

*на правах рукописи*

**СЕМЕНОВ Дмитрий Юрьевич**

РГБ 

28 НОЯ 2000

**ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО  
СОСТОЯНИЯ РЕЗИНОТКАНЕВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ**

Специальность 05.05.05. – Подъемно-транспортные машины

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург 2000 г.

*на правах рукописи*

**СЕМЕНОВ Дмитрий Юрьевич**



**ВИБРАЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО  
СОСТОЯНИЯ РЕЗИНОТКАНЕВЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ**

Специальность 05.05.05. – Подъемно-транспортные машины

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург 2000 г.

Работа выполнена в Уральском государственном техническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Кожушко Г.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Зимин А.И.;  
кандидат технических наук,  
ст. научный сотрудник Миронов В.И.

Ведущее предприятие: ОАО "Ураласбест" (г. Асбест).

Защита диссертации состоится "30" июня 2000 года в 14<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета К 063.14.15 при Уральском государственном техническом университете, ауд. М-323.

Ваш отзыв, в 2 экз., заверенный печатью, прошим направлять по адресу:  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УГТУ.

Автореферат разослан "25" мая 2000 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор техн. наук, профессор



Ю.Н. Жуков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одним из путей интенсификации разработки месторождений и повышения производительности труда на горнодобывающих предприятиях и обогатительных фабриках является внедрение поточной и циклично-поточной технологий добычи полезных ископаемых. Эти технологии предусматривают широкое применение машин непрерывного транспорта и в частности – ленточных конвейеров.

Одним из основных показателей эффективности использования конвейерного транспорта является надежность функционирования лент, доля которых в капитальных затратах составляет 17 - 51 %, в эксплуатационных – 11 - 30 %, при среднем сроке службы в горнорудной промышленности 21 месяц, а в экстремальных условиях эксплуатации порядка 3 - 5 месяцев.

Срок службы конвейерной ленты определяется качеством ее изготовления, обслуживания и условиями эксплуатации. Стохастический характер этих факторов, сложность оценки их влияния, делают решение задачи оценки технического состояния (ТС) резиноканевой конвейерной ленты актуальной и в настоящее время.

Основой для оценки ТС ленты и принятия решения о ее выбраковке зачастую является экспертная оценка. Такой подход обладает рядом недостатков, таких как субъективность оценки ТС и относительно большое время реакции на нарушения в работе конвейера.

Система мониторинга ТС резиноканевой конвейерной ленты позволит выявить вышеуказанные недостатки, даст возможность увеличить срок службы ленты и надежность конвейера в целом, а также упростит сбор статистической информации, что положительно скажется на точности методов расчета вновь проектируемых конвейеров.

Методика мониторинга ТС конвейерной ленты является инструментом для прогнозирования изменения ТС и оценки остаточного ресурса. Поэтому задача создания методики мониторинга ТС резиноканевой конвейерной ленты является актуальной научной проблемой, имеющей большое практическое значение.

**Цель работы** – создание методики оценки параметров повреждений (тип, размер, положение по длине) резиноканевой конвейерной ленты. При этом возникает ряд частных задач.

1. Определение основных типов повреждений лент мощных конвейеров большой длины;
2. Создание конечно-элементных моделей участка резинотканевой ленты и моделирование повреждений;
3. Определение параметров режима работы ленточного конвейера, оказывающего наибольшее влияние на частоты собственных колебаний (ЧСК), и минимизация их влияния;
4. Анализ взаимосвязи изменения вибрационных характеристик с изменением ТС. Определение диагностических признаков повреждений и проверка их точности;
5. Проведение экспериментальной проверки полученных результатов.

Основная идея работы заключается в исследовании процесса изменения вибрационных характеристик резинотканевой конвейерной ленты при появлении и развитии макроповреждений: абразивный износ обкладок, продольные и поперечные порывы сердечника движущейся ленты.

**Методы исследований.** Для изучения закономерностей процесса изменения вибрационных характеристик резинотканевой ленты применен комплексный подход, включающий теоретическое обобщение физических закономерностей изменения вибрационных характеристик, разработку конечно-элементных моделей с учетом параметров режима работы и конструктивных особенностей ленточных конвейеров, экспериментальное определение вибрационных характеристик.

При этом использовалось современное программное обеспечение в области конечно-элементного моделирования и математического анализа.

**Научные положения,** защищаемые в диссертационной работе:

- показатель изменения ЧСК адекватно отражает ТС резинотканевой конвейерной ленты;
- характеристики функций показателя изменения ЧСК от времени являются диагностическими признаками, позволяющими идентифицировать и оценить параметры абразивного износа обкладок, продольного и поперечного порыва сердечника резинотканевой конвейерной ленты;
- с целью минимизации погрешности определения ЧСК, связанной с неравномерной загрузкой ленты конвейера, рационально выбирать участок нижней ветви ленты с максимальным натяжением.

**Научная новизна.** Приоритет разработок диссертанта заключается в применении показателя изменения ЧСК, достаточно полно отражающего характеристики повреждений: абразивного износа обкладок, продольного и поперечного порыва сердечника конвейерной ленты; показатель изменения ЧСК позволяет оценивать размер повреждения и его положение в пролете без проведения идентификации ЧСК по их формам; определении диагностических признаков появления и развития повреждений резиноканевой ленты в виде функций показателя изменения ЧСК от времени; минимизации влияния неравномерной загрузки ленты конвейера на погрешность определения ее вибрационных характеристик путем рационального выбора участка трассы для проведения измерений.

**Научная ценность работы** состоит в разработке методики оценки ТС резинотканевой конвейерной ленты, что является дальнейшим развитием теории испортирования грузов ленточными конвейерами, а также расширяет область применения методов вибродиагностики поступательно движущихся объектов. Данная методика применима для прогнозирования остаточного ресурса резиноканевой конвейерной ленты.

**Практическая ценность работы.** Результаты, полученные в ходе разработки методики оценки ТС резинотканевых лент, конкретны и направлены на решение реальных проблем производства. Определено, в какой точке трассы следует проводить измерения (с точки зрения минимизации погрешности измерений, занной с изменением режима работы); получены диагностические признаки основных видов повреждений; разработаны конечно-элементные модели, позволяющие определить пороговые значения диагностических признаков. Выполнен объем работ, необходимый для перехода к созданию действующей системы виброной диагностики ТС конвейерной ленты.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.** Адекватность используемых конечно-элементных моделей подтверждена введенными экспериментальными исследованиями. При решении поставленных задач использованы современные методы вибрационной диагностики и программные средства моделирования.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации обсуждались и были одобрены на межгосударственном научно-техническом семинаре "Виб-

роакустические процессы в технологиях, оборудовании и сооружениях отрасли: лесопромышленного комплекса", а также на семинарах кафедры "Подъемно-транспортные машины и роботы" Уральского государственного технического университета, кафедры "Горные машины и комплексы" Уральской государственной горно-геологической академии.

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Она содержит 213 страниц машинописного текста, 45 таблиц, 79 рисунков; библиография 157 наименований на 15 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы сформулированы цель работы и основные вопросы, определяющие научную новизну и практическую ценность выполненных исследований. Кратко описано содержание основных частей работы.

**В первой главе** выполнен обзор научных исследований по вопросам анализа существующих методов оценки ТС конвейерной ленты, классификации повреждений конвейерной ленты и анализа математических моделей колебаний одномерных систем.

Наряду с методом экспертной оценки ТС конвейерной ленты существуют альтернативные методы. Так, В.Ф. Монастырским и В.И. Плахотником предложено оценивать ТС ленты по геометрии развала ленты между рядовыми роликами опорами верхней ветви. В работах А. Гаррисона дефектоскопия конвейерных лент основана на использовании свойства магнитной проницаемости диэлектрического материала.

Альтернативные методы получили ограниченное практическое применение следовательно, на сегодняшний день не существует отработанной технологии, позволяющей осуществлять мониторинг изменения ТС ленты в процессе эксплуатации конвейера.

Анализ работ Г.Г. Кожушко и публикаций зарубежных авторов (И. Ше С. Моте, А. Пандей, Р. Адамс, П. Колей, П. Ларсон и др.) показывает, что по ви

онным характеристикам возможно определение упругих характеристик материала, а также параметров повреждений конвейерной ленты. В частности, Кожушко выполнил экспериментальное определение коэффициента структурного демпфирования конвейерной ленты в форме решения обратной задачи ролдигностики на основе модально-частотного анализа, что позволило зафиксировать изменение демпфирующих свойств резинотканевой конвейерной ленты ее расслоении. Тем не менее, методы вибрационной диагностики не нашли в гоящее время применения для оценки ТС резинотканевой конвейерной ленты.

Подходы к решению задач определения ТС конвейерной ленты по вибрационным характеристикам изложены в работах В.В. Болотина, И.М. Бабакова, . Макарова, С.А. Панкратова, К. Висвесвара, Р. Ясенгар, Н. Перкинса, Садегерна, Б. Счафера, Г. Рега, Ф. Вестрони, Ф. Бернеттини и А. Луонго, лагема, Р. Беномара, М. Беноуна, Р. Уайта, С. Соши, С. Сурианарайана, анга, посвященных проблемам определения виброхарактеристик одно- и двухных объектов типа кабель, балка или пластина.

Описание взаимосвязи изменения характеристик колебаний при изменении участка конвейерной ленты возможно по результатам эксперимента, однако, ользование математической модели участка ленты позволяет значительно соить требуемые при этом затраты.

Математическая модель должна учитывать существенно неравномерный актер распределения жесткости по площади поврежденного участка конвейерленты, а также основные нелинейные факторы:

- нелинейность модуля упругости (зависимость деформации от напряжения, имеющая гистерезисный характер);
- влияние большой амплитуды колебаний на частоты собственных колебаний;
- наличие демпфирования.

Анализ литературы показал, что модели, подобные вышеописанной, отсутствуют даже для однородных (регулярных) систем, не говоря о моделировании неоднородностей (повреждений). К тому же, учет перечисленных особенностей вейерной ленты приводит к нелинейному дифференциальному уравнению зертвого порядка с непостоянными коэффициентами, решение которого возно только численными методами. Поэтому исследование виброхарактеристик

конвейерной ленты целесообразно проводить с использованием метода конечных элементов, который позволяет получить ЧСК поврежденной ленты. Кроме того при необходимости есть возможность учета влияния таких нелинейных факторов как влияние больших амплитуд колебаний и наличие демпфирующих свойств.

Вопросы, связанные с повышением надежности конвейеров или отдельных их узлов, рассматривались в работах А.О. Спиваковского, А.В. Андреев Н.Я. Биличенко, С.А. Панкратова, Л.Г. Шахмейстера, В.Г. Дмитриева, Г.Г. Кожушко, В.А. Дьякова, В.Ф. Монастырского, Н.В. Ампиловой, Б.А. Кузнецов Е.Е. Новикова, Ю.Д. Тарасова, Л.И. Чугреева, В.Я. Барабанова, В.С. Волоковского, Е.М. Высочина, В.К. Смирнова, В.П. Голованя, Г.Н. Гуленко, В.А. Голутвина, Г.Д. Кармаева, А.В. Коваля, Л.В. Колосова, Е.Г. Нохрина, В.Т. Полнина, В.И. Фролова, В.Д. Черненко, И.А. Шпакунова, Л.И. Эппеля, П.В. Яковлев и других отечественных и зарубежных ученых.

Обзор работ указанных авторов позволил выяснить, что основными видами повреждений ленты мощных конвейеров большой длины, транспортирующих крупнокусковые породы являются: абразивный износ обкладок – 49 % (от общего числа повреждений); сквозные пробои, продольный и поперечный порыв сердечника резиноканевой ленты – 39 %.

Наиболее распространенным видом повреждений является повреждение обкладок с последующей деградацией сердечника резиноканевой конвейерной ленты. Поскольку мгновенно развивающиеся повреждения являются относительно редким явлением, то оценка остаточного ресурса может быть получена как результат прогноза изменения ТС. Для этого следует знать оценки ТС для некоторого интервала времени, то есть осуществлять мониторинг ТС.

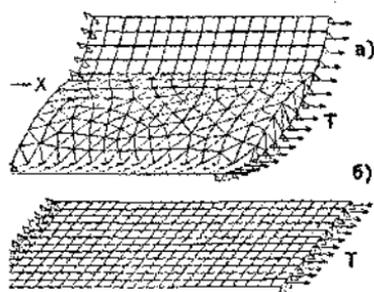
Для осуществления мониторинга ТС резиноканевой ленты конвейера необходимо решение двух задач:

- создание методики оценки параметров повреждений (тип, размер, положение по длине ленты);
- определение критического размера повреждения каждого типа для конкретного конвейера.

Данная работа посвящена решению первой задачи.

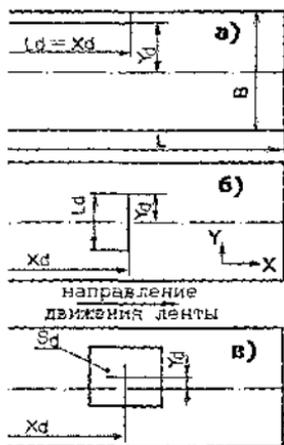
**Во второй главе** дано обоснование выбора параметров конечных

ментных моделей для минимизации затрат на их создание и расчет ЧСК резиноканевой конвейерной ленты. Использовались конечно-элементные модели участков верхней и нижней ветви ленты конвейера (рис.1), а также модели участка нижней ветви ленты с повреждениями (рис.2).



1. Общий вид конечно-элементных моделей: а – пролет верхней ветви; б – пролет нижней ветви

При моделировании резиноканевой конвейерной ленты, приняты следующие основные допущения: лента имеет ортотропные свойства, подчиняется закону Гука, эффект демпфирования не учитывается. Учет изгибной жесткости многослойного пакета резиноканевой ленты выполнен корректировкой толщины ленты по условиям эквивалентности изгибной жесткости модели и натуре. Неравномерность распределения жесткостных свойств по площади поврежденного участка



2. Расчетные схемы повреждений: а – продольный порыв ленты; б – поперечный порыв; в – абразивный износ ленты

Конечно-элементные модели характеризуются следующими основными параметрами: упругие свойства применяемого материала, тип конечного элемента, геометрия модели, граничные и начальные условия, а также параметры нагружения.

При моделировании резиноканевой конвейерной ленты, приняты следующие основные допущения: лента имеет ортотропные свойства, подчиняется закону Гука, эффект демпфирования не учитывается. Учет изгибной жесткости многослойного пакета резиноканевой ленты выполнен корректировкой толщины ленты по условиям эквивалентности изгибной жесткости модели и натуре. Неравномерность распределения жесткостных свойств по площади поврежденного участка ленты учитывался за счет изменения геометрии конечно-элементных моделей.

Транспортируемый груз в предположении сыпучести рассматривался как связанный с лентой без скольжения изотропный материал пренебрежимо малой изгибной жесткости, что позволяет учесть характер распределения груза по ширине ленты.

Геометрия ленты моделировалась с помощью конечного элемента оболочки, который позволяет воспроизводить как форму поперечного сечения верхней ветви ленты, так и нижней ветви. В отличие от элементов других типов, данный элемент может учитывать эффект увеличения же-

сткости при задании начального поля деформаций и использоваться при решении задач с большими деформациями и большими напряжениями. Тетраэдрически объемный элемент хорошо подходит для создания нерегулярных сеток (см. рис. 1а), что позволяет удовлетворительно описывать сложную форму поперечного сечения транспортируемого груза.

Края моделей, параллельные оси  $X$  – свободны (рис.1), края, параллельные оси  $Y$  – свободно оперты. Для компенсации дополнительной жесткости модели верхней ветви, связанной с наличием небольшой жесткости транспортируемого груза, граничные условия модели верхней ветви разрешают вращение крайних узлов модели относительно оси  $Y$ . Начальные скорости, ускорения и перемещения каких-либо частей моделей отсутствуют.

Распределение натяжения по ширине ленты равномерное. Учитывалось влияние силы тяжести, что позволило воспроизвести эффект провисания ленты.

Рассматривались только макроповреждения (рис.2): поперечный и продольный порыв сердечника, абразивный износ обкладок резиноканевой ленты.

Уравнение свободных колебаний участка резиноканевой конвейерной ленты в терминях метода конечных элементов записывается в виде:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}, \quad (1)$$

где:  $[M]$  – матрица масс;  $[K]$  – матрица жесткости (может учитывать эффект начального нагружения);  $\{u\}$  – вектор деформаций.

В соответствии с (1) задача определения частот и форм собственных колебаний конвейерной ленты формулируется следующим образом:

$$[K]\{\phi_i\} = (2\pi f_i)^2 [M]\{\phi_i\}, \quad (2)$$

где:  $i$  – номер формы;  $\{\phi_i\}$  – вектор форм собственных колебаний;  $f_i$  – частота собственных колебаний. Уравнение (2) решается относительно частот и форм собственных колебаний методом итераций в подпространстве.

Третья глава посвящена параметрическому анализу, т.е. оценке влияния изменений эксплуатационных факторов на вибрационные характеристики конвейерной ленты. Параметрический анализ проводился для решения двух задач:

определение параметров эксплуатационных режимов, оказывающих наибольшее влияние на ЧСК;

определение участка трассы конвейера, рационального с точки зрения минимизации погрешности определения ЧСК, связанной с неравномерным характером загрузки ленты.

Используемые конечно-элементные модели позволяют учесть следующие факторы:

конструктивные (форма поперечного сечения верхней ветви ленты, ее ширина; шаг расстановки роликоопор; изгибная жесткость ленты; изменение натяжения ленты по длине конвейера; угол наклона трассы);

эксплуатационные (неравномерность загрузки ленты транспортируемым материалом по ее длине и ширине; натяжение ленты).

Зависимость ЧСК продольных форм участка нижней ветви ленты линейной трассы конвейера от скорости движения описывается уравнением:

$$f_{m0}(v) = f_{m0} \left( 1 - \frac{v^2}{C} \right), \quad (3)$$

где  $m$  – номер продольной формы колебаний;  $f_{m0}$  – ЧСК участка ленты без учета скорости движения;  $v$  – скорость движения ленты; входящий в уравнение (3) коэффициент  $C$  зависит от шести параметров:

$$C = \left( \frac{a}{m\pi} \right) \left[ (2\pi f_{m0})^2 - \frac{T}{\rho h} \left( \frac{m\pi}{a} \right) \right],$$

где:  $a$  – длина пролета;  $\rho$  – объемная плотность ленты;  $h$  – толщина ленты;  $T$  – натяжение ленты.

На рис.3г показано ЧСК первых трех продольных форм собственных колебаний участка нижней ветви конвейерной ленты. Выбраны именно первые формы колебаний, поскольку им соответствуют максимальные деформации при прочих равных условиях.

Обеспечение возможности сравнения зависимостей ЧСК от разных параметров требует их приведения безразмерному виду, выполненного с помощью функции

$$f_{mn}^*(\chi) = \frac{f_{mn}(\xi)}{f_{mn}(\xi^*)}, \quad (4)$$

где  $\chi = \xi/\xi^*$  – безразмерный параметр эксплуатационного режима;  $\xi$  – значение рассматриваемого параметра;  $\xi^*$  – базовое значение рассматриваемого параметра.

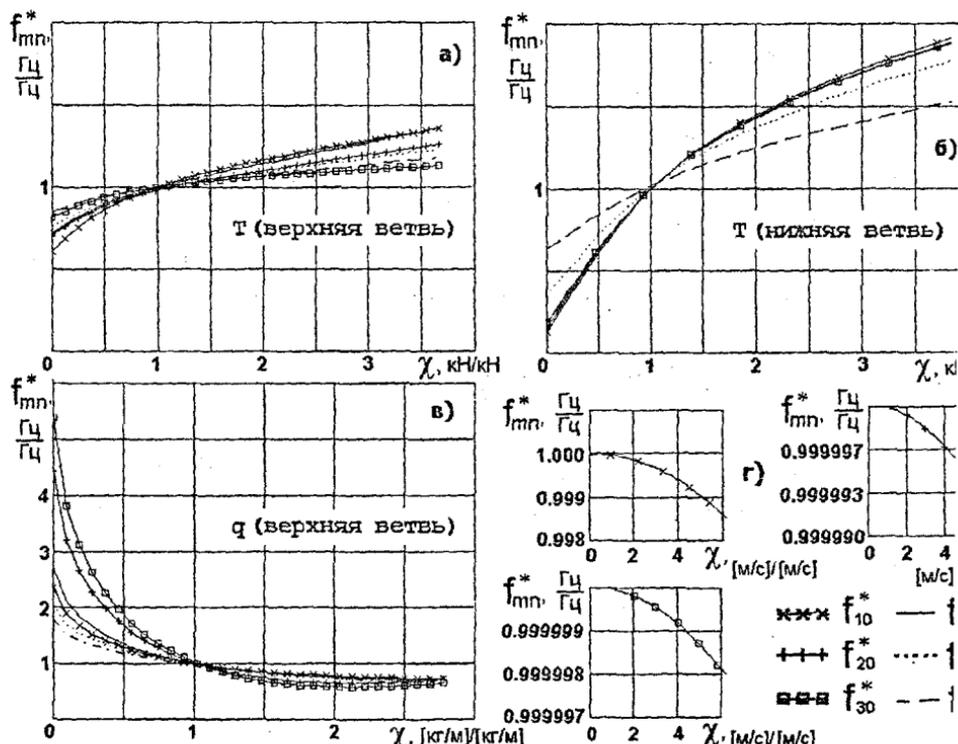


Рис. 3. Зависимости ЧСК от эксплуатационных параметров: а – зависимость ЧСК прола верхней ветви от натяжения; б – зависимость ЧСК пролета нижней ветви от натяжения в – зависимость ЧСК пролета верхней ветви от погонной массы транспортируемого груза; г – зависимость ЧСК пролета нижней ветви от скорости движения ленты конвейера

Так как масса транспортируемого груза считается связанной с лентой без скольжения, следовательно, согласно (3) влияние скорости движения ленты на

верхней ветви будет меньше, чем для нижней. Поскольку влияние скорости кения ленты на нижнюю ветвь очень мало (рис.3г), то для верхней ветви рас- те проводился.

Для верхней ветви на рис.3а и рис.3в приведены зависимости ЧСК ее участ- г изменения натяжения  $T$ , а также от погонной массы транспортируемого гру- Для нижней ветви исследовано влияние изменения натяжения (рис.3б). В до- ление к ЧСК первых трех продольных форм колебаний рассматривались ЧСК ых трех форм поперечных колебаний, так как натяжение и погонная масса а оказывают влияния и на поперечные формы.

Очевидно, что с точки зрения влияния на ЧСК участка ленты для верхней и доминирующим фактором является масса транспортируемого груза, а для ней – натяжение ленты.

Для решения второй задачи – определения точек трассы с минимальным нием изменения режима работы введен показатель интенсивности влияния  $K$ :

$$K = \frac{1}{2N} \left[ \sum_{m=1}^N \left. \frac{\partial f_{m0}^*(\chi)}{\partial \chi} \right|_{\chi=1} + \sum_{n=1}^N \left. \frac{\partial f_{0n}^*(\chi)}{\partial \chi} \right|_{\chi=1} \right], \quad (5)$$

где  $N$  – число учитываемых гармоник;  $\chi$  – безразмерный параметр эксплуа- ционного режима;  $m$  и  $n$  – номера продольных и поперечных форм соответ- ственно.

Показатель интенсивности влияния имеет смысл скорости изменения ЧСК варьировании параметра  $\chi$  вблизи его базового значения, равного 1.

Как уже было сказано, влияние скорости движения на ЧСК верхней ветви ьше, чем на ЧСК нижней ветви ленты. Поэтому, для верхней ветви расчет  $K$  проводился. Значения  $K$  от изменения натяжения ленты и погонной массы ипортируемого груза рассчитывались с учетом конструктивных факторов. нижней ветви проводился расчет зависимости  $K$  от натяжения

Множество исследуемых параметров эксплуатационного режима работы атривалось как многомерное пространство. Если изменения параметров ма- то их суммарное влияние можно считать аддитивным. Тогда в общем случае на поиска участка трассы, рационального с точки зрения минимизации по- ности измерений, сводится к поиску минимума целевой функции  $F$ :

$$F(K_1, K_2, K_i, \dots, K_\Theta) = \sqrt{K_1^2 + K_2^2 + K_i^2 \dots + K_\Theta^2}, \quad (6)$$

где:  $K_i$  –  $i$ -й показатель интенсивности влияния, рассчитываемый по формуле (3);  $\Theta$  – число показателей.

Изменение целевой функции обусловлено изменением конструктивных эксплуатационных параметров по длине трассы конвейера. Расчет  $F$  в соответствии с формулой (6) по длине трассы ленточного конвейера мощностью 126 кВт транспортирующего среднекусковый уголь, показал, что для минимизации потерь, связанной с неравномерным характером загрузки ленты конвейер следует выбирать участок нижней ветви ленты с максимальным натяжением.

**Четвертая глава** посвящена определению диагностических признаков повреждения резинотканевой конвейерной ленты.

При появлении повреждения данного вида наблюдается изменение некоторого набора ЧСК, которое имеет тенденцию к монотонному росту по мере развития повреждения. Для поперечного порыва – это уменьшение ЧСК продольных форм колебаний. Продольный порыв сердечника ленты проявляется в росте частот, соответствующих комбинированным формам колебаний, и ЧСК поперечных форм. Абразивный износ обкладок выражается в росте всех частот, кроме частот соответствующих поперечным формам колебаний с номером выше 3, для которых зафиксирована тенденция уменьшения.

Методика диагностики повреждений по отдельным группам ЧСК требует идентификации ЧСК, например, по их формам, что требует дополнительных затрат времени, которые возрастают пропорционально количеству рассматриваемых гармоник. Чтобы охарактеризовать изменение рассматриваемого набора частот в целом и избежать идентификации ЧСК, введен показатель интенсивности изменения:

$$\Delta F(t) = \sum_{i=1}^N \left| \frac{f_i(t)}{f_i^0} - 1 \right|, \quad (7)$$

где:  $N$  – число рассматриваемых гармоник;  $i$  – порядковый номер гармоник;  $t$  – время;  $f_i(t)$  – частота  $i$ -ой гармоники поврежденной ленты;  $f_i^0$  – частота  $i$ -ой гармоники, неповрежденной ленты.

Согласно (7) при бесконечно малом повреждении  $\Delta F(t)$  стремится к нулю, а в большом – к бесконечности. По мере движения ленты конвейера положение повреждения в пролете будет изменяться, что оказывает влияние на  $\Delta F$ .

Если амплитуда колебаний ленты сравнима с ее толщиной, то влияние наличия повреждения в пролете, соседнем рассматриваемому, пренебрежимо мало. Момент времени  $t = 0$  сек на рассматриваемом участке ленты повреждение не наблюдается, поэтому  $\Delta F(0) = 0$ .

В случае абразивного износа обкладок ленты (рис.4), при появлении правой кромки повреждения (см. рис.2в) на рассматриваемом участке показатель  $\Delta F$  растет со скоростью, определяемой размером повреждения (площадью). К повреждению оказывается в средней части пролета,  $\Delta F(t)$  достигает максимума. Координата области абразивного износа по ширине ленты и форма этой области оказывают близкое по величине, но достаточно малое влияние на изменение  $K$ .

При появлении правой границы продольного порыва (рис.2а) на рассматриваемом участке  $\Delta F$  возрастает со скоростью, определяемой положением продольного порыва по ширине ленты (рис.5). При появлении левой границы повреждения в рассматриваемом пролете значение  $\Delta F$  резко падает на некоторую величину: она повреждения равна по величине произведению времени появления левой кромки повреждения и скорости движения ленты ( $L_d = t \cdot v$ ). Далее  $\Delta F$  изменяется незначительно вплоть до момента выхода правой границы продольного порыва из рассматриваемого пролета.

В случае поперечного порыва рассматривались два подвида повреждений, для которых характер изменения показателя  $\Delta F(t)$  резко отличается. Для "внутреннего" порыва (рис.6) говорить об определении положения повреждения по ширине ленты не имеет смысла, поскольку его положение по ширине ленты определяется типом повреждения. Если поперечный порыв не является краевым (рис.7), то положение порыва по ширине ленты сказывается слабо. Очевидно, что влияние можно свести к минимуму, проводя оценку размеров повреждения по значению  $\Delta F(t)$  при  $t$ , стремящемся к нулю. Остальные характеристики определяют по аналогии с продольным порывом.

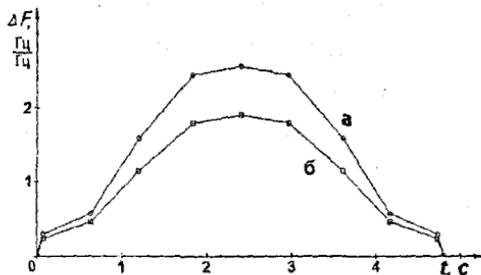


Рис.4. Показатель интенсивности изменения ЧСК как функция времени для случая абразивного износа обкладок ленты: а -  $S_d = 2.9 \text{ м}^2$ ,  $Y_d = 0 \text{ м}$ ; б -  $S_d = 1.4 \text{ м}^2$ ,  $Y_d = 0 \text{ м}$

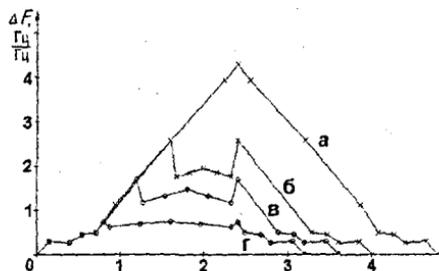


Рис.5. Показатель интенсивности изменения ЧСК как функция времени для сл продольного порыва сердечника: а -  $L_d = 2.4 \text{ м}$ ,  $Y_d = 0.45 \text{ м}$ ; б -  $L_d = 1.6 \text{ м}$ ,  $Y_d = 0.45 \text{ м}$ ; в -  $L_d = 1.2 \text{ м}$ ,  $Y_d = 0.45 \text{ м}$ ; г -  $L_d = 0.8 \text{ м}$ ,  $Y_d = 0.45 \text{ м}$

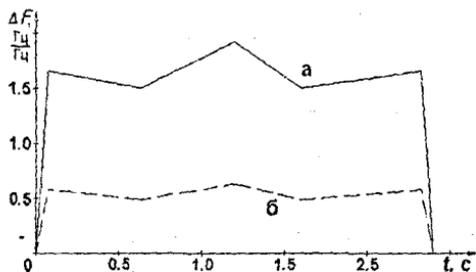


Рис.6. Показатель интенсивности изменения ЧСК как функция времени для случая краевого поперечного порыва сердечника: а -  $L_d = 0.2 \text{ м}$ ,  $Y_d = 0 \text{ м}$ ; б -  $L_d = 0.1 \text{ м}$ ,  $Y_d = 0 \text{ м}$

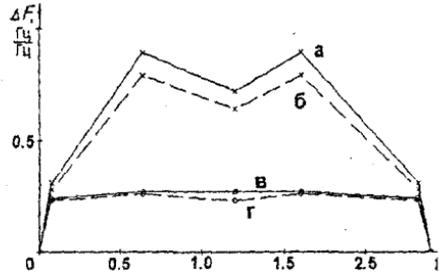


Рис.7. Показатель интенсивности изменения ЧСК как функция времени для сл некраевого поперечного порыва сердка: а -  $L_d = 0.2 \text{ м}$ ,  $Y_d = 0.5 \text{ м}$ ; б -  $L_d = 0.15 \text{ м}$ ,  $Y_d = 0.15 \text{ м}$ ; в -  $L_d = 0.1 \text{ м}$ ,  $Y_d = 0.5 \text{ м}$ ; г -  $L_d = 0.1 \text{ м}$ ,  $Y_d = 0.15 \text{ м}$

Таким образом, по приведенным зависимостям можно определить основные характеристики повреждения: тип, размер, положение в пролете. Тип повреждения определяется по виду зависимости показателя  $\Delta F(t)$ , которая уникальна для каждого типа повреждения. Размер и положение повреждения по длине ленты известны, поскольку отслеживается время, а показатель  $\Delta F(t)$  отклоняется от нуля только при появлении повреждения на рассматриваемом участке.

Для проверки устойчивости полученных диагностических признаков рассматривались влияние следующих факторов: натяжение  $T$ ; длина пролета; характер распределения натяжения по ширине ленты; наложение повреждений.

Устойчивого улучшения или полного искажения диагностических признаков при изменении указанных выше факторов не выявлено. Для конечных моделей изменение ЧСК участка ленты с наложением повреждений х типов (поперечный порыв и износ или продольный порыв и износ) представляет собой линейную комбинацию изменений ЧСК для соответствующих повреждений, что значительно облегчает диагностику вида повреждения.

В настоящее время открытые повреждения небольших размеров обычно немедленно ремонтируются, хотя, исходя из условия снижения прочности конвейерной ленты, в этом не всегда есть необходимость. Адекватная оценка степени разрушения сердечника конвейерной ленты, выполненная на основе предлагаемой одики, позволит продлить межремонтный период ленты.

Результаты работы могут быть обобщены на скрытые дефекты ленты, поскольку методика основана на физических закономерностях изменения вибрационных характеристик участка ленты при изменении распределения его жесткостных свойств из-за появления повреждения. Например, расслоение сердечника – типое повреждение, которое приводит к снижению жесткости, аналогично поперечному порыву сердечника, однако в отличие от последнего зона снижения жесткости не локализована по длине пролета, что создает предпосылки для идентификации расслоения сердечника ленты по изменению показателя  $\Delta F(f)$ .

**Пятая глава:** посвящена проведению экспериментальных исследований, в которых – апробация основных теоретических положений диссертационной работы. Проводится сопоставление результатов численного моделирования и лабораторных экспериментов. Экспериментальные исследования выполнены в лаборатории конвейерного транспорта института горного дела УрО РАН (г. Екатеринбург).

Эксперимент проводился по методу модальных испытаний. Рассматривался сток конвейерной ленты между роликосопами (рис.8). Колебания ленты возбуждались с помощью ударного воздействия, созданного специальным молотком. Сигнал отклика, регистрируемый приклеенным к ленте акселерометром, регистрировался портативным спектроанализатором. Для повышения точности вычленения частотных характеристик и идентификации отдельных гармоник сигнал последовательно снимался в шести точках.

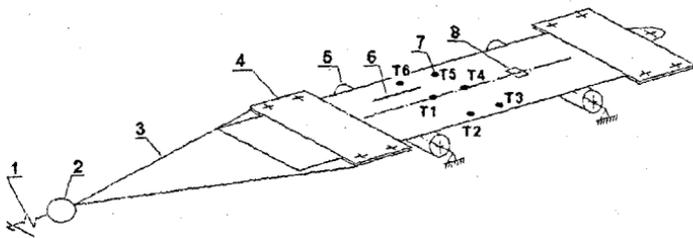


Рис.8. Схема экспериментальной установки: 1 – натяжной винт; 2 – динамометр; 3 – трос; 4 – зажимные плиты; 5 – роликоопора; 6 – пример повреждения (продольный разрыв); 7 – точки приклейки акселерометра; 8 – точка нанесения удара

Чтобы и  
тировать в экспе  
менте движен  
ленты, натяжен  
снялось, лег  
освобождалась  
закрепления, пе  
мещалась на не  
торую величину

носительно роликоопор, затем снова закреплялась и натягивалась.

Рассматривались продольный и поперечный порывы сердечника.

Для моделирования **продольного порыва** ленты использована полоса ленты типа ТА – 150 шириной  $B = 0.33\text{м}$ , на которой моделировался процесс прохождения через рассматриваемый пролет ( $L = 1\text{м}$ ) продольного порыва (рис.2а).

Сравнение передаточных функций поврежденной и неповрежденной лент показывает наличие существенных различий, поскольку при наложении функций не совпали (рис.9). Сдвиг пиков функций по частоте связан с изменением жестких свойств участка ленты, а изменение высоты и ширины пиков – с изменением демпфирующих свойств.

На рис.10 показана зависимость показателя  $\Delta F$  (7) от времени  $t$ . Положение продольного порыва в пролете  $X_d$  численно равно  $t$ , поскольку скорость движения ленты принята равной 1 м/с. Пунктирные линии показывают математическое ожидание и границы 95 % доверительного интервала на значение  $\Delta F(t)$  данным расчетом.

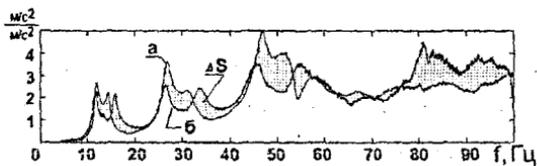


Рис.9. Графики обобщенных передаточных функций и площадь несовпадения  $\Delta S$ : а – лента не повреждена; б – лента повреждена, длина разрыва  $L_d = 1\text{ м}$

Расчет проводился в четотном диапазоне 0...60 Гц, в котором наблюдаются первые  $t_j$  продольные формы колебаний их комбинации с первой поперечной формой.

Изменение показателя  $\Delta$  по мере движения продольно порыва, рассчитанного по экспериментальным данным, имеет полученный с п

ью моделей характер изменения. Расхождение с данными конечно-элементного моделирования не превышает 6%.

Для проверки существования диагностического признака поперечного по-  
 ята взят образец ленты типа ЛА - 200 шириной  $B = 0.36$  м. Поперечный разрез  
 изца произведен, как показано на рис.26. Схема установки датчика и съема  
 тала соответствует применявшейся для моделирования продольного порыва.

На рис.10 также показана зависимость  $\Delta F$  от времени для случая попереч-  
 ) порыва сердечника резиноканевоы ленты.

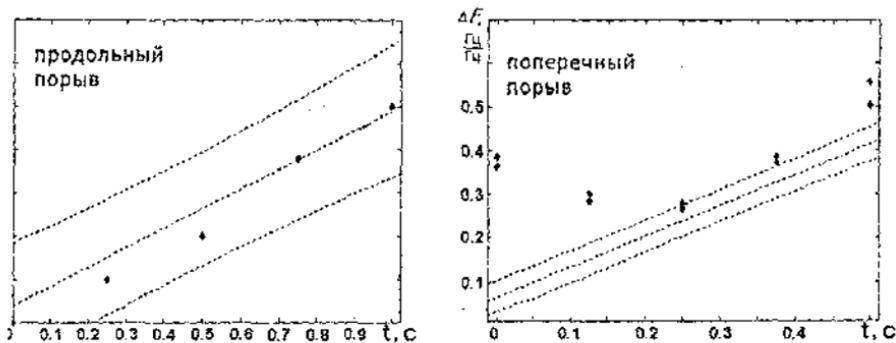


рис.10. Сравнение показателей  $\Delta F$ , полученных по результатам расчета и эксперимен-  
 : --- расчетные данные;  $\circ$  - экспериментальные данные

Очевидно, что расчетные значения  $\Delta F$  оказались занижены по сравнению с  
 ыми замеров. Это вызвано относительно большим размером разреза, он со-  
 ял 50% от ширины ленты. Появление повреждения такого размера, во-  
 вых, привело к снижению ЧСК и резкому увеличению демпфирования. Во-  
 ых, сравнение передаточных функций и функций взаимной фазы для непо-  
 кденной и поврежденной (рис.11) ленты позволяет сделать вывод о том, что  
 ождение экспериментальных и расчетных данных вызвано появлением нели-  
 ных факторов и неравномерным перераспределением натяжения по ширине  
 ы. Наличие нелинейных факторов проявилось в искажении функций взаим-  
 фазы в резонансных зонах. Неравномерное перераспределение натяжения  
 тверждается появлением гармоники  $f_{01}$  (см. рис.11б), которая соответствует  
 еречной форме колебаний и не может проявляться в точке  $t_1$  (см. рис.8).

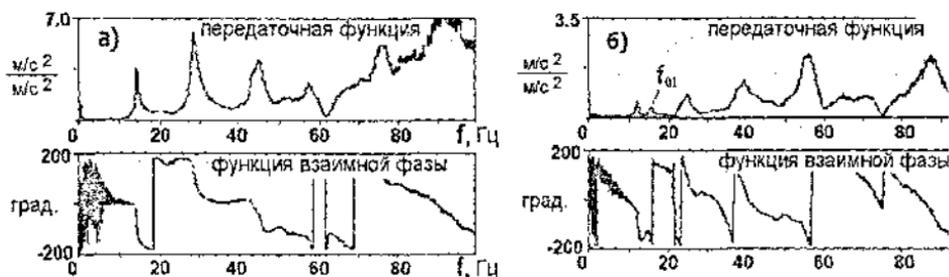


Рис.11. Передаточная функция и функция взаимной фазы для участка ленты типа ЛА (датчик установлен в точке  $t_1$ ): а – лента не повреждена; б – лента повреждена, разрез положен в середине пролета

Качественные характеристики изменения показателя  $\Delta F$  соответствуют полученным в результате конечно-элементного моделирования. Наблюдается резкое отклонение  $\Delta F$  от нуля при  $t = 0$  и  $t = 1$  сек. Поперечный порыв наблюдается в течение 1 сек, в то время как продольный в течение 2 сек. В момент времени  $t = 0,5$  сек расхождение с данными моделирования не превышает 23%.

Результаты экспериментальной проверки показали, что принятые в процессе конечно-элементного моделирования конвейерной ленты допущения не искажают реальной картины качественного изменения частотных свойств участка ленты при появлении повреждений рассматриваемых видов, а также подтверждают существование признаков продольного и поперечного порыва.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Создана методика обнаружения и оценки параметров повреждений резиноканевой ленты без остановки конвейера. Тем самым, выполнен объем работ, необходимый для перехода к созданию действующей системы вибрационной диагностики ТС конвейерной ленты.

В результате исследований, выполненных в диссертационной работе, получены следующие основные результаты:

1. На основании статистических данных, полученных в ходе анализа работ, связанных с технической эксплуатацией и надежностью машин непрерывного транспорта, установлены типы повреждений, характерные для шахтных конвейеров и мощных конвейеров большой длины, транспортирующих крупнокусковые руды.

Для резиноканевой конвейерной ленты определены диагностические признаки появления и развития макроповреждений следующих типов: абразивный износ обкладок, продольные и поперечные порывы сердечника. Уникальность характера проявления повреждений указанных типов позволяет алгоритмизировать процесс их идентификации и оценки основных параметров, то есть создать программное обеспечение для системы мониторинга ТС резиноканевой конвейерной ленты.

Созданы конечно-элементные модели участков резиноканевой конвейерной ленты, использование которых позволяет определить пороговые значения диагностических признаков, что является важной проблемой любого вида диагностики. Адекватность моделей подтверждена результатами экспериментальной проверки.

Показатель изменения частот собственных колебаний  $\Delta F(t)$  достаточно полно отражает характеристики повреждений конвейерной ленты, позволяя оценивать размер повреждения с учетом его положения в пролете, без проведения идентификации ЧСК по их формам.

В результате параметрического анализа, выполненного на основе конечно-элементного моделирования, установлено, что для верхней ветви ленты фактором, оказывающим доминирующее влияние на ЧСК, является масса транспортируемого груза. Для нижней ветви таким фактором является натяжение ленты.

Установлено, что погрешность определения ЧСК, связанную с влиянием изменения параметров эксплуатационных режимов работы конвейера на вибрационные характеристики участка ленты, возможно минимизировать путем выбора участка нижней ветви ленты с максимальным натяжением.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ:**

Семенов Д. Ю. Анализ виброхарактеристик мощных ленточных конвейеров// Ресурсосберегающие технологии в машиностроении: Сборник научных трудов УГТУ-УПИ. Екатеринбург: Изд.-во УГТУ, 1997. № 3. С. 76.

Кожушко Г.Г., Семенов Д.Ю., Ямпольский Д.А. Анализ виброхарактеристик ленточных конвейеров// УГТУ-УПИ. Екатеринбург, 1998. 13 с.: ил. Деп. в ВИНТИ №2671.

3. Кожушко Г.Г., Семенов Д.Ю., Ямпольский Д.А. К вопросу о вибродиагностировании ленточных конвейеров и выбору его оптимальных эксплуатационных параметров// УГТУ-УПИ. Екатеринбург, 1997. 15 с.: ил. Деп. в ВНИИ №2672.
4. Кожушко Г.Г., Семенов Д.Ю., Ямпольский Д.А. Вибрационные признаки повреждений резинотканевых лент как основа для определения их технического состояния// УГТУ-УПИ. Екатеринбург, 1999. 14 с.: ил. Деп. в ВИНТИ №17
5. Семенов Д.Ю. Вибродиагностика как средство оценки технического состояния конвейерной ленты// Виброакустические процессы в технологиях, оборудовании и сооружениях отраслей лесопромышленного комплекса: Тез. докл. к государственному научно-техн. семинару. УГЛТА. Екатеринбург, 1999.
6. Кожушко Г.Г., Семенов Д.Ю., Ямпольский Д.А. Определение характеристик повреждений конвейерной ленты (вторая задача вибродиагностики)// Горная электромеханика: Известия УГГГА. Екатеринбург, 2000. №9. С. 143 – 150.