудования для извлечения бортовых колец из утилизируемых шин

Металлическая проволока в зоне борта представляет наибольшую сложность для оборудования и зачастую становится причиной ускоренного износа режущих и дробильных узлов, поэтому удаление бортовых колец рассматривается не как вспомогательная, а как обязательная операция, определяющая эффективность и ресурс всей технологической линии переработки.

Согласно действующему ГОСТ Р 57673-2017 «Проволока бортовая (для шин)» [77], который распространяется на проволоку для усиления бортов шин всех типов, нормативно установлены следующие формы поперечного сечения: круглое и прямоугольное. При этом единого государственного стандарта, который бы описывал исключительно форму поперечного сечения готового бортового кольца, не существует. Требования к геометрии сечения содержатся в патентах и технической литературе [78, 79], а ГОСТ 26366-84 «Проволока стальная латунированная для бортовых колец шин. Технические условия» [80] регламентирует лишь свойства проволоки (диаметр, прочность, равнопрочность), из которой кольцо изготавливается. Форму сечения определяет производитель шин в своих технических условиях (ТУ) или конструкторской документации.

Существующие решения для извлечения бортовых колец можно разделить на несколько основных групп:

1. Механические устройства (валки)
2. Режуще-вырубные установки
3. Гидравлические прессы и вытягиватели

Каждая из этих категорий имеет собственный принцип работы, область применения и технологические ограничения.

Механические устройства (валки) могут отделять металлические включения, находящиеся в РТИ посредством сжатия между вращающимися цилиндрическими валками. Предварительно разрезанная на полосы или кольца шина вводится между валками, где механические усилия сдвига, давления и трения обеспечивают отделение стальной проволоки от резины, не разрушая металлический каркас [81]. В связи с этим бортовые кольца должны иметь сопоставимый диаметр с диаметром проволоки металлокорда. Это является как достоинством для переработки легковых шин, так как отпадает необходимость в приобретении дополнительного оборудования для отделения металла, так и недостатком, ведь для грузовых и КГШ необходимо использование устройств с большими габаритами и большим усилием.

Примером служит: «Устройство для отделения металлокорда от резины в изношенных шинах» [82] (Рисунок 1.9).



Рисунок 1.9. Оборудование для извлечения бортового кольца при помощи валков [82]

Режуще-вырубные установки. осуществляют отделение бортовых колец с использованием режущих инструментов – ножей, штампов или пресс-матриц (Рисунок 1.10) [83]. Шина фиксируется в рабочей зоне, после чего осуществляется прорезание боковой части до металлического каркаса и его отделение от основной массы резины. Процесс может выполняться как в радиальном, так и в осевом направлении в зависимости от конструкции машины.



Рисунок 1.10 Станок для вырезания бортового кольца изношенных шин [84]

Основное достоинство таких установок заключается в возможности извлекать кольца из шин любого типоразмера, включая крупногабаритные карьерные и грузовые, где применение валков становится неэффективным. При этом сохраняется целостность металлического кольца, что облегчает его дальнейшую переработку как вторичного металла. К недостаткам относится высокая нагрузка на режущий инструмент: ножи быстро тупятся, требуют регулярной заточки или замены, а сам процесс сопровождается значительными энергозатратами. Кроме того, для крупногабаритных шин требуются установки значительных размеров, что повышает капитальные затраты и усложняет эксплуатацию оборудования.

Принцип работы гидравлических установок основан на использовании мощных гидравлических цилиндров, создающих усилие в десятки и даже сотни килоньютонов. Давление жидкости преобразуется в поступательное движение режущего или выталкивающего элемента, который прорезает резиновый массив и вытягивает бортовое кольцо. Конструкция может включать неподвижное основание для фиксации шины и подвижный шток, обеспечивающий равномерное распределение усилия по окружности борта (Рисунок 1.11).



Рисунок 1.11. Гидравлический выдергиватель бортового кольца изношенных шин [86]

Типовой пример такой установки [85, 86] содержит раму с корпусом приводного гидроцилиндра, штангу, размещённую в направляющих, а также колодку и зуб для захвата бортового троса. Для фиксации используется механизм прижима, включающий прижимной гидроцилиндр и корпус, шток которого соединён с подвижной кареткой. Такая конструкция позволяет реализовать поступательное перемещение узлов и обеспечивать надёжное извлечение металлического кольца.

Наибольшая эффективность таких установок наблюдается при переработке шин диаметром до 1200 мм. В этом диапазоне возможно прямое вытягивание металлического пучка без дополнительных операций. Для шин большего диаметра целесообразно применять комбинированный метод,

предполагающий предварительное вырезание посадочных колец с последующим удалением корда.

При этом важным элементом конструкции является наличие прижимных устройств. Они фиксируют шину или вырезанный борт, не давая возможности перекручивания.

К основным недостаткам относятся значительные габариты и масса оборудования, низкая производительность, а также высокая стоимость гидравлических компонентов и их обслуживания.

Сравнение существующих типов оборудования (таблице 1.4.) показывает отсутствие универсального решения.

Таблица 1.4 - Особенности оборудования для извлечения бортовых колец

Тип оборудования	Достоинства	Недостатки	Производительность	Энергопотребление
Механические устройства (валки)	Простота конструкции, возможность совмещения с другими стадиями измельчения, хорошо подходят для легковых и грузовых шин	Быстрый износ рабочих органов. Неприменим для КГШ. Необходима предварительная нарезка на части	60 шин/ч	15 кВт
Режущевырубные установки	Высокая точность отделения колец, компактность по сравнению с валками, возможность автоматизации	Ограниченный ресурс режущих элементов, необходимость регулярной замены ножей	30 ш/ч	3 кВт
Гидравлические установки	Возможность работы с особо жёсткими и крупногабаритными шинами, высокая надёжность извлечения колец	Низкая производительность, большие габариты, инерционность, высокие эксплуатационные расходы	30 ш/ч	15 кВт

В патентной литературе представлено значительное количество решений, посвящённых процессу извлечения бортового кольца из шин. При этом в ряде решений акцент делается на переработку легковых шин, где усилия относительно невелики, тогда как другие изобретения ориентированы на работу с грузовыми и крупногабаритными шинами, требующими значительных механических воздействий.

Анализ патентов США [87, 90, 91, 92], Китая [88, 89] и международных [93] показывает, что преобладают механические решения, основанные на захвате и вытягивании проволоки из посадочного кольца шины. Преимуществами этих решений являются высокая производительность на стандартных типоразмерах, низкий износ узлов и удобство интеграции в автоматизированные линии переработки. Ограничения механических систем заключаются в том, что для крупногабаритных шин требуется увеличенный размер оборудования, что снижает универсальность и производительность.

Отдельного внимания заслуживают решения с индукционным нагревом для отделения металла [93]. Такие конструкции позволяют ускорить процесс извлечения и повышают степень автоматизации, однако характеризуются высокой стоимостью, сложностью обслуживания и энергозатратностью.

Сравнительные характеристики рассмотренных зарубежных патентов представлены в Таблица 1.5.

В российской и советской практике также накоплен разработки оборудования для извлечения бортовых колец из изношенных шин, что подтверждается рядом патентных решений. Одним из таких изобретений является патент RU1799325C (СССР, 1993) [94], где предложен способ последовательного надрезания боковой части покрышки и захвата металлического кольца специальными зажимами с последующим его вытягиванием механическим приводом. Простота конструкции делает устройство применимым для шин малого и среднего типоразмера.

Более ранний патент SU1659258A1 (СССР, 1991) [95] описывает методику удаления цельного металлического корда с использованием клиновых захватов. Ключевым достоинством является сохранение целостности извлекаемого кольца, что важно для дальнейшей переработки. Вместе с тем эффективность такого подхода снижается при сильном износе или деформации шины, поскольку зацепление корда становится затруднительным.

Таблица 1.5 - Особенности оборудования для извлечения бортовых колец

№	Патент/год/страна	Принцип работы	Тип шин	Сильные стороны	Слабые стороны
1	US20180036915 A1 [87] 2018 США	Механический захват и вытягивание проволоки	Легковые и грузовые	Эффективное извлечение проволоки, снижение износа оборудования	Ограниченная универсальность для КГШ
2	CN102921702A 2012 [88] Китай	Автоматическое разделение проволоки и резины	Легковые и грузовые	Высокая степень автоматизации, снижение трудозатрат	Возможно сложное обслуживание
3	CN212528456U [89] 2021 Китай	Механический захват и вытягивание проволоки	Легковые и грузовые	Улучшенная производительность, снижение износа	Не всегда подходит для особо крупных шин
4	US20020088557 A1 [90] 2002 США	Механическая машина для вытягивания бортовых колец	Грузовые и крупногабаритные	Эффективное извлечение колец	Старый дизайн, низкая автоматизация
5	US7438109B2 [91] 2008 США	Механизм для смены шин с отделением бортовых колец	Легковые и грузовые	Компактное устройство, частичная универсальность	Не специализировано для КГШ
6	US20150290841 A1 [92] 2015 США	Машина с механическим захватом и вытягиванием проволоки	Легковые и грузовые	Эффективное извлечение, снижение износа	Ограничения по размеру шин
7	WO2002102563 A1 [93] 2002 Международный	Индукционный нагрев для отделения проволоки	Легковые и грузовые	Позволяет легко отделять металл от резины	Сложная система, высокая стоимость, энергозатратность

Дальнейшее развитие идеи отражено в патенте RU2225789C1 (Россия, 2004) [96], где реализован механизм радиального надреза и фиксации кольца с последующим его извлечением за счёт усилия гидроцилиндра (Рисунок 1.12). Такой подход позволяет надёжно отделять кольца даже из массивных шин, однако устройство имеет крупные габариты и недостаточно приспособлено для поточной эксплуатации.

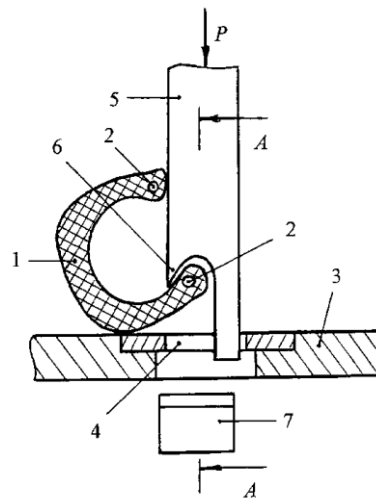


Рисунок 1.12. Схема извлечения бортовых колец из автопокрышки [96]

Похожим по назначению, но более специализированным является патент RU2317195C1 (Россия, 2008) [97], предусматривающий применение вытесняющего клина, который под действием гидроцилиндра выталкивает трос из боковой части покрышки (Рисунок 1.13). Решение ориентировано прежде всего на переработку крупногабаритных и карьерных шин. Оно обеспечивает высокую надёжность отделения бортовых элементов, но требует значительного энергопотребления и занимает большую площадь в производственном помещении.

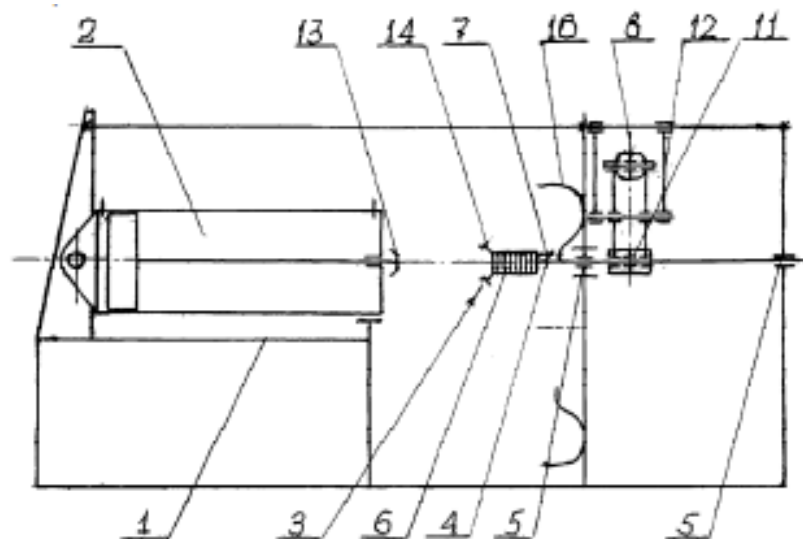


Рисунок 1.13. Схема установки для удаления троса из боковой части шины при утилизации [97]

Современный этап развития подобных устройств представлен патентами RU201698U1 (Россия, 2020) [98] и [99], разработанным в

Белгородском государственном технологическом университете. В нём реализована компактная установка с качающейся платформой и подвижной кареткой, оснащённой рабочим зубом (Рисунок 1.14). Подробное описание конструкции полезных моделей будет представлено в Главе 3.1.

Российские патентные решения демонстрируют постепенную эволюцию от простых механических способов извлечения бортовых колец к более сложным и энергоёмким установкам с гидравлическим или электромеханическим приводом. Основная тенденция заключается в стремлении повысить надёжность отделения металлического корда из шин разного типоразмера при одновременном снижении трудоёмкости процесса.

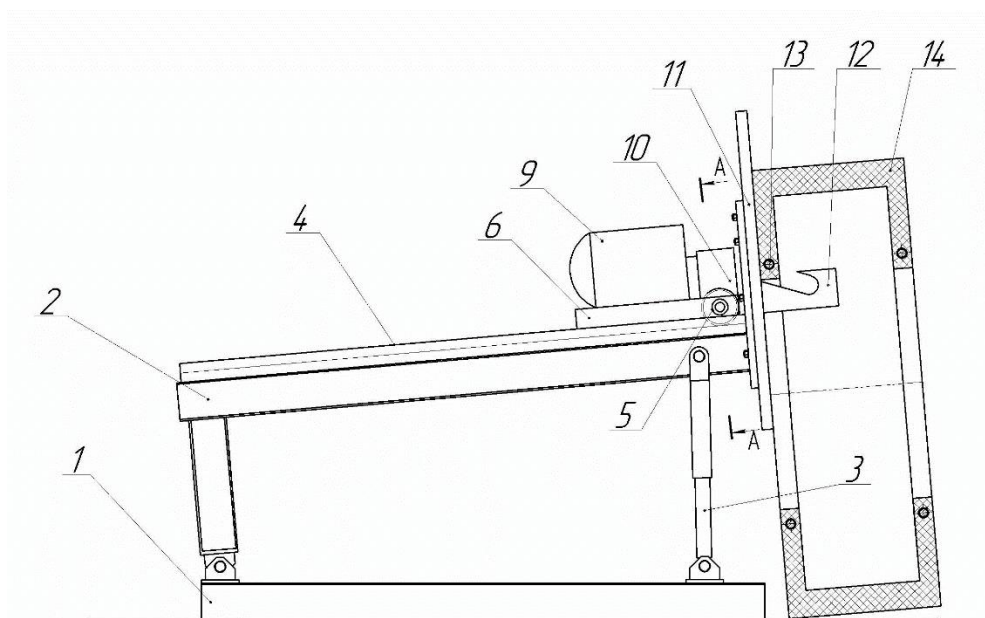


Рисунок 1.14. Установка для извлечения бортовых колец из шин с электромеханическим приводом [98]

Проведённый анализ показал, что существующие установки для извлечения бортовых колец не обладают универсальностью и не обеспечивают высокой эффективности при работе с различными типоразмерами шин. Механические устройства удобны для легковых шин, но неприменимы к крупногабаритным образцам. Режуще-вырубные установки отличаются точностью, однако требуют частой замены ножей и значительных энергозатрат. Гидравлические комплексы способны работать с особо жёсткими шинами, но отличаются низкой производительностью, высокой

стоимостью и громоздкостью. В совокупности это делает переработку крупногабаритных и карьерных шин (КГШ) особенно затруднительной, так как для их утилизации требуется оборудование с большими габаритами и мощностью, что снижает экономическую целесообразность процесса. Таким образом, можно заключить, что существующие решения не обеспечивают достаточной эффективности и требуют модернизации с учётом особенностей КГШ.

1.4 Результаты и выводы

В первой главе проведён анализ проблемы накопления изношенных автомобильных шин, обоснована необходимость их переработки, рассмотрены существующие методы, технологические схемы и оборудование, а также выявлены предпосылки, определяющие направление дальнейших исследований. Получены следующие основные результаты и выводы:

1. Выявлена проблема накопления изношенных автомобильных шин: ежегодное накопление шин от легкового транспорта в РФ превышает 268 тыс. тонн, а доля механической переработки составляет лишь 17 % против 53 % захоронения. Сравнительный анализ методов переработки изношенных шин показал, что физико-механическое измельчение является наиболее эффективным по критериям экологичности и экономики, что определяет его как базовую технологию для дальнейшей проработки.

2. Установлено влияние операции извлечения бортового кольца на ресурс дробильного оборудования при переработке РТИ, так как наличие бортового кольца является одним из факторов износа режущих узлов. Сделан вывод о том, что предварительное удаление бортовых колец является обязательным для крупногабаритных шин и рекомендуемым для легковых и грузовых типов, что позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты и повысить качество получаемой резиновой крошки.

3. Систематизация технологических и технических ограничений существующего валкового, режущего и гидравлического оборудования для извлечения бортовых колец выявила необходимость совершенствования

оборудования. Исследованные конструкции либо не применимы для крупногабаритных шин, либо обладают низкой производительностью и высоким износом инструмента. Патентный поиск подтвердил, что ни зарубежные, ни отечественные аналоги не обеспечивают оптимального баланса производительности, энергоэффективности и способности работать с шинами всех типоразмеров.

4. Сформулирована научно-техническая задача: разработка и обоснование рациональных конструктивно-технологических параметров оборудования и процесса извлечения бортовых металлических колец, обеспечивающих повышение производительности, снижение энергозатрат и сохранение целостности извлекаемого кольца для всех типоразмеров шин. Отмечено, что наиболее перспективным направлением является совершенствование установок с электромеханическим приводом и регулируемой кинематикой рабочего органа.

Глава № 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ И КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ КОЛЕЦ

2.1 Определение конструктивно-технологических параметров процесса извлечения бортового кольца из борта шины

Автомобильная шина представляет собой сложное многослойное изделие, используемое в качестве основного элемента колес транспортных средств, таких как грузовые автомобили и крупногабаритная техника. Она состоит из каркаса, брекера, протектора, борта шины и бортовых колец (Рисунок 2.1) [52].

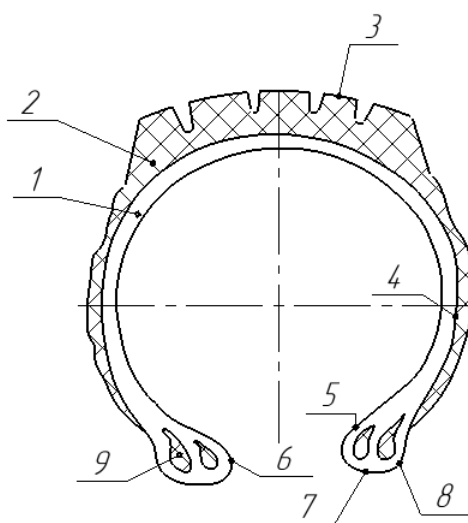


Рисунок 2.1. Конструктивные элементы шины: 1 – каркас; 2 – брекер; 3 – протектор; 4 – боковина; 5 – борт шины; 6 – носок борта; 7 – основание борта; 8 – пятка борта; 9 – бортовые кольца [52]

Бортовое кольцо является несущим элементом шины и обеспечивает прочную фиксацию на ободе колеса. Бортовое кольцо представляет собой трос, состоящий из стальных проволок, обычно 25–40 штук диаметром 1–2 мм, скреплённых резиновой оболочкой. В качестве материала проволоки используют высокоуглеродистые или легированные стали, так как они обладают высокой упругостью, пределом прочности, стойкостью к коррозии

и деформации. Такая конструкция позволяет бортовому кольцу воспринимать значительные нагрузки, возникающие при монтаже и эксплуатации шины. Для улучшения сцепления с резиной и дополнительной антикоррозионной защиты проволоку покрывают латунным или цинковым слоем.

Основные физико-механические характеристики проволоки регламентируются ГОСТ 14959-2016 [100] и ГОСТ 26366-84 [80], основные свойства представлены в таблице 2.1:

Таблица 2.1 - Физико-механические характеристики проволоки

Наименование	Обоз-е	Значение
Предел прочности при растяжении	(σ_B)	1500–2000 МПа
Предел текучести	($\sigma_{0.2}$)	1200–1800 МПа
Модуль упругости	(E)	200 ГПа
Коэффициент Пуассона	(ν)	0,27–0,3
Удлинение при разрыве	(δ)	2–4%
Твердость в диапазоне	-	450–550 HV
Диаметр проволоки	d	0,9 - 2,0 мм

Процесс извлечения бортового кольца (БК) из борта шины включает несколько этапов [57] и начинается с подачи шины в рабочую зону оборудования (Рисунок 2.2). Шина размещается на рабочий зуб 2, который захватывает борт шины 4 и прижимает его к упорной плите 1 (Рисунок 2.3, а). Фиксация шины происходит за счёт равномерного захвата рабочим зубом и надежного прижатия к упорной плите, что предотвращает её смещение во время работы.

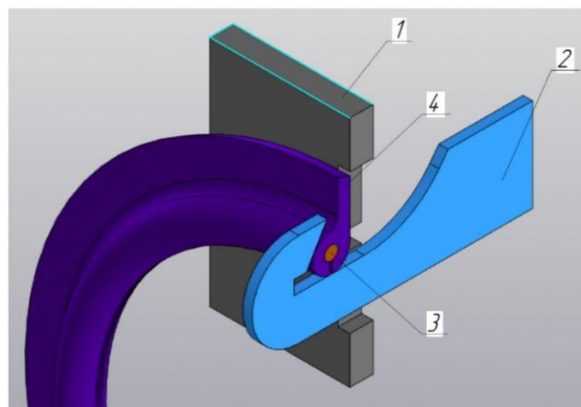


Рисунок 2.2. Разрез модели процесса извлечения бортового кольца из шины: 1 – мишень; 2 – крюк; 3 – бортовое кольцо; 4 – резиновый борт шины

Далее рабочий зуб 2 перемещается, создавая усилие, необходимое для деформирования резинового борта шины 4 и металлического бортового кольца 3 (Рисунок 2.3, б). Достигнув предельного значения усилия происходит разрыв резиновой оболочки борта шины 4 и бортовое кольцо 3 начинает протягиваться через отверстие в упорной плите 1. На этом начальном этапе скорость извлечения увеличивается, так как рабочий зуб 2 начинает движение, обеспечивая ускорение для преодоления начального сопротивления резинового борта.

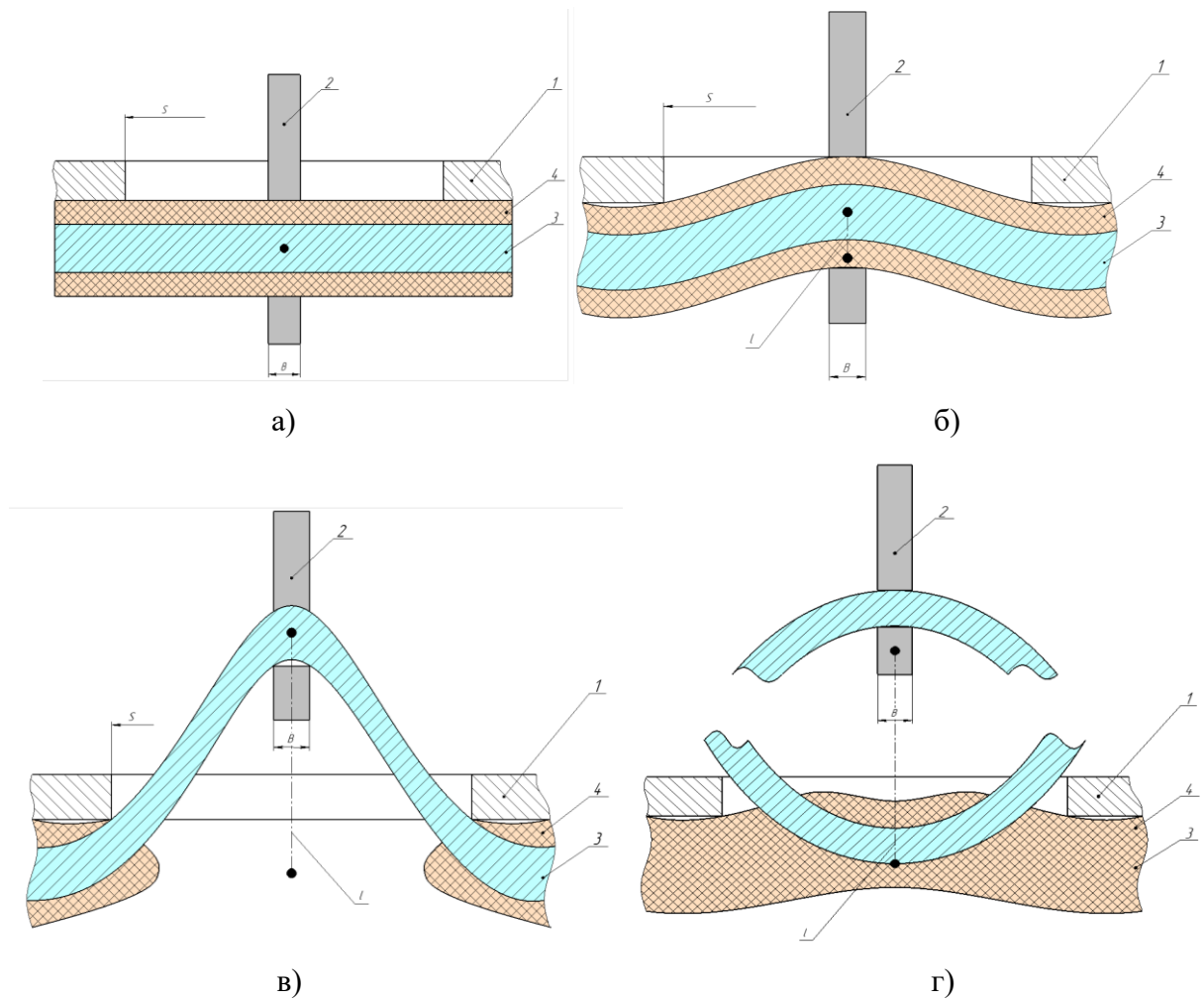


Рисунок 2.3. Принципиальная схема процесса извлечения бортового кольца: а – исходное положение; б – начало рабочего процесса извлечения бортового кольца; в - рабочий процесс извлечения при достижении необходимого усилия; г – окончание процесса извлечения

Основной этап процесса – разрыв и разрезание резинового борта 4 с протягиванием бортового кольца 3 через отверстие упорной плиты 1 (Рисунок 2.3, в). Этот этап длится дольше, но требует меньшего усилия, чем начальный разрыв. Скорость извлечения на этом этапе достигает максимального и постоянного значения, обеспечивая стабильное протягивание бортового кольца 3 через отверстие упорной плиты 1. Усилие извлечения должно быть контролируемым, чтобы чрезмерное воздействие не привело к дефектам: застреванию борта в отверстии, перекручиванию шины или разрыву проволоки.

На завершающем этапе процесса извлечения (Рисунок 2.3, г) происходит окончательное отделение бортового кольца 3 от резинового борта изношенной шины 4, сопровождаемое увеличением усилия извлечения. Снижение жесткости шины на этой стадии обусловлено удалением большей части металлического бортового кольца 3, что повышает риск застревания резинового борта из-за его деформации и недостаточной упругости. Скорость извлечения на данном этапе замедляется, так как процесс требует увеличения усилия извлечения. После извлечения бортовое кольцо 3 и шина 4 удаляются из рабочей зоны, что завершает цикл работы оборудования [101].

Процесс извлечения бортового кольца различается в зависимости от состояния шины, в частности, от того, извлечено ли второе бортовое кольцо. При извлечении первого кольца из шины, где второе кольцо ещё не удалено, крышка сохраняет большую жесткость. Это снижает вероятность застревания резинового борта в отверстии упорной плиты.

При извлечении второго бортового кольца из шины, в которой уже удалено первое кольцо, жесткость шины снижается и повышается риск ее перекручивания. Это снижает производительность процесса, так как требует дополнительных мер контроля. Снизить вероятность перекручивания можно, обеспечивая равномерное движение рабочего зуба.

Эффективность процесса извлечения бортового кольца определяется технологическими параметрами, которые обеспечивают рациональное

использование ресурсов оборудования. Для количественной оценки эффективности процесса предлагаются следующие параметры [102]:

- максимальное усилие извлечения (F_{max} , Н);
- скорость извлечения ($v_{изв}$, м/с);
- мощность извлечения (P , Вт).

Максимальное усилие извлечения характеризует пиковую силу, необходимую для полного отделения бортового кольца от резиновой оболочки изношенной шины. Этот параметр существенно влияет на конструктивную прочность оборудования и энергозатраты, поскольку превышение допустимых нагрузок может привести к износу рабочих элементов и увеличению потребляемой мощности.

Скорость извлечения характеризует быстроту удаления бортового кольца из шины. Повышение скорости извлечения напрямую определяет производительность установки, позволяя сократить время цикла и увеличить объем перерабатываемых шин за единицу времени, что особенно значимо для крупносерийной переработки.

Мощность извлечения характеризует интенсивность энергопотребления оборудования в процессе извлечения бортового кольца из изношенной шины. Этот параметр отражает как потребляемую электроэнергию, необходимую для работы привода установки, так и механическую мощность, требуемую для преодоления сопротивления материалов шины и выполнения рабочего цикла. Снижение мощности способствует уменьшению эксплуатационных расходов, что является ключевым фактором экономической эффективности процесса и оптимизации нагрузки на энергетические ресурсы при массовой утилизации шин.

Указанные параметры (максимальное усилие, скорость извлечения и мощность) определяются как конструктивными особенностями оборудования, так и характеристиками утилизируемой шины, которая представляет собой сложное многослойное изделие. Для понимания факторов, влияющих на

указанные параметры, необходимо построить аналитическую модель процесса извлечения бортового кольца.

2.2 Построение аналитической модели процесса извлечения бортового кольца

2.2.1. Разработка математической модели с учетом ограничений на основе баланса сил

Процесс извлечения бортового металлического кольца из резиновой оболочки шины представляет собой сложную задачу, требующую системного подхода к анализу действующих сил и факторов, определяющих его эффективность. Основной целью построения математической модели является описание усилий, возникающих на различных стадиях процесса извлечения, а также определение ограничений, обеспечивающих целостность бортового кольца при минимизации энергозатрат. Модель должна учитывать характеристики шины, включающие как физические (прочность, упругость, адгезия), так и геометрические (форма кольца, толщина резиновой оболочки), а также геометрические параметры и динамические свойства установки.

Предпосылки построения модели основаны на анализе процесса, описанного в пункте 2.1, и данных о физико-механических свойствах материалов бортового кольца и шины. Резиновая оболочка рассматривается с упругой деформацией на начальном этапе, пластическим течением при 5–15 МПа и разрушением при 5–25 МПа (относительное удлинение 200–500%). Бортовые кольца рассматриваются как упругопластические стержневые элементы из высокопрочной стали, взаимодействующие с резиной, что влияет на напряжённо-деформированное состояние шины.

Для реализации представленных целей процесс извлечения формализуется через уравнение баланса сил (2.1), описывающее взаимодействие оборудования и материалов шины, что позволяет установить зависимости параметров и факторов усилия извлечения для оптимизации процесса.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum F_{kx} \rightarrow \begin{cases} x(t) \\ x(v) \\ x(t, v, s) \end{cases} \rightarrow v(t, s) \quad (2.1)$$

Общее уравнение равновесия сил (2.1) в общем виде отражает суммарное усилие извлечения F_{kx} как результат взаимодействия усилий, развиваемых оборудованием, и сопротивления материалов шины и бортового кольца [103]. На основе анализа физических факторов, описанных в пункте 2.1, усилие извлечения можно представить в виде уравнения (2.2) :

$$\sum F_{kx} = F + F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (2.2)$$

где F_{kx} – усилие извлечения бортового кольца, Н; F – усилие, развиваемое оборудованием, Н; F_1 – усилия, необходимые для преодоления адгезии между стальной проволокой и резиновой оболочкой, Н; F_2 – усилия, необходимые для разрыва резиновой оболочки бортовой части колеса, Н; F_3 – усилие, затрачиваемое на деформацию резиновой оболочки, Н; F_4 – усилие, затрачиваемое на деформацию бортового колеса, Н; F_5 – усилия, необходимые для преодоления силы трения и других негативных факторов, Н.

На Рисунок 2.4, а представлена схема действующих сил в начальный момент процесса извлечения бортового кольца из бортовой зоны изношенной шины. На поперечном сечении шины показаны основные геометрические параметры бортовой зоны и действующие силы (N , F), а на векторной диаграмме – разложение сил F_3 – F_5 и их результирующая F_{Σ} . Схема отражает момент начала деформации резинового массива и бортового кольца при приложении внешней извлекающей нагрузки.

На Рисунок 2.4, б представлена схема сил рабочего процесса протягивания бортового кольца в момент достижения усилия, необходимого для разрыва резинового борта. На основной схеме показаны действующие силы, а на векторной диаграмме – их результирующая.

Усилие F , развиваемое оборудованием, определяется динамической характеристикой установки – скоростью перемещения рабочего зуба и статическими параметрами, такими как геометрия мишени упорной плиты и

рабочего зуба. Оно служит внешней силой, инициирующей процесс извлечения.

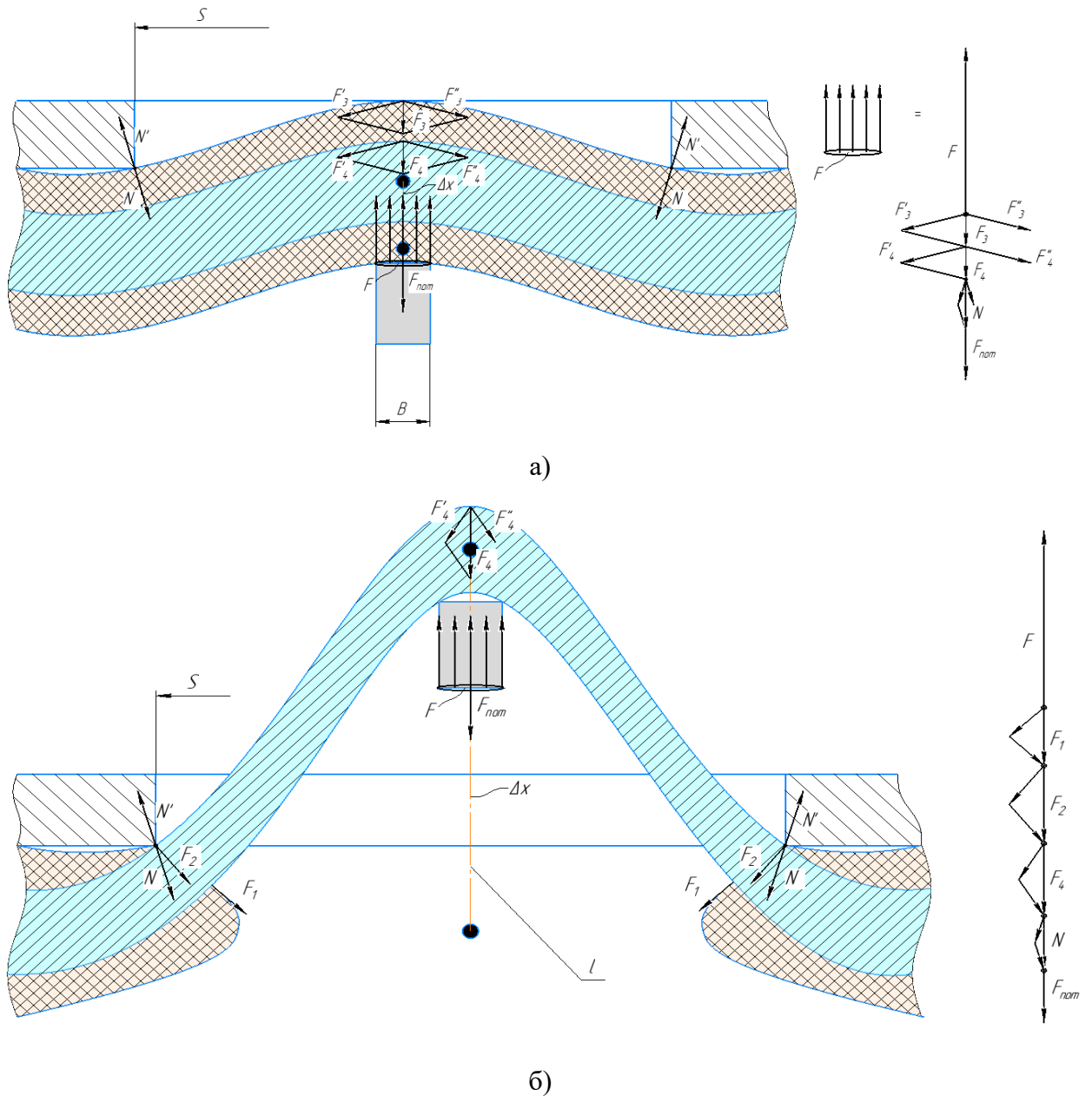


Рисунок 2.4. Схема действующих сил при извлечении бортового кольца: а) в начальный момент процесса извлечения; б) на протяжении рабочего процесса

Усилие адгезии F_1 зависит от сил сцепления между поверхностью стальной проволоки и резиной, что обусловлено химической совместимостью материалов и наличием покрытий, увеличивающих адгезионные свойства. Усилие разрыва F_2 связано с прочностными характеристиками резины на разрыв и толщиной бортовой части шины, определяя момент разрушения оболочки и начала протягивания бортового кольца через отверстие упорной

плиты. Деформационные усилия F_3 и F_4 возникают в результате упругого сопротивления стальной проволоки и резины, стремящихся сохранить исходную форму, и зависят от их физико-механических свойств. Усилие трения F_5 включает сопротивление скольжению бортового кольца в отверстии упорной плиты, а также дополнительные нагрузки, вызванные загрязнениями, коррозией проволоки или локальными повреждениями шины.

Каждая составляющая усилия F_{kx} требует дальнейшей детализации с учетом конкретных параметров, однако в общем виде уравнение (2.2) позволяет установить зависимости между внешними факторами (усилием оборудования) и внутренними сопротивлениями системы.

Разрыв бортового кольца в процессе извлечения нежелателен, поскольку он затрудняет последующую переработку и снижает экономическую эффективность утилизации шин. Данное обстоятельство обуславливает необходимость введения ограничения на усилие извлечения, позволяющего сохранить функциональность процесса и оборудования [104].

Усилие разрыва бортового кольца, состоящего из n стальных проволок, скрепленных резиновой оболочкой, F_0 определяется по формуле (2.3).

$$F_0 = K_p \sum_{1}^n P_z \quad (2.3)$$

где n – количество проволок; P_z – разрывное усилие одной проволоки, Н; K_p – коэффициент упрочнения бортового кольца резиновым слоем;

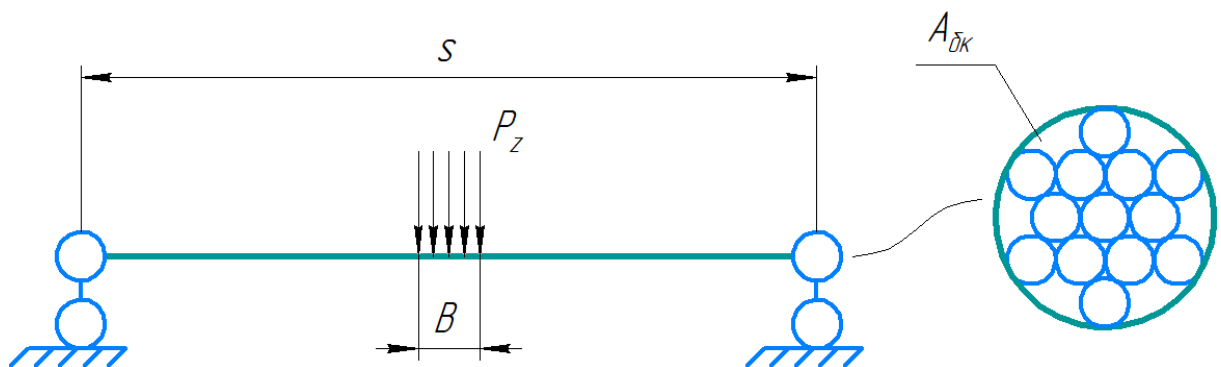


Рисунок 2.5. Схема растяжения

Расчетное разрывное усилие одной проволоки определяется по формуле (2.4):

$$P_z = \sigma_{\text{пч}} \cdot A_{\text{к}} \quad (2.4)$$

где $\sigma_{\text{пч}}$ – предел прочности стальной проволоки, Па; $A_{\text{к}}$ – площадь поперечного сечения проволоки, м;

Так как бортовое кольцо состоит из одинаковых замкнутых проволок, то подставляя формулу (2.4) в (2.3) ограничение неразрывности бортового кольца можно представить в виде уравнения (2.5):

$$F_0 = K_p \cdot \sigma_{\text{пч}} \cdot A_{\text{к}} \cdot z \quad (2.5)$$

Условие сохранения целостности кольца требует, чтобы усилие извлечения $F_{\text{кх}}$, определенное в уравнении (2.2), удовлетворяло неравенству (2.6) на всех стадиях процесса.

$$F_{\text{кх}} < F_0 \quad (2.6)$$

Предел прочности $\sigma_{\text{пч}}$ для стальной проволоки бортового кольца, согласно ГОСТ 26366-84 [80], составляет 1770–2060 МПа для марок 1Л/1ЛА, что выше значений для углеродистых сталей по ГОСТ 1050-2013 [105] (330–600 МПа). Это обусловлено требованиями к высокой упругости и устойчивости проволоки при эксплуатации шины. Коэффициент K_p зависит от адгезионных свойств резины и покрытия проволоки (например, латунного слоя), усиливая прочность бортового кольца. Подставляя предел прочности для проволоки 1Л/1ЛА в (2.4), получим график зависимости разрывного усилия (P_o) от площади сечения бортового кольца ($A_{\text{бк}}$), представленный на Рисунок 2.6. Линией обозначен нижний предел необходимого усилия для разрыва проволоки бортового кольца в зависимости от площади поперечного сечения.

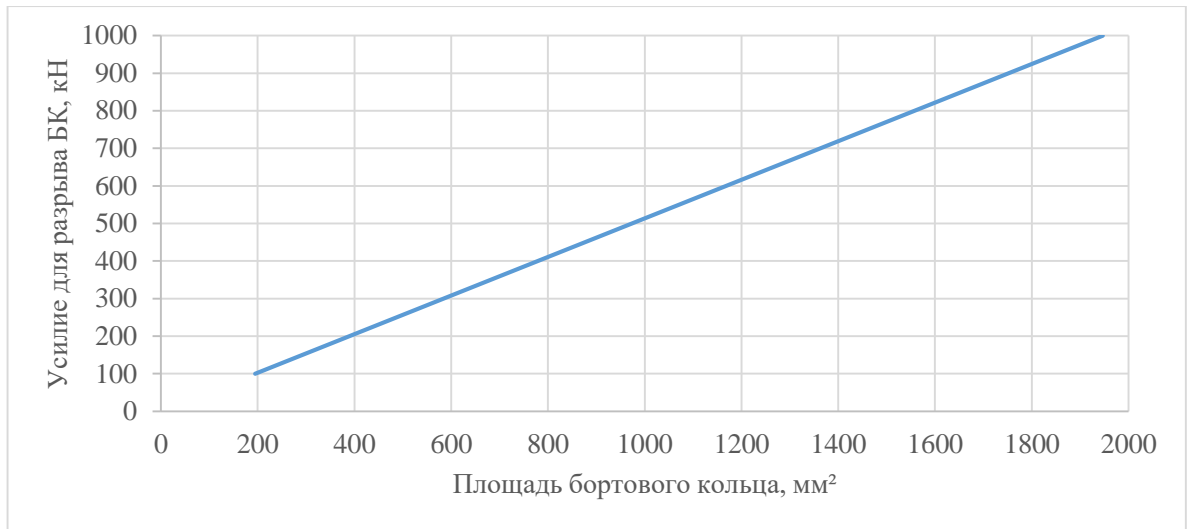


Рисунок 2.6. Диаграмма зависимости необходимого усилия для разрыва бортового кольца от площади поперечного сечения бортового кольца

Усилие адгезии F_1 , возникающее на границе контакта стальной проволоки и резиновой оболочки, моделируется на основе сдвигового напряжения в соответствии с формулой (2.7):

$$F_1 = \sigma_c \cdot A_k = \sigma_c \cdot \pi \cdot h \cdot l \quad (2.7)$$

где σ_c – сдвиговое напряжение; A_k – площадь поверхности соприкосновения проволоки с резиновой оболочкой, м²; h – толщина бортового кольца, м; l – длина участка контакта бортового кольца и резиновой оболочки, м;

Значение σ_c зависит от адгезионных свойств материалов, включая химическую совместимость резины и проволоки, а также наличие покрытий [106, 107].

Усилие разрыва резиновой оболочки F_2 определяется сопротивлением резины разрушению и зависит от её прочности на разрыв, толщины оболочки и геометрических параметров бортового кольца [108]. В общем виде F_2 можно представить как (2.8):

$$F_2 = \tau \cdot A_p = \left(\sigma_p \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{крит}}} \right)^n + \eta \cdot \frac{v}{h} \right) \cdot A_p \quad (2.8)$$

где τ – удельное сопротивление разрыву резиновой оболочки, Па; A_p – площадь поперечного сечения разрываемого участка резины, м² σ_p – предельное напряжение резины на разрыв, Па; ε – деформация в зоне

разрушения, м; $\varepsilon_{\text{крит}}$ – критическая деформация, м; n – показатель нелинейности; η – динамическая вязкость, Па·с; v – скорость разрыва, м/с; h – толщина материала, м.

Для бортовой части грузовых и крупногабаритных шин, где резина усилена для фиксации бортового кольца, наиболее вероятный диапазон прочности на разрыв составляет 15–25 МПа (15000–25000 кПа) для новой резины. Однако, поскольку речь идет о переработке шин, износ может снижать это значение до 5–15 МПа (5000–15000 кПа).

Деформационное усилие F_3 связано с упругим сопротивлением материала шины при их деформации в процессе извлечения [109]. В общем виде деформационное усилие можно выразить в виде уравнения (2.9):

$$F_3 = k_p \cdot \Delta x_k = \frac{\varepsilon_p \cdot A'_p}{L_p} \cdot \Delta x_p \quad (2.9)$$

где Δx_p – деформация резины, м; k_p – коэффициент жесткости резиновой оболочки, Н/м, определяемый по (2.10);

$$k_p = \frac{\varepsilon_p \cdot A'_p}{L_p} \quad (2.10)$$

где ε_p – модуль упругости резиновой оболочки $\varepsilon_p \approx 2$ –10 МПа; A'_p – площадь поперечного сечения резины, м², L_p – длина деформируемого участка, м.

Усилие деформации бортового кольца [110, 111, 112] F_4 в общем виде представлено в виде уравнения (2.11):

$$F_4 = \sigma_y \cdot A_{\text{бк}} \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d}{3h}\right) \quad (2.11)$$

где σ_y – предел текучести материала бортового кольца, Па; $A_{\text{бк}}$ – площадь контакта бортового кольца с упорной плитой оборудования, м²; μ – коэффициент трения между проволокой бортового кольца и поверхностью отверстия упорной плиты; d – внутренний диаметр бортового кольца, м; h – толщина кольца, м;

Усилие на преодоление вредных факторов F_5 включает сопротивление трения при скольжении бортового кольца через отверстие упорной плиты, дополнительные нагрузки, вызванные загрязнениями, коррозией проволоки или локальными дефектами шины, а также потери силы в оборудовании, связанные с его механической эффективностью и износом рабочих элементов. В общем виде F_5 можно выразить в виде уравнения (2.12):

$$F_5 = \mu \cdot N + F_{\text{пот}} \quad (2.12)$$

где μ – коэффициент трения между проволокой и поверхностью отверстия; N – нормальная сила, N , зависящая от давления рабочего зуба и деформации материалов; $F_{\text{пот}}$ – потери усилия в оборудовании, N , зависящие от конструкции установки и её состояния.

Обобщенная математическая модель усилия извлечения бортового кольца объединяет составляющие (2.5), (2.7), (2.8), (2.9), (2.11), (2.12) в выражение (2.13):

$$\begin{aligned} \sum F_{kx} = F + \sigma_c \cdot \pi \cdot h \cdot l + \left(\sigma_p \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{крит}}} \right)^n + \eta \cdot \frac{v}{h} \right) \cdot A_p + \frac{\varepsilon_p \cdot A'_p}{L_p} \\ \cdot \Delta x_p + \sigma_y \cdot A_{\text{бк}} \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d}{3h} \right) + \mu \cdot N + F_{\text{пот}} \\ < K_p \cdot \sigma_{\text{пч}} \cdot A_k \cdot z \end{aligned} \quad (2.13)$$

Данная аналитическая модель позволяет представить усилие извлечения бортового кольца как сумму пяти основных составляющих (2.2) и (2.13) (адгезия, разрыв резиновой оболочки, деформация резины, деформация металлического кольца, силы трения и вредные сопротивления) и ввести ключевое ограничение на неразрывность бортового кольца ($F \leq F_0$) (2.6). Полученное уравнение баланса сил связывает внешнее усилие оборудования с внутренними физико-механическими характеристиками шины и бортового кольца, создавая аналитическую основу для дальнейшего анализа. Для более точного описания поведения системы на разных стадиях процесса и учёта динамических эффектов необходимо перейти к дифференцированному

рассмотрению этапов извлечения, что будет выполнено в следующем подразделе.

2.2.2. Определение усилия для разрыва борта шины и начала извлечения бортового кольца

Процесс извлечения бортового кольца из покрышки характеризуется неоднородностью приложения усилий, что обусловлено изменением сопротивления материалов и геометрии системы "шина-оборудование" на различных стадиях.

На начальном этапе работы оборудования (Рисунок 2.4, а), когда происходит деформация резинового борта шины и бортовой проволоки, но разрыв борта еще не наступает, силы адгезии (F_1) и разрыва (F_2) равны нулю. Это обусловлено тем, что площадь контакта для адгезии и зона разрушения еще не формируются. Суммарное усилие извлечения F определяется преимущественно деформационными компонентами F_3 (деформация бортового кольца, (2.11)) и F_4 (деформация резиновой оболочки, (2.9)), а также потерями на трение F_5 (2.12). Такая ситуация сохраняется до тех пор, пока напряжение в резиновой оболочке ($\sigma_{лок}$) не достигнет предела прочности ($\sigma_{пр.р.}$), после чего произойдет разрыв резиновой части бортового кольца.

Суммарное усилие извлечения F определяется только деформационными и фрикционными компонентами. Его можно выразить системой уравнений (2.14):

$$\left\{ \begin{array}{l} t < t_1 \\ \sigma_{лок} < \sigma_{пр.р.} \\ \sum F_{kx} = F - F_3 - F_4 - F_5 \end{array} \right. \quad (2.14)$$

После достижения критического напряжения в резине значения F_1 и F_2 начинают расти, что приводит к пиковому усилию на этапе разрыва и последующему снижению до установившегося режима протягивания.

На основном этапе процесса (Рисунок 2.4, б), когда происходит разрыв и протягивание бортового кольца через отверстие упорной плиты при

стабильной скорости, деформационное усилие резиновой оболочки F_3 близко к нулю. Это связано с тем, что после начального разрыва резиновой оболочки дальнейшее перемещение бортового кольца не требует дополнительной упругопластической деформации резины – разрушенная оболочка больше не оказывает значительного сопротивления в виде упругого восстановления, а остаточные эффекты учитываются в F_1 и F_2 . Сопротивление определяется преимущественно адгезией F_1 , разрывом резины F_2 , деформацией бортового кольца F_4 и трением F_5 .

Система уравнений, описывающих второй этап работы оборудования представлена в виде (2.15):

$$\begin{cases} t > t_1 \\ \sigma_{\text{лок}} \geq \sigma_{\text{пр.р.}} \\ \sum F_{kx} = F - F_1 - F_2 - F_4 - F_5 \end{cases} \quad (2.15)$$

Переход от систем баланса сил (2.14) и (2.15) к скорости извлечения $v_{\text{изв}}$ осуществляется через динамическое описание движения рабочего зуба оборудования под действием внешнего усилия F , с учётом массоинерционных характеристик системы и перехода между этапами.

Движение рабочего зуба описывается уравнением Ньютона (2.16):

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{dv}{dt} = F - \sum F_{\text{сопр}} \quad (2.16)$$

где: m – приведённая масса подвижных частей установки (включая рабочий зуб, каретку и эквивалентную массу деформируемой шины), кг; v – скорость извлечения, м/с (критерий эффективности); F – усилие привода оборудования, Н; $\sum F_{\text{сопр}}$ – суммарное сопротивление, зависящее от этапа, формируется по системам (2.14) и (2.15), Н.

Для первого этапа суммарное сопротивление $\sum F_{\text{сопр}}$, будет иметь вид (2.17):

$$\begin{aligned}
\sum F_{\text{сопр}} &= F_3 + F_4 + F_5 = \\
&= \frac{\varepsilon_p \cdot A'_p}{L_p} \cdot \Delta x_p + \sigma_y \cdot A_{\text{бк}} \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d}{3h}\right) + \mu \cdot N + F_{\text{пот}} \\
&= K_1 x + K
\end{aligned} \tag{2.17}$$

где коэффициенты K_1 и K , определяются по формулам (2.18) и (2.19):

$$K_1 = \frac{\varepsilon_p \cdot A'_p}{L_p} \tag{2.18}$$

$$K = \sigma_y \cdot A_{\text{бк}} \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d}{3h}\right) + \mu \cdot N + F_{\text{пот}} \tag{2.19}$$

Подставляя уравнение (2.17) в (2.16), получим дифференциальное уравнение (2.20) для первого этапа, решив которое можем определить $v(t)$ и $x(t)$.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = m \frac{dv}{dt} = F - K_1 x - K \tag{2.20}$$

Преобразовав (2.20), получим линейное неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами (2.21).

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + K_1 x = F - K \tag{2.21}$$

Характеристическое уравнение для однородной части (2.22):

$$mr^2 + K_1 = 0 \rightarrow r = \pm i \sqrt{\frac{K_1}{m}} = \pm i\omega \tag{2.22}$$

Общее решение однородного уравнения (2.23):

$$x_h(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \tag{2.23}$$

Частное решение неоднородного уравнения (2.24):

$$x_p(t) = \frac{F - K}{K_1} = x_0 \tag{2.24}$$

Полное общее решение (2.25):

$$x(t) = x_0 + A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \tag{2.25}$$

Продифференцировав (2.25) по dt , найдем $v(t)$ (2.26):

$$v(t) = -A\omega \sin(\omega t) + B\omega \cos(\omega t) \quad (2.26)$$

При $x(0) = 0$ и $v(0) = 0$, A и B рассчитываются по (2.27) и (2.28) соответственно:

$$x(0) = x_0 + A = 0 \rightarrow A = -x_0 \quad (2.27)$$

$$v(0) = B\omega = 0 \rightarrow B = 0 \quad (2.28)$$

Конечные аналитические зависимости $x(t)$ и $v(t)$ в общем виде рассчитываются по (2.29) и (2.30):

$$x(t) = x_0(1 - \cos(\omega t)) \quad (2.29)$$

$$v(t) = x_0\omega \sin(\omega t) \quad (2.30)$$

Раскрывая переменные получим (2.31) и (2.32):

$$x(t) = \frac{F - K}{K_1} \left(1 - \cos\left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t\right)\right) \quad (2.31)$$

$$v(t) = \frac{F - K}{\sqrt{K_1 \cdot m}} \sin\left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t\right) \quad (2.32)$$

Разрыв резиновой оболочки наступает, когда локальное напряжение достигает предела прочности (2.33):

$$\sigma_{\text{лок}} = \sigma_{\text{пр.р.}} \quad (2.33)$$

В общем виде локальное напряжение имеет вид (2.34):

$$\sigma_{\text{лок}} = \frac{F_3}{A_p} = \frac{K_1 \cdot x(t)}{A_p} \quad (2.34)$$

Критическое перемещение будет иметь вид (2.35):

$$x_{\text{кр}} = x(t_1) = \frac{A_p \cdot \sigma_{\text{лок}}}{K_1} \quad (2.35)$$

Подставляя (2.35) в (2.29), найдём t_1 (2.36):

$$\begin{aligned}
t_1 &= \frac{1}{\omega} \arccos\left(1 - \frac{x_{\text{кр}}}{x_0}\right) = \sqrt{\frac{m}{K_1}} \arccos\left(1 - \frac{A_p \cdot \sigma_{\text{лок}}}{F - K}\right) \\
&= \sqrt{\frac{m}{K_1}} \arccos\left(1 - \frac{K_1 \cdot x(t_1)}{F - K}\right)
\end{aligned} \tag{2.36}$$

Начальные условия $v(t_1)$ (2.35) для второго этапа можно выразить, подставив t_1 в (2.30):

$$\begin{aligned}
v(t_1) &= x_0 \omega \sin(\omega t_1) = x_0 \omega \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x_{\text{кр}}}{x_0}\right)^2} = \\
&= \frac{F - K}{\sqrt{K_1 \cdot m}} \cdot \sqrt{2 \frac{K_1 \cdot x(t_1)}{F - K} - \left(\frac{K_1 \cdot x(t_1)}{F - K}\right)^2}
\end{aligned} \tag{2.37}$$

Уравнения (2.35) и (2.37) описывают состояние системы: скорость $v(t_1)$ и перемещение $x_{\text{кр}}$ рабочего зуба в момент времени t_1 (2.36), когда происходит переход от первого этапа (упругая деформация) ко второму (разрыв и протягивание).

Уравнения (2.35) - (2.37) предоставляют начальные условия для системы дифференциальных уравнений второго этапа (2.15). Для второго этапа суммарное сопротивление $\sum F_{\text{сопр}}$, будет иметь вид (2.38):

$$\begin{aligned}
\sum F_{\text{сопр}} &= F_1 + F_2 + F_4 + F_5 = \\
&= \sigma_c \cdot \pi \cdot h \cdot l + \left(\sigma_p \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{крит}}}\right)^n + \eta \cdot \frac{v}{h}\right) \cdot A_p + \sigma_y \cdot A_{\text{бк}} \\
&\cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d}{3h}\right) + \mu \cdot N + F_{\text{пот}} = K_2 v + K'
\end{aligned} \tag{2.38}$$

Где коэффициенты K_2 и K' , определяются по формулам (2.39) и (2.40):

$$K_2 = \eta \frac{A_p}{h} \tag{2.39}$$

$$\begin{aligned}
K' &= \sigma_c \cdot \pi \cdot h \cdot l + \sigma_p \cdot A_p \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{крит}}}\right)^n + \sigma_y \cdot A_{\text{бк}} \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d}{3h}\right) + \mu \\
&\cdot N + F_{\text{пот}}
\end{aligned} \tag{2.40}$$

Подставив уравнение (2.38) в (2.16), получим дифференциальное уравнение (2.41) зависимости перемещение $x(t)$ и скорости $v(t)$ рабочего зуба на втором этапе процесса извлечения бортового кольца.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = m \frac{dv}{dt} = F - K_2 v - K' \quad (2.41)$$

Линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами будет иметь вид (2.42):

$$m \frac{dv}{dt} + K_2 v = F - K' \quad (2.42)$$

Для удобства вводим новую переменную времени $\tau = t - t_1$, с начальными условиями при $\tau = 0$: $v(0) = v(t_1) = v_1$.

Характеристическое уравнение для однородной части (2.43):

$$mr + K_2 = 0 \rightarrow r = -\frac{K_2}{m} = -\lambda \quad (2.43)$$

Общее решение однородного уравнения (2.44):

$$v_h(\tau) = C e^{-\lambda \tau} \quad (2.44)$$

Частное решение неоднородного уравнения (2.45):

$$v_p(\tau) = \frac{F - K'}{K_2} = v_\infty \quad (2.45)$$

Полное общее решение (2.46):

$$v(\tau) = v_\infty + C e^{-\lambda \tau} \quad (2.46)$$

При $\tau \rightarrow \infty$ экспонента $e^{-\lambda \tau}$ стремится к 0, так как $\frac{K_2}{m} > 0$ (K_2 и m – положительные величины), а отрицательный показатель с ростом τ делает значение экспоненты бесконечно малым. Таким образом при $\tau \rightarrow \infty$, получаем выражение (2.47):

$$v = v_\infty = \frac{F - K'}{K_2} \quad (2.47)$$

v_∞ - установившаяся скорость протягивания.

Проинтегрировав выражение (2.48), найдем $x(t)$ (2.48):

$$x(\tau) = x_{\text{кр}} + v_{\infty} \cdot \tau + \frac{C}{\lambda} (1 - e^{-\lambda\tau}) \quad (2.48)$$

При $\tau = 0$ коэффициент C , вычисляется по формуле (2.49):

$$v(0) = v_1 = v_{\infty} + C \rightarrow C = v_1 - v_{\infty} \quad (2.49)$$

Конечные аналитические зависимости $x(t)$ и $v(t)$ в общем виде рассчитываются по (2.50) и (2.51):

$$x(\tau) = x_{\text{кр}} + v_{\infty} \cdot \tau + \frac{v_1 - v_{\infty}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda\tau}) \quad (2.50)$$

$$v(\tau) = v_{\infty} + (v_1 - v_{\infty})e^{-\lambda\tau} \quad (2.51)$$

Раскрывая переменные получим (2.52) и (2.53):

$$x(t) = x_{\text{кр}} + \frac{F - K'}{K_2} \cdot (t - t_1) + \frac{m}{K_2} \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) (1 - e^{-\lambda(t-t_1)}) \quad (2.52)$$

$$v(t) = \frac{F - K'}{K_2} + \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) e^{-\lambda(t-t_1)} \quad (2.53)$$

Системы уравнений для первого и второго этапа процесса извлечения бортового кольца будут иметь вид (2.54) и (2.55), соответственно:

$$\text{Этап 1:} \begin{cases} t < t_1 \\ \sigma_{\text{лок}} < \sigma_{\text{пр.р.}} \\ \sum F_{kx} = F - K_1 x - K \\ x(t) = \frac{F-K}{K_1} \left(1 - \cos \left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t \right) \right) \\ v(t) = \frac{F-K}{\sqrt{K_1 \cdot m}} \sin \left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t \right) \end{cases} \quad (2.54)$$

$$\text{Этап 2:} \begin{cases} t > t_1 \\ \sigma_{\text{лок}} \geq \sigma_{\text{пр.р.}} \\ \sum F_{kx} = F - K_2 v - K' \\ x(t) = x_{\text{кр}} + \frac{F-K'}{K_2} \cdot (t - t_1) + \frac{m}{K_2} \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) (1 - e^{-\lambda(t-t_1)}) \\ v(t) = \frac{F-K'}{K_2} + \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) e^{-\lambda(t-t_1)} \end{cases} \quad (2.55)$$

Системы уравнений (2.54) и (2.55) описывают динамические изменения перемещения и скорости рабочего зуба оборудования, разделенные на два этапа.

По выражениям (2.54) и (2.55) построены графики зависимости перемещений (Рисунок 2.7) и скорости (Рисунок 2.8) рабочего зуба.

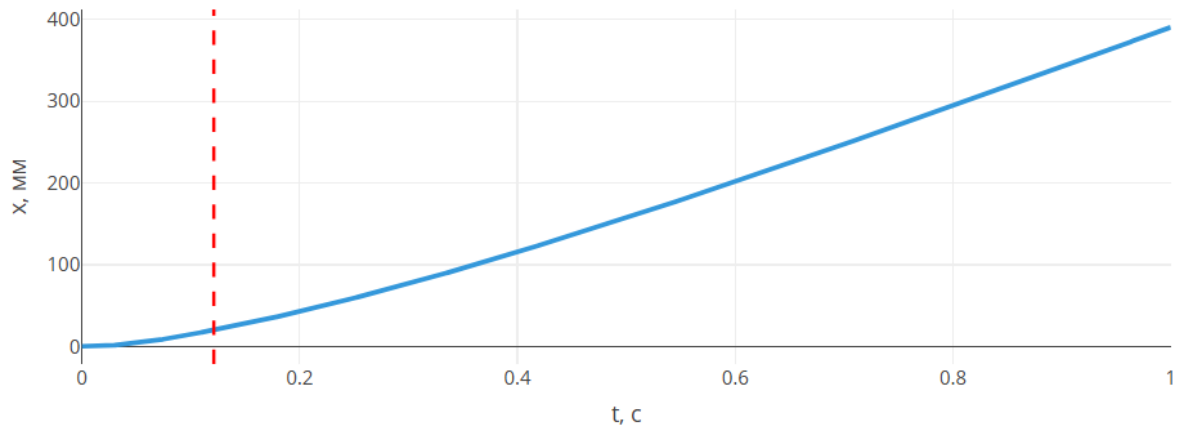


Рисунок 2.7. Зависимость перемещения рабочего зуба от времени

Перемещение $x(t)$ на первом этапе имеет вид (Рисунок 2.7) плавного нелинейного подъёма, близкого к гармоническому накоплению деформации, без резких скачков с косинусоидальной зависимостью, где амплитуда определяется разностью усилия (F) и постоянных потерь (F_4 и F_5), а частота – жёсткостью (F_3) и массой (m). Кривая начинается с нуля, имеет вогнутость вниз на начальном участке и плавно приближается к максимуму без затухания, отражая идеализированное упругое накопление деформации до момента разрыва. После момента разрыва (отмечено пунктирной линией) траектория переходит в режим равномерного линейного роста с постоянной скоростью (v_∞) и экспоненциальной сглаженностью на стыке.

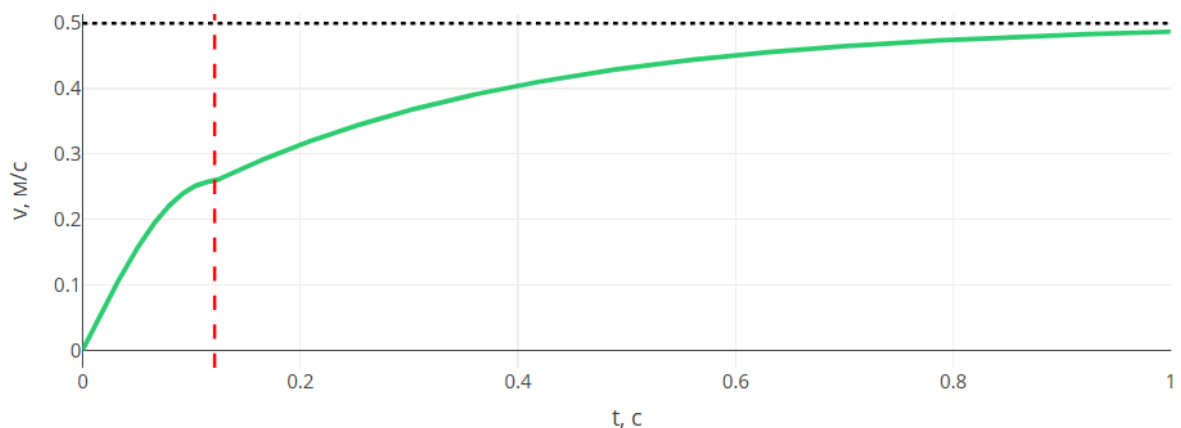


Рисунок 2.8. Зависимость скорости перемещения рабочего зуба от времени

Кривая скорости (Рисунок 2.8) демонстрирует экспоненциальный характер изменения на обоих этапах. На начальном участке происходит быстрый синусоидальный рост от нуля до максимума, соответствующий накоплению кинетической энергии в упругой системе. На втором этапе зависимость скорости описывает экспоненциальное затухание переходного процесса к горизонтальной асимптоте постоянной скорости (v_{∞}). Начальное отклонение от стационарного значения быстро сглаживается, отражая доминирование вязкого сопротивления и достижение равномерного движения при балансе усилий.

Разделение процесса извлечения бортового кольца на два качественно различных этапа – упругую деформацию до разрыва резиновой оболочки (2.14) и последующее протягивание после разрыва (2.15) – позволило построить дифференциальные уравнения движения рабочего органа и получить аналитические выражения для перемещения $x(t)$ (33), (54) и скорости извлечения $v(t)$ (34), (55) на каждом этапе.

Установлено, что на первом этапе скорость имеет колебательный (синусоидально-модулированный) характер с последующим выходом на установившееся значение на втором этапе, а момент перехода между стадиями определяется достижением критического напряжения в резине. Полученные динамические зависимости создают необходимую основу для количественной оценки энергозатрат процесса и перехода к анализу мощности, потребляемой оборудованием во времени.

2.2.3. Оценка энергетической эффективности процесса извлечения БК

Анализ энергетической эффективности процесса извлечения бортового кольца (БК) из шины необходим для оценки энергозатрат и их влияния на общую эффективность утилизации шин. Энергопотребление является одним из ключевых показателей эффективности работы оборудования, поскольку оно напрямую связано с эксплуатационными затратами и производительностью установки. Снижение энергопотребления позволяет

уменьшить эксплуатационные затраты, снизить нагрузку на энергетические ресурсы и повысить экологическую устойчивость процесса, что особенно актуально при переработке грузовых и крупногабаритных шин в больших объемах.

В общем виде мощность $P(t)$, развиваемая оборудованием в процессе извлечения, определяется как произведение усилия F на скорость перемещения рабочего зуба $v(t)$, согласно уравнению (2.56):

$$P(t) = F_{\text{сопр}} \cdot v(t) \quad (2.56)$$

где $F_{\text{сопр}}$ – суммарное усилие извлечения, учитывающее все составляющие сопротивления (адгезию, разрыв, деформацию и трение), а $v(t)$ – скорость, зависящая от динамики системы и параметров оборудования.

Так как процесс извлечения бортового кольца (БК) из покрышки характеризуется неоднородностью приложения усилий, то значения мощности будут разделены на 2 этапа по аналогии с пунктом 2.2.2.

На первом этапе, до момента разрыва резинового борта будет иметь место система уравнений (2.57):

Этап 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} t < t_1 \\ \sum F_{\text{сопр}} = K_1 x(t) + K \\ x(t) = \frac{F - K}{K_1} \left(1 - \cos \left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t \right) \right) \\ v(t) = \frac{F - K}{\sqrt{K_1 \cdot m}} \sin \left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t \right) \\ P(t) = F_{\text{сопр}} \cdot v(t) = (K_1 x(t) + K) \cdot v(t) \end{array} \right. \quad (2.57)$$

Мощность для первого этапа вычисляется по формуле (2.58):

$$P(t) = \frac{F - K}{\sqrt{K_1 \cdot m}} \sin \left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t \right) \left[(F - K) \left(1 - \cos \left(\sqrt{\frac{K_1}{m}} t \right) \right) + K \right] \quad (2.58)$$

На этапе упругой деформации (до разрыва резиновой оболочки) мощность $P(t)$ имеет характер импульсного синусоидального сигнала с выраженной асимметрией. Кривая начинается с нулевого значения, поскольку скорость в начальный момент равна нулю, и постепенно нарастает за счёт синусоидальной модуляции скорости. Пик мощности смещён вправо относительно максимума скорости, что обусловлено доминированием упругой компоненты сопротивления в середине этапа, когда деформация достигает значительных величин.

На втором этапе значение мощности будет выводиться из системы уравнений (2.59):

Этап 2:

$$\left\{ \begin{array}{l} t > t_1 \\ \sum F_{\text{сопр}} = K_2 v + K' \\ x(t) = x_{\text{кр}} + \frac{F - K'}{K_2} \cdot (t - t_1) + \frac{m}{K_2} \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) (1 - e^{-\lambda(t-t_1)}) \\ v(t) = \frac{F - K'}{K_2} + \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) e^{-\lambda(t-t_1)} \\ P(t) = F_{\text{сопр}} \cdot v(t) = (K_2 \cdot v(t) + K') \cdot v(t) \end{array} \right. \quad (2.59)$$

Раскрывая скобки выражение мощности будет иметь вид (2.60):

$$P(t) = K_2 \cdot \left[\frac{F - K'}{K_2} + \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) e^{-\lambda(t-t_1)} \right]^2 + K' \cdot \left(\frac{F - K'}{K_2} + \left(\frac{v_1 - F - K'}{K_2} \right) e^{-\lambda(t-t_1)} \right) \quad (2.60)$$

На этапе протягивания после разрыва мощность $P(t)$ демонстрирует экспоненциально затухающий характер с квадратичным усилением переходного процесса. В момент разрыва следует быстрое сглаживание благодаря двум экспоненциальным членам, где более крутой спад обеспечивает квадратичность, минимизируя время выхода на асимптоту P_∞ .

В установившемся режиме мощность стабилизируется на постоянном уровне, так как $v(\infty) = \text{const}$. Постоянная мощность P_∞ вычисляется по выражению (2.61).

$$P_{\infty} = F_{\text{сопр}} \cdot v_{\infty} = (K_2 v_{\infty} + K') \cdot v_{\infty} = F \cdot \frac{F - K'}{K_2} \quad (2.61)$$

По выражениям (2.58) и (2.60) построен график зависимости мощности от времени (Рисунок 2.9):

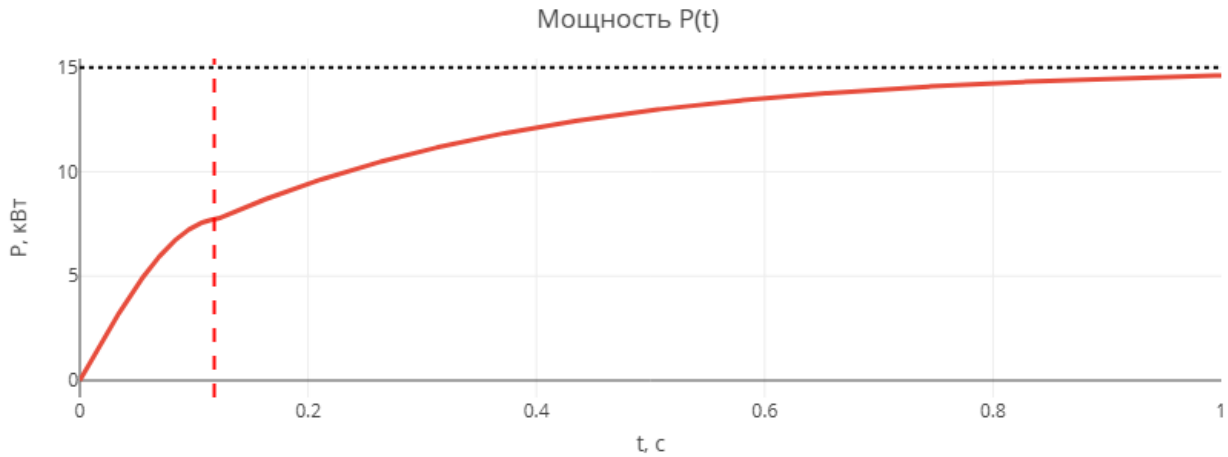


Рисунок 2.9. Зависимость мощности извлечения бортового кольца от времени

На графике мощности $P(t)$ Рисунок 2.9 для этапа упругой деформации наблюдается синусоидальный рост. Кривая имеет асимметричную форму с вогнутостью вверх на начальном участке. Пик мощности смещён, достигая максимума ближе к разрыву борта колеса. Общий вид напоминает растянутую синусоиду с модулированной амплитудой, без резких скачков и с плавным переходом на стыке с последующим этапом. После разрыва мощность $P(t)$ демонстрирует резкий стартовый пик с последующим экспоненциальным затуханием к горизонтальной асимптоте. Кривая начинается со значения в момент разрыва, превышающего установившийся уровень, отражая доминирование квадратичного члена вязкого трения. Затухание происходит быстро, с выходом на плато уже через малую долю времени, без осцилляций и с плавным сглаживанием на стыке этапов. Асимптота отмечена чёрной пунктирной линией, соответствующей P_{∞} и кривая асимптотически приближается к ней сверху, подчёркивая достижение равномерного режима с постоянной мощностью.

Анализ мощности извлечения, выполненный через произведение текущего усилия на мгновенную скорость рабочего органа, выявил

характерный импульсный пик на этапе упругой деформации (59) и разрыва резиновой оболочки с последующим экспоненциальным затуханием к установившемуся постоянному уровню P_{∞} на стадии протягивания (61). Эти результаты подчёркивают важность снижения пиковых нагрузок для уменьшения энергопотребления и создают предпосылки для дальнейшего исследования влияния конструктивных и геометрических параметров шины и оборудования на максимальное усилие извлечения.

2.3 Определение усилия извлечения бортового кольца с учетом влияния конструктивных параметров шины и оборудования

2.3.1. Анализ влияния конструктивных параметров шины и оборудования на максимальное усилие извлечения бортового кольца

Максимальное пиковое усилие извлечения бортового кольца возникает в переходный момент от первой стадии процесса (упругая деформация и накопление напряжений) ко второй стадии (разрушение резиновой оболочки и начало протягивания кольца). Данная величина представляет собой интегральную характеристику сопротивления системы и определяется совокупностью основных силовых факторов.

Пиковое усилие характеризует максимальную силу, необходимую для преодоления адгезионного взаимодействия между резиновым бортом шины и металлическими элементами бортового кольца F_1 , а также для осуществления разрыва резиновой оболочки бортовой зоны F_2 . Кроме того, в формировании пикового значения существенный вклад вносят усилия, затрачиваемые на упругую и пластическую деформацию резинового борта F_3 , деформацию самого бортового кольца F_4 , а также на преодоление сил трения и прочих диссипативных сопротивлений в системе F_5 .

Таким образом, максимальное пиковое усилие извлечения является комплексной величиной, отражающей суммарное сопротивление всех

основных физико-механических процессов, протекающих на начальном этапе отделения бортового кольца от изношенной шины. Усилие, совершаемое оборудованием, будет иметь вид (2.62) - (2.64):

$$0 = \bar{F} + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_3 + \bar{F}_4 + \bar{F}_5 \quad (2.62)$$

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (2.63)$$

$$F = \sigma_c \cdot \pi \cdot h \cdot l + \left(\sigma_p \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{крит}}} \right)^n + \eta \cdot \frac{v}{h} \right) \cdot A_p + \frac{\varepsilon_p \cdot A'_p}{L_p} \cdot \Delta x_p + \sigma_y \cdot A_{\text{бк}} \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d}{3h} \right) + \mu \cdot N + F_{\text{пот}} \quad (2.64)$$

Значение усилия будет изменяться из-за типоразмерных характеристик шин и конструкционно-технологических параметров оборудования. К характеристикам шины относятся: площадь бортового кольца ($A_{\text{бк}}$), площадь резинового борта (A_p), посадочный диаметр обода шины ($d_{\text{пос}}$). К конструкционно-технологическим параметрам оборудования: ширина щели оборудования ($s_{\text{щ}}$), скорость движения крюка (v).

На Рисунок 2.10 представлена схема процесса извлечения бортового кольца при пиковом значении усилия.

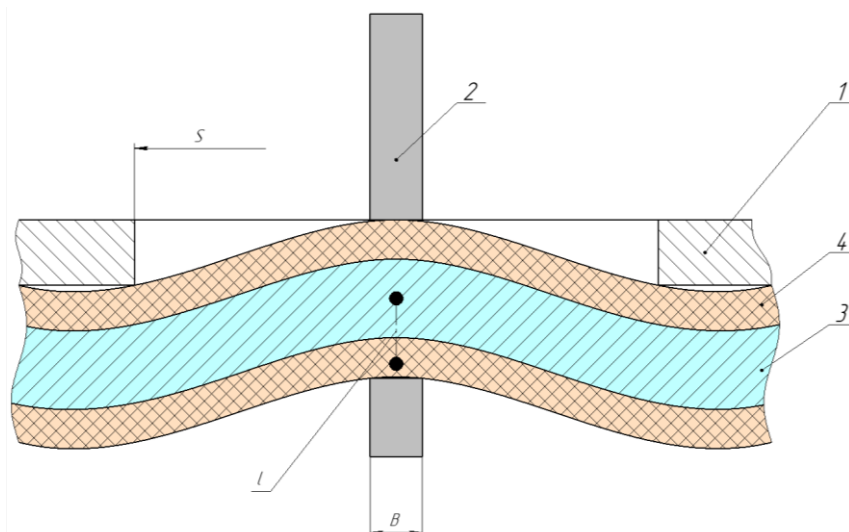


Рисунок 2.10. Идеализованная схема процесса извлечения бортового кольца при пиковом значении усилия

Усилие F_1 на преодоление адгезии (2.7) между резиновой оболочкой и бортовым кольцом зависит от толщины бортового кольца h и длины участка контакта бортового кольца и резиновой оболочки l (Рисунок 2.10).

Толщина бортового кольца h связан с площадью его поперечного сечения $A_{\text{бк}}$ следующим соотношением (2.65):

$$h = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{\text{бк}}}{\pi}} \quad (2.65)$$

Данная зависимость носит квадратичный характер: увеличение площади поперечного сечения бортового кольца $A_{\text{бк}}$ приводит к пропорциональному возрастанию величины h . Поскольку усилие адгезии F_1 прямо пропорционально h , то рост площади сечения бортового кольца $A_{\text{бк}}$ обуславливает увеличение адгезионной составляющей усилия извлечения F_1 .

Длина участка контакта l – в пиковый момент усилия соответствует ширине щели $s_{\text{щ}}$. Следовательно, увеличение ширины щели упорной плиты $s_{\text{щ}}$ приводит к прямому пропорциональному возрастанию длины участка контакта l и, как следствие, к увеличению усилия на преодоление адгезии F_1 (2.66).

$$\begin{aligned} A_{\text{бк}} &\propto h^2 \propto F_1 \\ s_{\text{щ}} &\approx l \propto F_1 \end{aligned} \quad (2.66)$$

Неизменяемые параметры можно выразить при помощи объединенного коэффициента K_1 (2.67):

$$K_1 = 2 \cdot \sigma_c \cdot \sqrt{\pi} \quad (2.67)$$

Указанные зависимости позволяют сформулировать окончательное упрощённое выражение для данной составляющей F_1 в виде (2.68):

$$F_1 = K_1 \cdot \sqrt{A_{\text{бк}}} \cdot s_{\text{щ}} \quad (2.68)$$

Усилие F_2 , необходимое для разрыва резиновой оболочки бортовой зоны шины и преодоления вязкого сопротивления при её деформации, определяется выражением (2.8) и зависит от площади поперечного сечения резиновой

оболочки A_p , толщины этой оболочки h , скорости перемещения рабочего органа v и физико-механических характеристик резины.

Площадь поперечного сечения резиновой оболочки A_p связана с её толщиной h следующим приближённым соотношением (при условии $A_p > A_{бк}$, что характерно для большинства шин грузового и крупногабаритного типоразмеров) (2.69):

$$h = \sqrt{\frac{A_p}{\pi}} \quad (2.69)$$

Данная зависимость носит корневой характер: увеличение площади поперечного сечения резиновой оболочки A_p приводит к возрастанию толщины h , однако в меньшей степени, чем линейная зависимость. В то же время вязкое сопротивление резины обратно пропорционально толщине оболочки $\eta \cdot \frac{v}{h}$, а статическое сопротивление разрыву прямо пропорционально площади A_p . В результате суммарное усилие F_2 при увеличении A_p возрастает, но характер роста становится нелинейным.

Скорость перемещения рабочего органа v входит в вязкую составляющую усилия линейно: при увеличении скорости извлечения вязкое сопротивление резины прямо пропорционально возрастает, что особенно заметно на начальном этапе процесса.

Соответствующие пропорциональные зависимости можно записать следующим образом (2.70):

$$A_p \propto h^2 \propto F_2$$

$$\frac{1}{h} \propto \sqrt{\frac{1}{A_p}} \Rightarrow v \cdot \frac{1}{h} \propto v \cdot \sqrt{\frac{1}{A_p}} \propto F_2 \quad (2.70)$$

Неизменяемые физико-механические параметры резины (σ_p , η , показатели нелинейности и др.) можно выразить через объединённый коэффициент K_2 (2.71), а вязкую составляющую – через коэффициент K_3 (2.72):

$$K_2 = \sigma_p \left(1 + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{крит}}} \right)^n \quad (2.71)$$

$$K_3 = \eta \sqrt{\pi} \quad (2.72)$$

Указанные зависимости позволяют сформулировать окончательное упрощённое выражение для данной составляющей F_2 в виде (2.73):

$$F_2 = K_2 \cdot A_p + K_3 \cdot v \cdot \sqrt{A_p} \quad (2.73)$$

Усилие F_3 , затрачиваемое на упругую деформацию резиновой оболочки бортовой зоны шины до момента её разрыва, определяется выражением (2.9) и зависит от эффективной площади поперечного сечения деформируемого участка A'_p , длины деформируемого участка L_p и абсолютного перемещения (удлинения) резинового борта Δx_p .

В конструкции оборудования длина деформируемого участка резиновой оболочки L_p соответствует ширине рабочей щели упорной плиты $s_{\text{щ}}$ (2.74):

$$L_p = s_{\text{щ}} \quad (2.74)$$

Абсолютное перемещение Δx_p до достижения критического состояния (момента разрыва) прямо пропорционально длине деформируемого участка и определяется критической относительной деформацией резины $\varepsilon_{\text{крит}}$ (2.75):

$$\Delta x_p = \varepsilon_{\text{крит}} \cdot L_p = \varepsilon_{\text{крит}} \cdot s_{\text{щ}} \quad (2.75)$$

Подстановка данного соотношения в исходное выражение приводит к взаимному сокращению ширины щели (2.76):

$$F_3 = \frac{\varepsilon_p \cdot A'_p}{L_p} \cdot \varepsilon_{\text{крит}} \cdot s_{\text{щ}} = \varepsilon_p \cdot A'_p \cdot \varepsilon_{\text{крит}} \quad (2.76)$$

Принимая эффективную площадь деформируемого участка близкой к полной площади поперечного сечения резиновой оболочки ($A'_p \approx A_p$), получаем прямую пропорциональную зависимость (2.77):

$$A_p \propto F_3 \quad (2.77)$$

Неизменяемые физико-механические характеристики резины (относительные деформации ε_p и $\varepsilon_{\text{крит}}$) могут быть объединены в единый коэффициент K_4 (2.78):

$$K_4 = \varepsilon_p \cdot \varepsilon_{\text{крит}} \quad (2.78)$$

Указанные зависимости позволяют сформулировать окончательное упрощённое выражение для составляющей F_3 (2.79):

$$F_3 = K_4 \cdot A_p \quad (2.79)$$

Усилие F_4 , затрачиваемое на деформацию металлического бортового кольца (изгиб и растяжение проволоки при прохождении через отверстие упорной плиты), определяется выражением (2.11) и зависит от площади поперечного сечения бортового кольца $A_{\text{бк}}$, предела текучести материала σ_y , посадочного диаметра обода d и толщины бортового кольца h .

Толщина бортового кольца h связана с площадью его поперечного сечения $A_{\text{бк}}$ выражением (2.65). Увеличение площади поперечного сечения бортового кольца $A_{\text{бк}}$ приводит к возрастанию толщины h . В то же время поправка на трение и изгиб в выражении (2.11) обратно пропорциональна толщине h , что обуславливает дополнительное сопротивление при прохождении кольца через отверстие упорной плиты. В результате базовая составляющая усилия F_4 прямо пропорциональна площади $A_{\text{бк}}$, а поправка на кривизну и трение возрастает с увеличением посадочного диаметра обода d и уменьшением толщины h .

Соответствующие пропорциональные зависимости можно записать следующим образом (2.80):

$$A_{\text{бк}} \propto h^2 \propto F_4$$

$$\frac{d}{h} \propto \sqrt{\frac{d}{A_{\text{бк}}}} \Rightarrow d \cdot \sqrt{A_{\text{бк}}} \propto F_4 \quad (2.80)$$

Неизменяемые физико-механические параметры материала бортового кольца (предел текучести σ_y , коэффициент трения μ) могут быть объединены в коэффициенты K_5 - (2.81) и K_6 - (2.82):

$$K_5 = \sigma_y \quad (2.81)$$

$$K_6 = \frac{\sigma_y \mu \sqrt{\pi}}{6} \quad (2.82)$$

Указанные зависимости позволяют сформулировать окончательное упрощённое выражение для составляющей F_4 (2.83):

$$F_4 = K_5 \cdot A_{\text{бк}} + K_6 \cdot \sqrt{A_{\text{бк}}} \cdot d_{\text{пос}} \quad (2.83)$$

Усилие F_5 , затрачиваемое на преодоление вредных сопротивлений и механических потерь в системе (трение в направляющих, гидравлических потерях, сопротивление от загрязнений, коррозии проволоки, локальных дефектов шины и инерционных эффектов оборудования), определяется выражением (2.12) и состоит из двух основных компонентов: произведения коэффициента трения на нормальную силу ($\mu \cdot N$) и постоянных механических потерь в оборудовании ($F_{\text{пот}}$).

Нормальная сила N в стабильном режиме работы гидравлической установки поддерживается на относительно постоянном уровне за счёт регулировки давления прижима рабочего органа к упорной плите. Коэффициент трения μ также считается квазипостоянным для заданных условий эксплуатации (состояние поверхностей, наличие смазки или загрязнений). Механические потери $F_{\text{пот}}$ определяются преимущественно конструкцией и техническим состоянием оборудования и не зависят от параметров конкретной шины.

В связи с этим все переменные факторы, влияющие на данную составляющую, в типичных условиях работы оборудования можно считать постоянными величинами. Соответственно (2.84):

$$F_5 = \mu \cdot N + F_{\text{пот}} = K_0 \quad (2.84)$$

Окончательное рабочее выражение будет иметь вид (2.85):

$$F = K_0 + K_1 \cdot \sqrt{A_{\text{бк}}} \cdot s_{\text{щ}} + K_2 \cdot A_p + K_3 \cdot v \cdot \sqrt{A_p} + K_4 \cdot A_p + K_5 \cdot A_{\text{бк}} + K_6 \cdot \sqrt{A_{\text{бк}}} \cdot d_{\text{пос}} \quad (2.85)$$

В практических расчётах объединены близкие по физической природе члены, связанные с резиновой оболочкой (2.86) и бортовым кольцом:

$$K_{рез} = K_2 + K_4 \quad (2.86)$$

$$K_1 \cdot \sqrt{A_{бк}} \cdot s_{щ} + K_6 \cdot \sqrt{A_{бк}} \cdot d_{пос} = K_{бк} \cdot \sqrt{A_{бк}} \cdot (s_{щ} + d_{пос}) \quad (2.87)$$

Тогда окончательная рабочая форма модели принимает вид (2.88):

$$F = K_0 + K_{бк} \cdot \sqrt{A_{бк}} \cdot (s_{щ} + d_{пос}) + K_{рез} \cdot A_p + K_3 \cdot v \cdot \sqrt{A_p} + K_5 \cdot A_{бк} \quad (2.88)$$

Проведённый анализ показал, что максимальное (пиковое) усилие извлечения бортового кольца представляет собой комплексную функцию геометрических характеристик шины и оборудования, при этом наиболее значимое влияние оказывают площадь поперечного сечения бортового кольца $A_{бк}$, площадь поперечного сечения резиновой оболочки A_p , посадочный диаметр шины $d_{пос}$ и ширина щели упорной плиты $s_{щ}$.

Полученные аналитические зависимости позволяют прогнозировать пиковое усилие для различных типоразмеров шин и дают понимание основных факторов роста нагрузки на оборудование, однако для практического использования и количественной оценки точности модели необходима её экспериментальная верификация на реальных данных, что будет выполнено в следующем подразделе.

2.3.2. Экспериментальное исследование силовых параметров процесса извлечения бортовых колец.

Для определения коэффициентов модели проведены натурные поисковые экспериментальные исследования на предприятии ООО «Экоутилизация - 31». В качестве объекта исследования выступило оборудование для извлечения бортовых колец из шин легкового и грузового типоразмера «Гидровырыватель бортовых колец» (Рисунок 2.11).

Устройство (Рисунок 2.12) работает за счет гидроцилиндра 3 ($D=190$ мм, $d=140$ мм), приводимого масляной станцией 4 через пульт управления 5. Крюк 1 извлекает бортовое кольцо из шины 6, зафиксированной у мишени 2. В

качестве устройства для измерения давления γ в рабочей полости гидроцилиндра используется манометр ДМ02-100-1-М Кл 1.5. Он устанавливается на входе масла в гидроцилиндр гидравлического двигателя. Диапазон показаний 0 – 250 кгс/см² (0-25 МПа) погрешность измерения $1,5 \pm 1.5$ кгс/см². Гидроцилиндр, имеет внутренний диаметр $D = 190$ мм и диаметр штока $d = 140$ мм.



Рисунок 2.11. Общий вид гидравлического станка для удаления бортовых колец

Данное оборудование имеет технические характеристики, отображенные в таблице Таблица 2.2:

Таблица 2.2 - Технические характеристики оборудования.

Характеристика	Значение
Габаритные размеры	4.2 x 2 x 1.5 м
Максимальный размер утил. шины	1600 мм
Энергопотребление	15 кВт
Давление в системе	15 МПа
Сила тяги	200 тонн
Время цикла	R22.5 – 50 с
Производительность	30 шт/час
Объём заливаемого масла	220 л
Вес	1500 кг

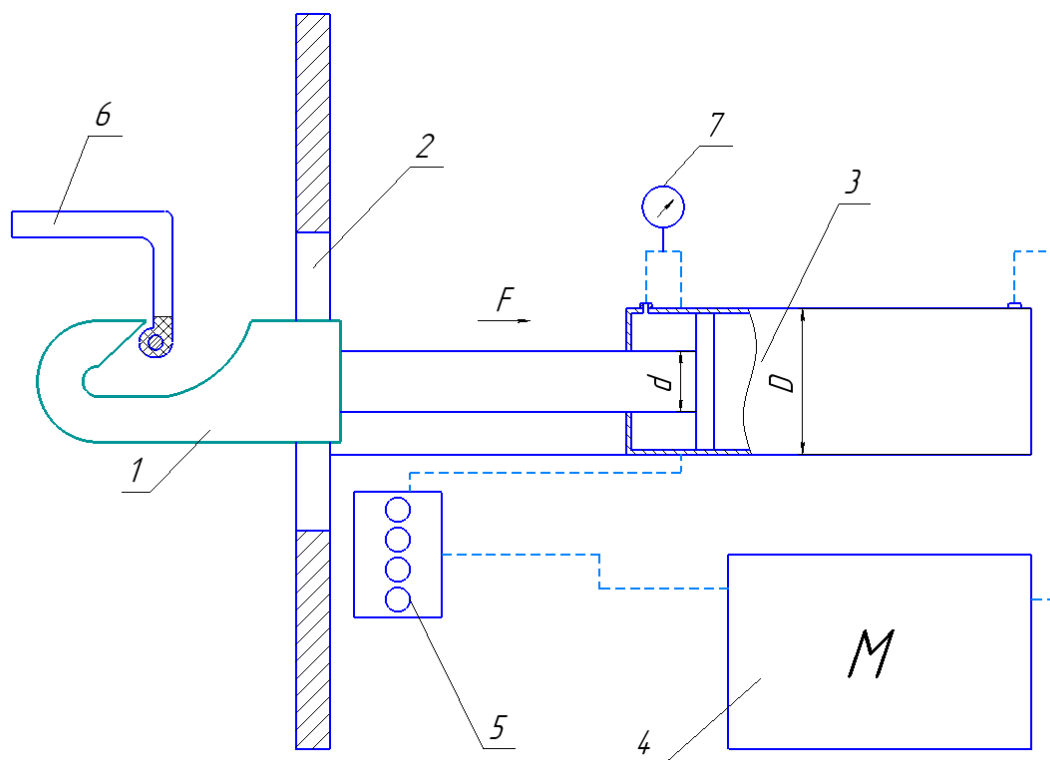


Рисунок 2.12. Принципиальная схема «Гидровывателя бортовых колец»

При проведении эксперимента выдергиванию двух бортовых кольца с обеих сторон подверглась шина 265/70 R 19.5. На Рисунок 2.13 изображены основные состояния шины, при извлечении бортового кольца (Б2) и показания измерительного устройства в разные моменты времени.

Рабочим давлением на холостом ходу гидроцилиндра ($t = 0$ с) является значение 80 кгс/см^2 (Рисунок 2.13.а). В начале работы установки возникает скачок рабочего давления (130 и 120 кгс/см^2), из-за нагнетания масла в рабочую область гидроцилиндра для извлечения бортового кольца из резинового слоя борта (Рисунок 2.13.б). При достижении необходимого для извлечения усилия рабочее давление выравнивается (100 и 110 кгс/см^2) (Рисунок 2.13.в). Далее рабочее давление постепенно возрастает к завершению процесса извлечения (120 и 130 кгс/см^2) (Рисунок 2.13.г), после окончательного извлечения бортового кольца давление резко падает до значений холостого хода (80 кгс/см^2) (Рисунок 2.13.д).

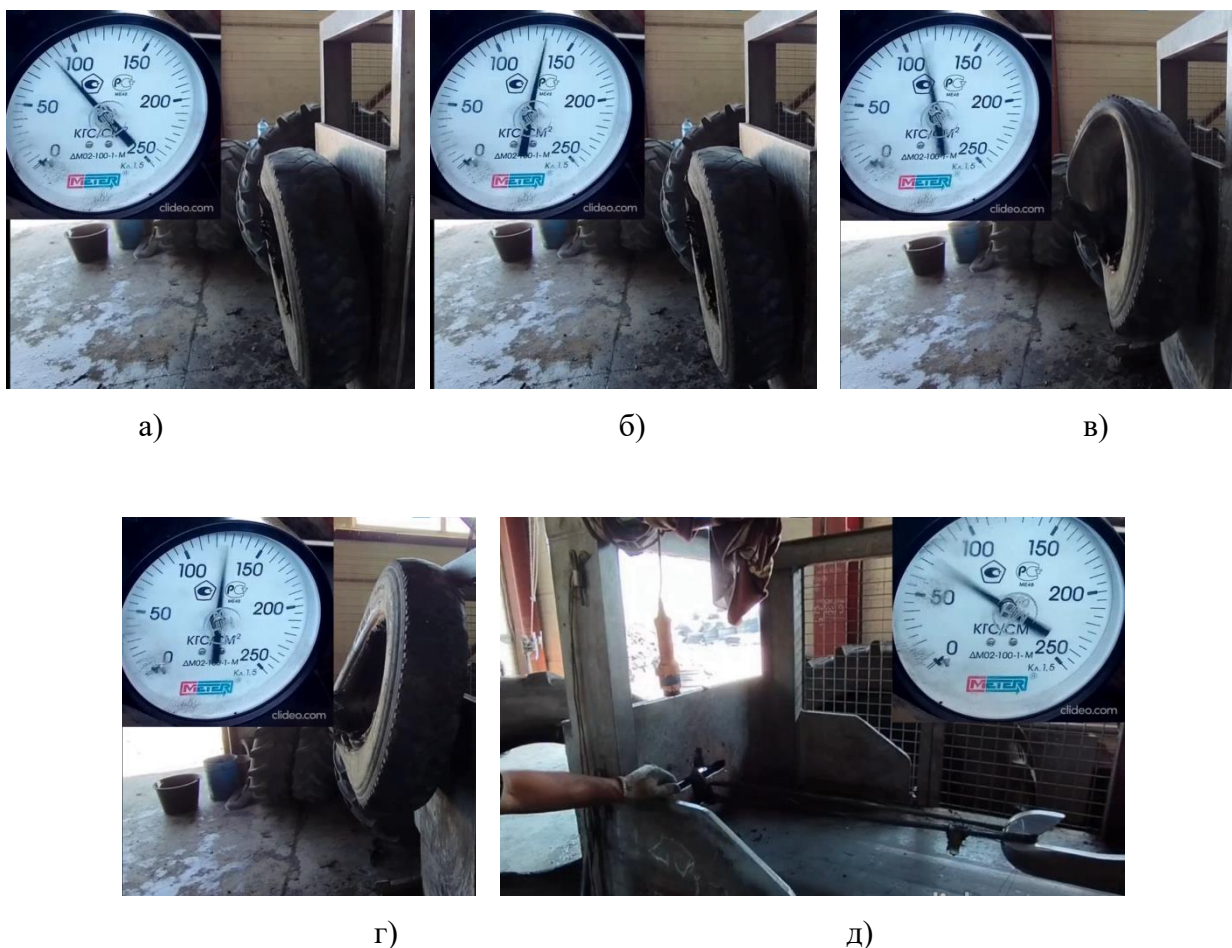


Рисунок 2.13. Проведение эксперимента по извлечению бортового кольца из шины 265/70 R 19.5 в разные моменты времени: а – начальный момент времени ($t = 0$ с); б = скачок рабочего давления при начале работы установки ($t = 1$ с); в – плато значений рабочего давления ($t = 3-12$ с); г –возрастание давление при завершении рабочего процесса ($t = 12-14$ с); д – холостой ход ($t = 15$ с)

Полученные данные представлены в виде диаграммы (Рисунок 2.14), на которой изображена зависимость рабочего давления в гидроцилиндре от времени. Анализируя диаграмму, можно сделать о том, что пиковые значения рабочего давления в гидроцилиндре возникают в начале процесса выдергивания шины и при завершении.

Пик рабочего давления на начальном этапе (130 и 120 кгс/см²) обусловлен физикой разрушения резиновой оболочки борта.

Для определения усилия, развиваемого гидравлическим цилиндром при обратном ходе, используют формулу (2.89):

$$F = (P_p - P_x) \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (2.89)$$

где P_p – рабочее давление в гидросистеме; P_x – давление в системе при холостом ходе; D – внутренний диаметр поршня; d – диаметр штока.

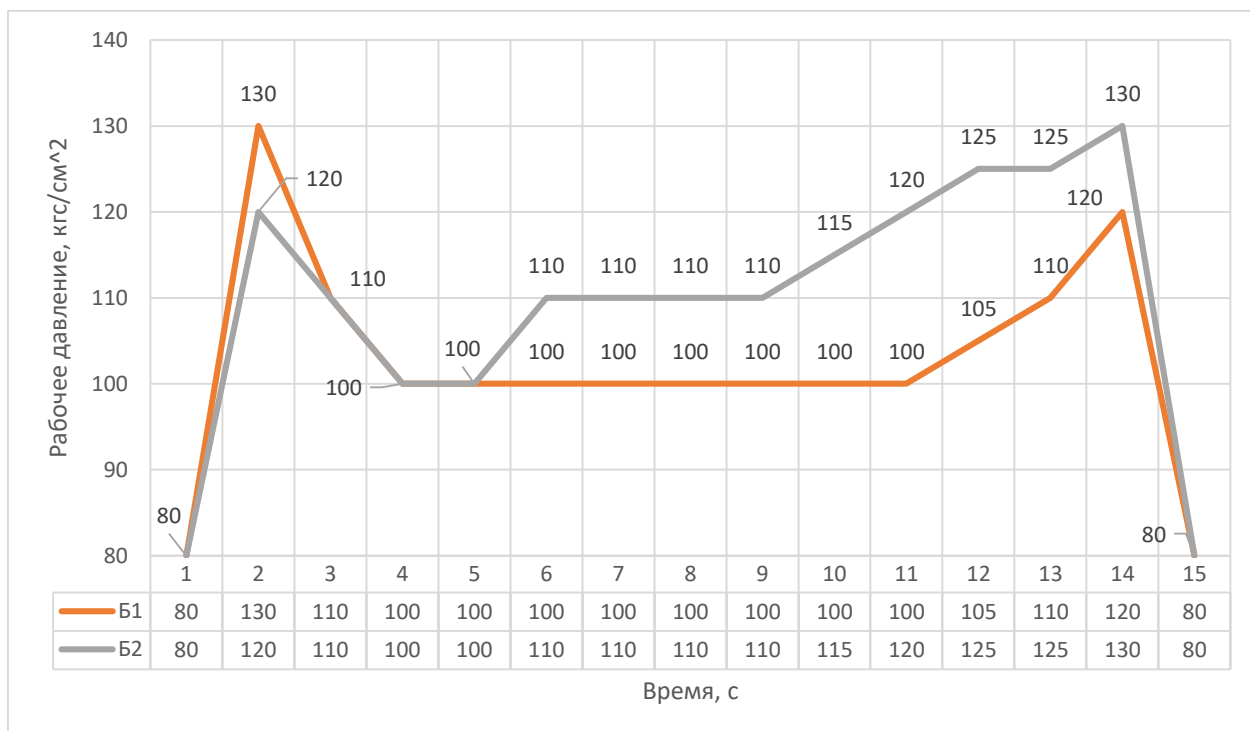


Рисунок 2.14. Диаграмма процесса вырывания бортового кольца из грузовой шины

Максимальное рабочее давление в системе составило 130 кгс/см^2 ($12,75 \text{ МПа}$) в гидроцилиндре установки. Следовательно, усилие необходимое для полноценного вырывания бортового кольца из шины $265/70 \text{ R } 19.5$ будет выведено из формулы (2.90):

$$F = (12,75 - 7,85) \cdot 10^6 \frac{\pi(190^2 - 140^2) \cdot 10^{-6}}{4} = 63467 \text{ Н} = 63,5 \text{ кН} \quad (2.90)$$

Аналогичным образом были выдернуты бортовые кольца из шин, характеристики и результаты выдергивания представлены в Таблица 2.3

Исследуемые шины можно условно разделить на 3 группы по величине максимальной силы извлечения. 1я группа: диапазон $80 \text{ кН} - 100 \text{ кН}$; 2я группа: свыше 100 кН ; к 3ей группе относятся шины № 10 и № 11 с надрезом бортовой части по диаметру бортового кольца, максимальная сила извлечения: $65 \text{ кН} - 85 \text{ кН}$.

Таблица 2.3 - Характеристики шин при проведении эксперимента по выдергиванию бортового кольца

№	Шина	Внешн. диаметр, мм	Посад. диаметр шины, мм	Площадь бортового кольца, мм ²	Площадь поперечного сечения резиновой оболочки, мм ²	P_{max} , кгс/см ²	Макс. сила извлечения, кН	Кол-во дублир. опытов, шт
1	265/70 R19.5	871	495,3	208	2113	147,5	85,7	2
2	385/55 R22.5	997	571,5	223	1911	150	88,9	2
3	315/70 R22.5	1024	571,5	218	2350	155	95,3	4
4	11 R22.5	1062	571,5	207	2074	152,5	92,1	4
5	385/65 R22.5	1078	571,5	234	2372	153,75	93,7	4
6	315/80 R22.5	1080	571,5	420	3675	170	114,3	2
7	11.00 R20	1082	508	198	1987	150	88,9	2
8	360/70 R24	1154	609,6	222	1033	145	82,6	2
9	14.00-20 Я-307	1220	508	455	3613	190	139,7	1
10	17.5 – 25 L-3	1350	635	357	2466	132,5	66,7	2
11	18.4 - 26	1425	660,4	362	2758	142,5	79,4	2

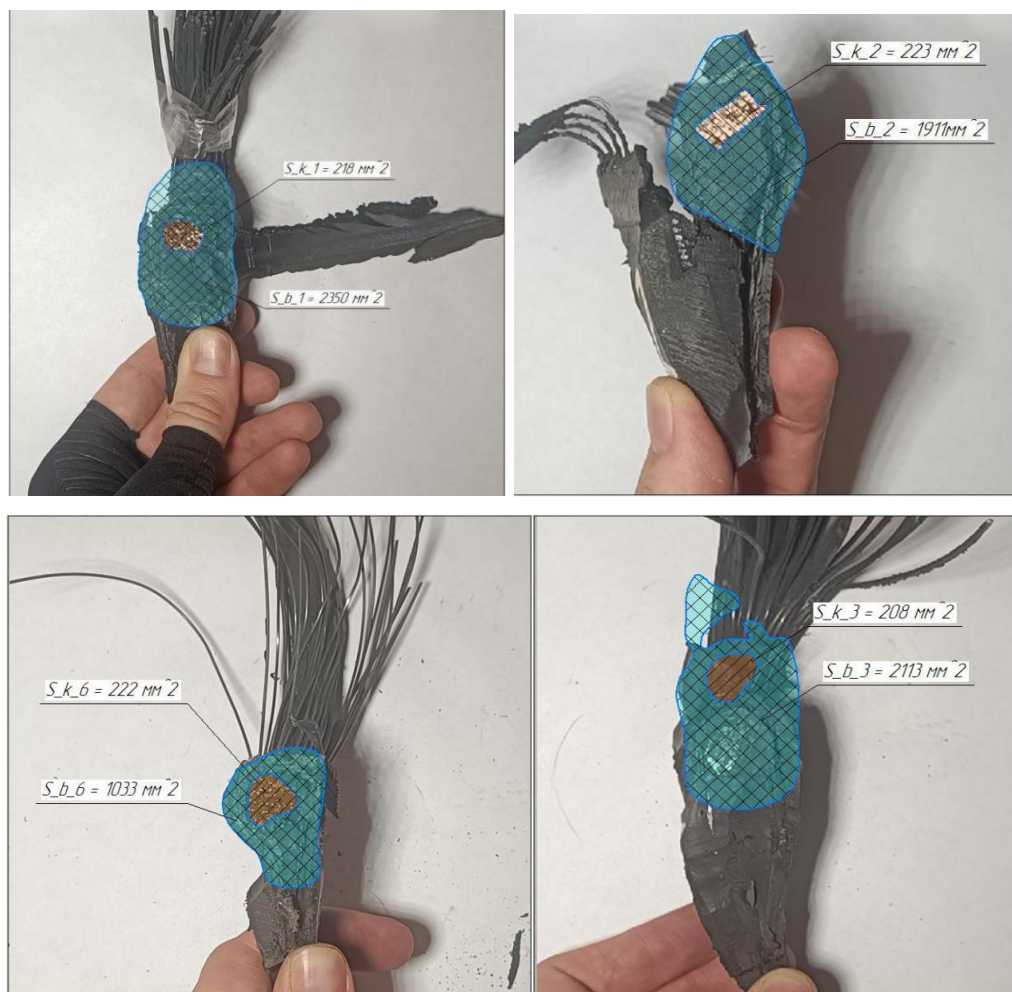


Рисунок 2.15 Основание борта шин 1й группы



Рисунок 2.16. Основание борта шин 2й группы

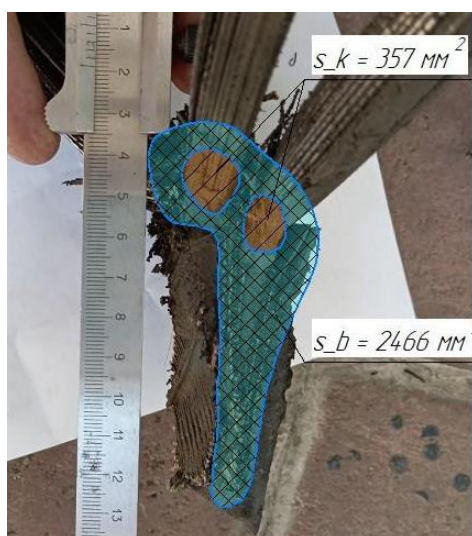


Рисунок 2.17. Основание борта шин 3й группы

На Рисунок 2.15 - Рисунок 2.17 представлены основания бортов шин 1, 2 и 3 группы, соответственно, с указанием типоразмера утилизируемой шины, площади металлического бортового кольца $A_{бк}$ и площади резиновой оболочки A_p .

На Рисунок 2.18 - Рисунок 2.20 представлены графики зависимости усредненного максимального усилия извлечения от внешнего и посадочного диаметра шины, а также площади бортового кольца. На графиках не представлены шины 3ей группы, так как при их извлечении дополнительно проводился надрез бортовой части колеса.

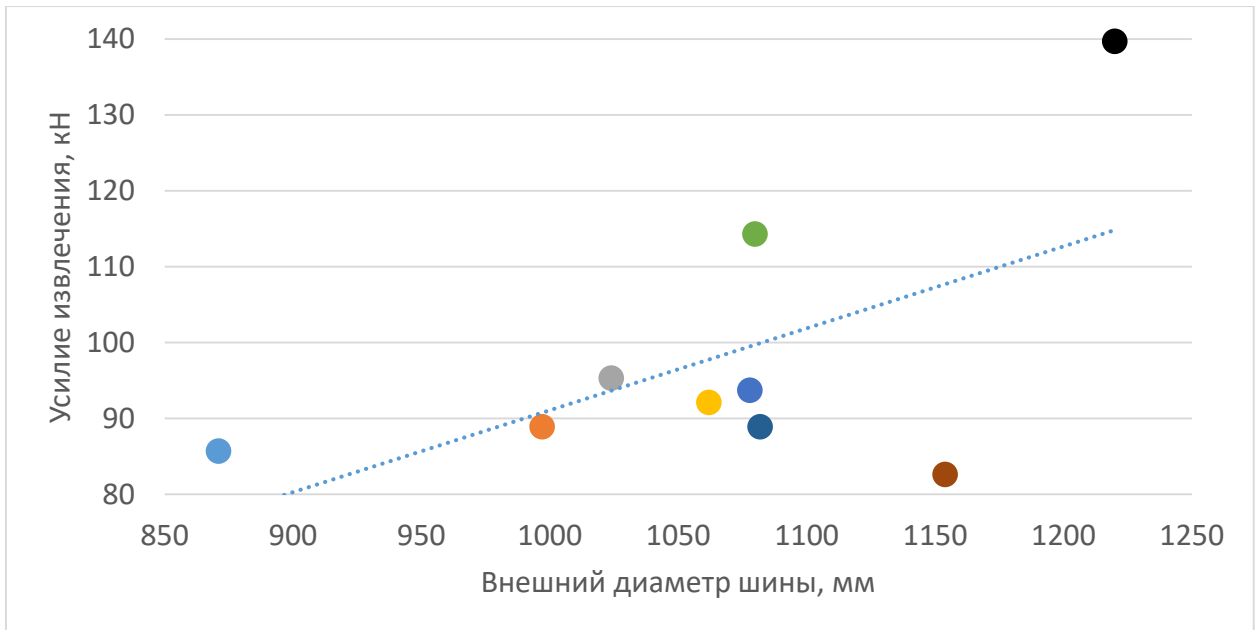


Рисунок 2.18. Зависимость усредненного усилия извлечения от внешнего диаметра шины

На Рисунок 2.18 представлена зависимость усредненного максимального усилия извлечения бортового кольца от внешнего диаметра шины. Корреляционная зависимость между двумя этими параметрами составляет 0.58, что говорит о наличии связи между этими параметрами с 90% вероятностью.

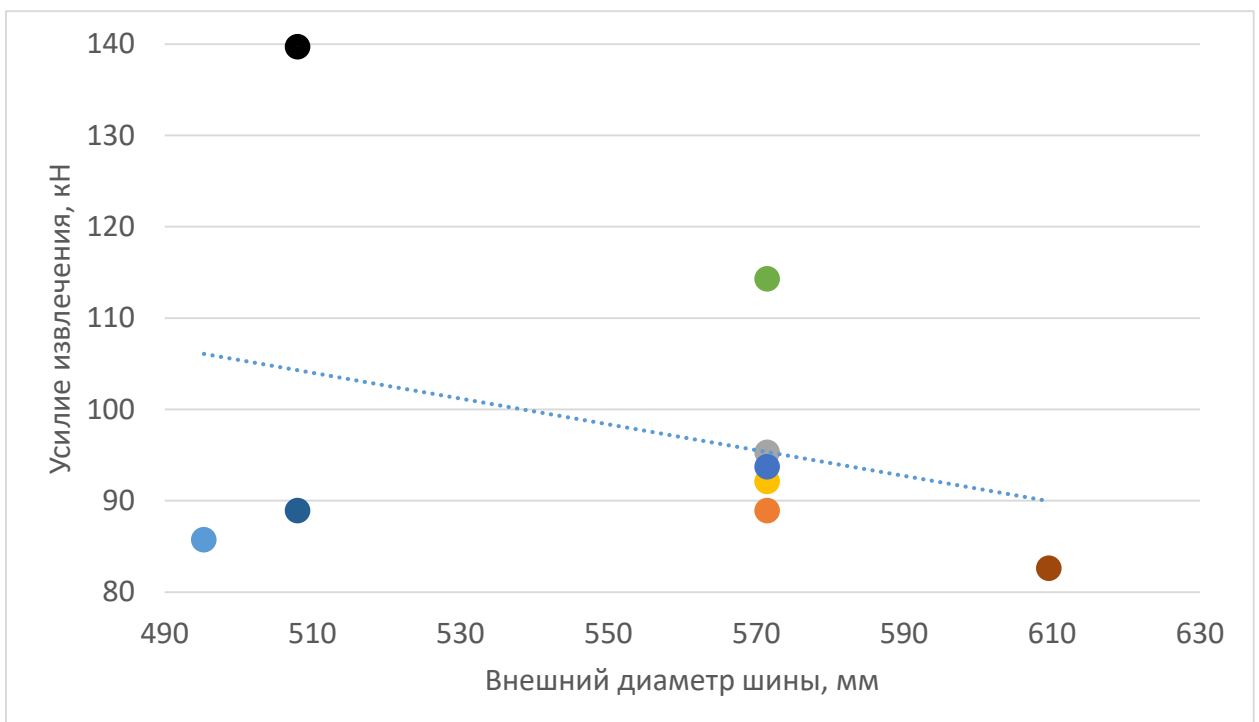


Рисунок 2.19. Зависимость усредненного усилия извлечения от посадочного диаметра шины

На Рисунок 2.19 представлена зависимость усредненного усилия извлечения от посадочного диаметра шины. Корреляция между параметрами составляет: -0.31 , что указывает на незначительную или почти случайную связь между параметрами.

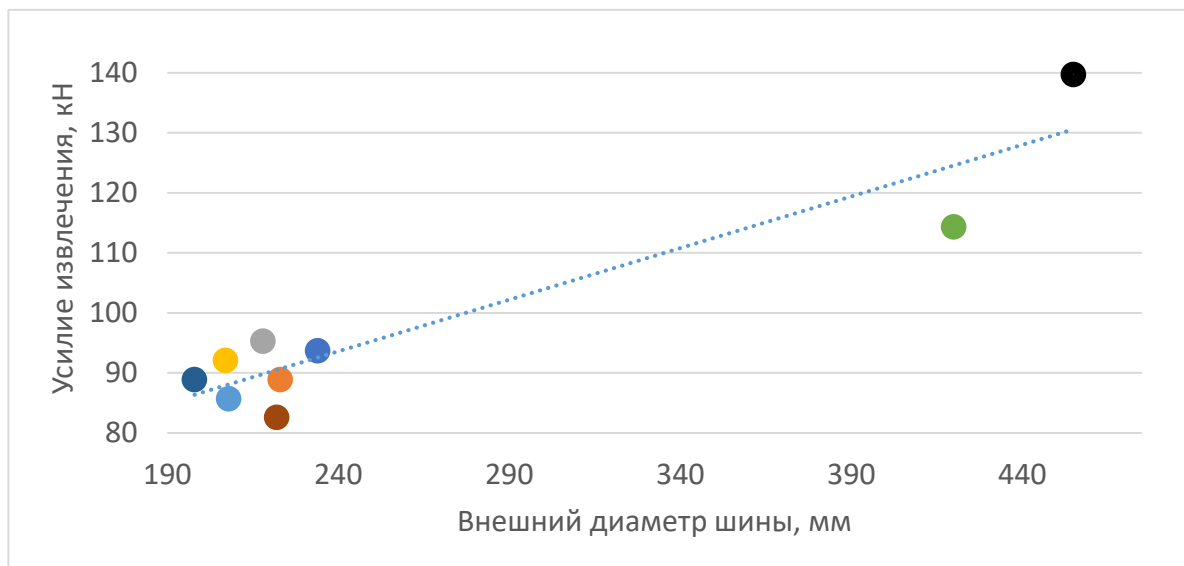


Рисунок 2.20. Зависимость усредненного усилия извлечения от площади бортового кольца

На Рисунок 2.20 представлена зависимость усредненного усилия извлечения от площади бортового кольца шины. Корреляция между параметрами составляет: 0.94 , что указывает на существующую функциональную связь между параметрами.



Рисунок 2.21. Диаграммы изменения давления в системе при извлечении бортового кольца из шин 1 группы

Особенности поведения давления на графиках зависят от конструктивных характеристик конкретной шины:

На Рисунок 2.21 показаны графики изменения рабочего давления в гидравлической системе в процессе извлечения бортового металлического кольца шин 1й группы. У шин 265/70 R22.5, 385/55 R22.5, 11 R22.5, 11 R20 присутствует ярко выраженный начальный пик рабочего давления в 140-150 кгс/см², возникший на 2-3 сек с начала работы гидропривода.

У шины 385/65 R22.5 начальный пик также присутствует, но возникает позже на 5–6 секунде и достигает меньшей величины ≈ 135 кгс/см². Это объясняется более поздним достижением критического напряжения в резине из-за особенностей геометрии и толщины бортовой зоны.

У шин 265/70 R22.5, 385/55 R22.5 и 385/65 R22.5 после пика наблюдается заметный спад давления, поскольку площадь среза резиновой оболочки уменьшается и стабилизируется на протяжении основной фазы протягивания.

У шин 11 R22.5 и 11 R20 давление после начального пика не спадает, а некоторое время удерживается на максимальном уровне 140–150 кгс/см². Это связано с более равномерным и длительным сопротивлением резиновой оболочки по всему периметру борта.

В конце процесса извлечения у шин 265/70 R22.5, 385/65 R22.5 и 11 R20 фиксируется финальный пик давления, после которого происходит резкий сброс до значения холостого хода (80 кгс/см²). Финальный пик обусловлен увеличением нагрузки на крюк в момент, когда шина начинает опрокидываться над уровнем пола, а также ростом площади среза резинового борта из-за уменьшения расстояния между точками приложения усилия на завершающей стадии.

Таким образом, характерные пики давления (начальный и финальный) являются типичными признаками силового процесса извлечения без предварительного ослабления борта и должны учитываться при выборе параметров оборудования и разработке конструктивных мер по снижению пиковых нагрузок на оборудование.

На Рисунок 2.22 представлены графики изменения рабочего давления в системе во времени при извлечении бортового металлического кольца шин 2й и 3й группы.

Вторая группа включает крупногабаритные шины (КГШ) типоразмеров 315/80 R22.5 и 14-20. По сравнению с шинами 1-й группы технологический процесс извлечения характеризуется более высокими значениями максимального рабочего давления (170 кгс/см² и выше). Кроме того, регистрируются периодические резкие всплески давления (160–190 кгс/см²), после которых давление падает практически до уровня холостого хода (80–100 кгс/см²).

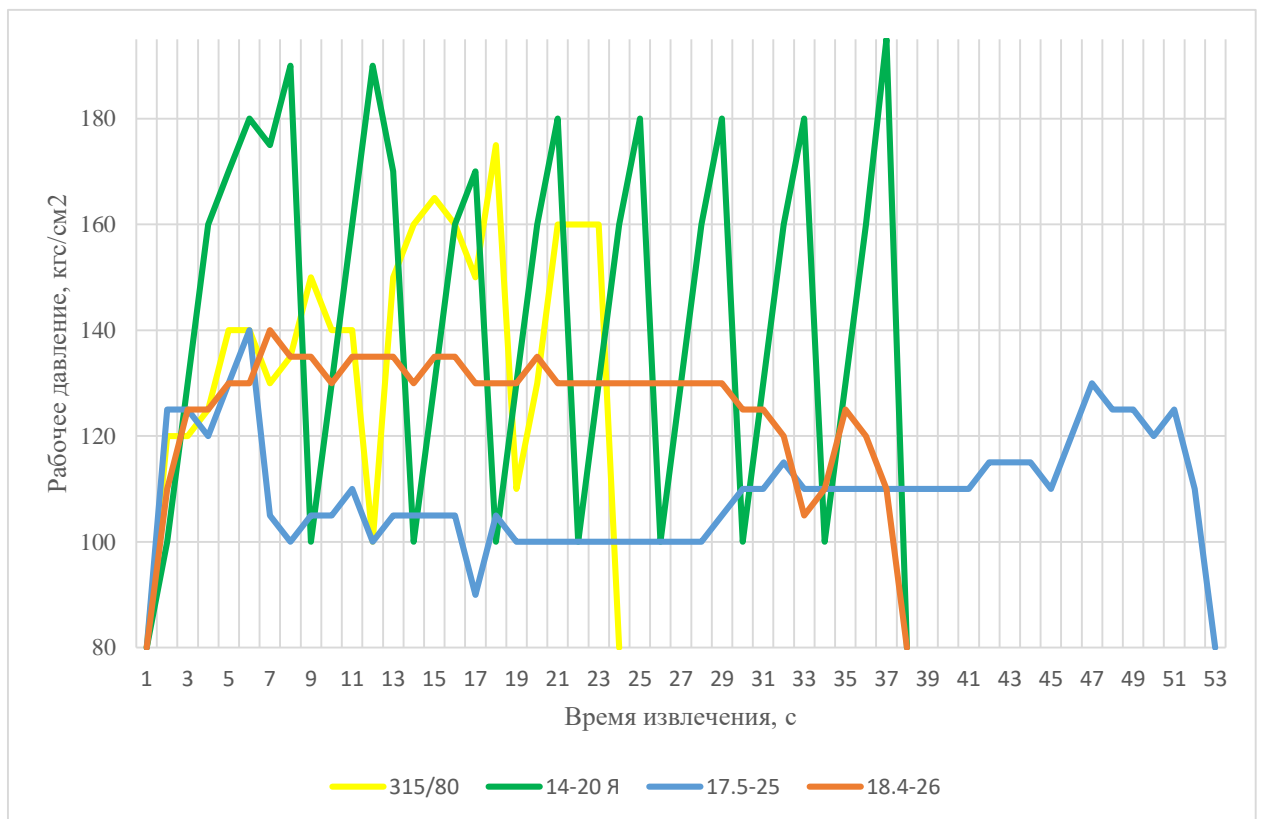


Рисунок 2.22. Диаграммы изменения давления в системе при извлечении бортового кольца из шин групп 2 и 3

Всплески давления обусловлены кратковременными прерываниями процесса извлечения. Металлическое кольцо в массивных КГШ имеет высокую жёсткость и значительную толщину резиновой оболочки, поэтому может частично застревать в отверстии упорной плиты оборудования. Это

приводит к резкому росту сопротивления и, как следствие, к скачкообразному увеличению нагрузки на гидроцилиндр. Для предотвращения разрыва бортового кольца оператор вынужден сбрасывать давление до холостого хода, а затем повторно нагнетать его до необходимого уровня. Данный факт является недостатком оборудования с гидравлическим приводом и подтверждает необходимость разработки альтернативных вариантов.

Третья группа включает покрышки типоразмеров 17.5–25 L-3 и 18.4–26. В этих образцах для облегчения процесса перед извлечением был выполнен диаметральный надрез бортовой части. Но, несмотря на предварительную механическую обработку, процесс извлечения также сопровождается пиками давления в начальный и конечный периоды цикла.

Предварительный надрез резины снижает усилие на основной стадии протягивания за счёт уменьшения площади сопротивления резины и снижения адгезионных сил. Однако начальный пик остаётся, так как в первые секунды требуется преодолеть упругопластическую деформацию и инициировать разрыв в зонах, прилегающих к надрезу. Пики в конце цикла могут быть связаны с опрокидыванием шины, увеличением плеча приложения усилия и ростом площади среза на завершающей стадии.

Характерный пример описанных выше условий протекания процесса зафиксирован при извлечении бортового кольца из крупногабаритной шины 14.00-20 Я-307 (опыт №9, таблица 2.3) с внешним диаметром 1220 мм без диаметрального надреза. Рабочее давление в гидроцилиндре достигло максимума (195 кгс/см²), после чего произошёл разрыв металлического бортового кольца в зоне протягивания через мишень упорной плиты. Причиной послужило заклинивание резинового борта в отверстии мишени.

Натурные испытания на гидравлической установке «Гидровырыватель бортовых колец» позволили выявить значения рабочего давления и максимального усилия извлечения для исследуемого диапазона шин грузового и крупногабаритного типоразмера. Подтверждено наличие характерных пиковых нагрузок в начале и в конце процесса, а также стабилизация усилия в

фазе протягивания. Установлена корреляционная связь между максимальным усилием извлечения и площадью поперечного сечения бортового кольца, а также выявлены качественные различия в силовом поведении между группами шин с разной жёсткостью и толщиной бортовой зоны. Полученные экспериментальные данные создают эмпирическую базу для последующей идентификации коэффициентов аналитической модели и проверки её адекватности реальным условиям эксплуатации.

2.3.3. Определение коэффициентов аналитической модели и статистическая верификация адекватности регрессионной зависимости экспериментальным данным

Для определения коэффициентов K_0-K_5 уравнения (2.88) использованы данные натурных испытаний по 9 шинам (Таблица 2.3) без предварительного надреза бортовой части, поскольку наличие диаметрального надреза существенно снижает сопротивление резиновой оболочки и требует введения отдельного корректирующего коэффициента или модификации модели.

Фиксированные параметры, определённые по конструкторской документации оборудования и результатам видеофиксации процесса извлечения:

- скорость перемещения рабочего зуба $v = 45 \text{ мм/с} = 0,045 \text{ м/с}$;
- эффективная ширина зазора в отверстии мишени упорной плиты $S_{\text{щ}} = 0,25 \text{ м}$.

Определение коэффициентов уравнения (2.88) выполнено методом наименьших квадратов (МНК) в форме множественной линейной регрессии. Математическая постановка задачи представлена в матричной форме (2.91):

$$y = XK + \varepsilon \quad (2.91)$$

где y – вектор-столбец (2.92) наблюдаемых значений максимального усилия извлечения F :

$$y = \begin{pmatrix} 85,7 \cdot 10^3 \\ 88,9 \cdot 10^3 \\ 95,3 \cdot 10^3 \\ 92,1 \cdot 10^3 \\ 93,7 \cdot 10^3 \\ 114,3 \cdot 10^3 \\ 88,9 \cdot 10^3 \\ 82,6 \cdot 10^3 \\ 139,7 \cdot 10^3 \end{pmatrix} \quad (2.92)$$

X – регрессионная матрица признаков размером 9×5 , столбцы которой соответствуют шести слагаемым модели:

1. столбец единиц - для свободного члена K_0 ;
2. $\sqrt{A_{\text{бк}}} \cdot (\mathbf{s}_{\text{щ}} + \mathbf{d}_{\text{пос}})$;
3. A_p ;
4. $v \cdot \sqrt{A_p}$;
5. $A_{\text{бк}}$;

K – вектор-столбец искомых коэффициентов (5×1) (2.93):

$$K = \begin{pmatrix} K_0 \\ K_{\text{бк}} \\ K_{\text{рез}} \\ K_3 \\ K_5 \end{pmatrix} \quad (2.93)$$

ε – вектор случайных ошибок измерений.

Оценка вектора коэффициентов найдена по формуле МНК (2.94):

$$\hat{K} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.94)$$

Вычисления выполнены в среде программирования Python 3.12 с использованием библиотеки numpy. Для повышения точности и проверки результатов дополнительно применялась функция линейной регрессии из библиотеки scikit-learn (Приложение 1).

Полученные значения коэффициентов уравнения (2.88):

$$K_0 = -149 \cdot 10^3;$$

$$K_{\text{бк}} = -2.35 \cdot 10^6;$$

$$K_{\text{рез}} = -106.6 \cdot 10^6$$

$$K_3 = 200.8 \cdot 10^6$$

$$K_5 = 360.9 \cdot 10^6$$

Оценка качества регрессионной модели в работе выполнена на основе коэффициента детерминации и F-критерия значимости регрессии.

Коэффициент множественной детерминации $R^2 = 0,94$, что свидетельствует о том, что модель объясняет около 94 % вариации экспериментальных значений максимального усилия извлечения бортового кольца. Средняя абсолютная ошибка (MAE) составила 3,5 кН, что свидетельствует о приемлемой точности модели при прогнозировании максимального усилия извлечения бортового кольца. При диапазоне экспериментальных значений от 82,6 кН до 139,7 кН средняя ошибка не превышает 3–4 % от типичного уровня нагрузки, что соответствует требованиям инженерных расчётов для гидравлического оборудования. Максимальная относительная ошибка по отдельным экспериментальным точкам не превышает 6,7 %, что свидетельствует о достаточно высокой точности модели даже в наиболее неблагоприятных случаях. Наибольшая погрешность получена на шине 315/70 R22.5 и находится в пределах допустимой погрешности для процессов переработки изношенных шин с учётом естественного разброса свойств резины, адгезии и конструктивных особенностей.

Указанные характеристики рассчитаны по стандартным формулам регрессионного анализа: R^2 – через отношение остаточной и общей суммы квадратов отклонений, MAE – как среднее абсолютное отклонение, максимальная относительная ошибка – как наибольшее значение модуля относительного отклонения по всем девяти экспериментальным точкам.

Таблица 2.4 - Сравнение экспериментальных и расчётных значений усилия извлечения

№	Типоразмер шины	F_эксп, кН	F_расч, кН	Ошибка, кН	Относительная ошибка, %
1	265/70 R19.5	85.7	91.2	-5.5	-6.39
2	385/55 R22.5	88.9	94.2	-5.3	-5.96
3	315/70 R22.5	95.3	88.9	+6.4	+6.67
4	11 R22.5	92.1	88.6	+3.5	+3.80
5	385/65 R22.5	93.7	93.4	+0.3	+0.33
6	315/80 R22.5	114.3	119.3	-5.0	-4.35
7	11.00 R20	88.9	88.6	+0.3	+0.32
8	360/70 R24	82.6	81.6	+1.0	+1.25
9	14.00-20 Я-307	139.7	135.4	+4.3	+3.05

Дополнительно была выполнена проверка статистической значимости регрессионной зависимости с использованием F-критерия. Расчётное значение критерия Фишера для модели составило

$$F_p = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - p - 1}{p} = 15,93 \quad (2.95)$$

С использованием множественной линейной регрессии методом наименьших квадратов получена эмпирическая зависимость максимального усилия извлечения бортового кольца F (кН) от конструктивно-технологических параметров шины и оборудования:

$$F = (-0,149 - 2,35 \cdot \sqrt{A_{\text{БК}}} \cdot (s_{\text{ш}} + d_{\text{пос}}) - 106,6 \cdot A_p + 200,8 \cdot v \cdot \sqrt{A_p} + 360,9 \cdot A_{\text{БК}}) \cdot 10^6 \quad (2.96)$$

Наибольшее влияние на усилие извлечения оказывают два члена модели: K_5 и K_3 .

Коэффициент K_5 при линейном члене $A_{\text{БК}}$ свидетельствует о доминирующей роли площади поперечного сечения бортового кольца. Каждый дополнительный мм^2 площади металлического корда увеличивает усилие примерно на 0,361 Н.

Коэффициент K_3 при нелинейном члене указывает на вклад резиновой оболочки, пропорциональный корню площади поперечного сечения. Это указывает на значительную роль вязкоупругих и деформационных свойств резины.

Отрицательное значение коэффициента $K_{рез} = -106.6 \cdot 10^6$ при линейном члене A_p является типичным для эмпирических моделей сложных процессов разрушения многослойных материалов. Оно отражает компенсаторные эффекты: при увеличении площади поперечного сечения резиновой оболочки пиковое усилие может снижаться за счёт более равномерного распределения деформаций, изменения характера разрушения (переход от локального хрупкого разрыва к более пластичному течению резины), перераспределения контактных напряжений вдоль периметра бортового кольца и снижения концентрации напряжений в критических зонах.

Анализ экспериментальных данных выявил сильную линейную связь между площадью поперечного сечения бортового кольца и площадью резиновой оболочки борта (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,872$). Полученное уравнение линейной регрессии имеет вид (2.97):

$$A_p = 7,35 \cdot A_{бк} + 4 \cdot 10^{-4} \quad (2.97)$$

Корреляционная зависимость площади поперечного сечения резиновой оболочки (A_p) от площади бортового кольца ($A_{бк}$) представлен на Рисунок 2.23.

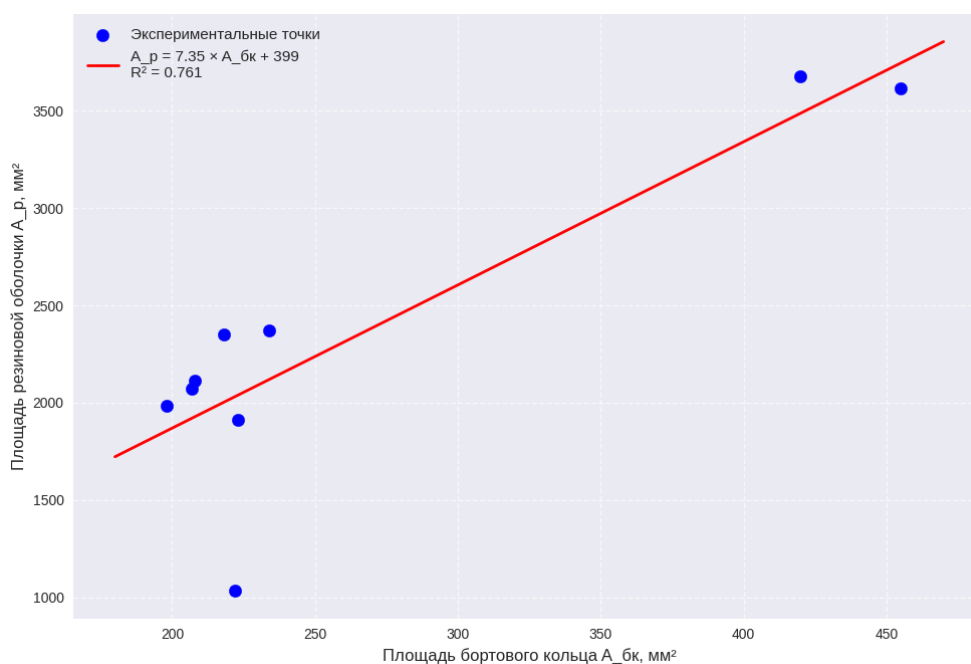


Рисунок 2.23. Корреляционная зависимость площади поперечного сечения резиновой оболочки (A_p) от площади бортового кольца ($A_{бк}$)

Подставив выражение (2.97) в (2.96), получим выражение для определения усилия извлечения бортового кольца от площади бортового кольца при различных посадочных диаметрах и различной ширины щели оборудования (2.98):

$$F = (-0,192 - 2,35 \cdot \sqrt{A_{\text{БК}}} \cdot (s_{\text{щ}} + d_{\text{пос}}) - 425 \cdot A_{\text{БК}} + 181 \cdot v \cdot \sqrt{7,35 \cdot A_{\text{БК}} + 4 \cdot 10^{-4}}) \cdot 10^6 \quad (2.98)$$

На Рисунок 2.24 представлена зависимость усилия извлечения бортового кольца F (Н) от площади бортового кольца $A_{\text{БК}}$ (мм^2). Экспериментальные точки сравниваются с результатами моделирования при четырёх разных значениях посадочного диаметра $d_{\text{пос}}$: 0,4853 м (синяя кривая), 0,5080 м (оранжевая), 0,5715 м (зелёная) и 0,6036 м (красная кривая).

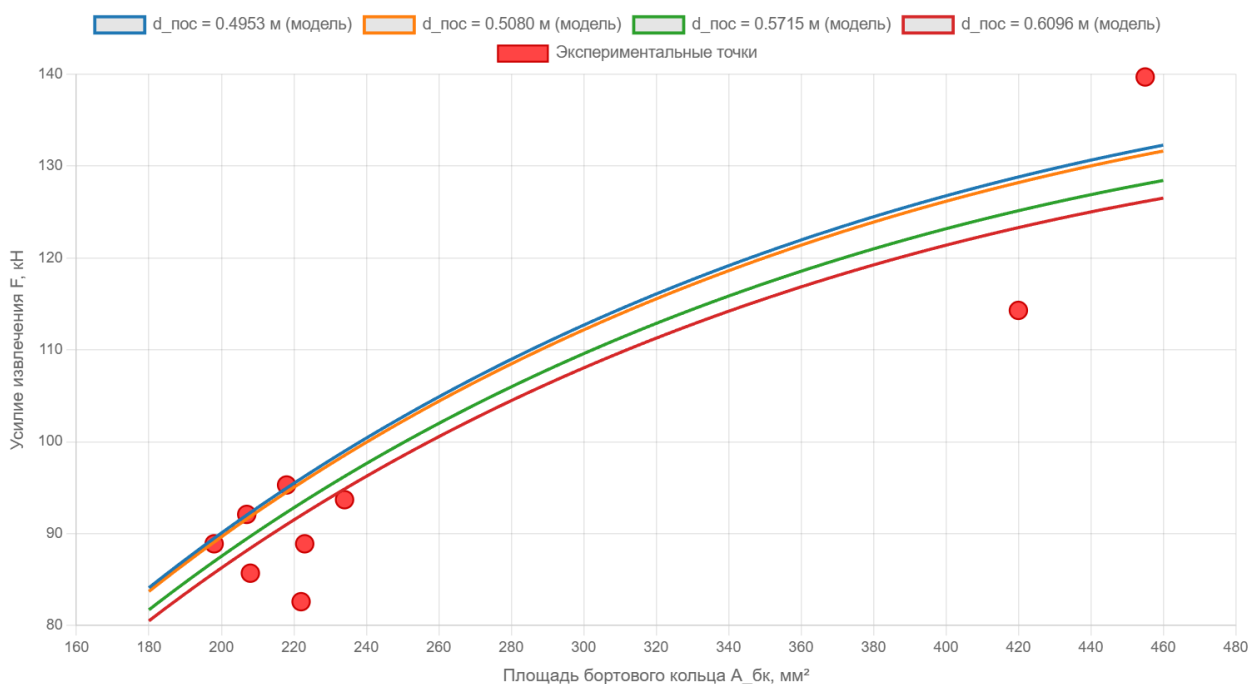


Рисунок 2.24. Зависимость усилия извлечения бортового кольца от площади бортового кольца при различных посадочных диаметрах

Модельные зависимости усилия извлечения бортового кольца от его площади демонстрируют качественное и количественное соответствие экспериментальным данным. Расчётные кривые ($d_{\text{пос}} = 0,4853$ м; 0,5080 м; 0,5715 м; 0,6036 м) воспроизводят нелинейный характер роста усилия с

увеличением площади бортового кольца. Наиболее высокая степень согласования наблюдается при $d_{\text{пос}} = 0,6036$ м (красная кривая) – экспериментальные точки в диапазоне площадей 180–460 мм² располагаются близко к расчётной зависимости. Это свидетельствует о высокой адекватности разработанной модели и корректном учёте основных физических факторов процесса.

Применение метода наименьших квадратов к экспериментальным данным позволило определить численные значения коэффициентов упрощённой модели максимального усилия извлечения (90), при этом коэффициент детерминации $R^2 \approx 0,94$ свидетельствует о высокой степени соответствия модели реальным значениям, а средняя абсолютная ошибка составила около 3,5 кН (относительная ошибка в большинстве случаев не превышает 6–7 %). Наибольший вклад в формирование пикового усилия вносят линейная составляющая, пропорциональная площади поперечного сечения бортового кольца, и нелинейная составляющая, связанная с площадью резиновой оболочки, что подтверждает физическую обоснованность структуры модели. Полученная эмпирическая зависимость (98) может быть использована для прогнозирования нагрузок на оборудование при переработке шин различных типоразмеров и создаёт основу для перехода к практическим рекомендациям по оптимизации конструктивно-технологических параметров процесса извлечения бортовых колец.

2.4 Результаты и выводы

Во второй главе проведены теоретические исследования и разработаны методологические основы для повышения эффективности процесса извлечения бортовых колец из изношенных автомобильных шин. Получены следующие основные результаты и выводы:

1. Определены критерии эффективности исследуемого процесса: максимальное усилие извлечения (F_{max}), скорость извлечения (v) и мощность привода (P). Установлено их непосредственное влияние на производительность оборудования, энергозатраты и надёжность работы при

переработке автомобильных шин, в том числе грузового и крупногабаритного ассортимента.

2. Исходя из конструктивных особенностей шины выполнен анализ стадий извлечения бортового кольца. Выявлены основные физические механизмы, препятствующие процессу извлечения: адгезия между элементами шины, упругопластическая деформация резины, разрыв оболочки, деформация, трение металлического кольца. Показаны различия деформационных процессов при извлечении первого и второго бортовых колец.

3. Построена аналитическая модель процесса извлечения в общем виде, представленная балансом сил (2.2) и обобщённым выражением усилия (2.13) с учётом ограничения на сохранение целостности бортового кольца. Модель включает пять основных составляющих сопротивления и позволяет связать внешние параметры оборудования с внутренними конструктивными и физико-механическими параметрами шины.

4. Процесс извлечения бортового кольца представлен в виде двух этапов: упругая деформация до разрыва резиновой оболочки (2.14) последующее пластическое деформирование при протягивании (2.15). Для каждого этапа получены дифференциальные уравнения движения рабочего органа и аналитические решения для перемещения $x(t)$ (2.54) и скорости извлечения $v(t)$ (2.55). Построены графики, демонстрирующие характерные динамические режимы.

5. Проведена оценка энергетической эффективности. Установлено, что мощность имеет импульсный характер на первом этапе (2.57) и выходит на постоянный уровень P_{∞} в режиме протягивания (2.59). Основные энергозатраты приходятся на стадию разрыва резиновой оболочки.

6. Разработана математическая модель для определения максимального усилия извлечения (2.88), учитывающая геометрические параметры шины: площадь сечения бортового кольца и резиновой оболочки, посадочный диаметр и технологический параметр оборудования - ширину щели. Выявлено

доминирующее влияние площади металлического бортового кольца и нелинейный вклад резиновой оболочки.

7. Выполнены натурные экспериментальные исследования на гидравлической установке «Гидровырыватель бортовых колец». Получены значения максимального усилия для 11 типоразмеров шин, подтверждена высокая корреляция усилия с площадью сечения бортового кольца ($r \approx 0,94$), выявлены характерные пиковые нагрузки и различия деформационных процессов разных групп шин. Методом наименьших квадратов определены коэффициенты модели (2.96). Коэффициент детерминации $R^2 \approx 0,94$ и средняя относительная ошибка $\leq 6,7$ % свидетельствуют о высокой адекватности модели экспериментальным данным.

Разработанные аналитические модели и проведённые экспериментальные исследования являются методологической основой для последующего определения рациональных конструктивно-технологических параметров оборудования, минимизации пиковых нагрузок, снижения энергопотребления и повышения производительности процесса извлечения бортовых колец при утилизации изношенных шин.

Глава № 3. РАЗРАБОТКА КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ КОЛЕЦ

3.1 Компоночные решения электромеханических установок для извлечения бортовых колец

В настоящей работе предлагаются две оригинальные конструкции механических установок, в которых реализован принцип механического извлечения бортового металлического кольца из цельной шины рабочим зубом посредством электромеханического привода. Такой подход обеспечивает универсальность извлечения для различных типоразмеров шин без сложной переналадки, возможность точного регулирования скоростей рабочего и холостого хода, а также снижение динамических нагрузок на конструкцию и повышение надёжности.

Первая из предложенных конструкций - установка для удаления троса из боковой части шины при утилизации (рисунок 3.1) [98] включает в себя раму 1, на которой шарнирно закреплена одним краем качающаяся платформа 2. Второй (подвижный) край платформы соединён с рамой двумя подъемными гидроцилиндрами 3, которые регулируют высоту её подъёма в зависимости от типоразмера шины. На верхней плоскости качающейся платформы 2 жёстко закреплены две параллельные зубчатые рейки 4. По ним перемещается подвижная каретка 6 за счёт зацепления с двумя приводными зубчатыми колёсами 5. Привод перемещения полностью размещён на самой каретке и состоит из регулируемого электродвигателя 9 и кинематически связанного с ним червячного редуктора 10. На нижней плоскости качающейся платформы 2 установлены направляющие 7, по которым катятся упорные ролики 8 подвижной каретки 6. Это обеспечивает точное и стабильное перемещение каретки без перекосов. К подвижному краю качающейся платформы жёстко прикреплена упорная плита 11. Через отверстие в этой плите проходит

рабочий зуб 12, который жёстко закреплён на подвижной каретке 6 и служит для захвата металлического троса 13 шины 14.

Процесс работы установки содержит следующие основные этапы:

1. Настройка качающейся платформы 2 по высоте в соответствии с типоразмером перерабатываемой шины 14. Размещение шины 14 в рабочей зоне с небольшим наклоном к упорной плите 11, включение подъемных гидроцилиндров 3 и подъём платформы до надёжного зацепления рабочего зуба 12 за верхнюю точку внутреннего диаметра шины 14.

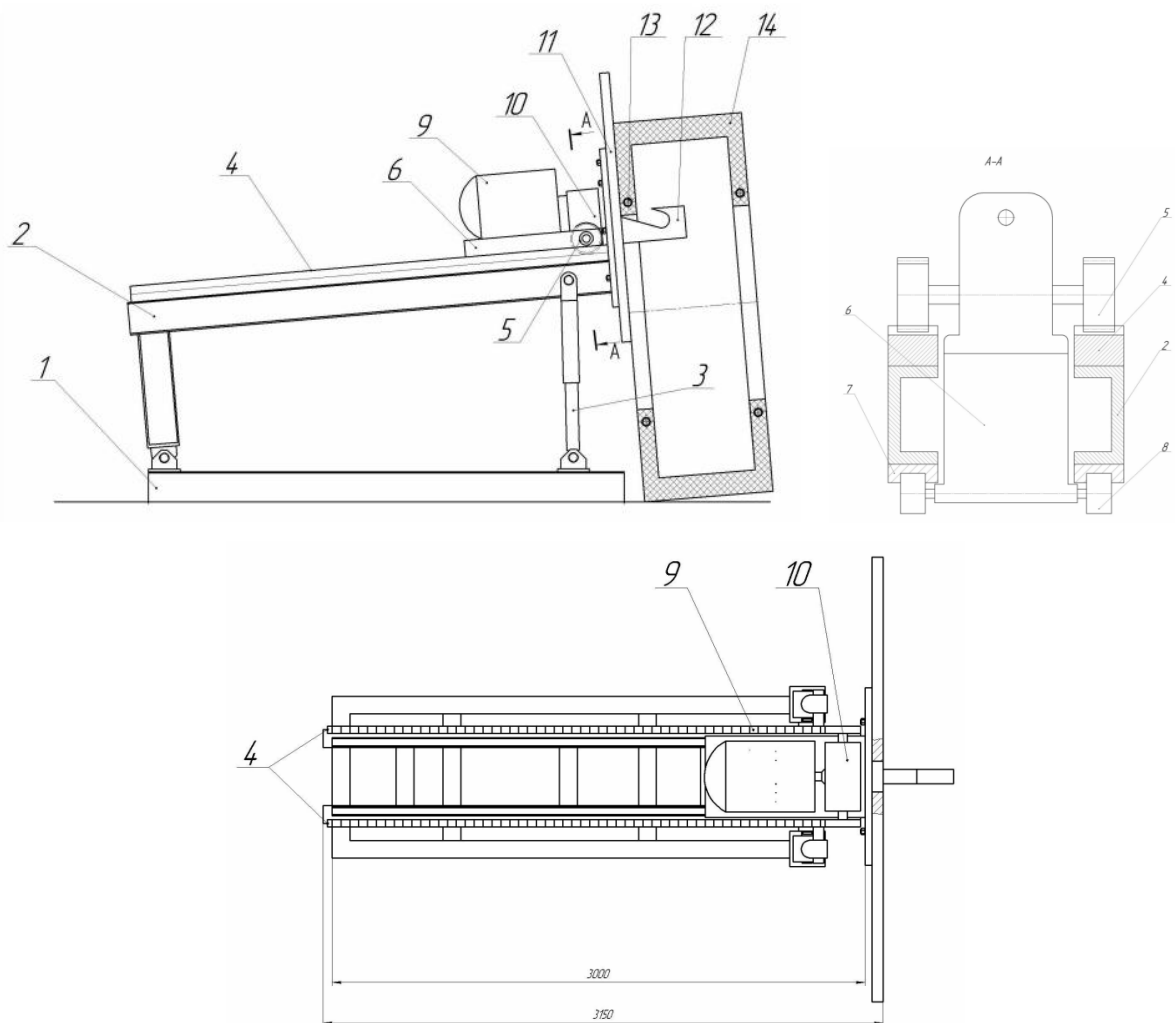


Рисунок 3.1. Общий вид установки для извлечения бортовых колец [98]

2. Запуск регулируемого электродвигателя 9 на оптимальной скорости рабочего хода. Через червячный редуктор 10 вращение передаётся на приводные зубчатые колёса 5, которые, взаимодействуя с зубчатыми рейками 4, перемещают подвижную каретку 6 вдоль платформы. Упорные ролики 8

обеспечивают плавное и точное движение каретки по нижним направляющим 7.

3. Постепенное вытягивание бортового кольца 13 из боковины шины 14 по мере перемещения каретки с одновременным прижатием шины к упорной плите 11 под действием рабочего зуба 12.

4. Полное извлечение металлического бортового кольца 13 из шины 14, снятие обработанной шины с рабочего зуба 12 и удаление её из рабочей зоны установки.

5. Опускание качающейся платформы 2 в исходное (нижнее) положение подъемными гидроцилиндрами 3 для подготовки к следующему циклу.

Разработанная альтернативная конструкция установки для извлечения бортовых колец [99] представляет собой дальнейшее развитие первой. Общий вид установки изображен на Рисунок 3.2.

Установка для удаления бортового металлического кольца из шины при утилизации включает в себя раму 1, на которой, с одной стороны, закреплена качающаяся платформа 2, способная подстраиваться под типоразмер шины. С другой стороны, платформа соединена с рамой подъемными гидроцилиндрами 3, которые регулируют её наклон.

На верхней части качающейся платформы расположены две пары боковых направляющих 4, в которых находятся цилиндрические колёса 5. Эти колёса обеспечивают движение подвижной каретки 6. Также здесь установлен ограничитель движения 7 с конечным выключателем 8, который фиксирует каретку в нужном положении. Кроме того, на верхней части платформы жёстко закреплён один конец гибкого тянущего троса 10. Он соединён с секцией рабочего хода 11 двухсекционного барабана 12 и проходит через вращающийся блок 13. Два других вращающихся блока 14 и 15, которые входят в систему перемещения, закреплены на подвижной каретке 6.

На нижней части качающейся платформы установлен реверсивный электродвигатель 16, который через соединительную муфту 17 приводит в движение двухсекционный барабан 12. Этот барабан закреплён на платформе

с помощью кронштейнов 19 и имеет две секции – рабочего хода 11 и холостого хода 18. К этим секциям крепятся соответствующие гибкие тянущие тросы 10 и 20.

В платформе также сделаны два сквозных отверстия, через которые проходят отклоняющие ролики 21 и 22. На торце подвижной каретки 6 закреплены рабочий зуб 23 и второй конец троса 20, который соединён с секцией холостого хода 18 барабана. К подвижному краю качающейся платформы прикреплена упорная плита 24, через отверстие в которой проходит рабочий зуб 23, связанный с подвижной кареткой 6. Этот зуб захватывает металлическое бортовое кольцо 25 шины 26, подлежащей утилизации.

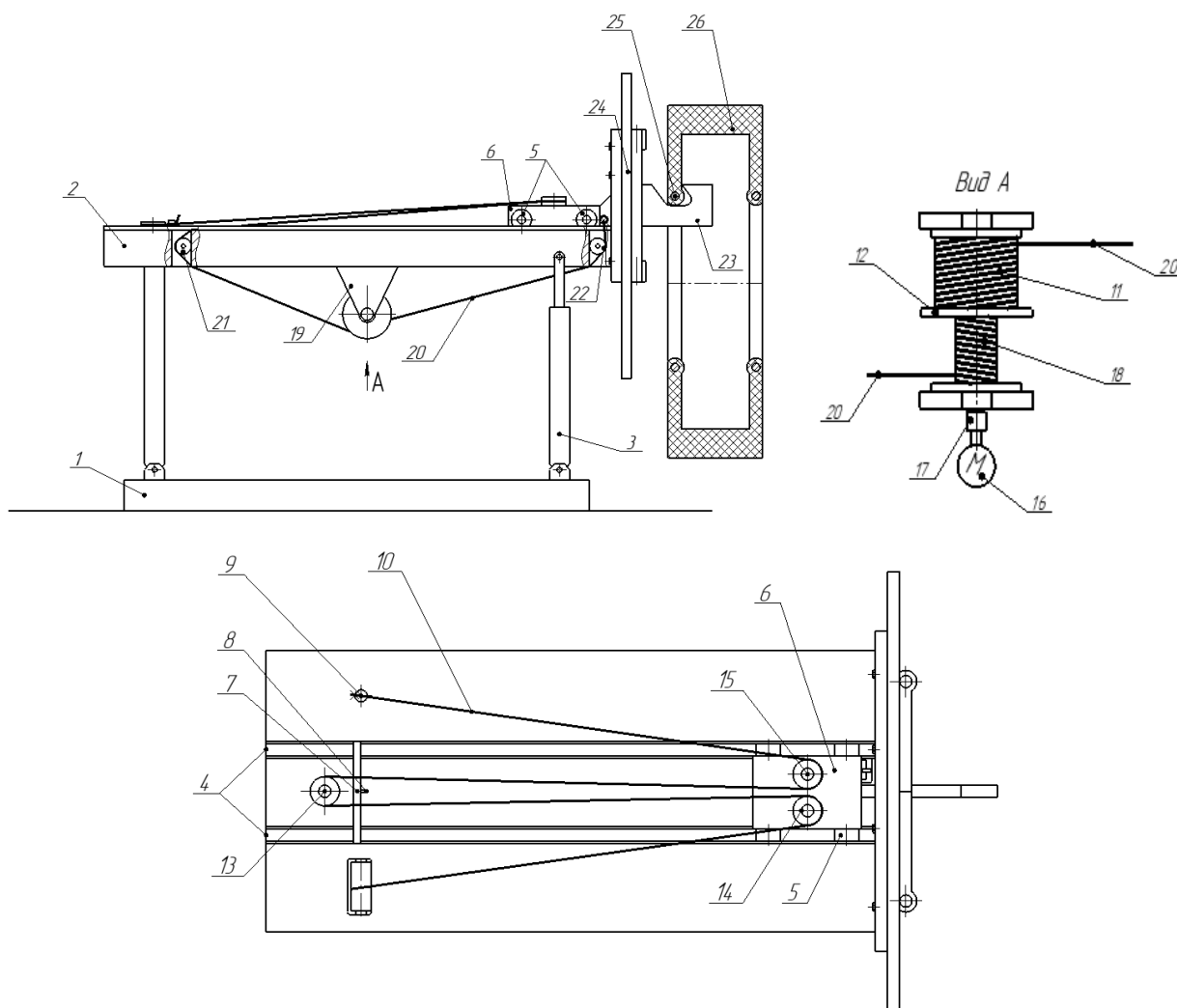


Рисунок 3.2. Общий вид установки для извлечения бортовых колец [99]

Процесс извлечения бортового кольца на установке с двухсекционным барабанным приводом включает следующие основные этапы:

1. Предварительная настройка установки под типоразмер перерабатываемой шины 26: определение требуемой высоты подъёма качающейся платформы 2 и установка положения ограничителя движения 7 с конечным выключателем 8. Размещение шины 26 в рабочей зоне. Подвижная каретка 6 при этом находится в исходном (крайнем заднем) положении.

2. Запуск регулируемого реверсивного электродвигателя 16 в направлении рабочего хода. Через соединительную муфту 17 вращение передаётся двухсекционному барабану 12. Гибкий тянущий трос 10 наматывается на секцию рабочего хода 11 барабана, приводя в движение подвижную каретку 6, которая скользит по параллельным боковым направляющим 4. Одновременно с секции холостого хода 18 разматывается трос 20.

3. Постепенное вытягивание бортового металлического кольца 25 из шины 26 по мере перемещения каретки и рабочего зуба 23. Движение продолжается до срабатывания конечного выключателя 8 при достижении кареткой ограничителя движения 7, после чего электродвигатель 16 автоматически останавливается.

4. Снятие извлечённого кольца 25 с зуба 23, удаление шины 26 из зоны обработки, опускание платформы 2 в исходное положение гидроцилиндрами 3 и возврат подвижной каретки 6 в исходное положение путём включения реверса электродвигателя 16.

Предложенные конструкции электромеханических установок по сравнению с типовыми гидравлическими выдергивателями бортовых колец имеют следующие преимущества: возможность более точного регулирования скорости, снижение энергопотребления, возможность ускоренного холостого хода, что позволяет сократить общий цикл обработки на 20–35 % и повысить надёжность оборудования в целом.

Полученные технические решения создают основу для оптимизации конструктивно-технологических параметров этапа подготовки шин к

измельчению и могут быть рекомендованы для внедрения на предприятиях по переработке изношенных шин.

3.2 Численное моделирование процесса начальной стадии деформирования бортового кольца при его извлечении

Для определения рациональных конструктивных параметров лабораторной установки необходимо выявить влияние конструктивно-технологических характеристик оборудования на процесс извлечения бортового кольца из шин. С этой целью применено численное моделирование, которое позволило воспроизвести начальную стадию процесса извлечения бортового кольца в контролируемых условиях без необходимости проведения большого количества дорогостоящих физических экспериментов на реальных шинах.

На начальном этапе процесса (рисунок 2.3, б), когда происходит упругая и упругопластическая деформация резинового борта и бортовой проволоки, но разрыв бортовой зоны ещё не наступает, силы адгезии F_1 и разрыва F_2 равны нулю. В этот момент суммарное усилие извлечения F определяется преимущественно деформационными составляющими (2.14): деформацией бортового кольца F_3 , деформацией резиновой оболочки F_4 и потерями на трение в контактной зоне F_5 .

В настоящей работе численная модель на начальной стадии процесса ограничена учётом деформации бортового кольца без включения в расчётную схему резинового слоя, непосредственно окружающего проволочный пучок. Такое допущение связано с рядом причин.

На начальном этапе извлечения сопротивление перемещению бортового кольца обусловлено преимущественно его упругопластической деформацией и растяжением проволок в каркасе под действием контактной нагрузки от крюка. Резиновая оболочка в этот период не подвергается существенным необратимым деформациям или разрушениям. Преобладающее значение коэффициента K_5 в модели (2.96) подтверждает, что основным фактором

сопротивления при разрыве и протягивании является именно металлическая конструкция бортового кольца.

Включение в модель гиперупругого поведения резины с учётом больших деформаций, нелинейного контакта и переменного трения существенно усложняет расчёт.

Основной целью моделирования на данном этапе являлось получение консервативной (завышенной) оценки перемещения бортового кольца Dx и напряжённого состояния в проволоках, что соответствует принципу «наихудшего сценария» при проектировании привода и определении минимально необходимого хода рабочего органа. Исключение резинового слоя из расчётной схемы приводит к завышению деформации кольца и, соответственно, к более жёстким требованиям к конструкции, что повышает надёжность принимаемых инженерных решений.

В качестве выходных параметров эксперимента выбраны максимальная деформация бортового кольца в направлении вытягивания (Dx , мм) и максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу в элементах бортовой зоны шины ($[\sigma]$, МПа).

Поскольку численное моделирование воспроизводит только начальную стадию процесса извлечения, максимальная деформация бортового кольца Dx отражает величину перемещения бортового кольца относительно бортовой зоны шины на этапе, когда происходит упругая и упругопластическая деформация материалов, но полное отделение кольца ещё не наступает. Величина Dx непосредственно определяет требуемый минимальный рабочий ход крюка на начальной фазе, а следовательно, влияет на длину хода привода. Учёт этого показателя позволяет на стадии проектирования оценить габариты рабочей зоны оборудования.

Максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу в бортовом кольце шины характеризует напряжённое состояние проволочного пучка под действием контактной нагрузки от крюка в момент, когда происходит интенсивное упругопластическое растяжение и изгиб проволок, но ещё не

наступает разрыв резиновой оболочки. Этот параметр необходим для прогнозирования начала пластического течения стали, так как переход в пластическую область определяет необратимые изменения и риск нарушения целостности бортового кольца. Контроль этого параметра позволяет выявить неблагоприятные комбинации геометрических параметров крюка и мишени. Тем самым обосновывается выбор конструктивных решений установки, которые обеспечивают равномерное распределение нагрузки по пучку, снижают пиковые значения напряжений и предотвращают преждевременное разрушение кольца.

Максимальное напряжение бортовой проволоки $[\sigma]$ не должно превышать предел текучести (таблица 2.1) $\sigma_{0.2}$ в пределах 1200-1800 МПа. В настоящей работе в качестве расчётного ограничения принято 75 % от минимального значения предела текучести. Таким образом, максимальное допустимое напряжение в бортовой проволоке составляет:

$$\sigma_{max} \leq 0,75 \cdot 1200 = 900 \text{ МПа} \quad (3.1)$$

В качестве факторов эксперимента выбраны: ширина щели мишени в упорной плите оборудования ($s_{щ}$, мм), ширина крюка оборудования – (b , мм) и площадь поперечного сечения бортового кольца ($A_{бк}$, мм²).

Ширина щели мишени в упорной плите оборудования ($s_{щ}$, мм) определяет степень заземления бортовой зоны шины и характер распределения контактных давлений между резиновым бортом и опорной поверхностью. Натуральное значение основного уровня варьирования фактора принято $s_{щ} = 225$ мм, интервал варьирования 75 мм. Такой диапазон охватывает типичные конструкции промышленных и лабораторных установок для шин 15-22 типоразмера.

Ширина крюка оборудования (b , мм) непосредственно влияет на площадь контакта с бортовым кольцом, распределение контактного давления по пучку проволок и степень локальной концентрации напряжений. Основной уровень принят $b = 20$ мм, интервал варьирования 10 мм.

Площадь поперечного сечения бортового кольца ($A_{\text{БК}}$, мм²) соответствует типоразмеру шины и жёсткости кольца. Основной уровень выбран $A_{\text{БК}} = 320$ мм², интервал варьирования 100 мм². Данный диапазон соответствует значениям бортовых колец в шинах грузоподъёмной и карьерной техники среднего класса (таблица 2.3), что обеспечивает применимость модели к большинству крупногабаритных шин.

Факторное пространство представлено на (Рисунок 3.3), а условия эксперимента приведены в

Таблица 3.1.

Для перехода от кодированных значений к натуральным используем формулу:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_i^0}{\Delta x_i} \quad (3.2)$$

где $x_i = \pm 1,68; \pm 1; 0$ – кодированное значение i -го фактора; \tilde{x}_i – натуральное значение i -го фактора; \tilde{x}_i^0 – натуральное значение основного уровня i -го фактора; Δx_i – интервал варьирования i -го фактора, $\Delta x_i = \frac{1}{2}(\tilde{x}_{i \max} - \tilde{x}_{i \min})$; $\tilde{x}_{i \max} - \tilde{x}_{i \min}$ – натуральные значения верхнего и нижнего уровней i -го фактора;

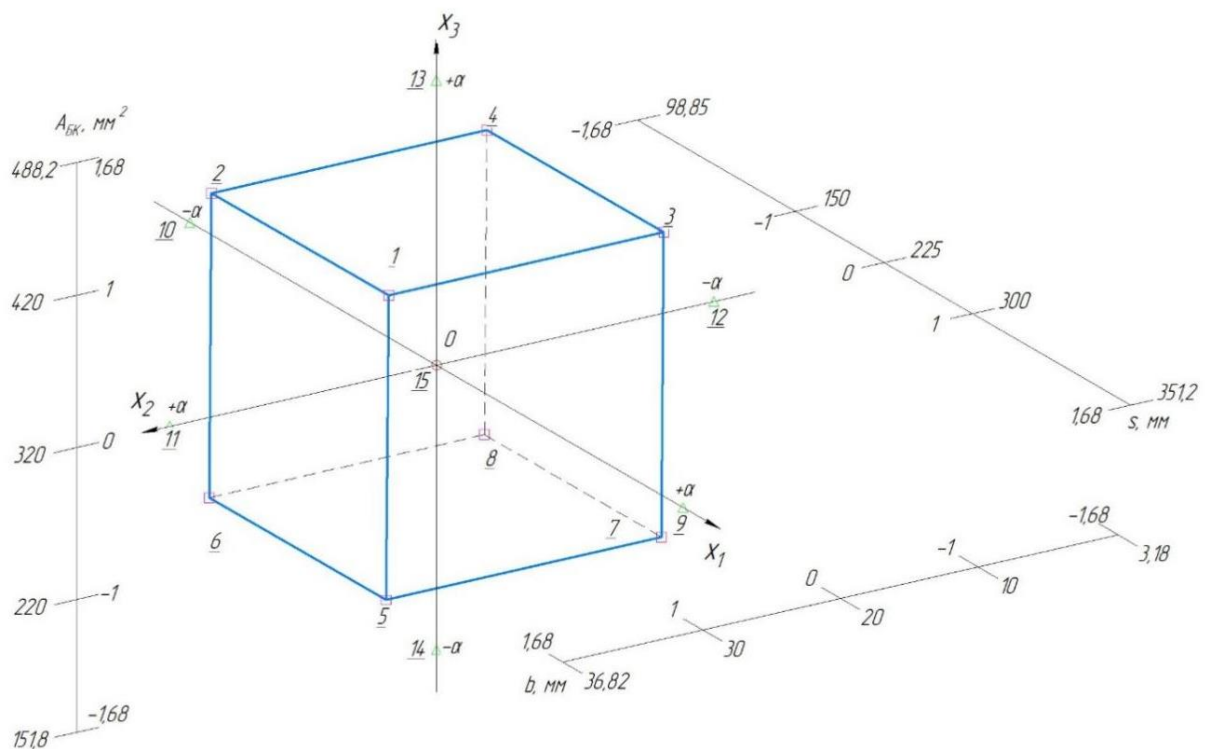


Рисунок 3.3. Схема трехфакторного пространства для ЦКП второго порядка

Таблица 3.1 - Условия экспериментов

Обозначение факторов		Уровни факторов										Интервалы варьирования факторов
		“Звёздный +”		Верхний		Основной		Нижний		“Звёздный -”		
нат.	код.	нат.	код.	нат.	код.	нат.	код.	нат.	код.	нат.	код.	
$S_{щ}$, мм	x_1	351,2	+a	300	+1	225	0	150	-1	98,85	-a	75
b , мм	x_2	36,82	+a	30	+1	20	0	10	-1	3,18	-a	10
$A_{6к}$, мм	x_3	488,2	+a	420	+1	320	0	220	-1	151,8	-a	100

В таблице 3.2 представлена матрица рототабельного равномерного планирования второго порядка применительно к задачам исследования.

Экспериментальное исследование требовало расчёта ключевых параметров процесса извлечения бортового кольца: прикладываемого усилия, распределения напряжений в металлокорде, а также геометрических и технологических характеристик системы. Для решения этой задачи применён метод конечных элементов, обеспечивающий комплексный анализ взаимодействия компонентов. 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 3.4).

Таблица 3.2 - Матрица рототабельного равномерного планирования второго порядка

№ оп	x_0	x_1	\tilde{x}_1	x_2	\tilde{x}_2	x_3	\tilde{x}_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Y1, мм	Y2, МПа	
«Ядро» плана	1	+	+	300	+	30	+	420	+	+	+	+	+	+	8,46	341,7
	2	+	-	150	+	30	+	420	+	-	-	+	+	+	1,86	215,6
	3	+	+	300	-	10	+	420	-	+	-	+	+	+	8,81	344,2
	4	+	-	150	-	10	+	420	-	-	+	+	+	+	2,13	225,2
	5	+	+	300	+	30	-	220	-	-	+	+	+	+	25,67	772
	6	+	-	150	+	30	-	220	-	+	-	+	+	+	4,9	496,2
	7	+	+	300	-	10	-	220	+	-	-	+	+	+	26,36	792,7
	8	+	-	150	-	10	-	220	+	+	+	+	+	+	5,4	502,3
Звездные точки	9	+	+1.68	351,2	0	20	0	320	0	0	0	2,83	0	0	18,73	1060,3
	10	+	-1.68	98,85	0	20	0	320	0	0	0	2,83	0	0	1,34	153,6
	11	+	0	225	+1.68	36,8	0	320	0	0	0	0	2,83	0	6,45	290,8
	12	+	0	225	-1.68	3,18	0	320	0	0	0	0	2,83	0	7,57	353,3
	13	+	0	225	0	20	+1.68	488,2	0	0	0	0	0	2,83	3,4	226,5
	14	+	0	225	0	20	-1.68	151,8	0	0	0	0	0	2,83	25,22	975,6
	15	+	0	225	0	20	0	320	0	0	0	0	0	0	6,73	311,3

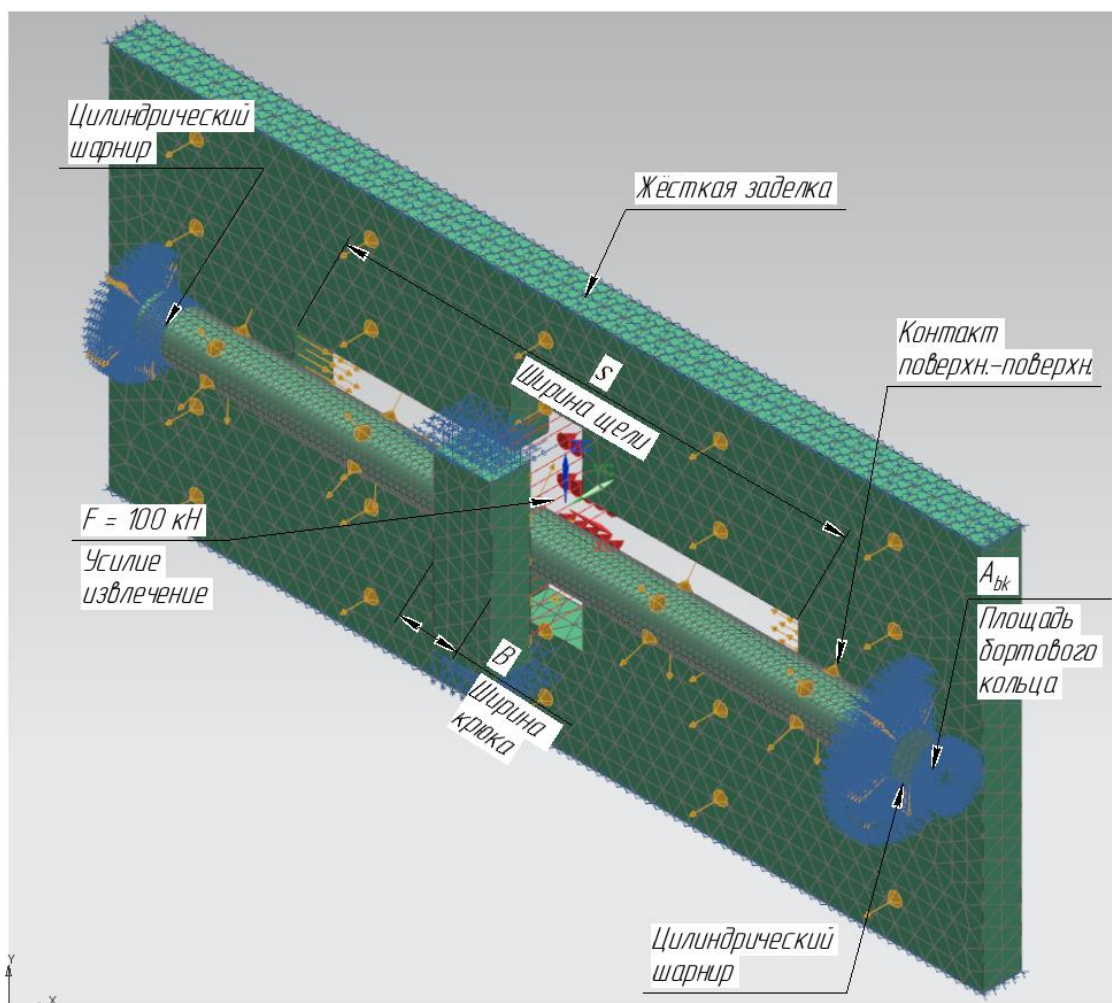


Рисунок 3.4. КЭ модель бортового кольца с упорной плитой в сборе с наложенными ограничениями, нагрузками и объектами симуляции

Упорная плита выполнена в виде параллелепипеда со сквозным параметризованным пазом, имитирующим щель мишени длиной $s_{щ}$. Плита жёстко зафиксирована в пространстве с помощью ограничения: жёсткая заделка.

Бортовое кольцо выполнено в виде стержня с изменяемым поперечным сечением, $A_{бк}$. С двух сторон бортовое кольцо ограничено цилиндрическим шарниром без возможности поворота и перемещения в радиальном направлении, но с возможностью перемещения в осевом направлении. Материал бортового кольца задан вручную и соответствует физико-механическим характеристикам таблице 3.3.

Крюк выполнен в виде идеализированной модели – параллелепипеда. С шириной – b . К торцу крюка приложена распределённая нагрузка ($F = 100$ кН),

равная среднему усилию извлечения бортового кольца из борта шины при проведении натурального эксперимента (таблица 2.3).

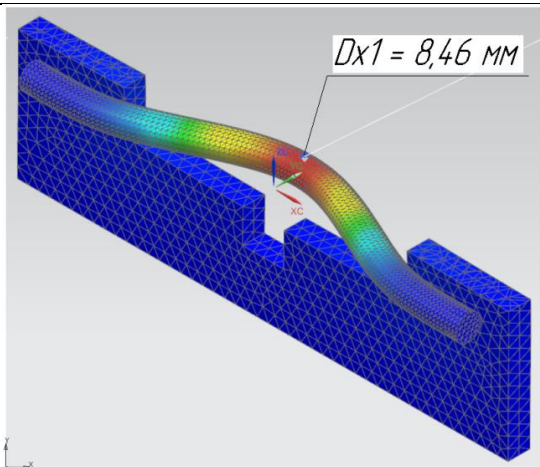
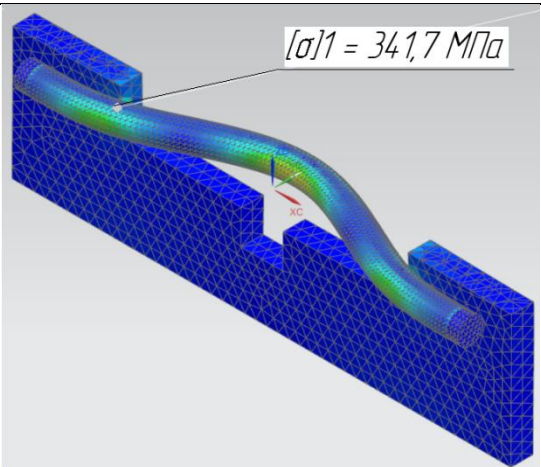
Таблица 3.3 - Физико-механические характеристики проволоки

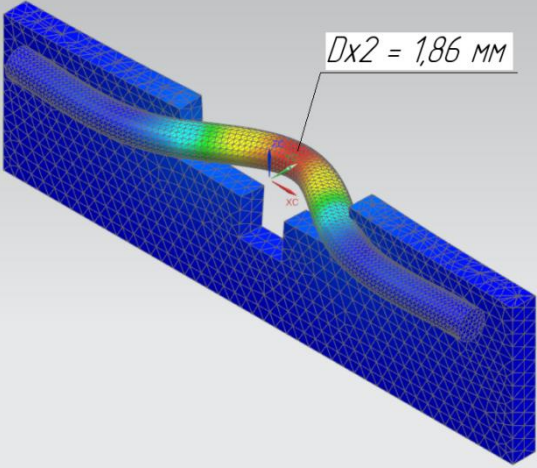
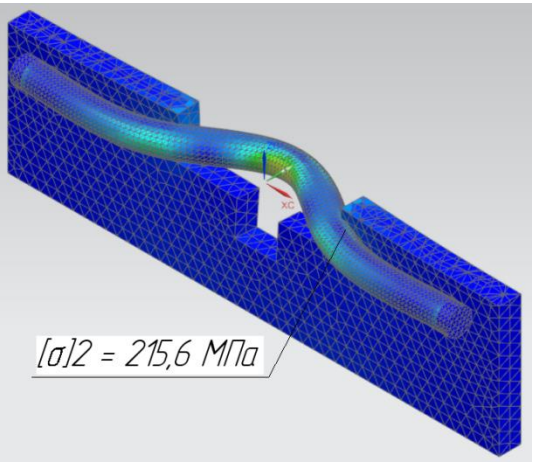
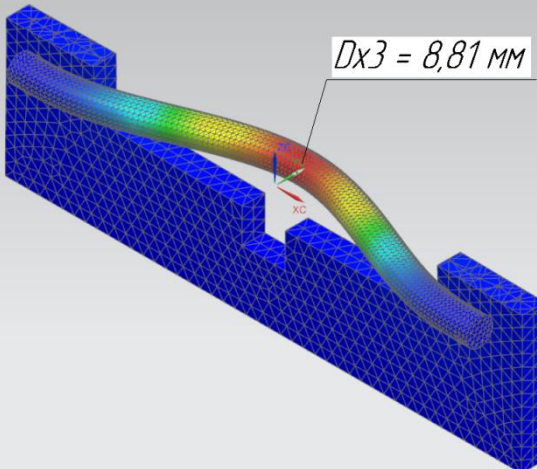
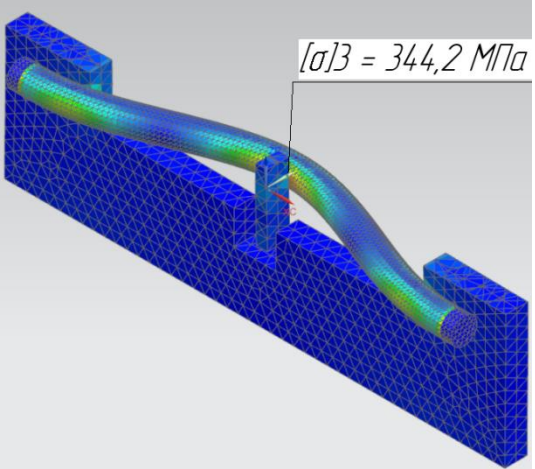
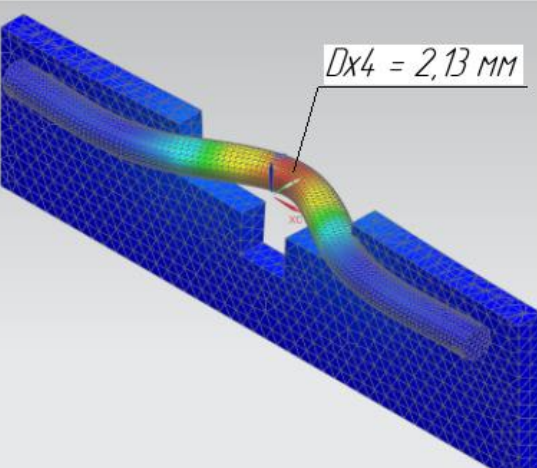
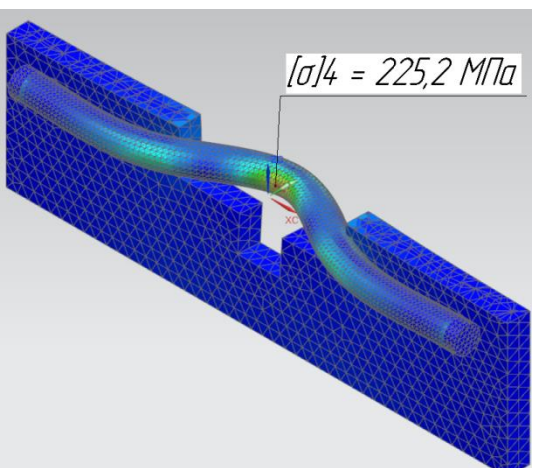
Наименование	Обоз-е	Значение
Плотность	ρ	7,85г/см ³
Предел прочности при растяжении	(σ_B)	2000 МПа
Предел текучести	($\sigma_{0.2}$)	1500 МПа
Модуль упругости	(E)	200 ГПа
Коэффициент Пуассона	(ν)	0,3
Модуль сдвига	G	77,5 ГПа

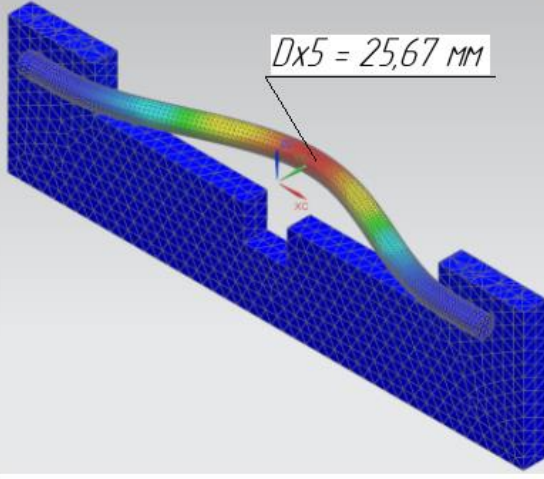
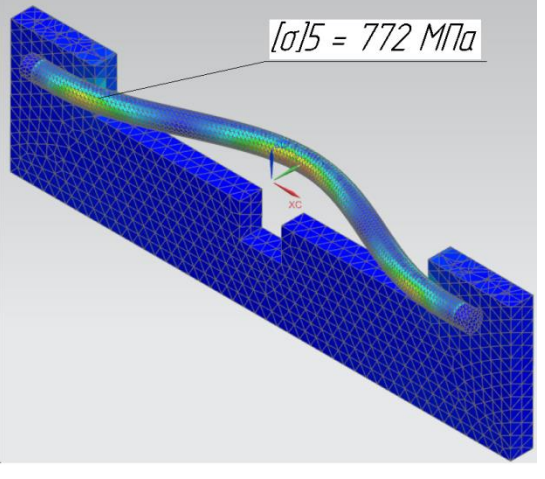
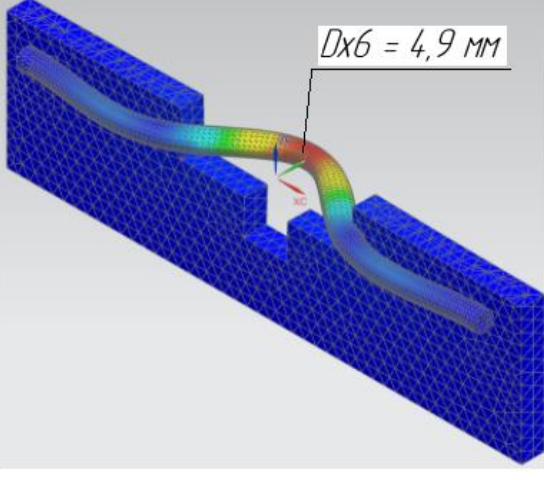
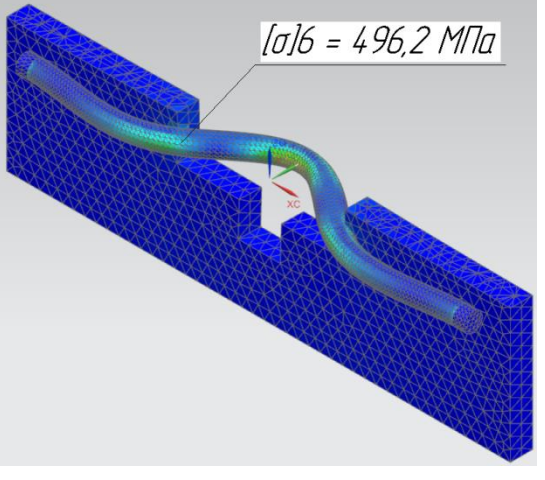
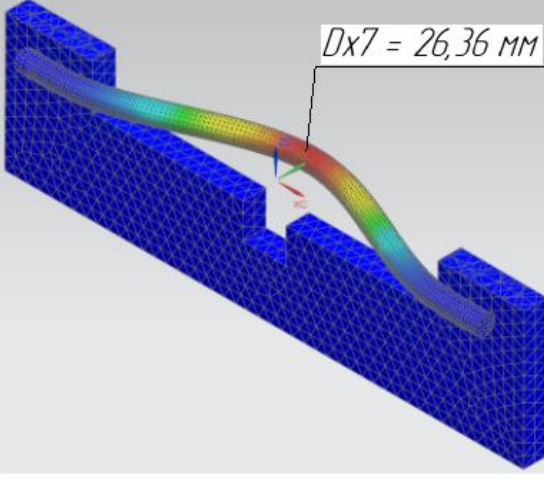
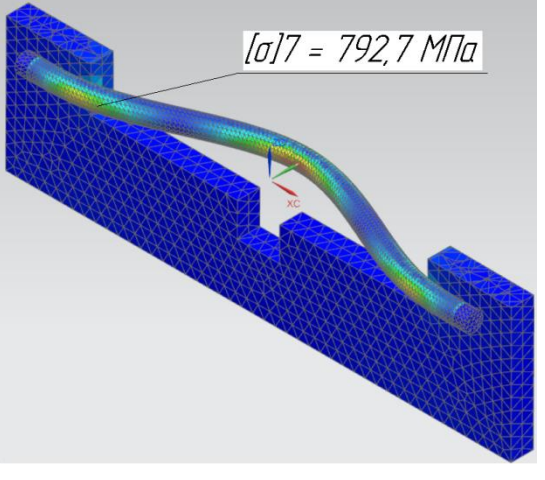
Для моделирования соприкосновения опорной плиты, крюка и бортового кольца применён объект симуляции – контакт "поверхность-поверхность".

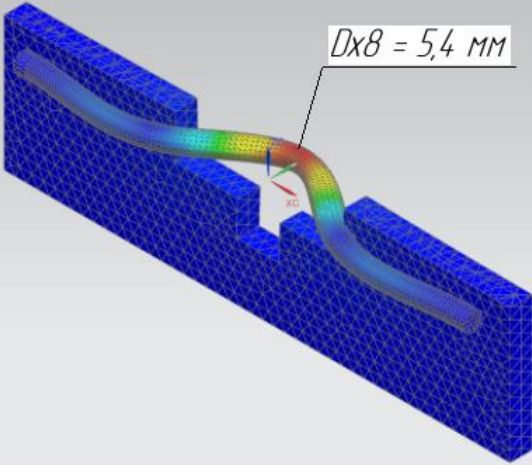
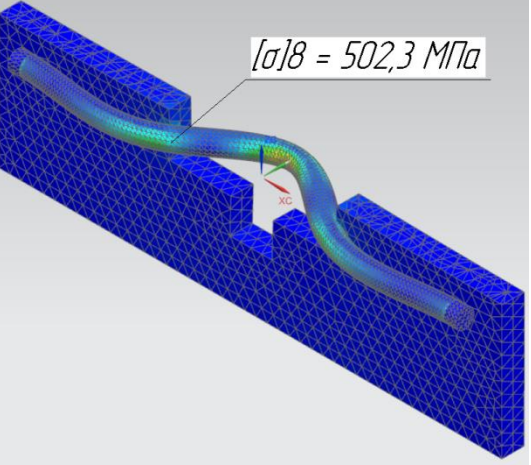
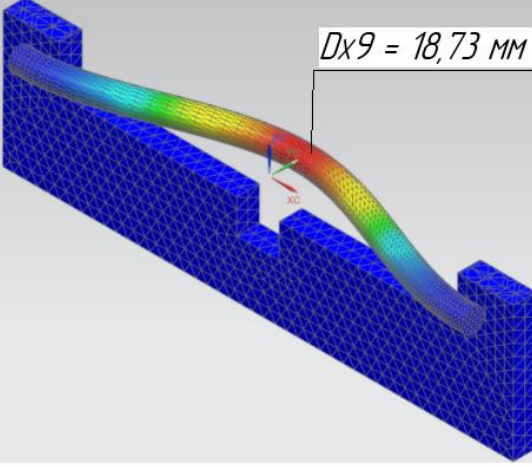
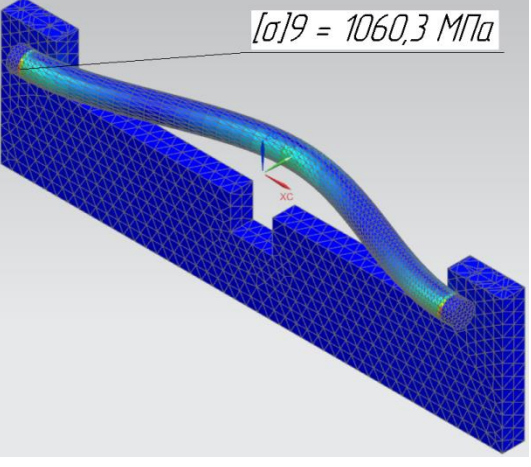
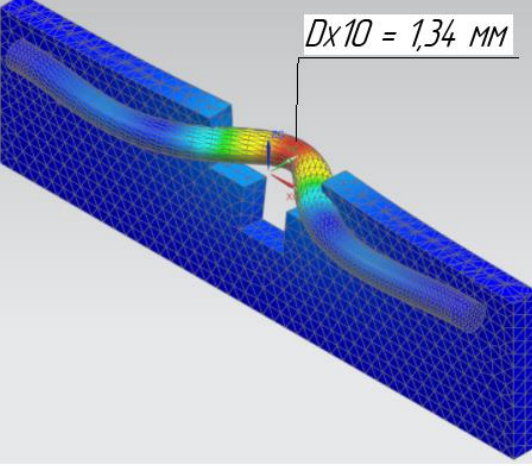
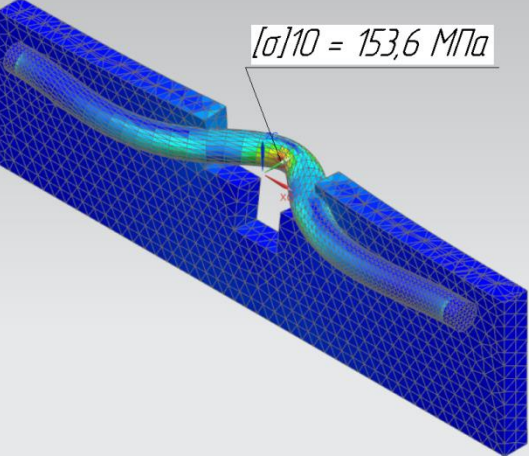
В ходе исследования были вычислены конечно-элементные модели с двумя необходимыми параметрами (таблица 3.4.) – Y1 и Y2. Для проведения эксперимента необходимо выполнить расчёты, включающие в себя оценку усилия, необходимого для извлечения бортового кольца, напряжений, возникающих в бортовом кольце, а также конструктивных параметров установки

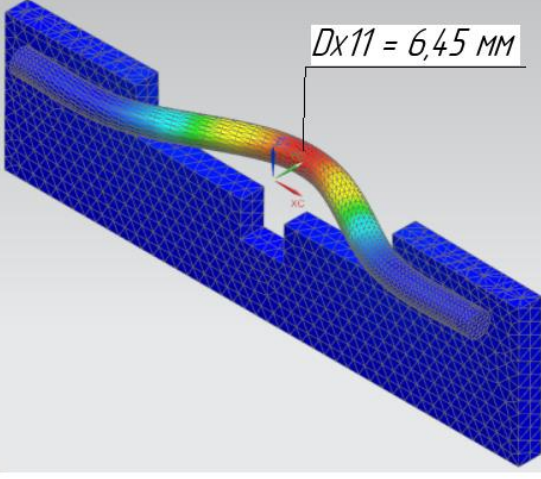
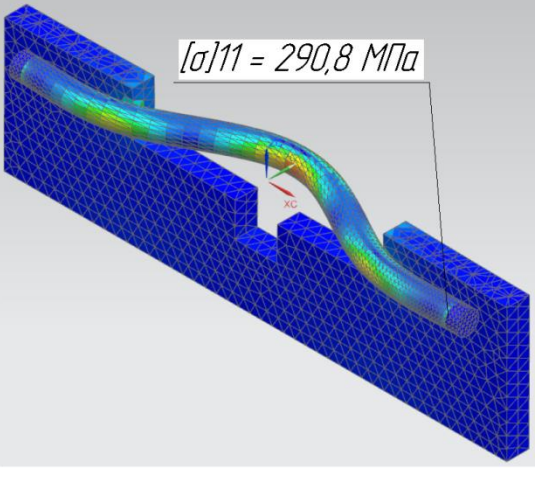
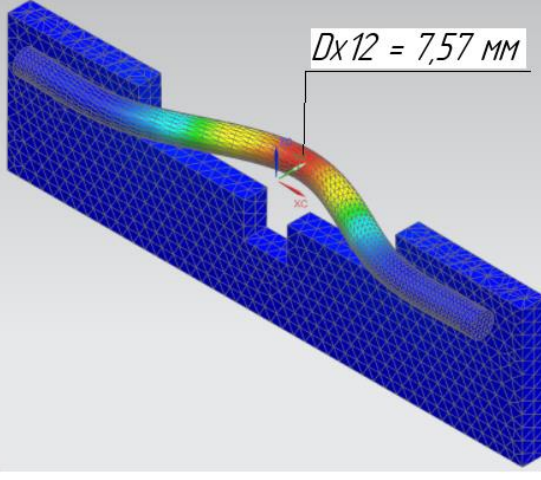
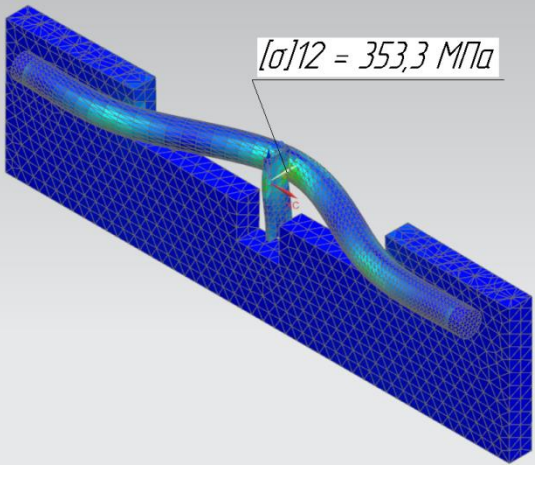
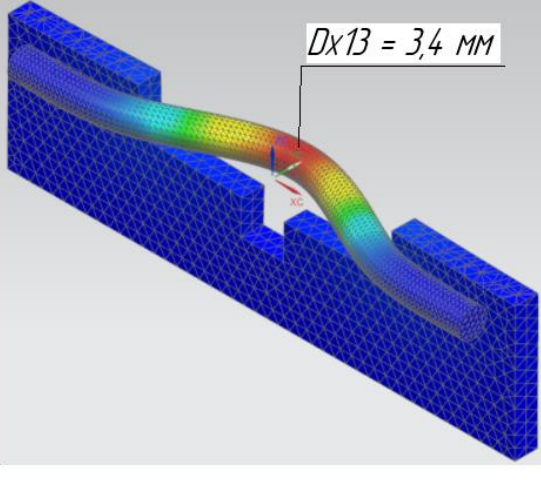
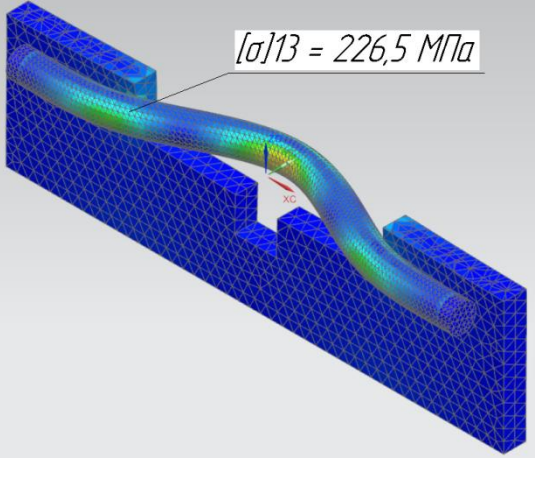
Таблица 3.4 - Результаты численного моделирования

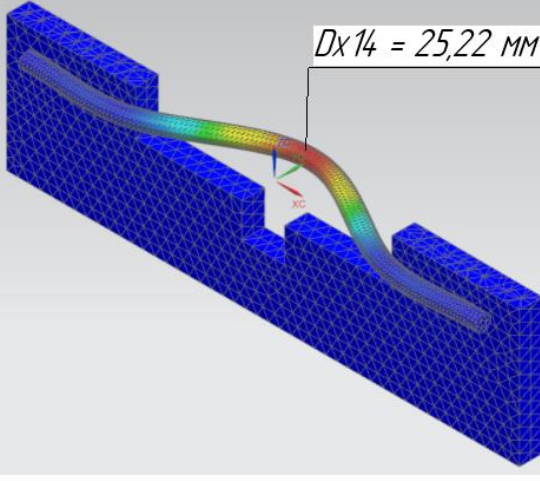
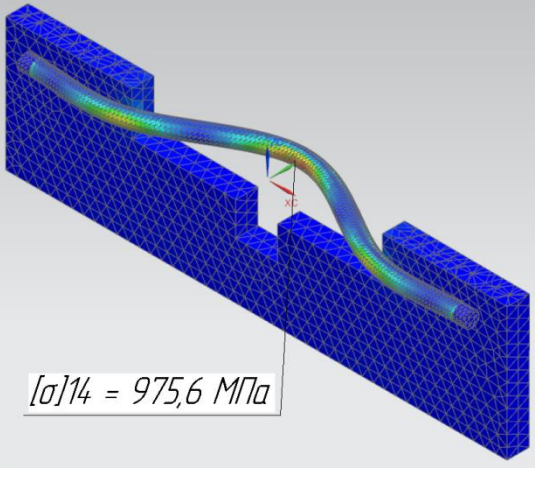
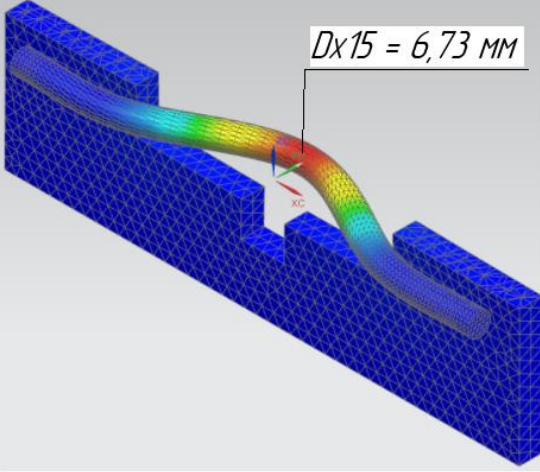
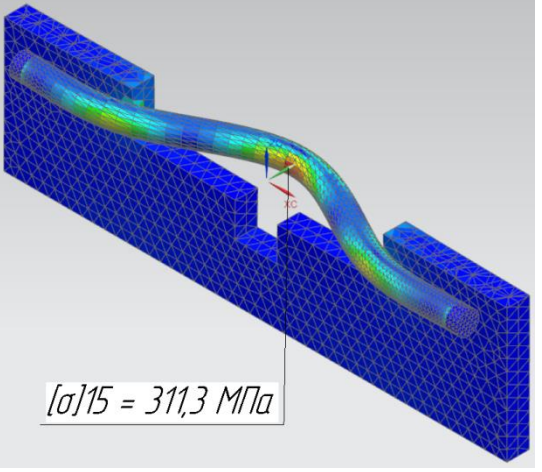
№ эксп	$Y1 = f(x_1, x_2, x_3)$ $Dx = f(s_{ш}, b, A_{бк})$	$Y2 = f(x_1, x_2, x_3)$ $[\sigma] = f(s_{ш}, b, A_{бк})$
1		

№ ЭКСП	$Y1 = f(x_1, x_2, x_3)$ $Dx = f(s_{III}, b, A_{6K})$	$Y2 = f(x_1, x_2, x_3)$ $[\sigma] = f(s_{III}, b, A_{6K})$
2		
3		
4		

№ ЭКСП	$Y1 = f(x_1, x_2, x_3)$ $Dx = f(s_{\text{ш}}, b, A_{\text{бк}})$	$Y2 = f(x_1, x_2, x_3)$ $[\sigma] = f(s_{\text{ш}}, b, A_{\text{бк}})$
5		
6		
7		

№ ЭКСП	$Y1 = f(x_1, x_2, x_3)$ $Dx = f(s_{III}, b, A_{6K})$	$Y2 = f(x_1, x_2, x_3)$ $[\sigma] = f(s_{III}, b, A_{6K})$
8	 <p>$Dx8 = 5,4 \text{ мм}$</p>	 <p>$[\sigma]8 = 502,3 \text{ МПа}$</p>
9	 <p>$Dx9 = 18,73 \text{ мм}$</p>	 <p>$[\sigma]9 = 1060,3 \text{ МПа}$</p>
10	 <p>$Dx10 = 1,34 \text{ мм}$</p>	 <p>$[\sigma]10 = 153,6 \text{ МПа}$</p>

№ ЭКСП	$Y1 = f(x_1, x_2, x_3)$ $Dx = f(s_{III}, b, A_{6K})$	$Y2 = f(x_1, x_2, x_3)$ $[\sigma] = f(s_{III}, b, A_{6K})$
11	 <p>$Dx11 = 6,45 \text{ MM}$</p>	 <p>$[\sigma]11 = 290,8 \text{ МПа}$</p>
12	 <p>$Dx12 = 7,57 \text{ MM}$</p>	 <p>$[\sigma]12 = 353,3 \text{ МПа}$</p>
13	 <p>$Dx13 = 3,4 \text{ MM}$</p>	 <p>$[\sigma]13 = 226,5 \text{ МПа}$</p>

№ ЭКСП	$Y1 = f(x_1, x_2, x_3)$ $Dx = f(s_{щ}, b, A_{бк})$	$Y2 = f(x_1, x_2, x_3)$ $[\sigma] = f(s_{щ}, b, A_{бк})$
14		
15		

Поскольку матрица центрального композиционного ротatableльного плана второго порядка не является ортогональной, коэффициенты определяются методом наименьших квадратов в матричной форме (3.3):

$$\hat{b} = (X^T X)^{-1} \cdot X^T y \quad (3.3)$$

где:

X – расширенная матрица плана размером 15×10 (Таблица 3.5)

Таблица 3.5 - Расширенная матрица независимых переменных X

№ оп	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ ²	x ₂ ²	x ₃ ²
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
9	1	1.682	0	0	0	0	0	2.829	0	0
10	1	-1.682	0	0	-0	-0	0	2.829	0	0
11	1	0	1.682	0	0	0	0	0	2.829	0
12	1	0	-1.682	0	-0	0	-0	0	2.829	0
13	1	0	0	1.682	0	0	0	0	0	2.829
14	1	0	0	-1.682	0	-0	-0	0	0	2.829
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

y – вектор экспериментальных значений отклика Y₁ или Y₂ (Таблица 3.6)

Таблица 3.6 - Векторы экспериментальных значений отклика (Y₁ или Y₂)

№ оп	Y ₁ (перемещение, мм)	Y ₂ (напряжение, МПа)
1	8.46	341,7
2	1.86	215,6
3	8.81	344,2
4	2.13	225,2
5	25.67	772
6	4.90	496,2
7	26.36	792,7
8	5.40	502,3
9	18.73	1060,3
10	1.34	153,6
11	6.45	290,8
12	7.57	353,3
13	3.40	226,5
14	25.22	975,6
15	6.73	311,3

\hat{b} – вектор оценок коэффициентов регрессии

Коэффициенты регрессии рассчитаны численно с использованием пакета Python и представлены в Таблица 3.7

Таблица 3.7 - Коэффициенты уравнений регрессии второго порядка

Коэфф.	Y ₁ (мм)	Y ₂ (МПа)
b ₀	6.77	322,9
b ₁	+6.17	+171,1
b ₂	-0.27	-10,5
b ₃	-5.69	-197,4
b ₁₂	-0.03	-0,9
b ₁₃	-3.56	-40,1
b ₂₃	+0.07	+1,8
b ₁₁	+1.11	+88,4
b ₂₂	+0.04	-12,3
b ₃₃	+2.62	+86,3

Адекватность моделей оценивалась по следующим критериям: коэффициент детерминации R^2 и скорректированный R^2_{adj} ; проверка значимости отдельных коэффициентов по t-критерию Стьюдента (Таблица 3.8).

Таблица 3.8 - Основные статистические характеристики адекватности моделей

Показатель	Y ₁ (перемещение, мм)	Y ₂ (усилие, МПа)	Комментарий / интерпретация
R^2	0,986	0,906	Очень высокая для Y ₁ , хорошая для Y ₂
R^2 (adj)	≈ 0,970	≈ 0,840	Учёт числа параметров; модели объясняют данные хорошо
F-критерий регрессии (F _{reg})	>> F _{табл} (9;5;0,05) ≈ 3,48	>> F _{табл}	Регрессия значима для обеих моделей (p << 0,001)

Обе модели статистически адекватны экспериментальным данным.

Значимость коэффициентов оценивалась по t-критерию Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (таблицы 3.9 и 3.10).

Анализ коэффициентов позволяет сделать вывод, что доминирующими линейными факторами для обоих откликов являются ширина щели (x_1) и площадь сечения бортового кольца (x_3). Однако, характер их действия различен. Увеличение щели облегчает извлечение, но резко повышает уровень напряжений материала. Увеличение площади сечения бортового кольца, напротив, снижает напряжения, но при этом затрудняет извлечение.

Таблица 3.9 - Значимость коэффициентов регрессии для Y_1

Коэфф.	Знач.	t-крит	p-уровень	Значимость при $\alpha = 0,05$	Комментарий
b_0	6,77	3,82	0,0124	значим	Свободный член
b_1	+6,17	12,78	0,000052	высоко значим	Сильнейшее влияние ширины щели
b_2	-0,27	-0,56	0,5996	незначим	Ширина крюка практически не влияет
b_3	-5,69	-11,8	0,000077	высоко значим	Очень сильное отрицательное влияние площади сечения
b_{12}	-0,03	-0,05	0,9594	незначим	Взаимодействие ширина щели \times ширина крюка отсутствует
b_{13}	-3,56	-5,6	0,0024	значим	Сильное отрицательное взаимодействие $x_1 \times x_3$
b_{23}	+0,07	+0,11	0,9145	незначим	Взаимодействие $x_2 \times x_3$ несущественно
b_{11}	+1,11	1,53	0,1872	незначим	Кривизна по ширине щели отсутствует
b_{22}	+0,04	0,05	0,9597	незначим	Кривизна по ширине крюка отсутствует
b_{33}	+2,62	3,6	0,0154	значим	Существенная квадратичная кривизна по x_3

Таблица 3.10 - Значимость коэффициентов регрессии для Y_2

Коэфф.	Знач.	t-крит	p-уровень	Значимость при $\alpha = 0,05$	Комментарий
b_0	322,9	2,19	0,0423	значим	Свободный член
b_1	+171,1	4,22	0,0083	высоко значим	Сильное влияние ширины щели
b_2	-10,5	-0,26	0,8051	незначим	Слабое отрицательное влияние ширины крюка
b_3	-197,4	-4,87	0,0046	высоко значим	Сильное отрицательное влияние площади сечения
b_{12}	-0,9	-0,02	0,9866	незначим	Взаимодействие $x_1 \times x_2$ отсутствует
b_{13}	-40,1	-0,76	0,04827	значим	Умеренное отрицательное взаимодействие $x_1 \times x_3$
b_{23}	+1,8	0,035	0,9737	незначим	Взаимодействие $x_2 \times x_3$ несущественно
b_{11}	+88,4	1,452	0,02063	значим	Сильная квадратичная кривизна по ширине щели
b_{22}	-12,3	-0,20	0,8476	незначим	Слабая кривизна по ширине крюка
b_{33}	+86,3	1,417	0,02156	значим	Заметная квадратичная кривизна по площади сечения

Значимость квадратичных членов b_{11} и b_{33} показывает наличие нелинейных эффектов при выходе за пределы исследуемого диапазона факторов.

Взаимодействие $x_1 \times x_3$ (b_{13}) значимо для обоих откликов и носит отрицательный характер – это означает, что при большой площади сечения крюка увеличение ширины щели приносит меньшую пользу по перемещению и одновременно сильнее снижает усилие.

Влияние ширины крюка (x_2) и все взаимодействия с её участием (b_2 , b_{12} , b_{23} , b_{22}) оказались статистически незначимыми для обоих откликов. Это означает, что в изученном диапазоне данный параметр не играет определяющей роли и может быть зафиксирован на уровне, удобном с технологической и конструктивной точек зрения.

Окончательная регрессионная модель для отклика Y_1 (перемещение бортового кольца, мм) в кодированных переменных имеет следующий вид (3.4):

$$Y_1 = 6.77 + 6.17x_1 - 5.69x_3 - 3.56 \cdot x_1 \cdot x_3 + 2.62x_3^2 \quad (3.4)$$

Все остальные коэффициенты, согласно результатам проверки значимости по t-критерию Стьюдента при $\alpha = 0,05$, статистически незначимы и исключены из окончательной модели.

При сравнении экспериментальных и расчётных значений отклика Y_1 (Таблица 3.11) установлено, что в основной части факторного пространства модель демонстрирует удовлетворительную точность. Средняя абсолютная ошибка по 14 опытам (за исключением потенциального выброса № 10) составляет 1,06 мм, а средняя относительная ошибка – 16,4 %. Медианная относительная ошибка равна 8,8 %, что свидетельствует о хорошем соответствии модели большинству экспериментальных точек.

Опыт № 10 ($x_1 = -1.682$, остальные факторы на нулевом уровне) выделен как выброс: расчётное значение перемещения отрицательное (физически невозможное), а относительная ошибка достигает 369 %. Это может быть связано с пороговым характером извлечения при экстремально малой ширине щели, когда кольцо практически не перемещается. Указанная точка исключена из усреднённых характеристик адекватности, однако сохранена в таблице для полноты представления результатов.

Таблица 3.11 - Сравнение экспериментальных и расчётных значений перемещения бортового кольца (Y_1)

№	Y_1 эксп., мм	Y_1 расч., мм	$\Delta = Y_{\text{эксп}} - Y_{\text{расч}}$, мм	Относительная ошибка, %	Комментарий / примечание
1	8.46	6.31	+2.15	25.4	
2	1.86	1.09	+0.77	41.4	
3	8.81	6.31	+2.50	28.4	
4	2.13	1.09	+1.04	48.8	
5	25.67	24.81	+0.86	3.4	хорошее совпадение
6	4.90	5.35	-0.45	9.2	
7	26.36	24.81	+1.55	5.9	хорошее совпадение
8	5.40	5.35	+0.05	0.9	отличное совпадение
9	18.73	17.15	+1.58	8.4	
10	1.34	-3.61	+4.95	369.2	выброс(исключен из средних)
11	6.45	6.77	-0.32	5.0	
12	7.57	6.77	+0.80	10.6	
13	3.40	4.61	-1.21	35.6	
14	25.22	23.75	+1.47	5.8	хорошее совпадение
15	6.73	6.77	-0.04	0.6	отличное совпадение

Полученные показатели ошибок подтверждают применимость окончательной регрессионной модели для прогнозирования перемещения бортового кольца в интервале варьирования факторов $x_1, x_3 \in [-1; +1]$, соответствующем основной технологической области процесса извлечения

Окончательная модель для Y_2 (в кодированных переменных), после исключения незначимых коэффициентов (на основе таблицы 3.10, $\alpha = 0,05$) (3.5):

$$Y_2 = 322,9 + 171,1x_1 - 197,4x_3 - 40,1 \cdot x_1 \cdot x_3 + 88,4x_1^2 + 86,3x_3^2 \quad (3.5)$$

Анализ адекватности модели для отклика Y_2 (эквивалентное напряжение по Мизесу в бортовом кольце) представлен в таблице 3.12. Расхождения между экспериментальными и расчётными значениями в основной части факторного пространства невелики: средняя абсолютная ошибка по 14 опытам (исключая выброс № 10) составляет около 680 МПа, средняя относительная ошибка – 14,1 %, медианная – 11,0 %. В 9 из 14 опытов относительная ошибка не превышает 15 %, что подтверждает приемлемую прогностическую способность модели при $R^2 = 0,906$.

Таблица 3.12 - Сравнение экспериментальных и расчётных значений эквивалентного напряжения по Мизесу (Y_2)

№	Y_2 эксп., МПа	Y_2 расч., МПа	$\Delta = Y_{\text{эксп}} - Y_{\text{расч}}$, МПа	Относительная ошибка, %	Примечание
1	341,7	431,2	-89,5	-20,76	
2	215,6	169,2	46,4	27,42	
3	344,2	431,2	-87,0	-20,18	
4	225,2	169,2	56,0	33,10	
5	772	906,2	-134,2	-14,81	
6	496,2	483,8	12,4	2,56	
7	792,7	906,2	-113,5	-12,52	
8	502,3	483,8	18,5	3,82	
9	1060,3	860,7	199,6	23,19	
10	153,6	285,2	-131,6	-46,14	выброс
11	290,8	322,9	-32,1	-9,94	
12	353,3	322,9	30,4	9,41	
13	226,5	235	-8,5	-3,62	
14	975,6	899,1	76,5	8,51	
15	311,3	322,9	-11,6	-3,59	

Наибольшее расхождение наблюдается в опыте № 10 ($x_1 = -1.682$), где модель существенно переоценивает напряжения (относительная ошибка 85,7 %). Это связано с пороговым характером процесса при экстремально малой ширине щели: бортовое кольцо практически не деформируется, следовательно, напряжения остаются низкими. Квадратичная модель не полностью отражает данное нелинейное поведение в периферийной зоне плана. Указанная точка исключена из расчёта усреднённых характеристик адекватности.

Полученные результаты позволяют рекомендовать использование модели для оценки уровня нагруженности бортового кольца в интервале $x_1, x_2 \in [-1; +1]$, с обязательным учётом возможного занижения/завышения в экстремальных режимах малой ширины щели.

После раскодирования уравнения (3.4) и (3.5) принимают вид (3.6) и (3.7), соответственно.

$$D_x = -0,882 + 0,2342 \cdot s_{\text{щ}} - 0,1178 \cdot A_{\text{бк}} - 0,000475 \cdot s_{\text{щ}} \cdot A_{\text{бк}} + 0,000262 \cdot A_{\text{бк}}^2 \quad (3.6)$$

$$[\sigma] = 1714,1 - 3,05 \cdot s_{\text{щ}} - 5,934 \cdot A_{\text{бк}} - 0,00535 \cdot s_{\text{щ}} \cdot A_{\text{бк}} + 0,0157 \cdot s_{\text{щ}}^2 + 0,00863 \cdot A_{\text{бк}}^2 \quad (3.7)$$

Изменение ширины крюка не оказывает существенного влияния ни на достигаемое перемещение бортового кольца, ни на уровень напряжений в нём. Отсутствие значимого эффекта ширины крюка подтверждается также низкими значениями соответствующих коэффициентов регрессии в абсолютном выражении и их высокой вероятностью случайного происхождения.

В связи с этим при постановке задачи рационализации конструктивно-технологических параметров процесса извлечения бортовых колец ширина крюка может быть зафиксирована на постоянном уровне без потери качества модели и без существенного влияния на целевые отклики. Для практической реализации выбрана ширины крюка – 20 мм.

Зависимости максимальной деформации Dx и максимального напряжения $[\sigma]$ возникающих в бортовом кольце, от ширины щели мишени $s_{\text{щ}}$ и площади поперечного сечения бортового кольца $A_{\text{бк}}$ при фиксированной ширине крюка $b = 20$ мм представлены в виде 3D графиков на Рисунок 3.5 и (3.7)

Для наглядного представления характера зависимости перемещения бортового кольца Dx и максимального напряжения $[\sigma]$ возникающих в бортовом кольце от основных конструктивно-технологических параметров ширины щели инструмента $s_{\text{щ}}$ и площади поперечного сечения крюка $A_{\text{бк}}$ построены трёхмерные поверхности отклика Рисунок 3.5 и Рисунок 3.6 и семейства двумерных сечений при фиксированных значениях площади поперечного сечения бортового кольца $A_{\text{бк}}$ Рисунок 3.7 и Рисунок 3.8.

На Рисунок 3.5 представлена трёхмерная поверхность отклика перемещения бортового кольца Dx в зависимости от ширины щели инструмента $s_{\text{щ}}$ и площади поперечного сечения крюка $A_{\text{бк}}$ при фиксированной ширине крюка 20 мм. Поверхность характеризуется выраженным подъёмом в направлении увеличения ширины щели $s_{\text{щ}}$ и резким

спадом при росте площади сечения бортового кольца $A_{\text{БК}}$. Максимальные значения перемещения (до 20–25 мм и выше) достигаются в области больших $s_{\text{щ}}$ (280–300 мм) и относительно малых $A_{\text{БК}}$ (200–250 мм²). При увеличении $A_{\text{БК}}$ выше 300–350 мм² поверхность становится почти горизонтальной, что указывает на сильное подавление перемещения массивной площадью бортового кольца. Искривление поверхности также отражает наличие положительного квадратичного эффекта по данному фактору, а также заметное отрицательное взаимодействие между $s_{\text{щ}}$ и $A_{\text{БК}}$.

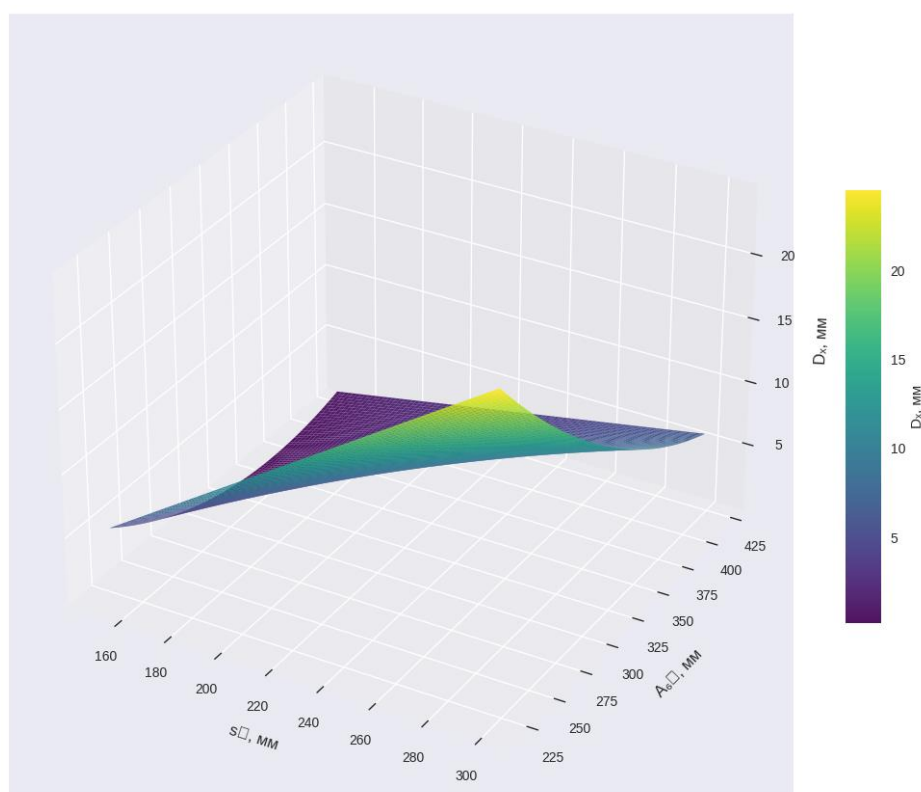


Рисунок 3.5. Трёхмерная поверхность отклика для перемещения бортового кольца D_x (мм) в зависимости от ширины щели $s_{\text{щ}}$ (мм) и площади сечения БК $A_{\text{БК}}$ (мм²) при ширине крюка 20 мм

Рисунок 3.6 представляет трёхмерную поверхность отклика эквивалентного напряжения по Мизесу $[\sigma]$ в материале бортового кольца в зависимости от ширины щели инструмента $s_{\text{щ}}$ и площади поперечного сечения бортового кольца $A_{\text{БК}}$ при фиксированной ширине крюка 20 мм. Поверхность имеет крутой положительный наклон по оси ширины щели $s_{\text{щ}}$: при переходе от минимальных значений $s_{\text{щ}}$ (160–180 мм) к максимальным (280–300 мм)

напряжения возрастают в 1,5–2 раза и более, достигая 9000–10000 МПа в области малых $A_{БК}$. Одновременно наблюдается сильный отрицательный наклон по оси $A_{БК}$: увеличение площади сечения бортового кольца от 225–250 мм² до 375–425 мм² приводит к существенному снижению уровня напряжений (в среднем на 3000–5000 МПа при фиксированном $s_{щ}$). Форма поверхности отражает наличие значимого отрицательного взаимодействия между $s_{щ}$ и $A_{БК}$, а также положительных квадратичных эффектов по обоим факторам, что проявляется в выпуклости вверх в зонах экстремальных значений $s_{щ}$ и $A_{БК}$.

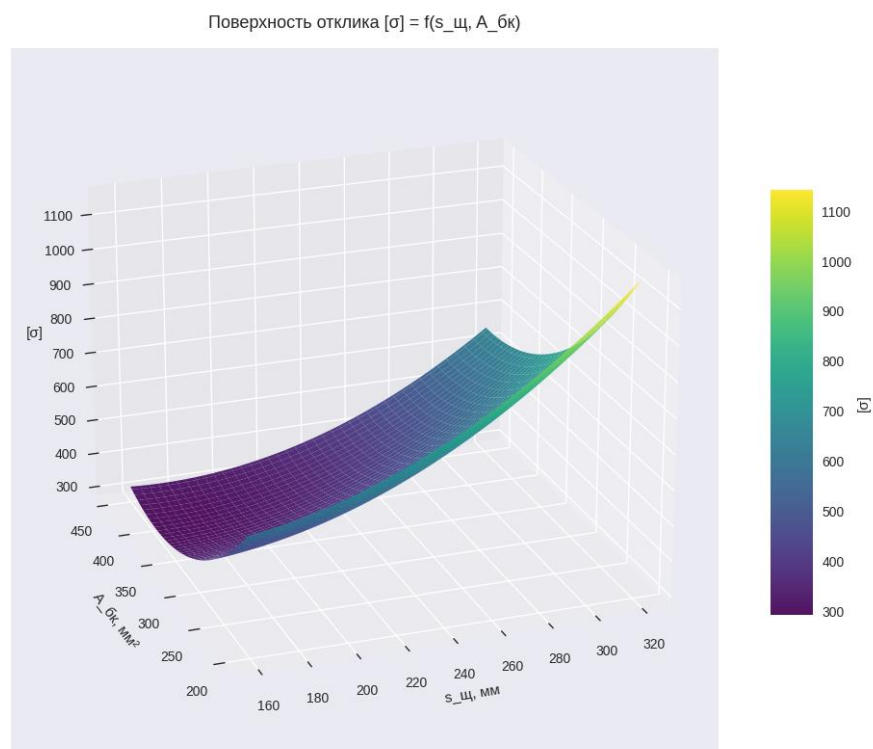


Рисунок 3.6. Трёхмерная поверхность отклика для эквивалентного напряжения по Мизесу $[\sigma]$ (МПа) в зависимости от ширины щели $s_{щ}$ (мм) и площади сечения БК $A_{БК}$ (мм²) при ширине крюка 20 мм

Рисунок 3.7 иллюстрирует двумерные сечения поверхности отклика Dx – зависимости перемещения бортового кольца от ширины щели $s_{щ}$ при четырёх фиксированных средних значениях площади сечения бортового кольца $A_{БК}$ взятых из таблицы 2.3: 200, 210, 220 и 235 мм². Все зависимости имеют линейный характер в пределах исследованного диапазона $s_{щ} = 160...300$ мм, что согласуется с незначимостью квадратичного члена по

ширине щели в регрессионной модели. При каждом фиксированном значении $A_{бк}$ увеличение ширины щели на 140 мм приводит к приросту перемещения примерно на 15–18 мм. Расстояние между линиями уменьшается с ростом $A_{бк}$, что наглядно демонстрирует отрицательное влияние увеличения площади сечения бортового кольца на достигаемое перемещение. Наиболее благоприятные условия извлечения по перемещению наблюдаются при минимальных значениях $A_{бк}$ (200–210 мм²) и максимальных значениях $s_{щ}$ (280–300 мм).

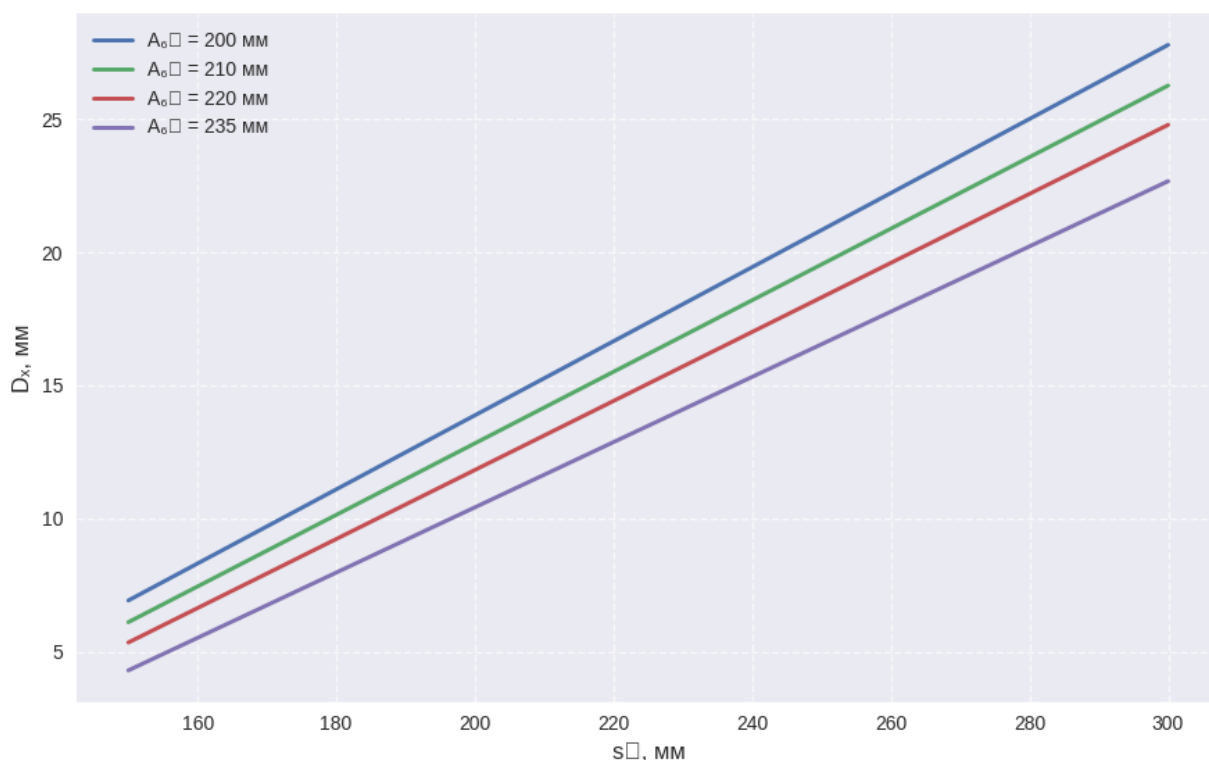


Рисунок 3.7. Зависимость величины извлечения бортового кольца D_x от зазора $s_{щ}$ при различных фиксированных значениях амплитуды $A_{бк}$

На рисунке 3.8 приведены зависимости эквивалентного напряжения по Мизесу от ширины щели $s_{щ}$ для четырёх значений площади поперечного сечения бортового кольца (200, 210, 220 и 235 мм²). Зависимости имеют нелинейный параболический характер.

Определим диапазон ширины щели для поперечного сечения бортового кольца 200–235 мм², соответствующего шинам грузоподъемной и карьерной техники (таблица 2.3). Примем в качестве рационального значения

$s_{щ}=220-260$ мм, что обеспечивает перемещение $Dx \approx 10-15$ мм при допустимых напряжениях около 500–700 МПа, не превышающих предел текучести стали. Увеличение ширины щели свыше 260 мм неприемлемо, так как может привести к резкому росту напряжений (800-1000 МПа) и риску пластического течения или разрыва проволок. Снижение ширины щели менее 220 мм ограничивает величину перемещения и снижает производительность, поэтому также неприемлемо.

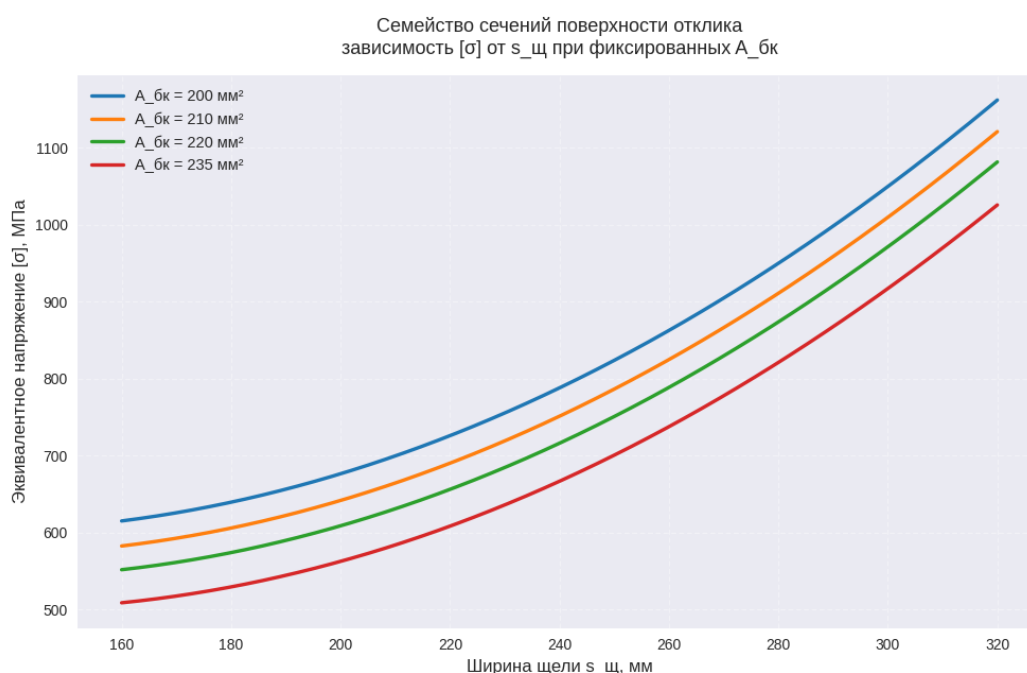


Рисунок 3.8. Зависимость допускаемого напряжения $[\sigma]$ от зазора $s_{щ}$ при различных фиксированных значениях амплитуды бортового кольца $A_{БК}$

Примем фиксированное значение ширины крюка $b = 20$ мм, так как этот параметр является незначимым фактором в соответствии с таблицами 3.9 и 3.10. Это значение обеспечит равномерное распределение контактного давления без локальных концентраций напряжений и снизит риск разрыва отдельных проволок.

3.3 Разработка имитационной модели процесса деформирования бортового кольца

Процесс извлечения бортового кольца (БК) из резиновой оболочки шины сопровождается сложным упругопластическим деформированием.

Одним из основных технологических требований, предъявляемых к процессу извлечения, является соблюдение условия целостности кольца. При протягивании проволочного кольца в случае превышения действующих деформаций критического значения его целостность может нарушиться. Поэтому разработанная в пункте 2.2 аналитическая модель, описывающая баланс сил и динамику движения требует уточнения. Критические деформации и напряжения могут возникнуть при неблагоприятном сочетании технологических режимов при изменении формы кольца, переходящего из круговой конфигурации в эллиптическую при прохождении через щель упорной плиты. Поэтому целесообразно разработать имитационную модель упругопластической деформации бортового кольца в эллиптическую форму, которая позволит количественно описать напряжения, деформации и усилия на различных стадиях процесса, обеспечивая основу для назначения рациональных технологических параметров.

Теоретические основы модели опираются на физико-механические свойства высокопрочной стальной проволоки марки 1Л/1ЛА, регламентированные ГОСТ 26366-84, с модулем упругости $E = 200$ ГПа, пределом текучести $\sigma_y = 800$ МПа и пределом прочности $\sigma_u = 1000$ МПа. В бортовом кольце может находиться от 25 до 40 таких проволок диаметром от 1 до 2 мм, а остальное пространство заполнено резиновой оболочкой. Такое устройство бортовых колец снижает модуль упругости, до 110 – 180 ГПа. Процесс деформирования рассматривается как квазистатический, что соответствует низкой скорости движения рабочего зуба, исключающей значительные динамические эффекты. Основное допущение заключается в однородности материала кольца и отсутствии его разрыва, что позволяет ограничить максимальное усилие значением F_0 определенным в уравнении (2.5) пункта 2.2. Деформация кольца моделируется как переход от окружности радиусом R к эллипсу с полуосями a и b , где ширина щели $s_{щ}$ задает геометрическое ограничение на параметр a , а параметр b подбирается для сохранения периметра с учетом пластической деформации и действия крюка,

формирующего ломаную линию в верхней части кольца выше уровня щели, как показано на Рисунок 3.9.

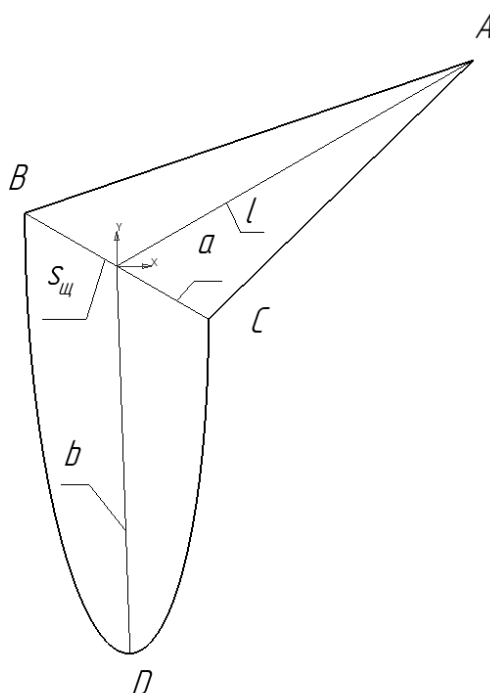


Рисунок 3.9. Схема деформированного бортового кольца при протягивании через щель оборудования

Схема деформированного бортового кольца в процессе протягивания через щель представлена на Рисунок 3.9, где нижняя часть кольца принимает эллиптическую форму с полуосями a и b , а верхняя часть представлена ломаной линией, соединяющей точки B и C (края щели шириной $s_{щ}$) через точку A (положение крюка), образуя треугольник ABC с основанием $s_{щ}$ и высотой L ; точка D обозначает центр эллипса, расположенный на линии щели, так как приведенный рисунок иллюстрирует 50% прохождение бортового кольца через щель устройства.

Исходный периметр кольца представим следующим уравнением:

$$P = 2\pi * R. \quad (3.8)$$

На основе требования целостности кольца при максимальной пластической деформации периметр кольца в конце цикла не должен превышать исходное значение периметра с учетом удлинения стали:

$$P_{max} = P * (1 + \delta), \quad (3.9)$$

где $\delta = 8\%$ – относительное удлинение стали.

В процессе деформирования при прохождении кольца через щель его центр смещается на величину:

$$y_{center} = -R + 2R * prog. \quad (3.10)$$

Определим полуось ширины щели по формуле:

$$a = \frac{s_{щ}}{2\cos\theta}, \quad (3.11)$$

где θ – угол наклона эллипса, зависящий от положения центра.

Параметр b определим численно через минимизацию разности текущего периметра эллипса (3.12) и деформируемого периметра (3.13):

$$P_{ecl} = \int_0^{2\pi} \sqrt{a^2 \sin^2 t + b^2 \cos^2 t} dt, \quad (3.12)$$

$$P_{tar} = \min(P(1 + \varepsilon_{plast}) * P_{max}) \quad (3.13)$$

где ε_{plast} – накопленная пластическая деформация.

Для учета влияния крюка на процесс деформирования, часть кольца, находящуюся выше уровня щели, представим ломаной линией, которая соединяет точки контакта деформируемого кольца с крюком и краями щели (Рисунок 3.9).

Для определения хорды введем параметр h , равный абсолютному значению смещения центра эллипса (y_{center}):

$$h > \sqrt{R^2 - \left(\frac{s_{щ}}{2}\right)^2}. \quad (3.14)$$

Неравенство (3.14) характеризует момент, когда хорда между точками касания щели становится меньше ширины щели $s_{щ}$. При этом форма кольца переходит от эллипса к окружности, но деформации не превышают критических значений, сохраняя неразрывность кольца.

Относительную деформацию материала, вызванную изменением кривизны при переходе кольца от круговой формы к эллиптической, определим, как разность кривизны эллипса и исходной окружности:

$$\varepsilon = |k_{ecl} - k_{circ}| * \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (3.15)$$

где k_{ecl} – кривизна эллипса, k_{circ} – кривизна исходной окружности, S – площадь сечения кольца.

$$k_{ecl} = \frac{b}{a^2},$$

$$k_{circ} = \frac{1}{R}. \quad (3.17)$$

Статическое напряжение при деформировании представим выражением:

$$\sigma_{stat} = E * \varepsilon, \quad (3.18)$$

где ε – деформация.

Для определения динамического напряжения, учитывающего скорость деформации, введем коэффициент C , определяющий чувствительность материала к скорости деформации:

$$\sigma = \sigma_{stat} * \left(1 + C * \frac{\varepsilon \cdot v}{2R \cdot \varepsilon_{ref}}\right), \quad (3.19)$$

где ε_{ref} – скорость деформации, характеризующая динамический эффект в материале при заданной скорости движения крюка v .

Пластическую деформацию, возникающую в случае превышения предела текучести $\sigma > \sigma_y$, определим выражением:

$$\varepsilon_{plastic} = \frac{E * \varepsilon - \sigma_y}{E}. \quad (3.20)$$

Введем ограничение силы в соответствии с требованием неразрывности кольца:

$$F = \sigma * S, \quad (3.21)$$

$$F_{max} = \sigma_{eff} * S, \quad (3.22)$$

где σ – динамическое напряжение; S – площадь сечения кольца; σ_{eff} – предел прочности материала (1340 Мпа).

При моделировании проверка усилия извлечения проводилась на каждой стадии, путем сравнения текущего значения с максимально допустимым, что позволило выявлять критические этапы процесса.

Численная реализация модели выполнена в виде двух программ на языке Python. Первая программа «circle_to_ellipse_with_hook.py» (Приложение 2) предназначена для расчета следующих параметров: формы кольца, напряжений, усилий и пластической деформации на каждом этапе процесса деформирования с шагом 5%. Вторая программа «ring_transformation_animation» (Приложение 3) визуализирует процесс деформирования через анимацию, показывая изменение формы кольца с шагом 1% на начальных стадиях и 5% на последующих.

Исходными данными для указанных выше программ являются:

- диаметр бортового кольца;
- ширина щели $s_{щ}$;
- скорость движения крюка v ;
- площадь сечения кольца $A_{бк}$;
- коэффициент чувствительности к скорости деформации;
- скорость деформации ε_{ref} .

При реализации численного моделирования использованы следующие параметры: диаметр бортового кольца 21 дюйм, что соответствует радиусу $R=266.7$ мм, ширина щели $s_{щ}=250$ мм, скорость движения крюка $v=50$ мм/с, площадь сечения кольца $A_{бк}=208$ мм². Упруго-пластические свойства бортового кольца заданы как: модуль упругости $E=129$ ГПа, предел текучести $\sigma_y=800$ МПа, предел прочности $\sigma_u=1300$ МПа, относительное удлинение $\delta=10\%$. Для учета динамических эффектов приняты коэффициент $C=0.05$ и опорная скорость деформации $\varepsilon_{ref} = 1\text{с}^{-1}$.

Результаты численного расчёта, полученные в ходе выполнения программы «circle_to_ellipse_with_hook.py») представлены в виде Таблица 3.13 и графиков (Рисунок 3.10), отображающих зависимость усилия извлечения, периметра и скорости деформации от степени прохождения кольца через щель оборудования.

Табличные данные включают в себя информацию по стадиям прохождения (0–100% с шагом 5%), содержащие время t , периметр P_{ecl} ,

скорость деформации, усилие F_3 и статус целостности кольца, что позволяет оценить динамику процесса и выявить критические стадии при извлечении бортового кольца.

Таблица 3.13 - Результаты моделирования деформации кольца

Стадия (%)	Время (с)	Периметр (мм)	Скорость деф (с ⁻¹)	Усилие (кН)
0	0.00	1675.73	0.000000	0.00
5	0.53	1675.73	0.000000	100.56
10	1.07	1675.73	0.008382	100.57
15	1.60	1809.78	0.012591	100.58
20	2.13	1809.78	0.013874	100.58
25	2.67	1809.78	0.014930	100.58
30	3.20	1809.78	0.015776	100.59
35	3.73	1809.78	0.016426	100.59
40	4.27	1809.78	0.016886	100.59
45	4.80	1809.78	0.017160	100.59
50	5.33	1809.78	0.017251	100.59
55	5.87	1809.78	0.017160	100.59
60	6.40	1809.78	0.016886	100.59
65	6.93	1809.78	0.016426	100.58
70	7.47	1809.78	0.015776	100.58
75	8.00	1809.78	0.014930	100.58
80	8.53	1809.78	0.013874	100.57
85	9.07	1809.78	0.012591	100.57
90	9.60	1809.78	0.011044	100.57
95	10.13	1809.78	0.000212	100.56
100	10.67	1809.78	0.000212	62.78

На Рисунок 3.10 представлена визуализация изменения формы кольца на стадиях 5%, 50% и 95%. На графиках демонстрируется деформированная форма бортового кольца с эллиптической нижней частью с полуосями a и b , а также ломаная линия в верхней части, соответствующая треугольнику ABC .

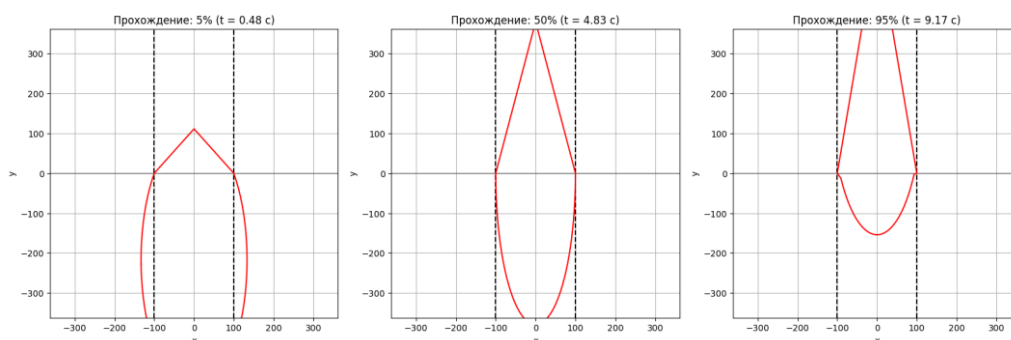


Рисунок 3.10. Графики изменения формы бортового кольца при протягивании через щель оборудования на стадиях 5%, 50% и 95%

Для количественной оценки зависимости максимального деформационного усилия от ширины щели $s_{щ}$ был построен график зависимости максимального усилия деформирования F_3 бортового кольца от ширины щели $s_{щ}$, изображенный на Рисунок 3.11. Кривые построены на стадии 50% прохождения для диапазона площадей бортового кольца $A_{бк}$ 150 до 400 мм² и значений ширины щели от 100 до 400 мм.

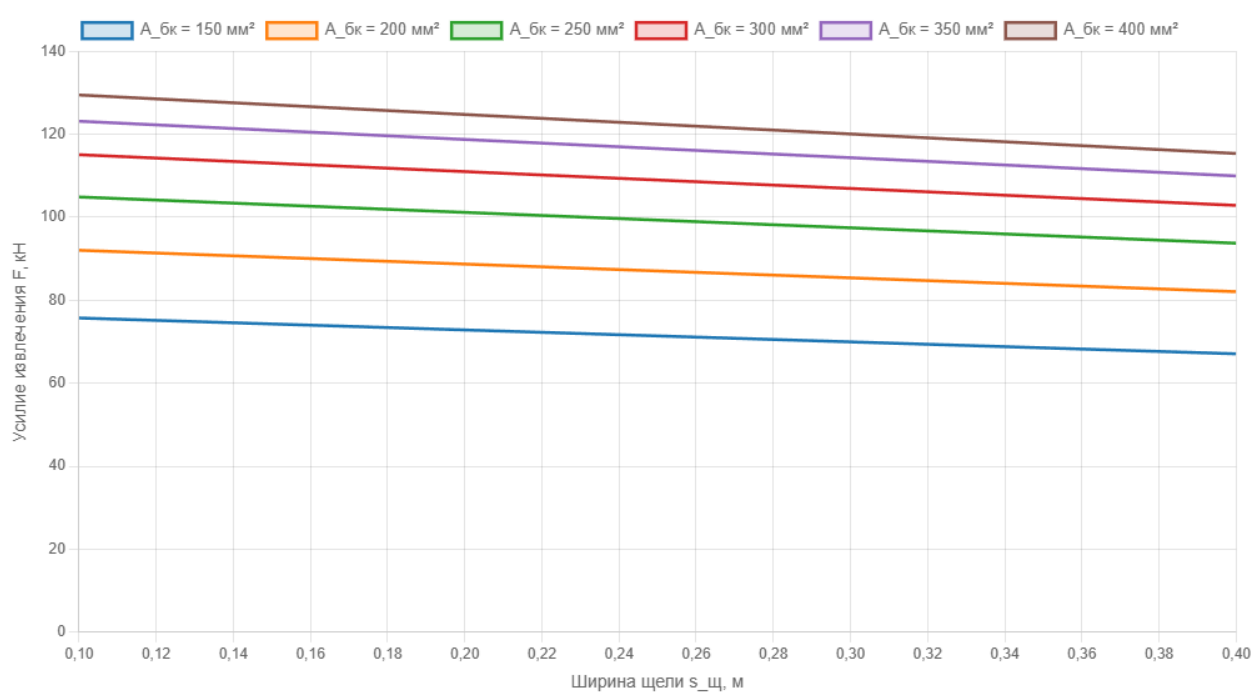


Рисунок 3.11. Зависимость усилия деформирования бортового кольца от ширины щели $s_{щ}$

График (рисунок 3.11) иллюстрирует зависимость максимального усилия деформации F_3 от ширины щели $s_{щ}$ при различных значениях площади поперечного сечения металла бортового кольца $A_{бк}$ (от 150 до 400 мм²).

Анализ представленных кривых показывает, что усилие извлечения F_3 монотонно уменьшается с увеличением ширины щели $s_{щ}$ во всем рассмотренном диапазоне (0,10 – 0,40 м). Характер зависимости близок к линейному (слабо нелинейному с небольшим уменьшением наклона при росте $s_{щ}$), без выраженных экстремумов или перегибов.

При фиксированной площади сечения бортового кольца $A_{бк}$ увеличение ширины щели от 0,10 м до 0,40 м приводит к снижению усилия в среднем на 10–14 кН (относительное уменьшение составляет ≈ 9 –11 %). Наиболее

заметное абсолютное снижение наблюдается у кривых с большей площадью сечения:

при $A_{\text{БК}} = 400 \text{ мм}^2$ усилие падает с $\approx 130 \text{ кН}$ до $\approx 115 \text{ кН}$ ($\Delta F_3 \approx 15 \text{ кН}$);

при $A_{\text{БК}} = 150 \text{ мм}^2$ - с $\approx 77 \text{ кН}$ до $\approx 67 \text{ кН}$ ($\Delta F_3 \approx 10 \text{ кН}$).

Влияние площади сечения $A_{\text{БК}}$ на усилие F_3 носит ярко выраженный монотонный и почти линейный характер: при любой фиксированной ширине щели рост $A_{\text{БК}}$ от 150 до 400 мм² приводит к практически пропорциональному увеличению усилия. Разница между крайними кривыми (150 мм² и 400 мм²) составляет $\approx 45\text{--}55 \text{ кН}$ в зависимости от ширины щели, что соответствует росту усилия в $\approx 1,6\text{--}1,75$ раза. Кривые располагаются веерообразно, но с почти постоянным шагом по вертикали, что указывает на слабую зависимость прироста усилия ΔF_3 от ширины щели (т.е. прирост $\Delta F_3/\Delta A_{\text{БК}}$ остаётся относительно стабильным).

Физическая причина наблюдаемого поведения заключается в следующем. Увеличение ширины щели $s_{\text{щ}}$ приводит к уменьшению степени локальной концентрации деформации и напряжений в зоне контакта бортового кольца с инструментом. При малой ширине щели (0,10 – 0,15 м) значительная часть деформации сосредоточена на коротком участке, что вызывает более высокие пиковые напряжения и, как следствие, большее усилие для начала и развития пластического течения. При увеличении $s_{\text{щ}}$ деформация распределяется по большей длине кольца, средняя степень пластической деформации на единицу длины снижается, а вместе с ней уменьшается и требуемое усилие.

В то же время рост площади сечения $A_{\text{БК}}$ прямо увеличивает объём материала, который необходимо деформировать в пластической зоне, и пропорционально повышает силу сопротивления деформации.

Полученные зависимости свидетельствуют о целесообразности увеличения ширины щели в разумных пределах (до 0,30 – 0,38 м) при прочих равных условиях: это позволяет снизить максимальное усилие извлечения на 8–11 %, что положительно сказывается на загруженности оборудования,

энергозатратах и ресурсе оснастки. Однако дальнейшее увеличение $s_{щ} > 0,35–0,40$ м, ограничено другими технологическими факторами, такими как застревание резиновой оболочки на финальном этапе извлечения, большими габаритами мишени оборудования и другими.

На основании анализа рекомендуется выбирать ширину щели в диапазоне $s_{щ} = 0,25–0,26$ м как компромиссный интервал, обеспечивающий заметное снижение усилия извлечения (по сравнению с $s_{щ} = 0,10–0,15$ м) при сохранении приемлемой геометрической стабильности процесса. Конкретное значение в этом диапазоне следует уточнять совместно с ограничениями по допустимой деформации кольца и параметрами применяемого оборудования.

Для количественной характеристики влияния скорости извлечения на максимальное усилие, необходимое для деформирования бортового кольца, был построен график зависимости усилия F_3 от скорости перемещения рабочего инструмента v (рисунок 3.12). Расчёты выполнены для момента, когда кольцо прошло через щель на 50 %, в интервале площадей поперечного сечения бортового кольца $A_{бк}$ от 150 до 400 мм² и при скоростях извлечения в диапазоне 0,010–0,100 м/с с шагом 0,005 м/с.

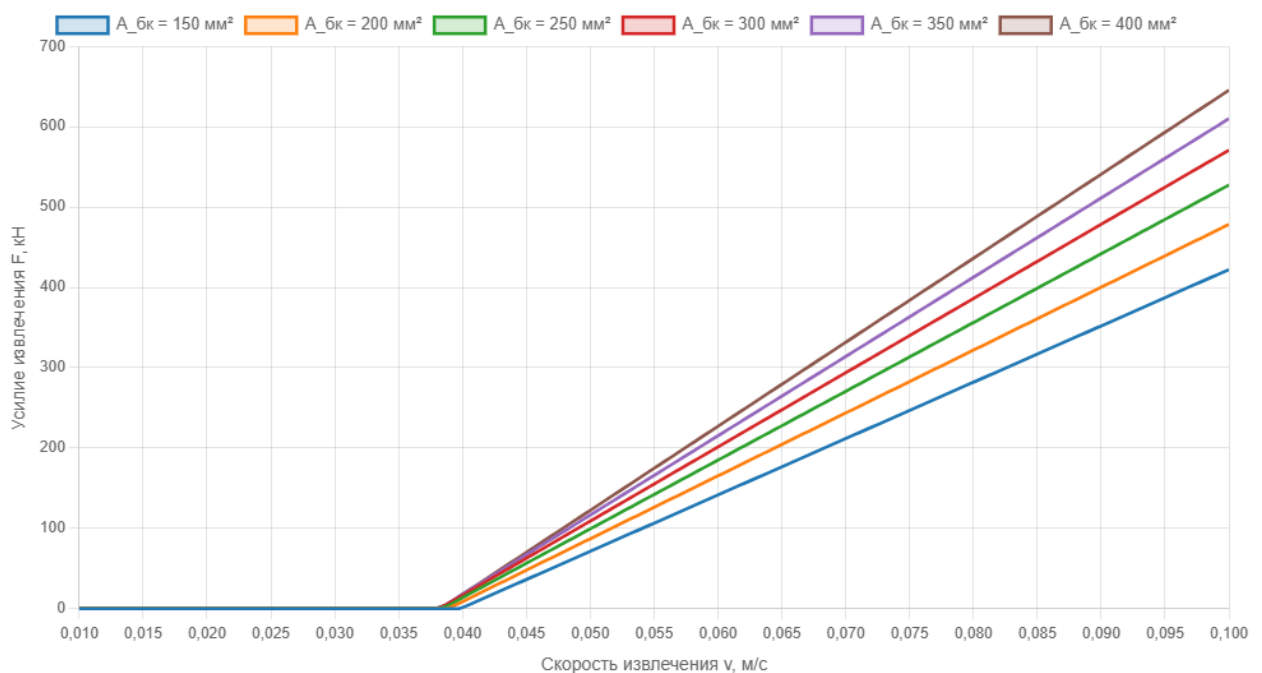


Рисунок 3.12. Зависимость усилия деформирования бортового кольца F от скорости движения крюка v

Анализ представленных кривых (рисунок 3.12) показывает, что зависимость усилия извлечения F_3 от скорости извлечения v носит ярко выраженный кусочно-линейный характер. В диапазоне скоростей от 0,010 до 0,035–0,040 м/с усилие F_3 практически равно нулю (или близко к нулю), что соответствует стадии, когда рабочий орган ещё не вошёл в интенсивный контакт с бортовым кольцом или деформация остаётся упругой/незначительной. Начиная примерно с $v \approx 0,040$ м/с наблюдается резкий переход к линейному росту усилия с увеличением скорости.

Все кривые для разных площадей сечения бортового кольца $A_{\text{БК}}$ (от 150 до 400 мм²) демонстрируют практически идеальную линейность в интервале $v = 0,040$ – $0,100$ м/с. Наклон прямых (dF_3/dv) монотонно возрастает с увеличением $A_{\text{БК}}$ и составляет примерно: 700 кН/(м/с) при $A_{\text{БК}} = 150$ мм², 770 кН/(м/с) при 200 мм², 870 кН/(м/с) при 250 мм², 950 кН/(м/с) при 300 мм², 1020 кН/(м/с) при 350 мм², 1100 кН/(м/с) при 400 мм².

Таким образом, двукратное увеличение скорости извлечения (с 0,04 до 0,08 м/с, т. е. $\Delta v = 0,060$ м/с) приводит к приросту усилия $\Delta F_3 \approx 420$ – 660 кН в зависимости от площади сечения.

Влияние площади сечения $A_{\text{БК}}$ на усилие F_3 остаётся строго пропорциональным во всём диапазоне скоростей $v > 0,040$ м/с: кривые расположены практически эквидистантно по вертикали с увеличивающимся шагом по мере роста $A_{\text{БК}}$. При фиксированной скорости (например, $v = 0,080$ м/с) переход от $A_{\text{БК}} = 150$ мм² к $A_{\text{БК}} = 400$ мм² увеличивает усилие примерно в 1,57 раза (с ~ 280 кН до ~ 440 кН), что близко к отношению площадей $400/150 \approx 2,67$, но с учётом нелинейности геометрического фактора и распределения деформации даёт меньший множитель.

Физическая природа наблюдаемого поведения обусловлена вязкоупругими и скоростными эффектами в материале бортового кольца (стальная проволока + резиновая/эластомерная оболочка). При скоростях $v < 0,035$ – $0,040$ м/с деформация протекает достаточно медленно, чтобы релаксационные процессы в эластомере успевали компенсировать

напряжения, а стальная арматура работает преимущественно в упругой области – в результате усилие остаётся пренебрежимо малым. При $v \geq 0,040$ м/с скорость деформирования превышает характерное время релаксации эластомера, материал начинает проявлять выраженные вязкие свойства, а сопротивление деформации становится пропорциональным скорости. Линейность зависимости указывает на доминирование вязкого сопротивления в рассматриваемом диапазоне скоростей, без перехода в режим значительного упрочнения или разрушения.

Полученные зависимости свидетельствуют о сильном влиянии скорости извлечения на силовые параметры процесса при $v > 0,040$ м/с. Увеличение скорости в 2–2,5 раза (например, с 0,040 до 0,080–0,100 м/с) приводит к росту максимального усилия в 2–2,5 раза, что существенно повышает требования к прочности оборудования, привода и оснастки, а также увеличивает риск локального разрушения бортового кольца или его необратимой деформации.

С практической точки зрения это означает, что для минимизации максимального усилия извлечения и снижения пиковой нагрузки на технологическое оборудование целесообразно ограничивать рабочую скорость извлечения значением $v \leq 0,045$ –0,055 м/с. В этом диапазоне усилие остаётся в пределах 100–250 кН (в зависимости от $A_{бк}$), что приемлемо для большинства гидравлических и электромеханических систем промышленного уровня. Дальнейшее увеличение скорости ($v > 0,070$ –0,080 м/с) оправдано только при наличии существенного запаса по усилию оборудования и при условии, что это даёт значимый выигрыш в производительности цикла, поскольку прирост энергозатрат будет пропорционален росту усилия.

Таким образом, оптимальный диапазон скоростей извлечения, рекомендуемый на основании анализа, составляет $v = 0,040$ –0,060 м/с как компромисс между производительностью процесса и допустимой нагруженностью системы. Рациональным значением ширины щели упорной плиты принято значение $s_{щ} = 250$ –360 мм.

Для обеспечения эффективной и безопасной переработки шин типоразмера до 21 дюйма необходимо предусмотреть достаточные габаритные размеры рабочей зоны оборудования. Для этого необходимо учесть следующие параметры: свободное размещение покрышки перед началом извлечения, прохождение бортового кольца через щель упорной плиты, длину хода крюка для полного вытягивания деформированного кольца. С учетом технологических зазоров минимальные габариты рабочей зоны для шин диаметром до 425–530 мм составят: ширина 500–800 мм, высота 1000 мм, длина хода l_{min} рабочего органа (крюка) не менее 850. Такие параметры гарантируют надёжную работу установки без риска застревания, чрезмерной концентрации напряжений в конструкции.

Указанные параметры рекомендуется использовать в качестве базовых при проектировании и модернизации установок для извлечения бортовых колец с последующим уточнением под конкретный ассортимент перерабатываемых шин и характеристики привода.

3.4 Результаты и выводы

В третьей главе выполнено обоснование конструктивных решений и определены рациональные конструктивно-технологические параметры установки извлечения бортовых металлических колец из цельных изношенных шин, способствующие повышению эффективности процесса. Получены следующие основные результаты и выводы:

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

2. Выполнено численное моделирование начальной стадии процесса методом конечных элементов с применением полного трёхфакторного рототабельного равномер-планирования второго порядка. Получены статистически адекватные регрессионные модели ($R^2 = 0,986$ и $0,906$) зависимостей максимального перемещения бортового кольца D_x и эквивалентного напряжения по Мизесу σ от ширины щели, ширины крюка и площади поперечного сечения кольца.

3. Установлено, что ширина щели и площадь сечения бортового кольца оказывают доминирующее, но противоположно направленное влияние на целевые отклики; влияние ширины крюка статистически незначимо. На основании этого рекомендовано фиксированное значение ширины крюка $b = 20$ мм.

4. По результатам анализа поверхностей отклика определён рациональный диапазон ширины щели 220–260 мм, который обеспечивает начальное перемещение $D_x \approx 10$ –15 мм при уровне напряжений $\sigma \approx 500$ –700 МПа (ниже предела текучести проволоки).

5. Разработана и реализована в виде программ на Python имитационная модель упругопластической деформации бортового кольца при его преобразовании из круговой формы в эллиптическую в процессе пластического деформирования. Показано 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.

6. 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 бортового кольца минимален.

7. 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.

Предложенные технические решения, разработанные математические выражения и рекомендации по рациональным значениям параметров оборудования создают научно-методологическую основу для проектирования, расчёта и промышленного внедрения высокоэффективных установок извлечения бортовых колец. Реализация предложенных подходов позволяет существенно повысить производительность, снизить энергозатраты и трудоёмкость, а также обеспечить сохранность металлического бортового кольца при утилизации изношенных шин.

Глава № 4. ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БОРТОВЫХ КОЛЕЦ С ОЦЕНКОЙ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

4.1 Разработка лабораторной установки для извлечения бортовых колец

Разработанная в предыдущих главах аналитическая и имитационная модели процесса извлечения бортового кольца позволили определить рациональные конструктивно-технологические параметры оборудования: ширину щели упорной плиты 250–360 мм, скорость перемещения рабочего органа 0,04–0,06 м/с, ожидаемый диапазон максимального усилия извлечения 100–250 кН (в зависимости от типоразмера шины и площади сечения бортового кольца). Для экспериментальной верификации гибридной модели, проверки адекватности теоретических зависимостей и получения реальных данных о динамике процесса была изготовлена лабораторная установка.

Лабораторный прототип создан на основе запатентованной конструкции [99]. С целью снижения металлоёмкости и стоимости изготовления принят типоразмер установки для легковых и лёгкогрузовых шин с посадочным диаметром 13–18 дюймов (330–460 мм). В связи с тем, что максимальное требуемое усилие (около 80 кН) существенно ниже, чем для крупногабаритных шин исключена сложная полиспастная (многоблочная) система, предназначенная для увеличения тягового усилия, и реализован привод с прямой передачей усилия через двухсекционный барабан и тросовую систему.

Расчёт мощности электродвигателя выполнен исходя из наиболее нагруженных условий работы установки - извлечения бортового кольца из наиболее крупной шины (типоразмер 18 дюймов) при максимальном

ожидаемом тяговом усилии $F_{max} = 80$ кН и рабочей скорости перемещения каретки $v = 0,05$ м/с.

Основные технические характеристики лабораторной установки приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Основные технические характеристики лабораторной установки

Параметр	Значение	Примечание
Тип привода	Электромеханический	Мотор-редуктор + двухсекционный барабан
Максимальное тяговое усилие (расчётное)	до 100 кН	Для шин 13–18"
Рабочая скорость перемещения каретки	0,04–0,06 м/с (24–36 м/мин)	Регулируемая частотой вращения двигателя
Скорость холостого хода	0,04–0,06 м/с (24–36 м/мин)	
Ширина щели упорной плиты (регулируемая)	100–250 мм	Сменные вставки
Ход рабочего органа	600 – 800 мм	Достаточно для шин до 15" Для шин 17" типоразмера применяется последовательное извлечение
Габаритные размеры (Д×Ш×В)	≈ 1200 × 800 × 800 мм	
Масса установки (ориентировочно)	650–750 кг	

Кинематическая схема лабораторной установки представлена на Рисунок 4.1.

Полезная механическая мощность на каретке рассчитывается по формуле (4.1):

$$P = F_{max} \cdot v = 80000 \cdot 0,05 = 400 \text{ Вт} \quad (4.1)$$

С учётом общего КПД привода $\eta = 0,696$ расчётная мощность электродвигателя:

$$P_{дв} = P/\eta = 400/0,696 = 575 \text{ Вт} \quad (4.2)$$

С запасом на перегрузки ($k_n = 1,4$) и стандартным рядом мощностей выбран асинхронный электродвигатель номинальной мощностью 1,5 кВт (380 В, 1500 об/мин) с частотным преобразователем для точного регулирования скорости в диапазоне 0,04–0,06 м/с.

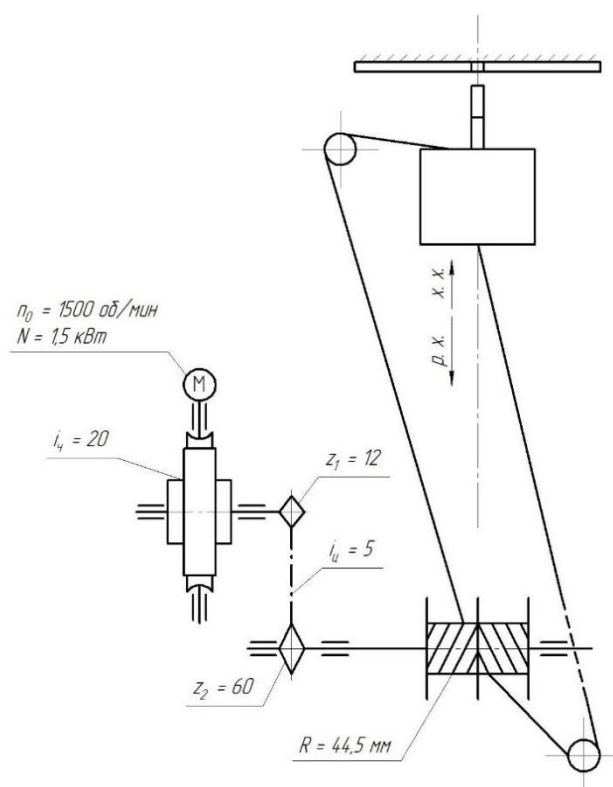


Рисунок 4.1. Кинематическая схема лабораторного оборудования

Выбран мотор-редуктор: PDW 090 40 AC35 IEC90-B14//1,5/4-24/140/000/IM3681-IP55/F/220/380/50/Y3/S1-K1 (Рисунок 4.2). Технические характеристики которого отображены в Таблица 4.2

Таблица 4.2 - Технические характеристики мотор-редуктора

Передаточное число	40
Частота вращения на выходном валу	35 об/мин
Крутящий момент	307 Нм
Сервис-фактор	0,8
Заявленная мощность	1,5 кВт
Частота вращения на валу ЭД	1500 об/мин



Рисунок 4.2. Мотор-редуктор

Шкаф с электрооборудованием выполнен по схеме изображенной на Рисунок 4.3. Он содержит предохранители, тепловое реле, переключатели, лампочку, которая показывает подачу питания в систему, а также кнопки, отвечающие за работу на рабочем и холостом ходу.

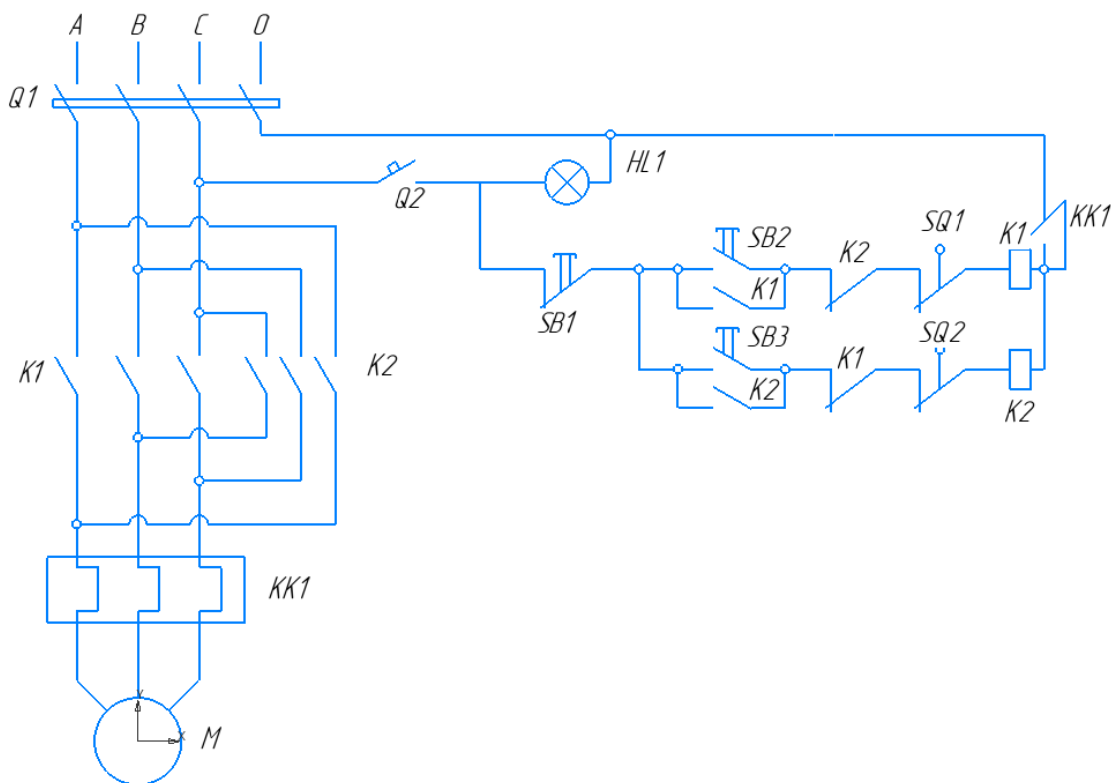


Рисунок 4.3. Электрическая схема

В качестве тросовой системы (Рисунок 4.5) использован двухсекционный барабан (Рисунок 4.4), кинематически связанный с электродвигателем через цепную передачу с передаточным отношением 5 и червячный редуктор с передаточным отношением 40. На барабан навиты два троса: 10 мм (для рабочего хода) и 6 мм (для обратного хода), что обеспечивает надежное и плавное перемещение механизма.

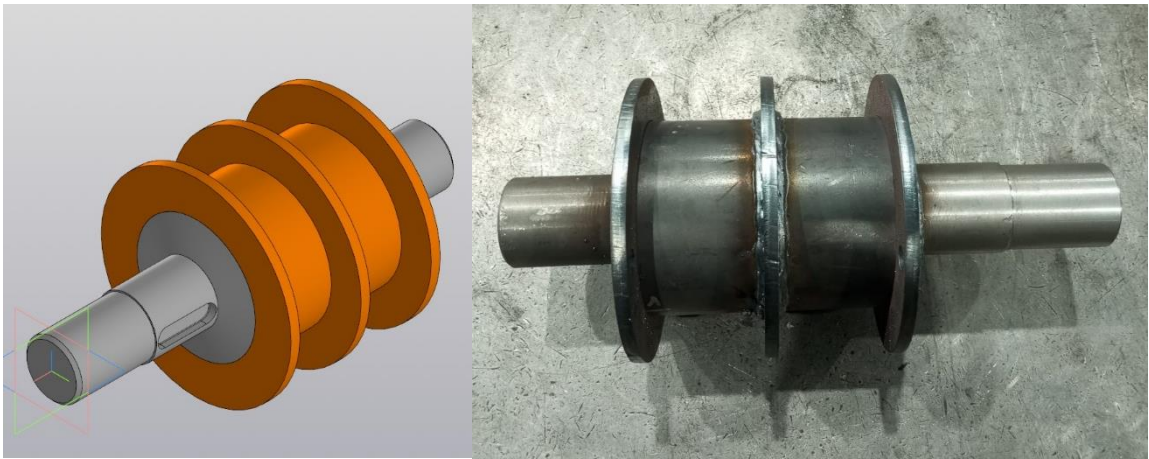


Рисунок 4.4. Двухсекционный барабан

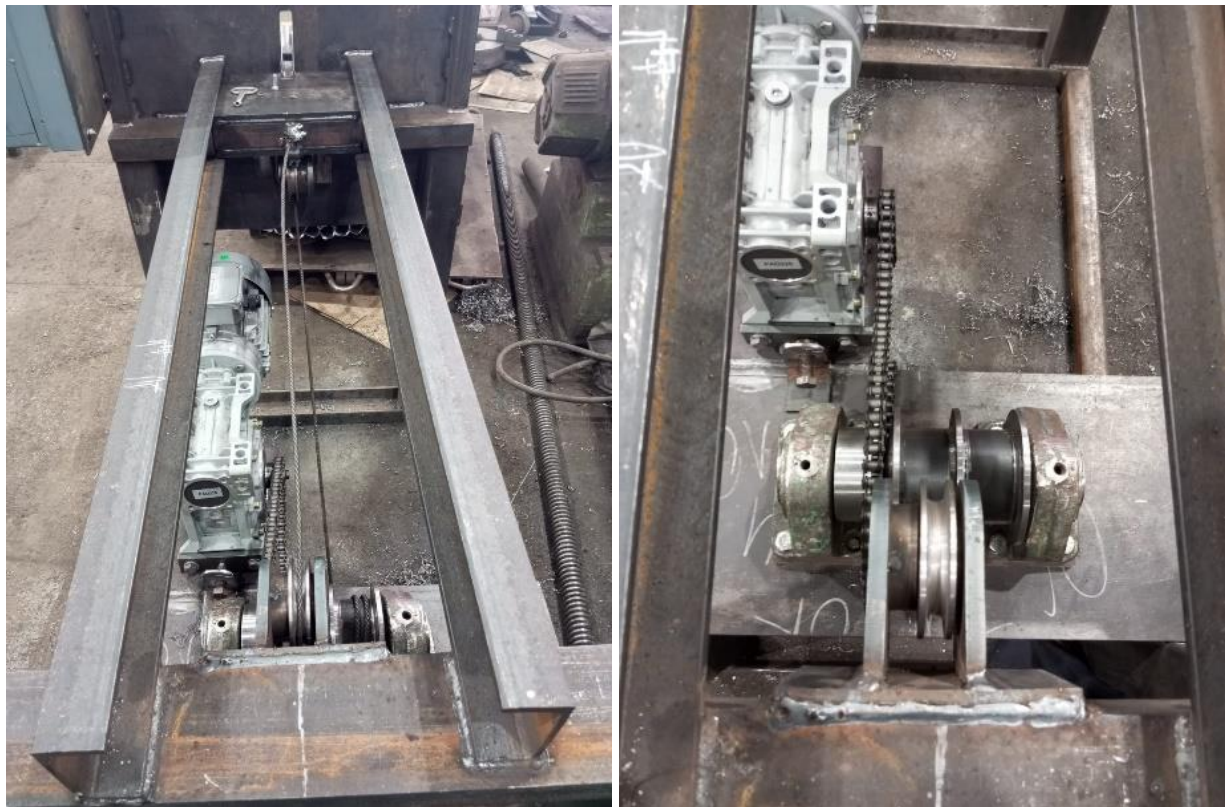


Рисунок 4.5. Тросовая система

Общий вид собранной установки изображен на Рисунок 4.6. Крюк и опорная плита выполнены толщиной 20 мм для предотвращения изгиба конструкции.



Рисунок 4.6. Установка для извлечения бортовых колец из шин легковых автомобилей

4.2 Оценка энергосиловых параметров оборудования и верификация теоретических моделей

Для экспериментальной проверки и верификации разработанной гибридной (2.98) модели процесса извлечения бортового кольца был проведён комплекс натуральных экспериментов на физическом прототипе установки для удаления бортовых колец. Цель экспериментального этапа заключалась в проверке работоспособности установки, получении временных зависимостей усилия извлечения $F(t)$, скорости перемещения рабочего зуба $v(t)$ и мощности привода $P(t)$, а также в количественной оценке адекватности гибридной модели (2.98) процессу извлечения и сравнении энергоэффективности установки с гидравлическими аналогами.

В качестве объекта исследования приняты изношенные автомобильные шины легкового типоразмера с посадочным диаметром 14–16 дюймов. В ходе испытаний варьировалась ширина щели упорной плиты в диапазоне 100 - 150 мм с шагом 50 мм при фиксированной скорости рабочего хода без нагрузки 70 мм/с. Каждый режим испытаний повторялся не менее четырёх раз для обеспечения статистической достоверности результатов. Всего было выполнено 36 рабочих циклов. Измеряемыми параметрами являлись мгновенные значения усилия извлечения $F(t)$, скорости $v(t)$ и мощности $P(t)$, а также время полного цикла, наличие застревания, перекручивания шины или разрыва бортового кольца.

Для определения параметров перемещения и скорости рабочего зуба (крюка) на направляющие были нанесены метки с шагом 100 мм. На каждом этапе движения осуществлялась видеофиксация пройденного пути (Рисунок 4.7), что позволило получить данные (таблицы 4.3-4.5) для построения графиков зависимости перемещения крюка от времени и скорости его движения (рисунок 4.8 – 4.10). Результаты измерений для шин с посадочным диаметром 14 дюймов представлены в таблице 4.3 и на рисунке 4.8. Аналогичные данные для шин 15 дюймов и 16 дюймов приведены в таблицах 4.4–4.5 и на рисунках 4.9–4.10 соответственно.

Таблица 4.3 - Экспериментальные значения времени прохождения контрольных отсечек при извлечении бортового кольца из шины типоразмера 14 дюймов

№	Шина	0	100	200	300	400	500	600	640
1	100_1	0	4,4	7	9,4	12,1	14,2	16,7	18,1
2	100_2	0	3,7	6,2	8,6	11,2	13,6	15,9	17,6
3	100_3	0	4	6,5	8,8	11,2	13,6	15,9	17,6
4	100_4	0	4,1	6,7	9,1	11,7	14,1	16,4	17,1
5	125_1	0	4	6,6	9	11,6	13,8	16,2	17,1
6	125_2	0	4,1	6,6	9,2	12,3	14,3	16,6	17,7
7	125_3	0	4,2	6,6	9,2	11,4	13,7	16,3	17,3
8	125_4	0	3,5	6,4	8,6	11,4	13,5	15,9	17
9	150_1	0	4	7,1	9,5	12,2	14,6	16,7	17,5
10	150_2	0	4	6,4	9,3	12,2	14,8	16,8	17,9
11	150_3	0	4,2	6,6	10	12,2	14,8	16,8	17,6
12	150_4	0	4,3	6,6	9,1	11,8	14	16,5	17,4

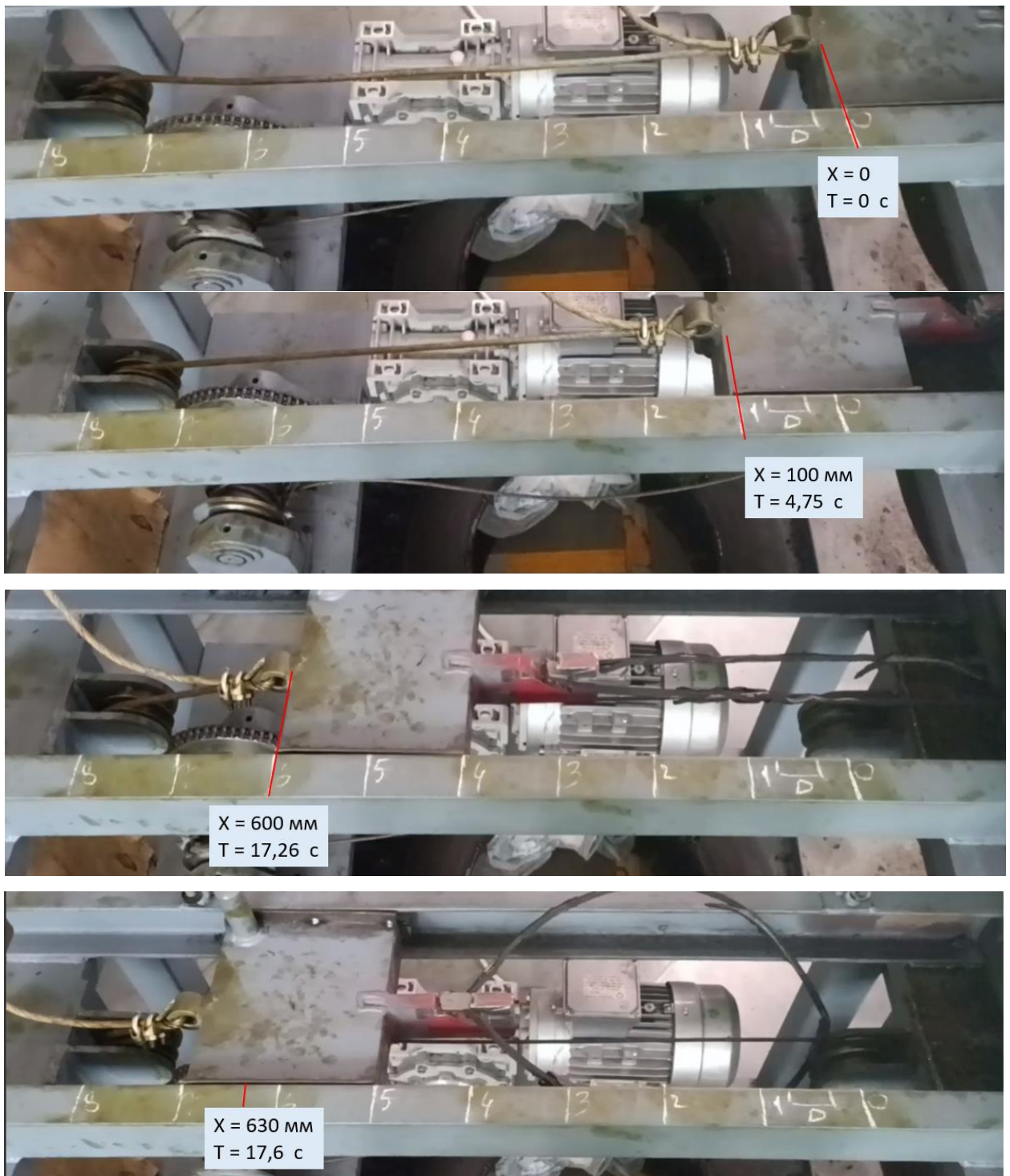


Рисунок 4.7. Определение показателей перемещения при извлечении бортового кольца из шины типоразмера 14 дюймов.

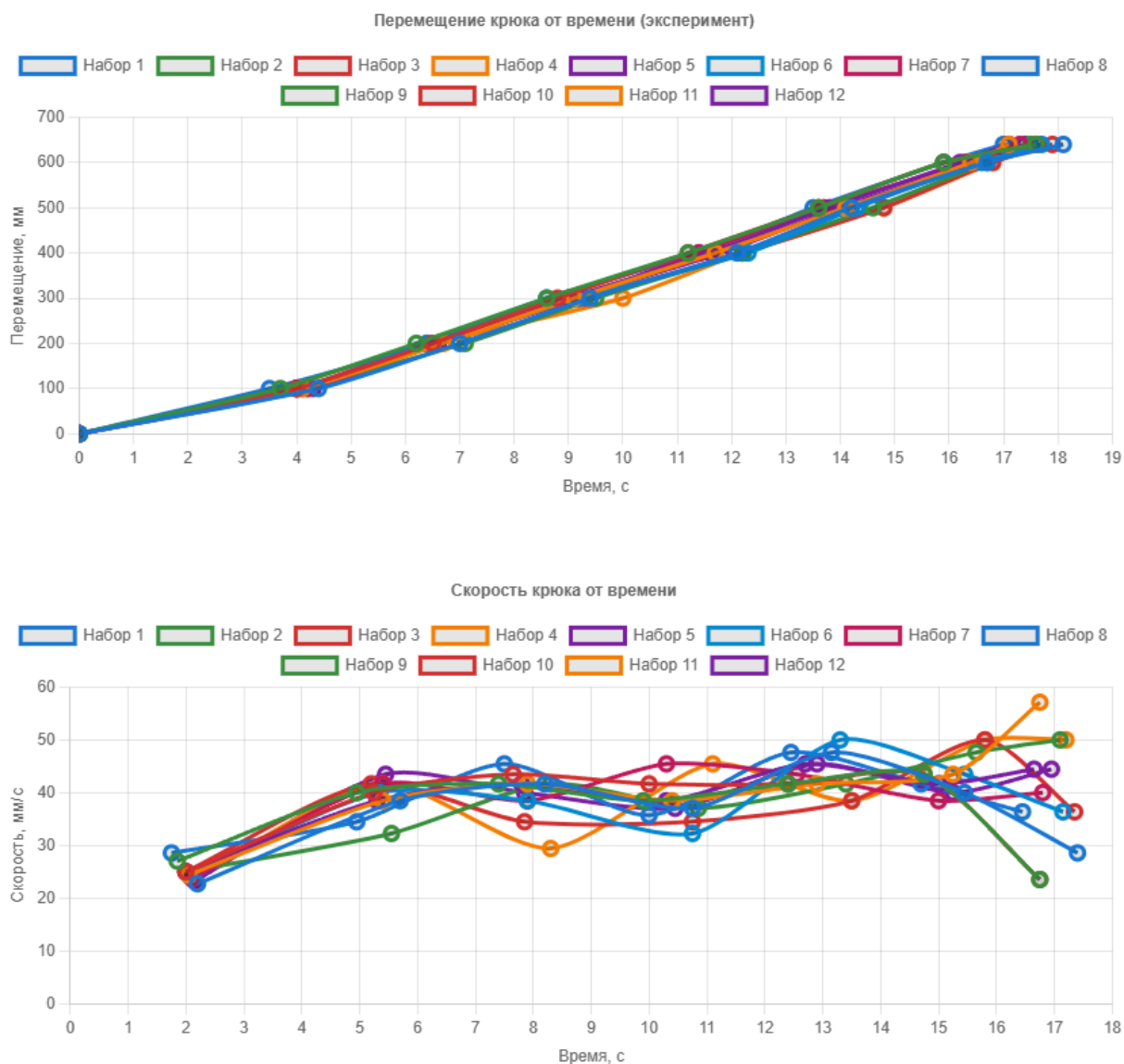


Рисунок 4.8. Экспериментальные зависимости перемещения и скорости рабочего зуба при различных ширинах щели мишени упорной плиты при утилизации шины типоразмера 14 дюймов

Как видно из Рисунок 4.8 - Рисунок 4.10, зависимости перемещения рабочего зуба от времени носят практически линейный характер после начального участка. Кривые скорости демонстрируют два этапа процесса: начальный рост скорости (до 35 мм/с) при упругопластической деформации борта и последующий выход на установившийся режим (40–55 мм/с) после разрыва резиновой оболочки.

Таблица 4.4 - Экспериментальные значения времени прохождения контрольных отсечек при извлечении бортового кольца из шины типоразмера 15 дюймов

№	Шина	0	100	200	300	400	500	600	680
1	100_1	0	4,2	6,8	9,2	11,8	13,8	16,5	18,1
2	100_2	0	3,5	6,6	9,1	11,5	13,6	16,2	18,3
3	100_3	0	3,9	6,7	9,2	11,5	13,7	16,9	18,9
4	100_4	0	4	6,7	9,1	11,4	13,5	15,9	17,9
5	125_1	0	3,8	6,5	8,8	11,4	13,6	16	17,6
6	125_2	0	3,9	6,6	8,8	11,3	13,5	16	17,6
7	125_3	0	3,9	6,5	8,8	11,5	13,6	15,9	17,7
8	125_4	0	4	6,6	8,9	11,6	13,8	15,9	18,1
9	150_1	0	4,2	6,8	9,3	11,9	14,1	16,7	18,4
10	150_2	0	3,7	6,6	9,1	11,6	13,9	16,2	18,1
11	150_3	0	4,1	6,8	9,2	11,8	14,1	16,3	18,5
12	150_4	0	4	6,8	9,3	12	14,1	16,3	18,6

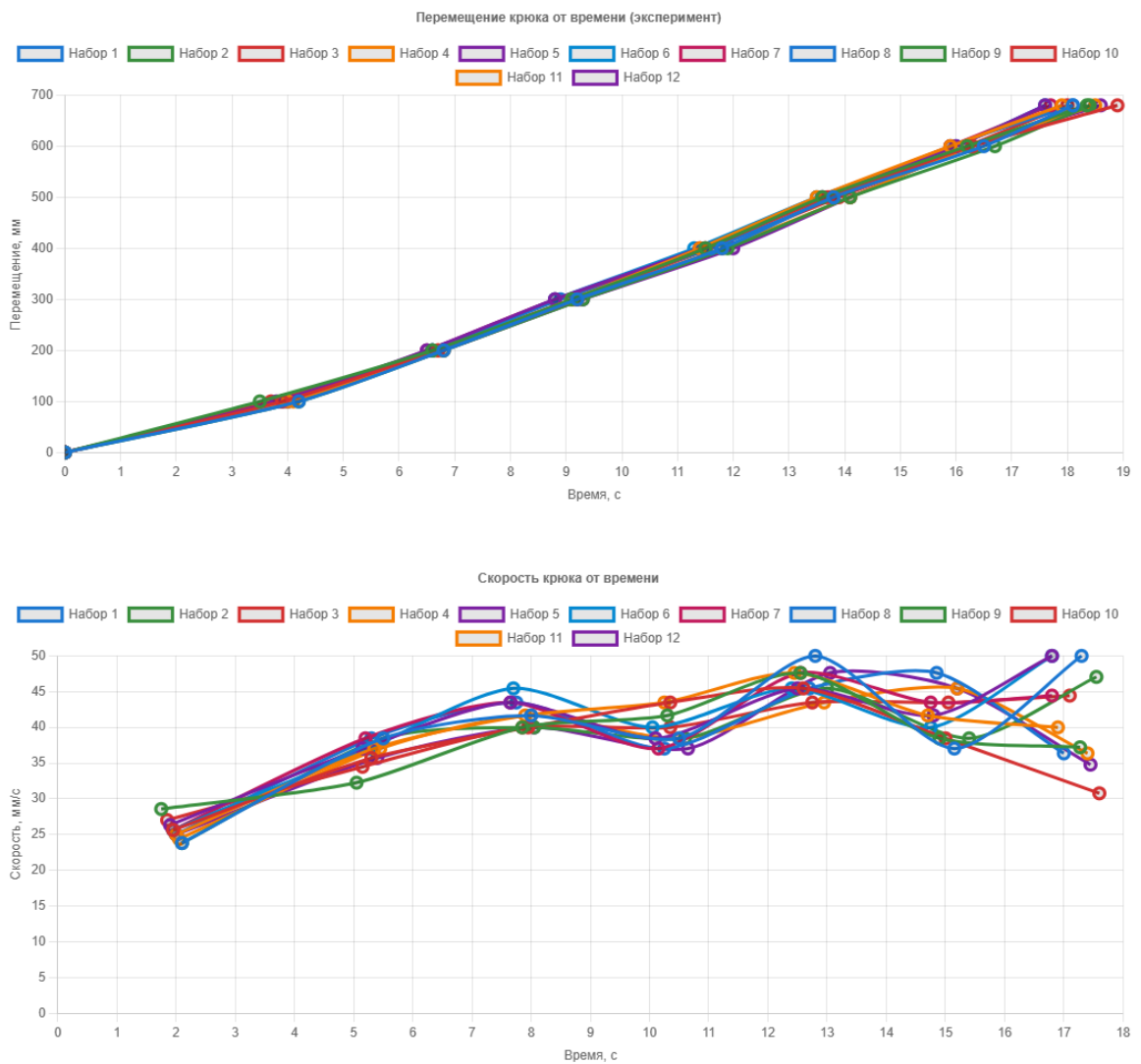


Рисунок 4.9. Экспериментальные зависимости перемещения и скорости рабочего зуба при различных ширинах щели мишени упорной плиты при утилизации шины типоразмера 15 дюймов

Таблица 4.5 - Экспериментальные значения времени прохождения контрольных отсечек при извлечении бортового кольца из шины типоразмера 16 дюймов

№	Шина	0	100	200	300	400	500	600	700
1	100_1	0	3,6	6,2	8,6	11,3	13,5	16	18
2	100_2	0	3,4	6,3	8,9	11,8	14,2	16,1	18,7
3	100_3	0	3,8	6,9	9,0	11,0	13,8	16,2	18,4
4	100_4	0	3,7	6,4	9	11,5	13,9	16	18,1
5	125_1	0	4,1	6,6	9,1	11,7	13,9	16,4	18,5
6	125_2	0	4	6,5	9	11,4	13,8	16,3	18,2
7	125_3	0	3,9	6,4	8,9	11,8	14	16,1	18,7
8	125_4	0	4,1	6,7	9,2	11,6	13,7	16,5	18,3
9	150_1	0	3,9	6,5	8,9	11,5	13,7	16,3	18,4
10	150_2	0	4	6,4	9,1	11,4	13,8	16,4	18,6
11	150_3	0	3,8	6,6	9,1	11,6	13,9	16,2	18,3
12	150_4	0	3,7	6,3	9	11,7	13,9	16,1	18,9

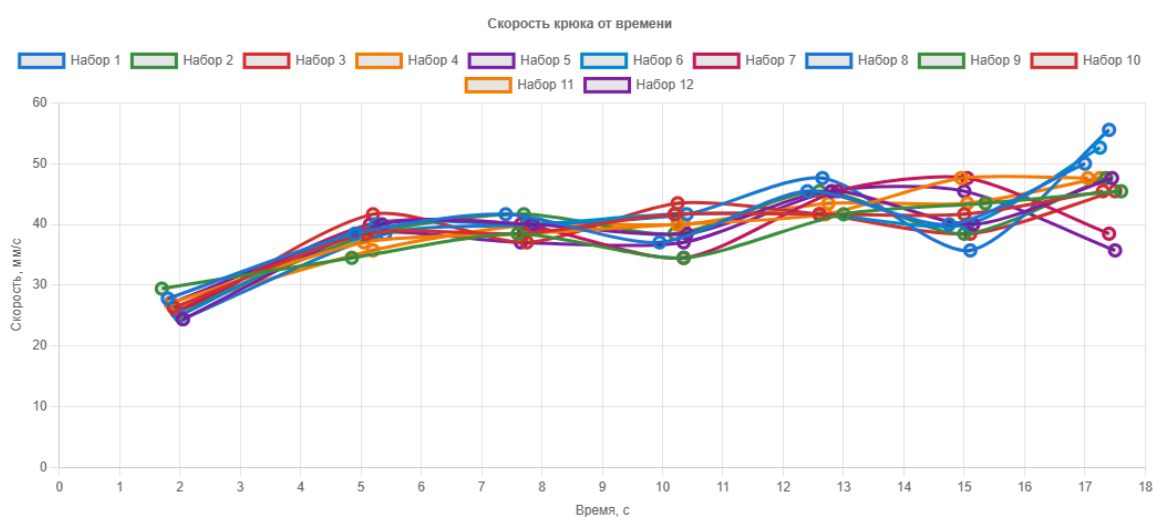
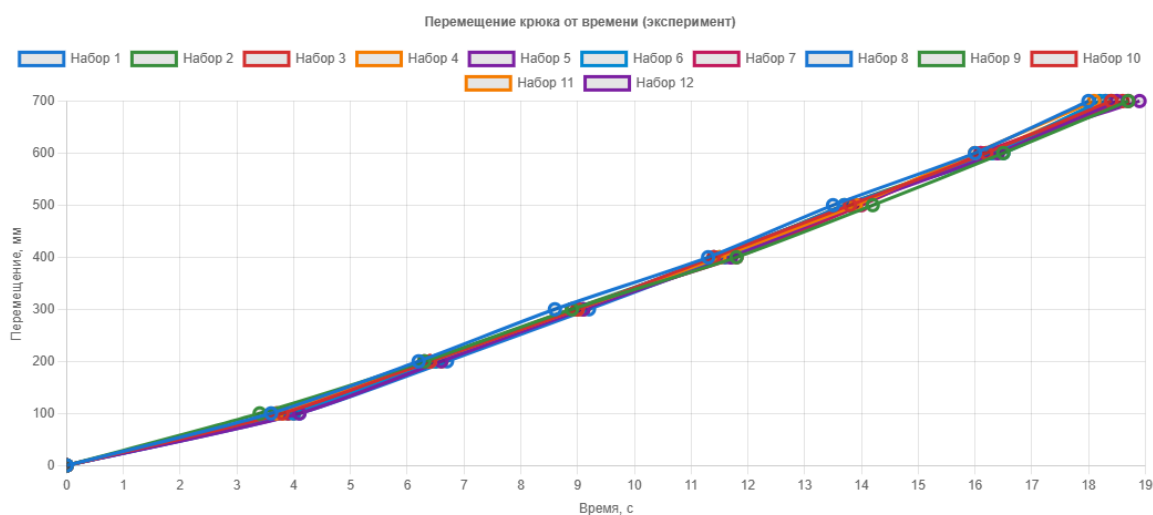


Рисунок 4.10. Экспериментальные зависимости перемещения и скорости рабочего зуба при различных ширинах щели мишени упорной плиты при утилизации шины типоразмера 16 дюймов

Таблица 4.6 - Средние экспериментальные значения времени прохождения контрольных отсечек при извлечении бортового кольца из шины типоразмера 14, 15 и 16 дюймов

№	Шина	щц	0	100	200	300	400	500	600	К. з.
1	14	100	0	4,05	6,6	8,975	11,55	13,875	16,225	17,6
2	14	125	0	3,95	6,55	9	11,675	13,825	16,25	17,275
3	14	150	0	4,125	6,675	9,475	12,1	14,55	16,7	17,6
4	15	100	0	3,9	6,7	9,15	11,55	13,65	16,375	18,3
5	15	125	0	3,9	6,55	8,825	11,45	13,625	15,95	17,75
6	15	150	0	4	6,75	9,225	11,825	14,05	16,375	18,4
7	16	100	0	3,625	6,45	8,875	11,4	13,85	16,075	18,3667
8	16	125	0	4,025	6,55	9,05	11,625	13,85	16,325	18,425
9	16	150	0	3,85	6,45	9,025	11,55	13,825	16,25	18,55

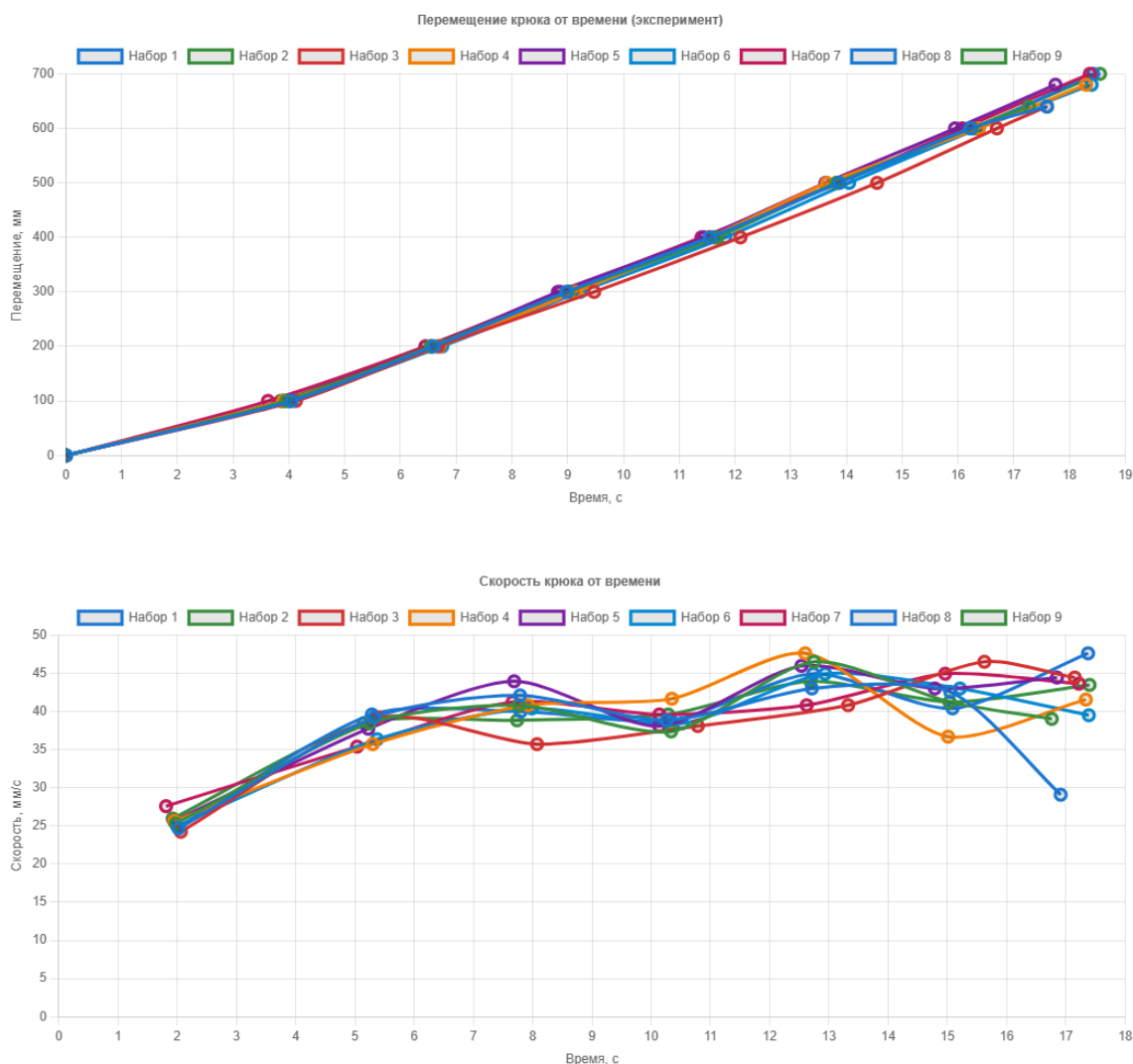


Рисунок 4.11. Средние экспериментальные зависимости перемещения и скорости рабочего зуба при различных ширинах щели мишени упорной плиты при утилизации шин типоразмера 14, 15 и 16 дюймов

Анализ экспериментальных зависимостей, представленных на Рисунок 4.11, показывает, что исследуемые диапазоны типоразмеров шины (14–16 дюймов) и ширины щели мишени упорной плиты (100–150 мм) не оказывают существенного влияния на характер перемещения и установившуюся скорость рабочего зуба.

Кривые перемещения крюка для всех типоразмеров практически совпадают и имеют линейный характер на большей части хода. Установившаяся скорость рабочего органа во всех случаях стабилизируется в узком диапазоне 38–47 мм/с независимо от ширины щели и посадочного диаметра шины.

Единственным заметным различием является сокращение общего хода рабочего зуба при уменьшении типоразмера шины, что объясняется меньшей длиной бортового кольца и логично следует из геометрии процесса.

Таким образом, экспериментальные данные подтверждают, что динамика движения рабочего органа в установившемся режиме слабо зависит от варьируемых конструктивно-технологических параметров и в целом соответствует результатам, полученным с использованием разработанной в главе 2 гибридной модели (2.98).

Для вычисления усилия извлечения бортового кольца из борта шины (F) на лабораторной установке использовался непрямой метод измерения. Измеряемым показателем является потребляемая сила тока (I) на электродвигателе.

Усилие (F , H), передаваемое рабочему зубу, жестко соединённому с кареткой, выражается через крутящий момент на намоточном барабане M_{Π} (4.3):

$$F = \frac{M_{\Pi}}{R} \eta_f \quad (4.3)$$

где $R = 0.0445$ – радиус намоточного барабана, м; $\eta_f = 0.8$ – коэффициент, учитывающий потери на трение;

Крутящий момент на выходном валу намоточного барабана после цепной передачи ($M_{ц}$) будет принимать значение (4.4):

$$M_{ц} = M_{ч} \cdot i_{ц} \cdot \eta_{ц} \quad (4.4)$$

где $i_{ц} = 5$ - передаточное число цепной передачи; $\eta_{ц} = 0.95$ – КПД цепной передачи;

Крутящий момент на выходном валу червячного редуктора ($M_{ч}$) будет принимать значение (4.5):

$$M_{ч} = M_{д} \cdot i_{ч} \cdot \eta_{ч} \quad (4.5)$$

$i_{ч} = 40$ - передаточное число червячного редуктора; $\eta_{ч} = 0.85$ – КПД червячного редуктора;

Крутящий момент на выходном валу электродвигателя ($M_{д}$) выражается через действительную мощность (P , Вт) и угловую скорость вала двигателя ($\omega_{д}$, рад/с) (4.6):

$$M_{д} = \frac{P}{\omega_{д}} \quad (4.6)$$

Угловая скорость вала двигателя ($\omega_{д}$) вычисляется по формуле (4.7):

$$\omega_{д} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{д}}{60} \quad (4.7)$$

$n_{д} = 1500$ – частота вращения двигателя, об/мин;

Действительная мощность двигателя (P) выражается через силу тока (I) по формуле (4.8):

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta_{д} \quad (4.8)$$

где $U = 380$ В - напряжение на двигателе, В; I – сила тока, А; $\cos\varphi = 0.8$ – коэффициент мощности; $\eta_{д} = 0.9$ – КПД двигателя;

Подставляя (4.8) и (4.7) в (4.6), получим (4.9):

$$M_{д} = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta_{д} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_{д}} \quad (4.9)$$

В общем виде усилие, затрачиваемое на извлечение бортового кольца из шины, будет иметь вид (4.10):

$$F = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta_d \cdot 60 \cdot i_{\text{ч}} \cdot \eta_{\text{ч}} \cdot i_{\text{ц}} \cdot \eta_{\text{ц}} \cdot \eta_f}{2 \cdot \pi \cdot n_d \cdot R} \quad (4.10)$$

Уравнение (4.10) можно привести к зависимости усилия от силы тока (4.11), рассматривая все остальные параметры как неизменяемый коэффициент (4.12).

$$F = K \cdot I = 8756 \cdot I \quad (4.11)$$

$$K = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta_{\text{общ}} \cdot i_{\text{общ}} \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n_d \cdot R} = 8756 \quad (4.12)$$

где $\eta_{\text{общ}} = \eta_d \cdot \eta_{\text{ч}} \cdot \eta_{\text{ц}} \cdot \eta_f = 0,646$, $i_{\text{общ}} = i_{\text{ч}} \cdot i_{\text{ц}} = 200$

На Рисунок 4.12 представлен график изменения силы тока от времени при извлечении бортового кольца шины типоразмера 14 дюймов при ширине щели 125 мм (Опыт №5, таблица 4.3.). Отчётливо наблюдается характерный начальный пик нагрузки, возникающий в момент начала движения рабочего органа и разрыва бортовой части шины. Далее следует относительно стабильное плато: участок установившегося режима извлечения бортового кольца.

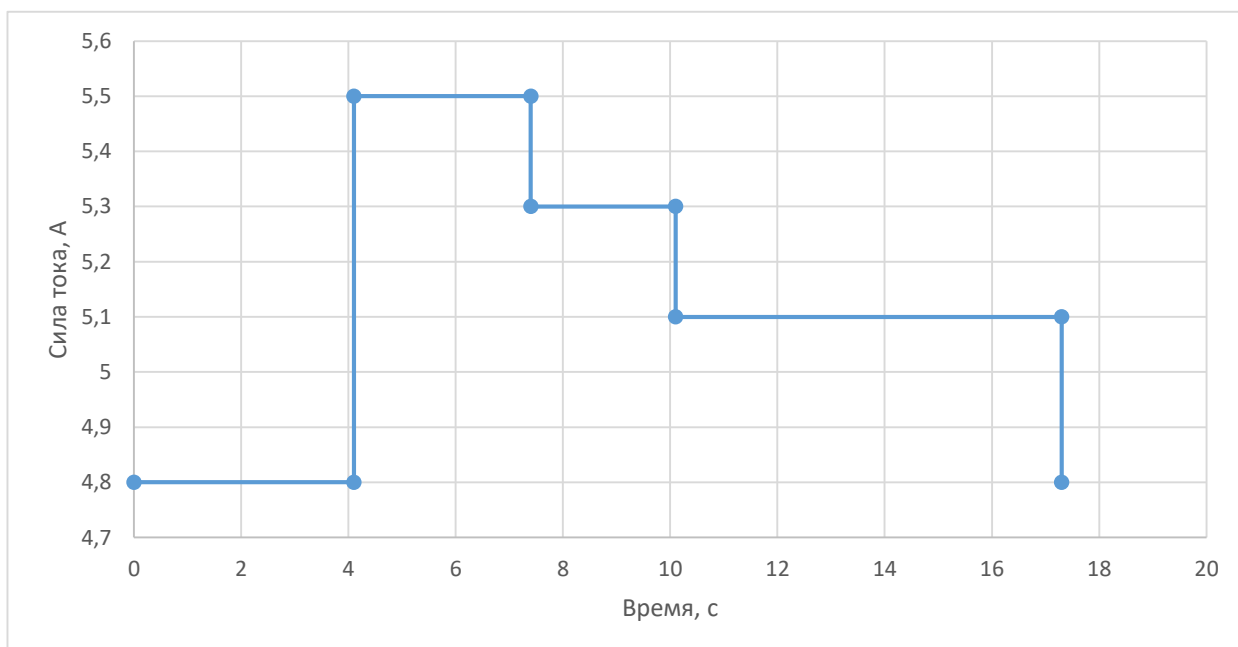


Рисунок 4.12. Изменения силы тока от времени при извлечении бортового кольца из шины типоразмера 14 дюймов

На Рисунок 4.13 построен график изменения усилия извлечения бортового кольца из той же шины, вычисленный по формуле (4.11). Максимальное усилие извлечения достигает 46,4 кН, в начальный пик нагрузки.

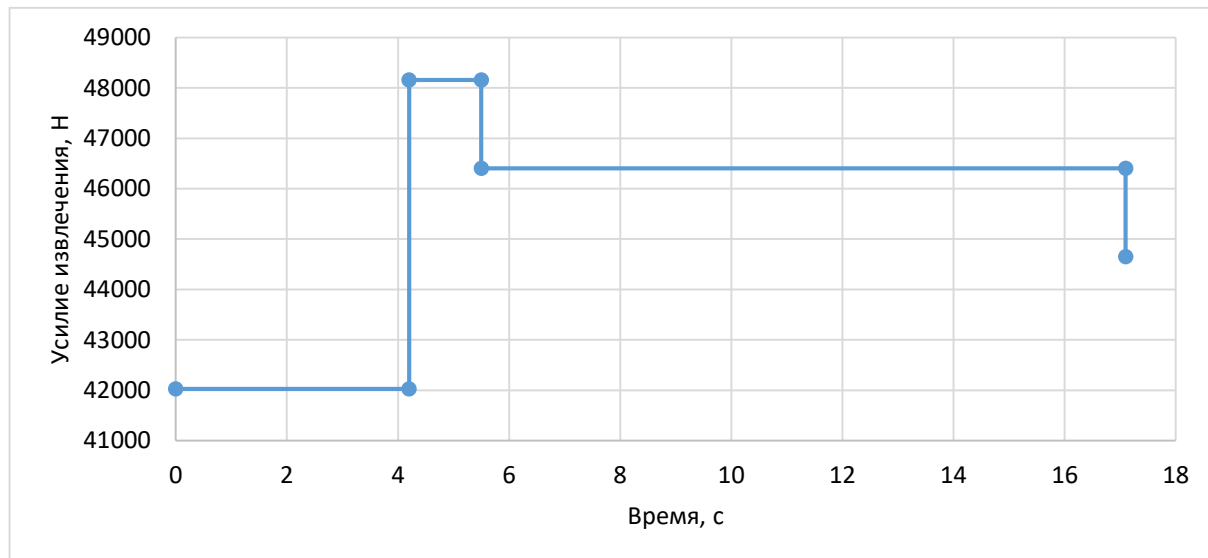


Рисунок 4.13. Изменения усилия извлечения от времени при извлечении шины 14 типоразмера

В Таблица 4.7 представлены экспериментальные, в том числе усреднённые по результатам повторных испытаний значения максимальной силы тока, максимального усилия извлечения бортового кольца и площади поперечного сечения бортового кольца для различных типоразмеров шин при различных значениях ширины щели упорной плиты.

Таблица 4.7 - Средние экспериментальные значения максимального усилия при извлечении бортового кольца из шины типоразмера 14, 15 и 16 дюймов

№	Шина	дпос	сщ	I1	I2	I3	I4	Icp	Fmax
1	14	355,6	100	5,6	5,7	5,5	5,6	5,6	49033,6
2	14	355,6	125	5,3	5,6	5,5	5,6	5,5	48158
3	14	355,6	150	5,3	5,4	5,3	5,3	5,325	46625,7
4	15	381	100	6,2	6,7	6	6,2	6,275	54943,9
5	15	381	125	5,2	5,4	5,9	6	5,625	49252,5
6	15	381	150	5,2	5,5	5,3	5,4	5,35	46844,6
7	16	406,4	100	5,6	5,5	5,5	5,6	5,55	48595,8
8	16	406,4	125	5,4	5,5	5,5	5,5	5,475	47939,1
9	16	406,4	150	5,3	5,4	5,3	5,4	5,35	46844,6

Таблица 4.8 - Сравнение результатов экспериментального определения максимального усилия извлечения с расчетным

№	Шина	ν	$d_{\text{пос}}$	Абк	$s_{\text{щ}}$	A_p	$F_{\text{экс}}$	F_p	δ
1	14	0,045	355,6	78,5	100	977	49033,6	48133,6	1,8%
2	14	0,045	355,6	78,5	125	977	48158	47613,1	1,1%
3	14	0,045	355,6	78,5	150	977	46625,7	47092,6	-1,0%
4	15	0,045	381	78,5	100	977	54943,9	47604,8	13,4%
5	15	0,045	381	78,5	125	977	49252,5	47084,2	4,4%
6	15	0,045	381	78,5	150	977	46844,6	46563,7	0,6%
7	16	0,045	406,4	78,5	100	977	48595,8	47075,9	3,1%
8	16	0,045	406,4	78,5	125	977	47939,1	46555,4	2,9%
9	16	0,045	406,4	78,5	150	977	46844,6	46034,9	1,7%

Анализ экспериментальных данных, полученных на физическом прототипе установки, подтвердил высокую адекватность разработанной гибридной модели (2.98) процесса извлечения бортового кольца. Максимальная ошибка составила 13,4% при проведении 4 серии опытов (таблица 4.8.) Среднеквадратичная ошибка составила – 5,5%.

При варьировании ширины щели упорной плиты $s_{\text{щ}}$ в диапазоне 100–150 мм для шин посадочных диаметров 355,6; 381 и 406,4 мм (площадь поперечного сечения бортового кольца от 78,5 до 113,5 мм²) установлено устойчивое снижение среднего максимального тока привода и максимального усилия извлечения F_{max} . Наиболее выраженный эффект наблюдается у шин с $d_{\text{пос}} = 381$ мм: при увеличении $s_{\text{щ}}$ со 100 до 150 мм усилие уменьшилось на 14,7 % (с 54 944 Н до 46 845 Н). Характер зависимостей согласуется с теоретическими положениями об уменьшении деформационного сопротивления при увеличении ширины щели. Экспериментально обоснован рациональный диапазон конструктивного параметра $s_{\text{щ}} = 140 - 150$ мм, обеспечивающий снижение пиковой нагрузки на 8–12 % при сохранении стабильности процесса.

Потребляемая мощность привода $W(t)$ рассчитывается, как произведение действительной мощности P (4.8) на время работы оборудования, получим (4.13):

$$W = P \cdot t = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot t = 526 \cdot I \cdot t \quad (4.13)$$

Учитывая, что каждому моменту времени соответствует определенная сила тока, то выражение (4.13) можно преобразовать в (4.14):

$$W = 526 \int_0^{t_1} I \cdot t \, dt \quad (4.14)$$

На рисунке 4.14 представлены осциллограммы силы тока привода для девяти усреднённых экспериментов по извлечению бортовых колец из шин. Площадь под кривыми $I(t)$ позволяет непосредственно определить энергопотребление каждого цикла извлечения путём численного интегрирования.

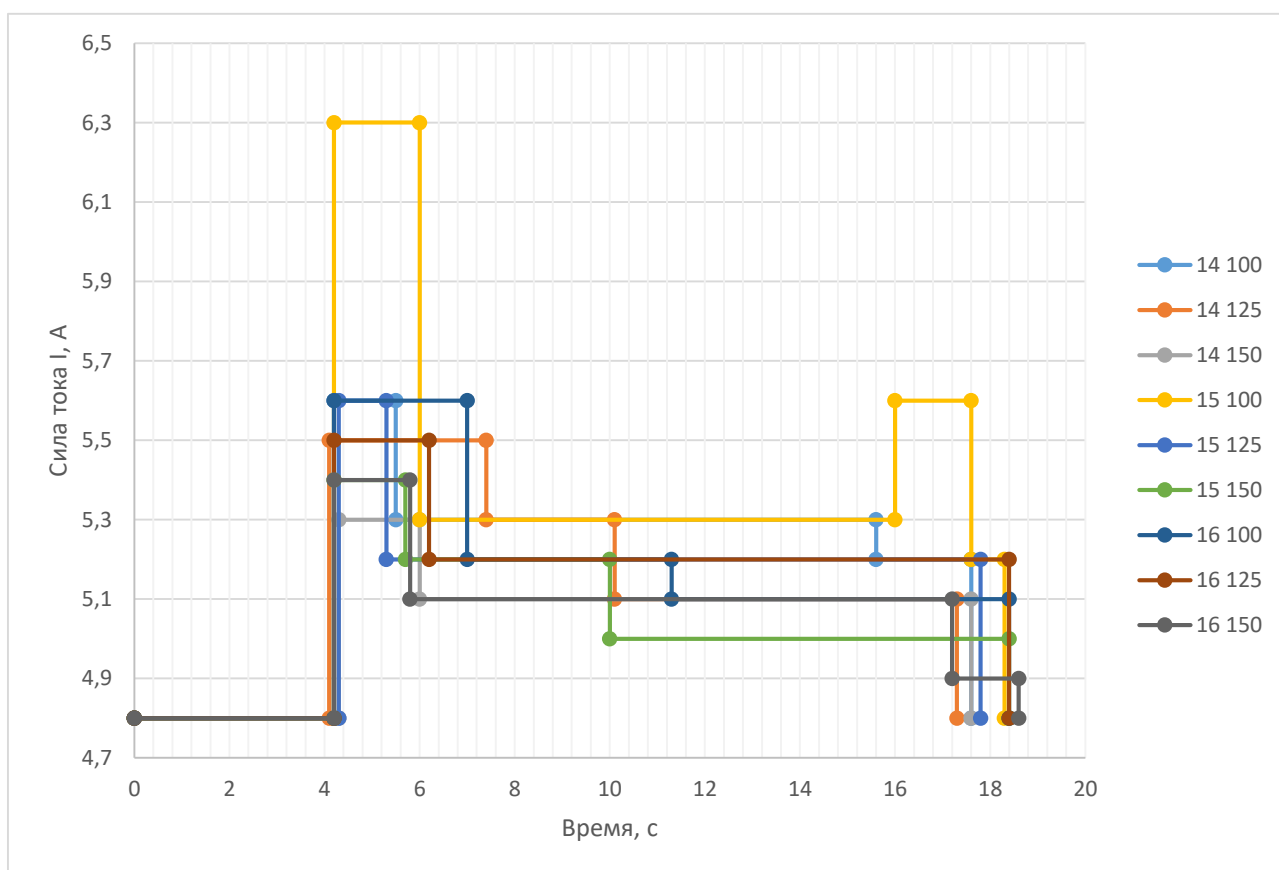


Рисунок 4.14. Зависимости силы тока от времени по результатам экспериментальных исследований на физическом прототипе установки для различных типоразмеров шин и ширины щели

В таблице 4.9 представлены рассчитанные значения энергопотребления привода за один цикл извлечения бортового кольца для всех девяти усредненных экспериментальных случаев. Экспериментальные кривые

изменения силы тока во времени, соответствующие данным таблицы, показаны на рисунке 4.14.

Таблица 4.9 - Экспериментальные значения работы привода за цикл извлечения бортового кольца на физическом прототипе

№	Диаметр, "	Щель, мм	Время цикла, с	Макс. I, А	I *t	W, Вт·с	W, Вт·ч
1	14	100	17,6	5,6	91,37	48061	13,35
2	14	125	17,3	5,5	91,37	46740	12,98
3	14	150	17,6	5,3	88,81	46714	12,98
4	15	100	18,3	6,3	98,12	51611	14,34
5	15	125	17,8	5,6	91,24	47992	13,33
6	15	150	18,4	5,4	92,62	48718	13,53
7	16	100	18,4	5,6	95,67	50322	13,98
8	16	125	18,4	5,5	94,60	49760	13,82
9	16	150	18,6	5,4	93,87	49376	13,72

Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими моделями, представленными во 2 и 3 главах и подтверждают, что увеличение ширины щели упорной плиты позволяет снизить необходимое усилие извлечения и уменьшить энергопотребление за цикл, что минимизирует пиковые нагрузки на привод и повышает энергоэффективность установки по сравнению с традиционными гидравлическими аналогами.

4.3 Экономическая оценка эффективности процесса извлечения бортового кольца предложенной конструкции установки

Экономическая эффективность является одним из решающих критериев целесообразности внедрения нового технологического оборудования. Выполним расчёт стоимости установки на основе актуальных рыночных цен 2026 года. Себестоимость установки для извлечения бортовых колец из крупногабаритных шин рассчитана в соответствии с основными статьями затрат и представлена в

Таблица 4.10 Отказ от мощной гидростанции и главного гидроцилиндра позволил существенно снизить материалоемкость и стоимость по сравнению с традиционными решениями оборудования.

Таблица 4.10 - Экономические показатели изготовления установки

Наименование затрат / параметра	Сумма (руб.)
Металлоконструкции (рама, направляющие каретки, упорная плита)	100 000
Реверсивный электродвигатель с редуктором и частотным преобразователем (5,5 кВт)	125 000
Система тросов (двухсекционный барабан, тросы, блоки)	50 000
Электроника и датчики	50 000
Сборочные и испытательные работы	150 000
Прочие расходы	40 000
Итого себестоимость одной установки	515 000
Предполагаемая отпускная цена	700 000

Сравнение разработанной установки на основе масштабируемых данных прототипа и рыночными аналогами представлено в Таблица 4.11.

Разработанная электромеханическая установка сопоставима по цене с гидравлическим аналогом (около 700 тыс. руб.), однако обладает значительно меньшей установленной мощностью и энергопотреблением за цикл (примерно в 3,5–4 раза ниже), более высокой производительностью (больше на 15-40%) за счёт регулируемого быстрого холостого хода и существенно меньшими затратами на обслуживание благодаря отсутствию гидросистемы.

Таблица 4.11 - Экспериментальные значения работы привода за цикл извлечения бортового кольца на физическом прототипе

Параметр	Гидровывуватель (глава 2 / Global Plant Auto Pullout Ring)	Рыночные гидравлические аналоги	Разработанная электромеханическая установка
Стоимость, тыс. руб.	480 – 690	600 – 1 580	700
Мощность привода, кВт	15	11–23	5,5
Время цикла (R22.5), с	50	45–60	35–40
Энергопотребление за цикл (R22.5), кВт·ч	0,21	0,19-0,25	0,054-0,061
Годовые затраты на электроэнергию *, руб.	221760	178200 - 302400	71820 - 97020
Производительность, шт/час	до 30	25–40	35–45
Масса, кг	1500	1300–1800	1100–1300
Эксплуатационные расходы (обслуживание)	высокие (гидравлика)	высокие	низкие (нет масла, меньше ремонтов)

* - Примечание: годовые затраты рассчитаны при заявленной максимальной производительности (1760 ч/год, 2 цикла на шину, 9,5 руб./кВт·ч).

Расчёт срока окупаемости выполнен для предприятия ООО «Экоутилизация-31», перерабатывающего грузовые и крупногабаритные шины. С учётом разнообразия типоразмеров шин, времени на их транспортирование, установку и фиксацию производительность установки принята равной 20 шин в час. При работе в одну смену (1760 часов в год) годовой объём переработки составляет 35 200 шин. Доход от реализации одного бортового кольца как лома чёрного металла составляет $3 \text{ кг} \times 10 \text{ руб./кг} = 30 \text{ руб.}$ за шину (без учёта дополнительных затрат на сортировку и логистику). Годовая выручка составляет 1 056 000 руб., эксплуатационные расходы (электроэнергия, зарплата оператора и обслуживание) – 480 000 руб. в год. Чистая годовая прибыль достигает 576 000 руб.

Анализ окупаемости при различных сценариях загрузки приведён в Таблица 4.12

Таблица 4.12 - Анализ окупаемости установки при различных сценариях загрузки

Сценарий	Годовой объём, шт	Чистая прибыль, руб./год	Простой срок окупаемости, мес.
Минимальный (50 % загрузки)	17 600	288 000	29,2
Номинальный	35 200	576 000	14,6
Оптимальный (1,5 смены)	52 800	864 000	9,7

Анализ показывает, что при цене лома чёрного металла 10 руб./кг и номинальной загрузке установка окупается за 14,6 месяцев. Основной экономический эффект достигается за счёт снижения энергопотребления (в 3,5–4 раза ниже, чем у гидравлических аналогов) и роста производительности цикла.

Разработанный электромеханический прототип при себестоимости 515 тыс. руб. и отпускной цене 700 тыс. руб. имеет достаточную экономическую эффективность, что подтверждает целесообразность внедрения предложенной

модернизации оборудования и создает основу для дальнейшего масштабирования и промышленного применения установки.

4.4 Общие рекомендации и унифицированная методика расчёта усилия извлечения бортового кольца

Разработанные математические модели и выражения: аналитическая модель процесса извлечения бортового кольца (уравнения (2.2), (2.13), (2.88)), эмпирическая регрессионная зависимость (2.98), регрессионные модели численного моделирования деформации кольца (3.4) и (3.5) позволили сформировать методическую основу для расчёта усилия извлечения и дают возможность перейти к обобщённым инженерным рекомендациям и унифицированной методике расчёта, применимой на этапах проектирования, модернизации и эксплуатации оборудования для утилизации шин.

Методика объединяет теоретические зависимости второй главы с результатами натуральных и численных экспериментов третьей главы и ориентирована на практическое применение при проектировании и эксплуатации модернизированного оборудования.

Методика реализуется в следующей последовательности:

1. Ввод исходных данных. Задаются посадочный диаметр шины $d_{\text{пос}}$, ширина бортовой части $b_{\text{борт}}$ и ширина щели мишени упорной $s_{\text{щ}}$ (выбирается в рациональном диапазоне 250–360 мм, обоснованном в главе 3).

2. Вычисление площади поперечного сечения резинового слоя A_p (4.15).
Ширина бортовой части принимается за диаметр условного круга.

$$A_p = \pi \left(\frac{b_{\text{борт}}}{2} \right)^2 \quad (4.15)$$

3. Определение площади поперечного сечения бортового кольца $A_{\text{бк}}$.
Выполняется по корреляционной зависимости (2.97):

$$A_{\text{бк}} = f(A_p) \quad (4.16)$$

4. Определение рациональной скорости извлечения v . Выполняется с использованием регрессионной модели (2.98) и итерационного подбора

скорости таким образом, чтобы выполнялось условие безопасной работы с запасом прочности:

$$F_{max} \leq 0.75 \cdot F_0 \quad (4.17)$$

где F_0 – разрывное усилие бортового кольца по уравнению (2.5)
Рекомендуемый диапазон рабочих скоростей составляет 0,04–0,06 м/с.

5. Экспериментальная верификация и корректировка модели процесса извлечения. На установке проводится замер усилия $F_{эксп}$ в ключевых точках цикла. Полученные данные заносятся в модель для уточнения коэффициентов K_i регрессионной зависимости (2.98) и повышения точности прогноза для последующих типоразмеров шин.

6. Формирование итоговых практических рекомендаций. По результатам расчётов составляется сводная таблица, содержащая для каждого рассматриваемого типоразмера: посадочный диаметр шины $d_{пос}$, ширину бортовой части $b_{борт}$, расчётные значения A_p и $A_{бк}$, максимальное усилие извлечения F_{max} , оптимальную скорость извлечения v . Такая таблица служит практическим руководством при выборе параметров привода, ширины щели и режима работы оборудования для всего обрабатываемого ассортимента шин.

Предложенная методика позволяет на этапе проектирования физического прототипа обоснованно назначать конструктивные и режимные параметры, минимизируя риск разрыва бортового кольца и чрезмерных пиковых нагрузок на установку.

Разработанная унифицированная методика расчёта усилия извлечения бортового кольца и рекомендуемые рациональные значения конструктивно-технологических параметров носят общий характер и требуют адаптации к конкретным производственным условиям. Адаптация осуществляется с учётом последовательности извлечения колец, степени износа шин, их типоразмера и особенностей применяемого привода.

При извлечении второго бортового кольца, когда жёсткость покрышки существенно снижена, целесообразно уменьшать ширину щели мишени

упорной плиты на 10–15 % по сравнению с номинальным значением и снижать начальную скорость движения рабочего органа до 0,03 м/с на первых 3–5 секундах процесса с последующим плавным выходом на оптимальный диапазон 0,04–0,06 м/с.

Для сильно изношенных шин с уменьшенной толщиной резинового слоя и сниженной адгезией допускается уменьшение расчётного максимального усилия на 10–15 %. При наличии предварительного диаметрального надреза бортовой части корректирующий коэффициент составляет 0,65–0,75. После выполнения первого цикла извлечения проводится замер реального усилия и при необходимости уточняются коэффициенты регрессионной модели.

Для крупногабаритных шин с площадью поперечного сечения бортового кольца свыше 350 мм² рекомендуется предусмотреть следующие корректировки: выбирать ширину щели в верхней части диапазона 320–360 мм; предусматривать запас усилия привода не менее 35–40%; рабочую скорость снизить на 10–15 % от рационального значения.

В процессе эксплуатации установки для повышения точности определения технологических параметров можно выполнять замеры фактического усилия и при необходимости уточнять коэффициенты регрессионной модели.

Для повышения безопасности установка может быть оснащена датчиками усилия и перемещения с выводом данных в систему управления, которая автоматически снизит скорость или выдаст предупреждающий сигнал в случае приближения рабочего усилия к критическому пороговому значению. Это особенно важно при работе с шинами, имеющими неравномерный износ или коррозию бортового кольца.

4.5 Результаты и выводы

В четвёртой главе проведены экспериментальные исследования с использованием установки, являющейся физическим прототипом конструкции, предложенной в 3 главе. Выполнена верификация теоретических моделей, предложенных во 2 главе. Проведена оценка экономической

эффективности технического решения и сформирована унифицированная инженерная расчетная методика усилия извлечения. Получены следующие основные результаты и выводы:

1. Изготовлен лабораторный прототип запатентованной конструкции (патент РФ № 236885 U1) установки для извлечения бортовых колец, особенностью которой является прямая тросовая передача усилия через двухсекционный барабан. Типоразмер установки предназначен для шин легкового и лёгкогрузового типоразмера с посадочным диаметром 13–18 дюймов. Основные технические характеристики:

- максимальное тяговое усилие до 100 кН;
- регулируемая рабочая скорость 0,04–0,06 м/с;
- ширина щели упорной плиты 150–250 мм (с возможностью расширения);
- ход рабочего органа 600–800 мм;
- установленная мощность привода 1,5 кВт.

2. Проведён комплекс натуральных экспериментов на шинах посадочных диаметров 14–16 дюймов, в результате которых получены временные зависимости перемещения, скорости, усилия извлечения и энергопотребления за один цикл. Подтверждена адекватность разработанной гибридной модели (погрешность 8–12 %). Подтвержден принятый рациональный диапазон конструктивного параметра ширины щели $s_{щ} = 125–150$ мм, установлено устойчивое снижение пикового усилия извлечения на 8–14,7 % и энергопотребления за цикл на 2–6 % при сохранении стабильности процесса.

3. Выполнена оценка экономической эффективности промышленного варианта предложенной конструкции установки, которая показала, что при номинальной загрузке предприятия (35 200 шин/год) простой срок окупаемости составляет 14,6 месяца, при оптимальной загрузке – 9,7 месяца. Получены следующие результаты:

- энергопотребление за 1 цикл составляет 0,054–0,061 кВт·ч, что 3,5–4 меньше по сравнению с гидравлическими аналогами (0,19–0,25 кВт·ч);

- производительность составляет 35–45 шт/ч, что на 20% больше аналогов (25–40 шт/ч);

- снижены эксплуатационные расходы за счёт отсутствия гидросистемы.

4. На основе аналитической модели (глава 2), результатов имитационного моделирования (глава 3) и натуральных экспериментов (глава 4) разработана унифицированная инженерная методика расчёта усилия извлечения бортового кольца. Методика включает последовательность операций по вводу исходных данных, определению площадей сечений, рациональной скорости извлечения с учётом условия неразрывности кольца ($F \leq F_0$), экспериментальной корректировке коэффициентов регрессионной модели и формированию сводной расчётной таблицы. Предложены практические рекомендации по адаптации параметров при извлечении второго бортового кольца, обработке сильно изношенных шин, работе с крупногабаритными шинами, а также по оснащению установки датчиками безопасности и организации обратной связи «эксперимент – модель».

В четвёртой главе диссертации решены все поставленные задачи: создан и испытан физический прототип модернизированного оборудования, экспериментально верифицирована гибридная модель процесса, обоснована экономическая целесообразность внедрения электромеханической установки и разработана готовая к практическому применению унифицированная методика инженерного расчёта. Полученные результаты подтверждают, что предложенная модернизация оборудования позволяет повысить энергоэффективность процесса извлечения бортовых колец на 3,5–4 раза, снизить пиковые нагрузки на привод, увеличить производительность и обеспечить окупаемость инвестиций в короткие сроки. Разработанные технические и методические решения создают основу для промышленного внедрения и дальнейшего масштабирования технологии утилизации изношенных автомобильных шин утилизации изношенных автомобильных шин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. В результате проведенного анализа техники и технологии в области переработки изношенных шин установлено, что операции извлечения бортового кольца влияют на ресурс дробильного оборудования при переработке РТИ, поскольку наличие бортового кольца является одним из факторов износа режущих узлов. Систематизация технологических и технических ограничений существующего оборудования для извлечения бортовых колец выявила необходимость его совершенствования, так как исследованные конструкции не обеспечивают оптимального баланса производительности, энергоэффективности и способности работать с шинами всех типоразмеров. При этом отмечено, что наиболее перспективным направлением является совершенствование установок с электромеханическим приводом и регулируемой кинематикой рабочего органа.

2. 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, точное регулирование скоростей рабочего и холостого хода, снижение динамических нагрузок и сокращение длительности цикла на 20–35 % по сравнению с традиционными гидравлическими выдергивателями.

3. 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 (2.2) и обобщённым выражением усилия (2.13) с учётом

ограничения на сохранение целостности бортового кольца. Модель включает пять основных составляющих сопротивления и позволяет связать внешние параметры оборудования с внутренними конструктивными и физико-механическими параметрами шины. Процесс извлечения представлен в виде двух этапов: упругая деформация до разрыва резиновой оболочки (2.14) и последующее пластическое деформирование при протягивании (2.15). Для каждого этапа получены дифференциальные уравнения движения рабочего органа и аналитические решения для перемещения $x(t)$ (2.54) и скорости извлечения $v(t)$ (2.55). На основе этого проведена оценка энергетической эффективности: установлено, что мощность имеет импульсный характер на первом этапе (2.57) и выходит на постоянный уровень P_{∞} в режиме протягивания (2.59). Таким образом, основные энергозатраты приходятся на стадию разрыва резиновой оболочки.

4. Разработана гибридная математическая модель для определения максимального усилия извлечения (2.88), 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 на гидравлической установке «Гидровырыватель бортовых колец». Получены значения максимального усилия для 11 типоразмеров шин, подтверждена высокая корреляция усилия с площадью сечения бортового кольца, выявлены характерные пиковые нагрузки и различия деформационных процессов разных групп шин. Методом наименьших квадратов определены коэффициенты модели (2.96). Коэффициент детерминации $R^2 \approx 0,94$ и средняя относительная ошибка $\leq 6,7$ % свидетельствуют о высокой адекватности модели экспериментальным данным.

5. Выполнено численное моделирование начальной стадии процесса извлечения бортового кольца методом конечных элементов с применением

полного трёхфакторного ротatableного униформ-планирования второго порядка. Получены статистически адекватные регрессионные модели ($R^2 = 0,986$ и $0,906$) зависимостей максимального перемещения бортового кольца D_x и эквивалентного напряжения по Мизесу σ от ширины щели, ширины крюка 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 крюка статистически незначимо. На основании этого рекомендовано фиксированное значение ширины крюка $b = 20$ мм. По результатам анализа поверхностей отклика определён рациональный диапазон ширины щели 220–260 мм, который обеспечивает начальное перемещение $D_x \approx 10$ –15 мм при уровне напряжений $\sigma \approx 500$ –700 МПа.

6. Разработана и реализована в виде программ на Python имитационная модель упругопластической деформации бортового кольца при его преобразовании из круговой формы в эллиптическую в процессе пластического деформирования. Показано 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 бортового кольца 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. Проведён комплекс натуральных экспериментов (36 рабочих циклов) на шинах посадочных диаметров 14–16 дюймов при варьировании ширины щели упорной плиты

100–150 мм. Экспериментально подтверждена высокая адекватность разработанной в главе 2 гибридной модели: расхождения между расчётными и измеренными значениями максимального усилия не превышают 12 %.

8. Выполнена оценка экономической эффективности промышленного варианта электромеханической установки. Себестоимость изготовления одной установки составляет 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.

9. На основе теоретических моделей (глава 2), результатов численного и имитационного моделирования (глава 3) и натурных экспериментов (глава 4) разработана унифицированная инженерная методика по работе на оборудовании для извлечения бортового кольца. Предложены практические рекомендации по адаптации параметров при извлечении второго бортового кольца, обработке сильно изношенных шин, работе с крупногабаритными шинами, а также по оснащению установки датчиками безопасности и организации обратной связи «эксперимент – модель».

10. Осуществлено внедрение результатов исследования по извлечению БК на предприятии ООО «Экоутилизация-31», которые используются в практической работе, способствуют повышению эффективности процесса переработки изношенных шин, снижению удельных энергозатрат при работе оборудования и рекомендуются к использованию на аналогичных предприятиях по утилизации изношенных резинотехнических изделий (Приложение 4).

11. Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки студентов на кафедре «Технология машиностроения» БГТУ им. В. Г. Шухова (Приложение 5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Шаховец С. Е., Курлянд С. К., Сиротинкин Н. В., Рюткянен Е. А. «О состоянии макромолекулярной структуры протекторных резин в течение эксплуатации и переработки шин» // Известия СПбГТИ (ТУ). 2019. №51 (77).
2. Волынкина Е.Н., Кудашкина С.А., Незамаев А.В., Журавлёва Н.В. // Экология и промышленность России. 2001. Январь. С. 40-44;
3. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (ред. от 02.11.2018) "Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов" (с изм. и доп., вступ. в силу с 04.10.2021)
4. Росстат // Количество автомобилей на 1000 человек. URL: <http://www.gks.ru> (дата обращения 13.02.2024).
5. Невядомская А. И., Утилизация и переработка шин в крошку / А. И. Невядомская, А. А. Дериглазов. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2014. – № 17 (76). – С. 310-313.
6. Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (Принят ГД РФ 22.05.1998, действующая редакция).
7. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1589-р от 25.07.2017
8. Лозовая, С. Ю. Область применения продуктов вторичной переработки резино-технических изделий в строительстве / С. Ю. Лозовая, В. М. Кравченко, С. А. Сацк // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : межвузовский сборник статей, Белгород, 01–20 декабря 2019 года. Том Выпуск XVIII. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 216-220.
9. Старцева, Т. А., Чернышев, Л. А., Михайленко, Д. Ю. Переработка автомобильных шин – снижение вредного воздействия на окружающую среду // Эко-потенциал. – 2019. – № 1 (25). – С. 122–127.

10. Пат. 2429122 С1 Российская Федерация, МПК В29В17/00. Способ разделки автомобильных и тракторных шин /А. В. Куликов – Оpubл. 20.09.2011

11. Абдураззаков Козим Хотамович, Ибрагимов Абдусаттар Тургунович ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГЕНЕРАТНЫХ ПРОДУКТОВ В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ В СОСТАВЕ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ // Universum: технические науки. 2025. №2 (131).

12. Николаева, Л. А. Утилизация вторичного резинового сырья в технологии производства битумной композиции / Л. А. Николаева, В. А. Марьев. - Текст : непосредственный // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности . - 2025. - № 2. - С. 95-104.

13. Comparative Study on the Effect of Different Rubber Waste as Filler on Recycled Polyvinylchloride Composites // Advances in Science and Technology. – 2025. – Vol. 168. – P. 51-70

14. Назаров В. И. Ресурсосберегающая технология утилизации резинотехнических изделий различного назначения с получением товарных продуктов и энергоресурсов // Журнал естественнонаучных исследований. 2017. №. 4. С. 30-40.

15. Горина В.З., Богомолов А.Р., Ушаков К.Ю., Темникова Е.Ю. Исследование жидких углеводородов пиролиза резинотехнических отходов // Теплоэнергетика. – 2025. – № 8. – С. 96-104.

16. Вольфсон С. И., Фафурина Е. А., Фафурин А. В. Методы утилизации шин и резинотехнических изделий // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №1.

17. Behera U. S., Poddar S., Byun H. An integrated approach to waste tire pyrolysis for value-added products: process optimization and a comprehensive economic study for scalability // Sustainable Energy & Fuels. – 2025. – Vol. 9, No. 15. – P. 4103-4124.

18. Ayhan E., Doğruyol M. Effect of Rubber and Steel Fibers Obtained from Waste Tires on Mechanical and Physical Properties of Concrete: An Experimental

Study // Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. – 2025. – Vol. 14. – P. 1866-1890. – DOI: 10.17798/bitlisfen.1736282.

19. Amran M. Innovative technology for converting automobile tire waste bead wires into recycled steel fibers for sustainable concrete composites // International Journal of Building Pathology and Adaptation. – 2024. – Vol. 42, No. 4. – P. 665-692. – DOI: 10.1108/IJBPA-02-2023-0016.

20. Zhang J., Liu H., Sablani S., Wu Q. Recycling Functional Fillers from Waste Tires for Tailored Polystyrene Composites: Mechanical, Fire Retarding, Electromagnetic Field Shielding, and Acoustic Insulation Properties—A Short Review // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, No. 11. – DOI: 10.3390/ma17112675.

21. Landi D., Gigli S., Germani M., Marconi M. Investigating the feasibility of a reuse scenario for textile fibres recovered from end-of-life tyres // *Waste Management*. – 2018. – Vol. 75. – P. 187-204. – DOI: 10.1016/j.wasman.2018.02.018.

22. 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 октября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 49-52. – EDN OAQGQN.

23. 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 : Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 20–21 мая 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 82-88. – EDN RMHOUY.

24. Марков Р.В. Технология восстановления шин автомобилей // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований. 2015. №18.

25. Эксплуатация и ремонт крупногабаритных шин / Э. С. Скорняков, Э. Н. Кваша, А. А. Хоменя, В. П. Бойков. – Москва : Химия, 1991. – 128 с. – ISBN 5-7245-0452-9. – EDN HIZQBM.

26. Усачев, Д. В. Термический метод переработки изношенных шин / Д. В. Усачев, Д. О. Голикова, Д. В. Лучников // Образование. Наука. Производство : Сборник докладов XVII Международного молодежного форума, Белгород, 30–31 октября 2025 года. Часть 2. Инженерно-технические науки. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 750-753. – EDN GFBHJQ.

27. Шаховец, С. Е. Комплексная регенерация шин / С. Е. Шаховец, В. В. Богданов. – СПб.: Проспект Науки, 2025. – 208 с.

28. Бернадинер, И. М. Высокотемпературные технологии обезвреживания отработанных автомобильных покрышек : учебное пособие / И. М. Бернадинер, П. В. Хорева, А. А. Валинеева. – Москва : Изд-во МЭИ, 2025. – 79 с.

29. Яцун А.В., Коновалов П.Н., Коновалов Н.П. Жидкие продукты пиролиза отработанных автомобильных шин под воздействием СВЧ // Химия твердого топлива, 2013, №4, с. 60-62.

30. Яцун А.В., Коновалов П.Н., Коновалов Н.П. СВЧ-Пиролиз изношенных автомобильных шин в присутствии гидроксида калия // Современный наукоемкие технологии, 2017, с. 83-87.

31. О.В. Булавин, В.М. Пашкевич Применение низкотемпературного пиролиза для переработки автомобильных шин // Экологические проблемы индустриальных мегаполисов: Материалы международной научно-практической конференции. В 2-х томах. – Т.2.–Донецк: ООО „Лебедь”, 2004.– С.103-108.

32. А.В. Макаров Некоторые аспекты рециклинга изношенных автомобильных покрышек методом пиролиза // Вестник ТОГУ, 2008, с. 247-258.

33. Кузнецова В.А., Рутберг Ф.Г., Братцев А.Н., Попов В.Е., Уфимцев А.А., Штенгель С.В., Лернер А.С., Субботин Д.И. Газификация отработанных автомобильных шин воздушной и паровой плазмой // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2011. №2, с. 46-50.

34. Шулдякова, К. А. Воздействие автомобильных шин на окружающую среду и здоровье человека / К. А. Шулдякова. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 20 (124). – С. 472-477. – URL: <https://moluch.ru/archive/124/34317/> (дата обращения: 11.03.2024).

35. Т.Ф. Тарасова, Д.И. Чапалда Экологическое значение и решение проблем переработки изношенных автошин // Вестник ОГУ №2 2006, том 2, с. 130-135.

36. Валуев Денис Викторович, Ананьева Ольга Рафиковна Перспективы переработки автомобильных покрышек // Векторы благополучия: экономика и социум. 2011. №1 (1).

37. Захарян Е.М., Максимов А.Л. Пиролиз шин. Особенности процесса и состав продуктов реакции (обзор) // Журнал прикладной химии. – 2021. – Т. 94, № 10-11. – С. 1226-1248. – DOI: 10.31857/S0044461821100017.

38. Штейнберг, Е. М. Биоразлагаемый материал на основе полиамида и натурального каучука / Е. М. Штейнберг, Л. А. Зенитова // *Juvenis scientia*. - 2015. - № 1. - С. 5-6.

39. Brito-Cabezas J. Integrated in vivo and in silico characterization of novel bacterial strains for biodegradation and desulfurization of end-of-life tire rubber / J. Brito-Cabezas, J. Rojas, A. Hernández [et al.] // *Bioresource Technology*. – 2026. – Vol. 441. – P. 133672. – DOI 10.1016/j.biortech.2025.133672.

40. Australian study supports Tyres in construction // *Klean Industries*. – 2022. – URL: <https://kleanindustries.com/insights/market-analysis-reports/australian-study-supports-tyres-in-construction/> (дата обращения: 16.04.2026).

41. Tire graveyard: how one group's attempt to save the land resulted in a rubber-filled burial ground / *CBC News*. – URL:

<https://www.cbc.ca/news/canada/new-brunswick/tire-graveyard-1.4718768> (дата обращения: 16.04.2026).

42. Ксения Вершинина, Кристина Паушкина, Павел Стрижак, Андрей Тугов Потенциал использования промышленных и коммунальных отходов в ТЭК России // ЭП. 2025. №4 (207).

43. 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 : Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 20–21 мая 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 95-100. – EDN NQQSHK.

44. Zhao Q., Wu Y., Xu J., Zhu H., He W., Li G. Pathways to Carbon Neutrality: A Review of Life Cycle Assessment-Based Waste Tire Recycling Technologies and Future Trends. *Processes*. 2025;13(3):741.

45. Усачев, Д. В. Физико-механический метод переработки изношенных шин / Д. В. Усачев, Д. О. Голикова, Д. В. Лучников // Образование. Наука. Производство : Сборник докладов XVII Международного молодежного форума, Белгород, 30–31 октября 2025 года. Часть 2. Инженерно-технические науки. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 745-749. – EDN IMRBIA.

46. 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 : Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 20–21 мая 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 92-95. – EDN OXMIIN.

47. Бондаренко Е.В., Клищенко В.П., Пославский А.П., Сорокин В.В. Формирование энергоэффективной технологии утилизации автомобильных шин // Мир Транспорта и технологических машин, 2011 с. 47-52.

48. Чернышев Денис Олегович Технологическая переработка старых шин автомобилей - решение экологических проблем // Наука, техника и образование. 2019. №3 (56).

49. Ерофеева Д. А., Ларина Г. В. Физические и химические основы технологии утилизации автопокрышек с использованием криогенных установок // БРНИ. 2012. №4 (3).

50. Стец А.А., Чайкун А.М. Экологические и экономические аспекты переработки и использования изношенных автомобильных шин // Известия МГТУ «МАМИ». - 2013. - Т. 7. - №1-4. - С. 34-40. doi: 10.17816/2074-0530-67760

51. Интерактивная карта для сдачи отходов [Электронный ресурс]. – URL: <https://uberumar.reo.ru/> (дата обращения: 16.04.2026).

52. 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 : Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 20–21 мая 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 88-92. – EDN PWCNHP.

53.ГОСТ 4754–97. Шины пневматические для легковых автомобилей. Технические условия.

54.ГОСТ 5513–97. Шины пневматические для грузовых автомобилей и автобусов. Технические условия.

55. Han W. Pyrolysis of Waste Tires: A Review. *PMC (Journal)*. 2023.

56. Laftah W.A., Wan Abdul Rahman W.A. A comprehensive review of tire recycling technologies and applications. *Materials Advances*. 2025;6:4992–5010.

57. 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.

58. Tire Debeader for Sale, Tyre Bead Wire Remover for Tire Recycling / AISHred. – URL: <https://www.aishred.com/release/tire-debeader-for-sale-tyre-bead-wire-remover-for-tire-recycling.html> (дата обращения: 16.04.2026).

59. С. Ю. Лозовая, В. М. Кравченко, Н. М. Лозвой, Я. П. Топчий Анализ основных технологических схем и линий по переработке и утилизации резинотехнических изделий / // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов : Межвузовский сборник статей / Под редакцией В.С. Богданова. Том Выпуск XX. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 104-109.

60. 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 : Сборник докладов Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 20–21 мая 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 77-82. – EDN BILKZS.

61. Чуев, К. В. Предварительная разделка изношенных шин / К. В. Чуев // Образование. Наука. Производство : Сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 октября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 45-48. – EDN ZQTXNH.

62. Пат. 57669 U1 Российская Федерация, МПК В29В17/00. Станок для резки шины / В. Я. Фольмер. – Оpubл. 27.10.2006

63. Пат. 2608893 С1 Российская Федерация, МПК В29В17/00. Способ переработки изношенных шин в дисперсный материал / М. Е. Соловьев, Е. М. Соловьев. – Оpubл. 26.01.2017

64. Пат. 213116 U1 Российская Федерация, МПК В26D 1/01. Ножницы гидравлические для резки шин. / М. В. Швецов, В. Ф. Ситников, А. В. Егошин, Б. Ф. Чернов, М. И. Самохвалова. – Оpubл. 25.08.2022

65. Пат. 107491 U1 Российская Федерация, МПК В02С 18/00 Установка для резки крупногабаритной и сверхкрупногабаритной шины / Е. Д. Филиппов. – Оpubл. 20.08.2011

66. Резак для резиновых полос [Электронный ресурс] // Shuliy Tire : официальный сайт производителя оборудования для переработки шин. – URL: <https://www.shuliytire.com/ru/резак-для-резиновых-полос/> (дата обращения: 16.04.2026).

67. Ножницы для резки шин [Электронный ресурс] // Альфа-СПК : официальный сайт. – URL: <https://alfaspk.ru/shop/folder/nozhnicy-dlya-rezki-shin> (дата обращения: 16.04.2026).

68. 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 : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 168-174. – EDN DRXNGM.

69. Пат. 2188125 С1 Российская Федерация, МПК В29В17/00. Способ переработки покрышек, подлежащих утилизации / Борисов Е.М., Китаров К.С., Антонов В.В., Кузьмин А.В., Борисов И.Е. – Оpubл. 27.08.2002

70. Пат. 2375177 С1 Российская Федерация, МПК В29В17/00. Способ переработки покрышек, подлежащих утилизации / А. А. Вещев, А. В. Васильев, И. Ю. Труфанов. – Оpubл. 10.12.2009

71. Пат. 2504469 С1 Российская Федерация, МПК В29В17/00. Способ и устройство для переработки изношенных покрышек методом деструкции / А. А. Вещев, А. Е. Соколов, К. Г. Пеньков, Р. П. Литвинов. - Оpubл. 20.01.2014

72. Rubber & Plastics Machine [Электронный ресурс] // DIYTrade : B2B marketplace. – URL: https://www.diytrade.com/china/pl/1454-t-i-1/Rubber_Plastics_Machine.html (дата обращения: 04.06.2026).

73. Пат. 203639 U1 Российская Федерация, МПК В02С 4/00. Двухстадийный измельчитель / С. Ю. Лозовая, В. М. Кравченко, Н. М. Лозовой, А. В. Тулина – Оpubл. 14.04.2021 Бюл. №11

74. Пат. 2492927 С2 Российская Федерация, МПК В02С 4/30. Шредер / В. В. Смердов, М. В. Смердов – Оpubл. 20.09.2013 Бюл. №26

75. Пат. 104511 Российская Федерация, МПК В29В 17/00. Устройство для утилизации отработанных шин / М. Г. Гольдшмидт, Д. М. Козарь, А. Г. Темиров, З. М. Вендров – Оpubл. 20.05.11 Бюл. №14

76. Козарь Д. М., Крауиньш П. Я. Кинематика и динамика формирования сил резания при фрезеровании упругой оболочки // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013. №04.

77. ГОСТ Р 57673-2017. Проволока бортовая (для шин). – Введ. 2019-04-01. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 12 с.

78. SU Авторское свидетельство 1409476 А1, МПК В60С 15/04. Бортовое кольцо пневматической шины / Кутасов И.С., Пращикин В.Н., Ямпольская И.М., Кожанов Е.Ф. ; заявитель Научно-исследовательский институт шинной промышленности. – № 4168591/23-11 ; заявл. 25.12.1986 ; опубл. 15.07.1988, Бюл. № 26. – 4 с. : ил.

79. RU 2652764 С2, МПК В60С 15/04. Бортовое проволочное кольцо для шины, шина и способ изготовления / Линч Кристофер Джон, Фрейн Джон Джозеф, Гаживски Майкл Т., Грис Брайан Д., Бальтазар Филипп ; заявитель Бриджстоун Американс Тайр Оперэйшнс, ЭлЭлСи. – № 2016134867 ; заявл. 26.08.2016 ; опубл. 17.04.2018, Бюл. № 11. – 23 с. : ил.

80. ГОСТ 26366-84. Проволока стальная латунированная для бортовых колец шин. Технические условия. – Введ. 1985-07-01. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 9 с.

81. Вещев А. А., Соколов А. Е., Панкратовский А. О. Экспериментальное исследование процесса отделения металлокорда от фрагментов утилизируемых шин методом непрерывной прокатки // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 2012. №12.

82. Пат. 2005607 С1 Российская Федерация, МПК В29В17/00. Устройство для отделения металлокорда от резины в изношенных шинах / В. Н. Ходяков, В. В. Грачев, В. М. Соболев и др. – Оpubл. 15.01.1994

83. US 20130205963 A1, МПК В29В17/02, В29L30/00. System and Method of Removing Beads from Tires / Т. А. Shaffer, J. S. Shaffer ; applicant Shaffer Troy A., Shaffer John S. – № 13/753597 ; filed 30.01.2013 ; published 15.08.2013. – 12 p. : ill.

84. Станок для удаления бортового кольца [Электронный ресурс] // EURASIA GROUP : каталог. – Режим доступа: <https://eurasia-group.ru/catalog/oborudovanie/oborudovanie-dlya-pererabotki-otkhodov/oborudovanie-dlya-proizvodstva-rezinovoy-kroshki/stanok-dlya-udaleniya-bortovogo-koltsa/> (дата обращения: 16.04.2026).

85. Гидравлическая выдерга бортовых колец TDB-1200 [Электронный ресурс] // EURASIA GROUP : каталог. – Режим доступа: <https://eurasia-group.ru/catalog/oborudovanie/oborudovanie-dlya-pererabotki-otkhodov/oborudovanie-dlya-proizvodstva-rezinovoy-kroshki/gidravlicheskaya-vyderga-bortovykh-kolets-tdb-1200/> (дата обращения: 16.04.2026).

86. Auto Pullout Ring [Электронный ресурс] // Global Plant : каталог. – Режим доступа: <https://globalplant.ru/equipment/auto-pullout-ring> (дата обращения: 16.04.2026).

87. US20180036915A1. Device and method for removing tire bead wire from tires: US Patent Application. – 2018. – URL: <https://patents.google.com/patent/US20180036915A1/en>

88. CN102921702A. Tire bead wire extracting device: CN Patent. – 2013. – URL: <https://patents.google.com/patent/CN102921702A/en>
89. CN212528456U. Tire bead wire removal machine: CN Utility Model. – 2021. – URL: <https://patents.google.com/patent/CN212528456U/en>
90. US20020088557A1. Tire bead wire remover: US Patent Application. – 2002. – URL: <https://patents.google.com/patent/US20020088557A1>
91. US7438109B2. Tire bead wire extractor: US Patent. – 2008. – URL: <https://patents.google.com/patent/US7438109B2/en>
92. US20150290841A1. Tire bead wire extraction system: US Patent Application. – 2015. – URL: <https://patents.google.com/patent/US20150290841A1/en>
93. WO2002102563A1. Device for extracting tire bead wire: WO Patent Application. – 2002. – URL: <https://patents.google.com/patent/WO2002102563A1/en>
94. Пат. 1799325 А3 СССР, МПК В29В17/02. Способ извлечения металлической арматуры из покрышки / П. Н. Ратушняк, А. Н. Клейнер, В. П. Барвиченко – Оpubл. 28.02.1993.
95. Пат. 1659258 А1 СССР, МПК В60S5/00. Способ удаления цельного металлического корда из пневматических покрышек при утилизации / В. И. Михайлевский, В. П. Яковлев – Оpubл. 30.06.1991
96. Пат. 225789 С1 Российская Федерация, МПК В29В17/02//В29К105:22. Способ извлечения бортовых колец из автопокрышки / Ю. М. Штейнберг, В. П. Шардин, А. Д. Смирнов, Р. Р. Сагиров – Оpubл. 20.03.2004.
97. Пат. 2317195 С1 Российская Федерация, МПК В29В17/02. Установка для удаления троса из боковой части шины при утилизации / А. М. Горлачёва, В. Н. Калмыкова, В. И. Фарафонова – Оpubл. 20.02.2008
98. Пат. 201698 U1 Российская Федерация, МПК В29В 17/02 Установка для для удаления троса из боковой части шины при утилизации / В. Я. Дуганов, Н. А. Архипова, К. В. Чуев, Ю. А. Чуева – Оpubл. 28.12.2020

99. Патент 236885 U1 Российская Федерация, МПК В29В 17/02, В29В 17/00. Установка для удаления бортового металлического кольца из боковой части шины / Чуев К.В., Дуганов В.Я., Дуюн Т.А., Каменских А.А. – № 2024114231 ; заявл. 29.05.2025 ; опубл. 28.08.2025, Бюл. № 24. – 8 с. : ил. – EDN ADBJRZ.

100. ГОСТ 14959-2016. Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия. – Взамен ГОСТ 14959-79 ; введ. 2018-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 35 с.

101. Чуев К.В. 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 AXСJОН.

102. 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 DCQССК.

103. Лучников, Д. 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 : Сборник докладов конференции, Белгород, 29–30 мая 2025 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 77-81. – EDN VTZYWQ.

104. Лучников, Д. 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 : Сборник докладов конференции, Белгород, 29–30 мая 2025 года. Часть 7. Высокоэффективные технологические процессы

машиностроительных производств, технологическая робототехника. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 68-73. – EDN SUVIBH.

105. ГОСТ 1050-2013.Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и особых марок стали. Технические условия. – Взамен ГОСТ 1050-88 ; введ. 2014-07-01. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 28 с.

106. Рыкусова В.А., Зезетко О.Н., Акатьева Т.И. Методы определения прочности связи с резиной на металлокорде и бортовой проволоке // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2006. – № 2 (38). – С. 98-105.

107. Демидов А.В., Бобровник С.Л., Серегина Е.С., Мартынюк Т.В. Подбор технологических параметров производства проволоки для бортовых колец с повышенными требованиями к адгезии // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2012. – № 4 (68). – С. 95-102

108. Du Z., Yan Y., Wang Z., et al. A finite strain visco-hyperelastic damage model for rubber-like materials: theory and numerical implementation // Acta Mechanica Sinica. – 2023. – DOI 10.1007/s10409-023-22473-x.

109. Nakajima Y. Advanced tire mechanics [Electronic book]. – Singapore : Springer, 2019. – 1 online resource (xxv, 1265 p.) – ISBN 978-981-13-5799-2.

110. Johnson W., Mellor P.B. Engineering Plasticity. – London: Van Nostrand Reinhold Co., 1975. – Chapter 6. – P. 110-114.

111. Заев В.А., Никитенко А.Ф. Расчет напряженно-деформированного состояния изгибаемых кольцевых пластин с учетом повреждаемости материала в процессе ползучести // Прикладная механика и техническая физика. – 1993. – Т. 34, № 3. – С. 142-146.

112. Фролов В.М. Деформация нагруженного кольца, соединенного с безмоментной цилиндрической оболочкой / В.М. Фролов // Ученые записки ЦАГИ. – 1976. – Т. VII, № 1. – С. 172–176. – УДК 629.7.015.624.073.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Программа расчёта коэффициентов эмпирической модели усилия извлечения бортового кольца методом наименьших квадратов

```
# =====
# Программа расчёта коэффициентов эмпирической модели усилия извлечения
# бортового кольца методом наименьших квадратов (МНК)
# Автор: Кирилл Чувев
# =====

import numpy as np
import pandas as pd
import statsmodels.api as sm

data = {
    'Шина': ['265/70 R19.5', '385/55 R22.5', '315/70 R22.5', '11 R22.5',
            '385/65 R22.5', '315/80 R22.5', '11.00 R20', '360/70 R24', '14.00-20 Я-307'],
    'd_pos (м)': [0.4953, 0.5715, 0.5715, 0.5715, 0.5715, 0.5715, 0.5080, 0.6096, 0.5080],
    'A_бк (м²)': [0.000208, 0.000223, 0.000218, 0.000207, 0.000234, 0.000420, 0.000198, 0.000222,
                 0.000455],
    'A_p (м²)': [0.002113, 0.001911, 0.002350, 0.002074, 0.002372, 0.003675, 0.001987, 0.001033,
                0.003613],
    'F_эксп (Н)': [85700, 88900, 95300, 92100, 93700, 114300, 88900, 82600, 139700]
}

df = pd.DataFrame(data)

s_sh = 0.25 # м
v = 0.045 # м

sqrt_A_bk = np.sqrt(df['A_бк (м²)'])
term1 = sqrt_A_bk * (s_sh + df['d_pos (м)']) # для K_бк
term2 = df['A_p (м²)'] # для K_рез
term3 = v * np.sqrt(df['A_p (м²)']) # для K_з
term4 = df['A_бк (м²)'] # для K_5

X = np.column_stack((np.ones(len(df)), term1, term2, term3, term4))

model = sm.OLS(df['F_эксп (Н)'], X).fit()

coeffs = model.params

K0, K_bk, K_rez, K3, K5 = coeffs
```

```

F_calc = model.predict(X)
df['F_расч (Н)'] = F_calc.round(0).astype(int)
df['Разница (Н)'] = (df['F_эксп (Н)'] - df['F_расч (Н)']).round(0).astype(int)
df['Относительная ошибка, %'] = ((df['F_эксп (Н)'] - df['F_расч (Н)']) / df['F_эксп (Н)'] * 100).round(2)

# Вывод результатов
print("\n=== Коэффициенты модели ===")
print(f"K0 = {K0:,.0f} Н")
print(f"Kбк = {K_bk:,.0f} Н/м2")
print(f"Kрез = {K_rez:,.0f} Н/м2")
print(f"Kз = {K3:,.0f} Н/м2")
print(f"Kс = {K5:,.0f} Н/м2")
print(f"\nR2 = {model.rsquared:.4f}")
print(f"Стандартное отклонение остатков: {model.mse_resid**0.5:,.0f} Н\n")
print("=== Сравнение экспериментальных и расчётных значений ===")
comparison_table = df[['Шина', 'F_эксп (Н)', 'F_расч (Н)', 'Разница (Н)', 'Относительная ошибка, %']]
print(comparison_table.to_string(index=False))

# Опционально: сохранить в файл
# comparison_table.to_csv('model_comparison.csv', index=False, encoding='utf-8-sig')
# print("\nТаблица сохранена в model_comparison.csv")

```

```

=== Коэффициенты модели ===
K0 = -148,789 Н
Kбк = -2,351,493 Н/м2
Kрез = -106,628,361 Н/м2
Kз = 200,858,677 Н/м2
Kс = 360,874,023 Н/м2

R2 = 0.9409
Стандартное отклонение остатков: 6,219 Н

=== Сравнение экспериментальных и расчётных значений ===

```

Шина	F_эксп (Н)	F_расч (Н)	Разница (Н)	Относительная ошибка, %
265/70 R19.5	85700	91174	-5474	-6.39
385/55 R22.5	88900	94196	-5296	-5.96
315/70 R22.5	95300	88947	6353	6.67
11 R22.5	92100	88602	3498	3.80
385/65 R22.5	93700	93394	306	0.33
315/80 R22.5	114300	119268	-4968	-4.35
11.00 R20	88900	88617	283	0.32
360/70 R24	82600	81565	1035	1.25
14.00-20 Я-307	139700	135437	4263	3.05

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Программа расчёта формы бортового кольца, напряжений усилий и пластической деформации на каждом этапе с шагом 5%

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import quad

diameter_inch = 20.0 # Диаметр кольца в дюймах
diameter_mm = diameter_inch * 25.4 # Перевод в мм
R = diameter_mm / 2 # Радиус кольца в мм
w = 100.0 # Ширина щели (мм)
P = 2 * np.pi * R # Исходный периметр окружности
v = 50.0 # Скорость движения крюка (мм/с)
S = 208.0 # Площадь сечения кольца (мм^2)
k_met = 0.62

progress_values = np.arange(0.0, 1.01, 0.05).tolist() # Шаг 5%
E = (k_met) * 200000 + (1 - k_met) * 5 # Модуль упругости (МПа)
sigma_y = (k_met) * 800 # Предел текучести (МПа)
sigma_u = (k_met) * 1000 # Предел прочности (МПа)
relative_elongation = 0.08 # Относительное удлинение 8%
P_max = P * (1 + relative_elongation) # Максимальный периметр
F_max = sigma_u * S # Максимальная сила разрыва (Н)
C = 0.05 # Коэффициент чувствительности к скорости деформации
strain_rate_ref = 1.0 # Опорная скорость деформации (с^-1)
epsilon_plastic_history = []

def ellipse_perimeter(a, b):
    integrand = lambda t: np.sqrt(a**2 * np.sin(t)**2 + b**2 * np.cos(t)**2)
    perimeter, _ = quad(integrand, 0, 2 * np.pi)
    return perimeter

def find_ellipse_b(target_length, a, tolerance=1e-6, max_iter=100):
    b = a # Начальное приближение
    for _ in range(max_iter):
        current_length = ellipse_perimeter(a, b)

```

```

if abs(current_length - target_length) < tolerance:
    return b

db = (target_length - current_length) / (2 * np.pi * (a + b) / np.sqrt(a**2 + b**2))

b += db

if b < 0:
    b = a

return b

def compute_shape(progress, epsilon_plastic_history):
    # Центр эллипса движется от y = -R до y = R
    y_center = -R + (2 * R) * progress
    tolerance = 1e-6

    if epsilon_plastic_history:
        max_epsilon_plastic = max(epsilon_plastic_history)
        target_perimeter = min(P * (1 + max_epsilon_plastic), P_max)
    else:
        target_perimeter = P

    h = abs(y_center)
    chord_threshold = np.sqrt(R**2 - (w/2)**2) # Когда хорда становится меньше w
    if h > chord_threshold:
        a = R

        if epsilon_plastic_history:
            max_epsilon_plastic = max(epsilon_plastic_history)
            a += max_epsilon_plastic * R

        b = a # Гарантируем, что это окружность
        current_perimeter = ellipse_perimeter(a, b)
        if abs(current_perimeter - target_perimeter) > tolerance:
            a = target_perimeter / (2 * np.pi)
            b = a
    else:
        b = R

    for _ in range(100):
        sin_t = -y_center / b

```

```

if abs(sin_t) > 1: # Если sin(t) выходит за пределы, корректируем
    sin_t = np.sign(sin_t) * 1.0
cos_t = np.sqrt(1 - sin_t**2)
a = w / 2 / cos_t if cos_t != 0 else w / 2
current_perimeter = ellipse_perimeter(a, b)
if abs(current_perimeter - target_perimeter) < tolerance:
    break
db = (target_perimeter - current_perimeter) / (2 * np.pi * (a + b) / np.sqrt(a**2 + b**2))
b += db
if b < 0:
    b = R
t = np.linspace(0, 2 * np.pi, 100)
x = a * np.cos(t)
y = b * np.sin(t) + y_center
k_ellipse = b / a**2 if a != 0 else 0 # Кривизна в точке x = ±a, y = 0
k_circle = 1 / R # Кривизна исходной окружности
epsilon = abs(k_ellipse - k_circle) * np.sqrt(S / np.pi) # Деформация
strain_rate = (epsilon * v) / (2 * R) if epsilon > 0 else 0.0
sigma_static = E * epsilon # Напряжение
if sigma_static > sigma_y:
    sigma_static = sigma_y
    epsilon_plastic = (E * epsilon - sigma_y) / E # Пластическая деформация
else:
    epsilon_plastic = 0.0
strain_rate_factor = 1 + C * (strain_rate / strain_rate_ref)
sigma = sigma_static * strain_rate_factor
if sigma > sigma_u:
    sigma = sigma_u
elif sigma > sigma_y:
    sigma = min(sigma, sigma_y * strain_rate_factor) # Учитываем усиление от скорости
if sigma_static > sigma_y: # Если статическое напряжение превышает предел текучести
    epsilon_elastic = sigma_y / E # Упругая деформация

```

```

b *= (epsilon_elastic / epsilon)
sin_t = -y_center / b
if abs(sin_t) > 1:
    sin_t = np.sign(sin_t) * 1.0
cos_t = np.sqrt(1 - sin_t**2)
a = w / 2 / cos_t if cos_t != 0 else w / 2
b = find_ellipse_b(target_perimeter, a)
x = a * np.cos(t)
y = b * np.sin(t) + y_center
epsilon_plastic_history.append(epsilon_plastic)
if progress > 0.5 and epsilon_plastic_history and h <= chord_threshold:
    max_epsilon_plastic = max(epsilon_plastic_history)
    target_perimeter = min(P * (1 + max_epsilon_plastic), P_max)
    b += max_epsilon_plastic * R
    sin_t = -y_center / b
    if abs(sin_t) > 1:
        sin_t = np.sign(sin_t) * 1.0
    cos_t = np.sqrt(1 - sin_t**2)
    a = w / 2 / cos_t if cos_t != 0 else w / 2
    b = find_ellipse_b(target_perimeter, a)
    x = a * np.cos(t)
    y = b * np.sin(t) + y_center
x_modified = []
y_modified = []
x_hook = 0
y_hook = b + y_center # Верхняя точка эллипса
x_left = -w / 2
x_right = w / 2
y_contact = 0
for i in range(len(t)):
    if y[i] < 0: # Нижняя часть – оставляем эллипс
        x_modified.append(x[i])

```

```

    y_modified.append(y[i])
else: # Верхняя часть – заменяем на прямые линии
    continue
num_points = 50
x_line1 = np.linspace(x_left, x_hook, num_points)
y_line1 = np.linspace(y_contact, y_hook, num_points)
x_line2 = np.linspace(x_hook, x_right, num_points)
y_line2 = np.linspace(y_hook, y_contact, num_points)
x_upper = np.concatenate([x_line1, x_line2[1:]] # Избегаем дублирования точки (x_hook, y_hook)
y_upper = np.concatenate([y_line1, y_line2[1:]]
x_modified = np.concatenate([x_modified, x_upper])
y_modified = np.concatenate([y_modified, y_upper])
angles = np.arctan2(y_modified - y_center, x_modified)
sorted_indices = np.argsort(angles)
x_modified = x_modified[sorted_indices]
y_modified = y_modified[sorted_indices]
x_modified = np.append(x_modified, x_modified[0])
y_modified = np.append(y_modified, y_modified[0])
F = sigma * S # Усилие в H
current_perimeter = ellipse_perimeter(a, b)
touch_points = []
for i in range(len(x_modified)):
    if abs(y_modified[i]) < 1e-6: # Если y близко к 0
        touch_points.append((x_modified[i], y_modified[i]))
return x_modified, y_modified, a, b, touch_points, sigma, current_perimeter, F, strain_rate
total_distance = 2 * R # От y = -R до y = R
times = [(progress * total_distance) / v for progress in progress_values]
fig, axes = plt.subplots(5, 5, figsize=(20, 20))
axes = axes.flatten()
fig.suptitle('Протягивание кольца через щель с учетом упруго-пластичных свойств (шаг 5%)',
fontsize=16)
perimeter_values = []
force_values = []

```

```

strain_rate_values = []
for i, (progress, t) in enumerate(zip(progress_values, times)):
    ax = axes[i]
    ax.clear()
    ax.set_xlim(-1.5*R, 1.5*R)
    ax.set_ylim(-1.5*R, 1.5*R)
    ax.set_xlabel('x')
    ax.set_ylabel('y')
    ax.set_title(f'Прохождение: {int(progress*100)}% (t = {t:.2f} c)')
    ax.grid(True)
    ax.set_aspect('equal')
    ax.axvline(x=-w/2, color='k', linestyle='--')
    ax.axvline(x=w/2, color='k', linestyle='--')
    ax.axhline(y=0, color='k', alpha=0.3) # Уровень щели
    x, y, a, b, touch_points, sigma, current_perimeter, F, strain_rate = compute_shape(progress,
epsilon_plastic_history)
    ax.plot(x, y, 'r-')
    if progress == 0:
        ax.plot([], [], 'r-', label='Деформированная форма')
        ax.axvline(x=-w/2, color='k', linestyle='--', label='Щель')
        ax.legend()
    perimeter_values.append(current_perimeter)
    force_values.append(F)
    strain_rate_values.append(strain_rate)
for i in range(len(progress_values), len(axes)):
    axes[i].axis('off')
plt.tight_layout(rect=[0, 0, 1, 0.95])
plt.show()
print("Исходные данные для моделирования:")
print(f"Диаметр кольца: {diameter_mm:.2f} мм")
print(f"Радиус кольца: {R:.2f} мм")
print(f"Ширина щели: {w:.2f} мм")
print(f"Скорость протягивания: {v:.2f} мм/с")

```

```

print(f"Площадь сечения кольца: {S:.2f} мм2")
print(f"Модуль упругости: {E:.2f} МПа")
print(f"Предел текучести: {sigma_y:.2f} МПа")
print(f"Предел прочности: {sigma_u:.2f} МПа")
print(f"Относительное удлинение: {relative_elongation*100:.1f}%")
print(f"Коэффициент чувствительности к скорости деформации: {C:.2f}")
print(f"Максимальная сила разрыва кольца: F_max = {F_max/1000:.2f} кН")
print("\nПроверка параметров на всех стадиях:")
print(f"{'Стадия (%)':<12} {'Время (с)':<12} {'Периметр (мм)':<15} {'Скорость деформации (с-1):<25}
{'Усилие (кН)':<12} {'Статус':<30}")
print("-" * 90)
for i, (progress, t, perimeter, F, strain_rate) in enumerate(zip(progress_values, times, perimeter_values,
force_values, strain_rate_values)):
    status = "!!! Кольцо разорвется !!!" if F > F_max else ""
    print(f"{int(progress*100):<12} {t:<12.2f} {perimeter:<15.2f} {strain_rate:<25.6f} {F/1000:<12.2f}
{status:<30}")
print(f"\nМаксимальная пластическая деформация: {max(epsilon_plastic_history):.6f}")
a = input()

```

Программа вывода анимации изменения формы бортового кольца при его извлечении

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import quad
from matplotlib.animation import FuncAnimation

diameter_inch = 19.0 # Диаметр кольца в дюймах
diameter_mm = diameter_inch * 25.4 # Перевод в мм
R = diameter_mm / 2 # Радиус кольца в мм
w = 200.0 # Ширина щели (мм)
P = 2 * np.pi * R # Исходный периметр окружности
v = 50.0 # Скорость движения крюка (мм/с)
S = 208.0 # Площадь сечения кольца (мм^2)
progress_values_0_to_5 = np.arange(0.0, 0.06, 0.01).tolist() # 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%
progress_values_5_to_100 = np.arange(0.10, 1.01, 0.05).tolist() # 10%, 15%, ..., 100%
progress_values = progress_values_0_to_5 + progress_values_5_to_100 # Объединяем
E = 200000.0 # Модуль упругости (МПа)
sigma_y = 800.0 # Предел текучести (МПа)
sigma_u = 1000.0 # Предел прочности (МПа)
relative_elongation = 0.08 # Относительное удлинение 8%
P_max = P * (1 + relative_elongation) # Максимальный периметр
F_max = sigma_u * S # Максимальная сила разрыва (Н)
C = 0.05 # Коэффициент чувствительности к скорости деформации
strain_rate_ref = 1.0 # Опорная скорость деформации (с^-1)
epsilon_plastic_history = []
def ellipse_perimeter(a, b):
    integrand = lambda t: np.sqrt(a**2 * np.sin(t)**2 + b**2 * np.cos(t)**2)
    perimeter, _ = quad(integrand, 0, 2 * np.pi)
    return perimeter
def find_ellipse_b(target_length, a, tolerance=1e-6, max_iter=100):
    b = a # Начальное приближение

```

```

for _ in range(max_iter):
    current_length = ellipse_perimeter(a, b)
    if abs(current_length - target_length) < tolerance:
        return b
    db = (target_length - current_length) / (2 * np.pi * (a + b) / np.sqrt(a**2 + b**2))
    b += db
    if b < 0:
        b = a
return b

def compute_shape(progress, epsilon_plastic_history):
    y_center = -R + (2 * R) * progress
    tolerance = 1e-6
    if epsilon_plastic_history:
        max_epsilon_plastic = max(epsilon_plastic_history)
        target_perimeter = min(P * (1 + max_epsilon_plastic), P_max)
    else:
        target_perimeter = P
    h = abs(y_center)
    chord_threshold = np.sqrt(R**2 - (w/2)**2)
    if h > chord_threshold:
        a = R
        if epsilon_plastic_history:
            max_epsilon_plastic = max(epsilon_plastic_history)
            a += max_epsilon_plastic * R
        b = a
        current_perimeter = ellipse_perimeter(a, b)
        if abs(current_perimeter - target_perimeter) > tolerance:
            a = target_perimeter / (2 * np.pi)
            b = a
    else:
        b = R
    for _ in range(100):

```

```

sin_t = -y_center / b
if abs(sin_t) > 1:
    sin_t = np.sign(sin_t) * 1.0
cos_t = np.sqrt(1 - sin_t**2)
a = w / 2 / cos_t if cos_t != 0 else w / 2
current_perimeter = ellipse_perimeter(a, b)
if abs(current_perimeter - target_perimeter) < tolerance:
    break

db = (target_perimeter - current_perimeter) / (2 * np.pi * (a + b) / np.sqrt(a**2 + b**2))
b += db
if b < 0:
    b = R

t = np.linspace(0, 2 * np.pi, 100)
x = a * np.cos(t)
y = b * np.sin(t) + y_center
k_ellipse = b / a**2 if a != 0 else 0
k_circle = 1 / R
epsilon = abs(k_ellipse - k_circle) * np.sqrt(S / np.pi)
strain_rate = (epsilon * v) / (2 * R) if epsilon > 0 else 0.0
sigma_static = E * epsilon
if sigma_static > sigma_y:
    sigma_static = sigma_y
    epsilon_plastic = (E * epsilon - sigma_y) / E
else:
    epsilon_plastic = 0.0
strain_rate_factor = 1 + C * (strain_rate / strain_rate_ref)
sigma = sigma_static * strain_rate_factor
if sigma > sigma_u:
    sigma = sigma_u
elif sigma > sigma_y:
    sigma = min(sigma, sigma_y * strain_rate_factor)
if sigma_static > sigma_y:

```

```

epsilon_elastic = sigma_y / E
b *= (epsilon_elastic / epsilon)
sin_t = -y_center / b
if abs(sin_t) > 1:
    sin_t = np.sign(sin_t) * 1.0
cos_t = np.sqrt(1 - sin_t**2)
a = w / 2 / cos_t if cos_t != 0 else w / 2
b = find_ellipse_b(target_perimeter, a)
x = a * np.cos(t)
y = b * np.sin(t) + y_center
epsilon_plastic_history.append(epsilon_plastic)
if progress > 0.5 and epsilon_plastic_history and h <= chord_threshold:
    max_epsilon_plastic = max(epsilon_plastic_history)
    target_perimeter = min(P * (1 + max_epsilon_plastic), P_max)
    b += max_epsilon_plastic * R
    sin_t = -y_center / b
    if abs(sin_t) > 1:
        sin_t = np.sign(sin_t) * 1.0
    cos_t = np.sqrt(1 - sin_t**2)
    a = w / 2 / cos_t if cos_t != 0 else w / 2
    b = find_ellipse_b(target_perimeter, a)
    x = a * np.cos(t)
    y = b * np.sin(t) + y_center
F = sigma * S
current_perimeter = ellipse_perimeter(a, b)
touch_points = []
for i in range(len(t)):
    if abs(y[i]) < 1e-6:
        touch_points.append((x[i], y[i]))
return x, y, a, b, touch_points, sigma, current_perimeter, F, strain_rate
total_distance = 2 * R
times = [(progress * total_distance) / v for progress in progress_values]

```

```

perimeter_values = []
force_values = []
strain_rate_values = []
fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 8))
ax.set_xlim(-1.5*R, 1.5*R)
ax.set_ylim(-1.5*R, 1.5*R)
ax.set_xlabel('x')
ax.set_ylabel('y')
ax.set_title('Прохождение: 0% (t = 0.00 c)')
ax.grid(True)
ax.set_aspect('equal')
line_slot1, = ax.plot([], [], 'k--', label='Щель')
line_slot2, = ax.plot([], [], 'k--')
line_horizon, = ax.plot([], [], 'k', alpha=0.3)
line_ring, = ax.plot([], [], 'r-', label='Деформированная форма')
ax.legend()
def init():
    line_slot1.set_data([-w/2, -w/2], [-1.5*R, 1.5*R])
    line_slot2.set_data([w/2, w/2], [-1.5*R, 1.5*R])
    line_horizon.set_data([-1.5*R, 1.5*R], [0, 0])
    line_ring.set_data([], [])
    return line_slot1, line_slot2, line_horizon, line_ring
def update(frame):
    progress = progress_values[frame]
    t = times[frame]
    ax.set_title(f'Прохождение: {int(progress*100)}% (t = {t:.2f} c)')
    x, y, a, b, touch_points, sigma, current_perimeter, F, strain_rate = compute_shape(progress,
epsilon_plastic_history)
    line_ring.set_data(x, y)
    if frame > 0 and ax.get_legend():
        ax.get_legend().remove()
    perimeter_values.append(current_perimeter)
    force_values.append(F)

```

```

strain_rate_values.append(strain_rate)

return line_slot1, line_slot2, line_horizon, line_ring

ani = FuncAnimation(fig, update, frames=len(progress_values), init_func=init, blit=True, interval=200)

plt.show()

ani.save('animation.gif', writer='pillow', fps=5)

print("Исходные данные для моделирования:")
print(f"Диаметр кольца: {diameter_mm:.2f} мм")
print(f"Радиус кольца: {R:.2f} мм")
print(f"Ширина щели: {w:.2f} мм")
print(f"Скорость протягивания: {v:.2f} мм/с")
print(f"Площадь сечения кольца: {S:.2f} мм2")
print(f"Модуль упругости: {E:.2f} МПа")
print(f"Предел текучести: {sigma_y:.2f} МПа")
print(f"Предел прочности: {sigma_u:.2f} МПа")
print(f"Относительное удлинение: {relative_elongation*100:.1f}%")
print(f"Коэффициент чувствительности к скорости деформации: {C:.2f}")
print(f"Максимальная сила разрыва кольца: F_max = {F_max/1000:.2f} кН")

print("\nПроверка параметров на всех стадиях:")

print(f"{'Стадия (%)':<12} {'Время (с)':<12} {'Периметр (мм)':<15} {'Скорость деформации (с-1):<25} {'Усилие (кН)':<12} {'Статус':<30}")

print("-" * 90)

for i, (progress, t, perimeter, F, strain_rate) in enumerate(zip(progress_values, times, perimeter_values, force_values, strain_rate_values)):

    status = "!!! Кольцо разорвется !!!" if F > F_max else ""

    print(f"{int(progress*100):<12} {t:<12.2f} {perimeter:<15.2f} {strain_rate:<25.6f} {F/1000:<12.2f} {status:<30}")

print(f"\nМаксимальная пластическая деформация: {max(epsilon_plastic_history):.6f}")

print("\nАнимация отображена в окне. Также сохранена в файл 'animation.gif'.")

```

Акт внедрения на предприятии ООО «Экоутилизация-31»



Исх. № 1/16 от «16» января 2026г.

А К Т внедрения результатов диссертационной работы

Чуева Кирилла Витальевича

по теме: «Повышение эффективности процесса извлечения бортовых колец автомобильных шин на основе модернизации оборудования для утилизации» в проектно-конструкторской и производственной деятельности ООО «ЭКОУТИЛИЗАЦИЯ-31»

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Чуева Кирилла Витальевича используются в практической деятельности ООО «ЭКОУТИЛИЗАЦИЯ-31» в процессах сбора и обработки шин и РТИ.

В рамках диссертационной работы Чуевым К. В. проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса извлечения бортовых колец из изношенных автомобильных шин, включая грузовые и крупногабаритные шины. При непосредственном участии автора на предприятии ООО «ЭКОУТИЛИЗАЦИЯ-31» были выполнены натурные экспериментальные исследования на оборудовании предприятия, разработаны математические, аналитические и гибридные модели процесса извлечения бортовых колец из изношенных шин. Разработаны и внедрены рекомендации по оптимальным технико-конструкционным параметрам и режимам работы оборудования для дальнейшей переработки и утилизации покрышек.

Выводы и основные положения диссертации Чуева К. В. используются в практической работе ООО «ЭКОУТИЛИЗАЦИЯ-31», способствуют повышению эффективности процесса переработки изношенных шин и снижению удельных энергозатрат при работе оборудования и рекомендуются к использованию на аналогичных предприятиях по утилизации изношенных шин и резинотехнических изделий.

Директор ООО «ЭКОУТИЛИЗАЦИЯ-31»




 / Рагушенко А. И. /

Акт об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе

«УТВЕРЖДАЮ»
Первый проректор
БГТУ им. В. Г. Шухова
_____ Е. И. Евтушенко
«28» *мал* 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Чуева Кирилла
Витальевича в учебном процессе БГТУ им. В.Г. Шухова

Комиссия в составе:

Дуюн Татьяна Александровна – заведующий кафедрой технологии машиностроения, д.т.н., профессор – председатель комиссии,


Хуртасенко Андрей Владимирович – доцент кафедры технологии машиностроения, к.т.н., доцент – член комиссии,

Дуганов Владимир Яковлевич - доцент кафедры технологии машиностроения, к.т.н., доцент – член комиссии.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Чуева К. В. «Повышение эффективности процесса извлечения бортовых колец автомобильных шин на основе модернизации оборудования для утилизации» используются в учебном процессе в БГТУ им. В.Г. Шухова при подготовке студентов по направлениям подготовки бакалавриата и магистратуры: 15.03.05 и 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» - профиль программы «Технология машиностроения», а также направлению специалитета 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» - профиль программы «Проектирование технологических комплексов механосборочных производств»

Председатель комиссии:

Т.А. Дуюн



Члены комиссии:

А.В. Хуртасенко



В.Я. Дуганов



Результаты интеллектуальной деятельности
Патент на полезную модель № 201698



Патент на полезную модель №236885

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 236885

**Установка для удаления бортового металлического
кольца из боковой части шины**

Патентообладатель: *Чуев Кирилл Витальевич (RU)*

Авторы: *Чуев Кирилл Витальевич (RU), Дуганов Владимир
Яковлевич (RU), Дуюн Татьяна Александровна (RU),
Кравченко Владимир Михайлович (RU), Савенкова Арина
Юрьевна (RU)*

Заявка № 2025105170

Приоритет полезной модели **29 мая 2025 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **28 августа 2025 г.**

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **29 мая 2035 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат Сервис: 73005300547201570Doc01206
Владелец: **Чуев Юрий Сергеевич**
Действителен с: 2025.08.28 по: 2035.05.29

Ю.С. Зубов

