

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«Донбасский государственный технический институт»

На правах рукописи



Долгих Виталий Павлович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СИЛОВОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕНТЫ С РОЛИКООПОРАМИ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(по отраслям)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Алчевск – 2020

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего образования Луганской Народной Республики «Донбасский государственный технический институт»

Научный руководитель:

Корнеев Сергей Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
Государственное образовательное учреждение
высшего образования Луганской Народной Рес-
публики «Донбасский государственный техни-
ческий институт», заведующий кафедрой гор-
ной энергомеханики и оборудования

Официальные оппоненты:

Снитко Сергей Александрович,
доктор технических наук, доцент,
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «До-
нецкий национальный технический универси-
тет», заведующий кафедрой обработки металлов
давлением

Петров Александр Геннадиевич,
кандидат технических наук, доцент,
Государственное образовательное учреждение
высшего образования Луганской Народной Рес-
публики «Луганский государственный универ-
ситет имени Владимира Даля», Стахановский
инженерно-педагогический институт менедж-
мента, заведующий кафедрой электромеханики
и транспортных систем

Ведущая организация:

Государственное образовательное учреждение
высшего образования Луганской Народной Рес-
публики «Луганский государственный аграрный
университет»

Защита состоится « 18 » декабря 2020 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 001.007.01 на базе ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» по адресу: 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16 (главный корпус), конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале научной библиотеки ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» по адресу: 94204, г. Алчевск, ул. Ленинградская 45-а, библиотека.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Е.С. Смекалин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Многолетний опыт эксплуатации конвейеров на горнорудных и угольных предприятиях подтверждает главные достоинства этого вида транспорта – высокую производительность, возможность транспортирования груза на большие расстояния при углах наклона от -16° до $+18^\circ$ и переменном профиле трассы.

Важным технико-экономическим показателем ленточных конвейеров являются удельные затраты энергии при транспортировании грузов, которые, например в результате регулирования скорости и (или) натяжения тягового органа (ТО), могут быть снижены на 40 ... 50 %.

Энергоемкость процесса транспортирования определяется сопротивлениями движению ТО, разброс значений которых, как показывает анализ результатов многих исследований, может достигать 300 %. Неопределенность сопротивлений движению ТО, возникающих при прохождении роlikоопор, вызвана их зависимостью от целого ряда факторов: натяжения и скорости движения ленты, конструктивных и физико-механических параметров элементов системы «груз-лента-роlikоопоры» (ГЛР). При этом наименее изученным остается процесс силового взаимодействия загруженной конвейерной ленты с роlikоопорами при различных эксплуатационных параметрах конвейера (погонной массе груза, натяжении и скорости движения ленты).

Расчет сил сопротивления движению по типовой методике проводится при номинальных значениях скорости и загрузки конвейера с использованием интегрального коэффициента сопротивления движению, устанавливаемого опытным путем для некоторых условий эксплуатации. При этом не учитывается влияние натяжения и скорости тягового органа. Для обоснования регулирования скорости и (или) натяжения ТО при поступлении на конвейер неравномерных грузопотоков появляется необходимость в разработке новых методов тягового расчета на основе исследований зависимости сопротивлений движению ленты по роlikоопорам от всей совокупности значимых факторов.

Таким образом, разработка нового метода расчета сопротивлений движению ленточных конвейеров с учетом взаимодействия ленты с роlikоопорами для обоснования эффективных режимов работы конвейеров является актуальной научно-практической задачей.

Степень разработанности проблемы исследования. В научно-технической литературе подробно освещены различные методы тягового расчета ленточных конвейеров и особенности выбора их конструктивных и режимных параметров. Вопросам совершенствования тягового расчета для конвейеров с жестким ставом посвящены работы отече-

ственных ученых: Н.Я. Биличенко, В.И. Галкина, А.Я. Грудачева, В.Г. Дмитриева, Р.В. Кирии, С.В. Корнеева, Б.А. Кузнецова, В.Ф. Монастырского, С.Д. Мягкова, Н.С. Полякова, Л.Г. Шахмейстера, И.А. Шпакунова, И.Г. Штокмана и др., а также зарубежных исследователей: Gabriel Lodewijks, Jerzy Antoniak, Allen V. Reicks, Alan W. Roberts, Craig Wheeler, Chen Yan и др. Результаты исследований этих ученых являются теоретической базой тяговых расчетов ленточных конвейеров. Отсутствие общепринятых закономерностей силового взаимодействия тягового органа с роlikоопорами приводит к существенным расхождениям значений сопротивлений движению ТО, определяемых по разным методикам.

Объект исследования – процесс силового взаимодействия элементов системы «груз-лента-роlikоопоры» в ленточном конвейере.

Предмет исследования – сопротивление движению тягового органа ленточных конвейеров при его взаимодействии с роlikоопорами.

Цель исследований – разработка метода тягового расчета ленточных конвейеров на основе закономерностей процессов силового взаимодействия тягового органа с роlikоопорами для обоснования режимов работы и конструктивных параметров конвейера.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие основные **задачи исследования**:

- проанализировать современные методы тягового расчета ленточных конвейеров и факторы, влияющие на сопротивления движению тягового органа;

- разработать компьютерную модель системы ГЛР, исследовать закономерности формирования нагрузок в системе при прохождении тяговым органом отдельных роlikоопор и установить зависимости сопротивления движению ленточных конвейеров от режимных параметров: погонной массы груза на ленте, скорости движения и первоначального натяжения ТО;

- разработать и обосновать метод расчета сопротивлений движению ТО ленточных конвейеров и методику тягового расчета, основывающихся на моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов системы ГЛР;

- адаптировать методику тягового расчета шахтных ленточных конвейеров для обоснования режима регулирования скорости в условиях поступления на конвейер неравномерного случайного грузопотока. Внедрить результаты работы.

Научная новизна исследований.

1. Разработан новый метод тягового расчета ленточных конвейеров, который основывается на компьютерном моделировании процессов деформирования конвейерной ленты при прохождении ею отдельных роликоопор.

2. Впервые получены квадратичные зависимости силы сопротивления от деформирования ленты ленточных конвейеров при прохождении ею отдельной роликоопоры от погонной массы груза, силы натяжения и скорости движения.

3. Впервые установлена возрастающая квадратичная зависимость отношения весовой нагрузки, приходящейся на средний ролик трехроликовой опоры конвейера, к весовой нагрузке, приходящейся на боковые ролики, от погонной массы груза и ленты.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Разработана компьютерная модель системы «груз-лента-роликоопоры», позволяющая исследовать напряженно-деформированное состояние взаимодействующих элементов системы с учетом их физико-механических свойств, геометрических характеристик линейной части конвейерного става и режимных параметров конвейера: погонной массы груза, скорости движения и натяжения тягового органа.

Установлены зависимости сопротивления движению ТО конвейеров при прохождении им отдельных роликоопор от режимных параметров конвейера (погонной массы груза, скорости движения и натяжения ТО).

Разработан новый метод расчета сопротивлений движению ленты, который позволяет учитывать влияние погонной массы ленты с грузом, натяжения ТО и скорости, а также выявить механизмы снижения энергозатрат в производственных условиях. Разработана методика для имитационного моделирования нагрузок в приводе конвейера и выбора режима регулирования скорости.

Установлены зависимости распределения отношения весовой нагрузки, приходящейся на средний ролик трехроликовой опоры ленточных конвейеров, к весовой нагрузке, приходящейся на боковые ролики, в зависимости от погонной массы груза и ленты, что позволяет уточнить сопротивления от вращения роликов.

Обоснована целесообразность регулирования скорости конвейера при поступлении на него шахтных углетотоков для снижения расхода электроэнергии. Ожидаемое максимальное снижение расхода электроэнергии в расчете на один конвейер составляет 67,7 тыс. кВт·ч/год при сроке окупаемости аппаратуры управления (в том числе преобразователя частоты) – 2 года и 3 месяца.

Методология и методы исследования. При разработке математической модели системы ГЛР использовались методы классической теории деформирования твердого тела, теории наследственной деформации твердого тела, теории сыпучей среды. Компьютерные исследования закономерностей формирования нагрузок в элементах системы ГЛР и в приводе ленточного конвейера основывались на методах: конечных элементов в пакете прикладных программ ANSYS Workbench, регрессионного анализа и планирования полного факторного эксперимента. При моделировании случайных шахтных углетоковок, нагрузок в ТО и приводе конвейера применялись методы имитационного моделирования случайных величин, теории случайных процессов и математической статистики. При разработке методики тягового расчета использовался метод обхода по контуру, который заключается в последовательном определении натяжений при обходе трассы конвейера.

Положения, выносимые на защиту:

1. Сила сопротивления движению ленты от ее деформирования при прохождении отдельной роликоопоры находится в квадратичной зависимости от погонной массы груза, натяжения и скорости движения тягового органа, что позволяет обосновать выбор режимов работы конвейера.

2. Отношение весовой нагрузки, приходящейся на средний ролик трехроликовой опоры конвейера, к весовой нагрузке, приходящейся на боковые ролики, возрастает по квадратичной зависимости по мере увеличения погонной массы груза и ленты, что позволяет повысить точность расчета силы сопротивления от вращения роликов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность и новизна научных решений, обоснованность выводов и рекомендаций подтверждается приведенным объемом проанализированной информации о процессе взаимодействия элементов системы «груз-лента-роликоопоры», использованием апробированных методов исследований и научных теорий, адекватностью разработанных математических моделей экспериментальным исследованиям в промышленных условиях, соответствием полученных автором результатов теоретических исследований известным экспериментальным данным при относительной погрешности менее 9...10 %.

Основные результаты диссертационной работы обсуждались на: Всеукраинской научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития транспортных систем горных предприятий» (г. Днепропетровск, 2012 г.); Международной научно-технической конференции «Форум горняков 2014» (г. Днепропетровск, 2014 г.); I, II, III и IV Международных научно-технических конференциях «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного произ-

водства» (г. Алчевск, 2016, 2017, 2018 и 2019 г.); Научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых» (г. Алчевск, 2019 г.).

Результаты диссертационной работы, а именно, метод расчета сопротивления движению ленты и методика тягового расчета ленточных конвейеров, основой которых является компьютерное моделирование взаимодействия ленты с роlikоопорами, были приняты к рассмотрению руководством Филиала №12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» для обоснования рациональных режимов работы ленточных конвейеров, эксплуатируемых в цехах предприятия, и использованы Государственным унитарным предприятием Луганской Народной Республики «Луганский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по качеству и обогащению углей» при проведении тяговых расчетов ленточных конвейеров традиционной конструкции с шириной ленты 800 и 1000 мм, что позволило более обоснованно выбирать параметры и режимы работы конвейеров.

Теоретические положения диссертации используются в учебном процессе на кафедре «Горная энергомеханика и оборудование» факультета металлургического и машиностроительного производства ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ».

Публикации. Основные положения исследования отображены в 13 печатных работах, среди них 6 статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах и изданиях, утвержденных ВАК ЛНР, 3 статьи в профессиональных журналах и сборниках, 4 публикации – материалы Международных научных конференций.

Структура диссертации обусловлена логикой исследования и соответствует его цели и задачам. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов (18 подразделов), выводов к разделам, заключения, списка литературы из 116 наименований и 3 приложений. Общий объем диссертации – 166 страниц (139 страниц – основная часть). В разделах диссертации 45 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность направления, цель и задачи исследования. Определены объект, предмет исследования, методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования, а также формы их апробации.

Раздел 1 «Состояние вопроса, цель и задачи исследования» содержит 4 подраздела. В подразделе 1.1 «**Проблема точности расчетов критериев для обоснования режимов работы ленточных конвейер-**

ров» освещается проблема выбора критериев для оценки эффективности работы конвейера, а также точности их расчетов. В качестве основного показателя эффективности конвейеров рассматривается удельное потребление электроэнергии, которое напрямую зависит от сопротивления движению тягового органа.

В подразделе **1.2 «Современные методы тягового расчета ленточных конвейеров и тенденции их совершенствования»** представлены методы, а также отечественный и зарубежный опыт исследования силового взаимодействия элементов системы «груз-лентароликоопоры». Проанализированные методы и методики тягового расчета основываются на установленных экспериментально интегральных коэффициентах сопротивления движению тягового органа. При расчетах не учитывается влияние на коэффициенты сопротивления физико-механических свойств ленты и груза, погонной массы груза, скорости движения и натяжения тягового органа.

Подраздел **1.3 «Анализ коэффициентов сопротивления движению тягового органа, применяемых при тяговых расчетах»** содержит результаты анализа известных исследований сопротивлений движению конвейерной ленты при прохождении роликоопоры. Выявлены три основные составляющие сопротивления движению: от изгиба ленты, от вдавливания и от вращения роликов. Установлено, что основными факторами, определяющими коэффициент сопротивления движению конвейерной ленты и поддающимися управлению в процессе эксплуатации конвейера, являются погонная масса груза, натяжение и скорость тягового органа. Значительный разброс рекомендуемых при проведении тягового расчета значений коэффициентов сопротивления движению (от 0,02 до 0,08) указывает на необходимость разработки применительно к конкретным условиям эксплуатации, физико-механическим свойствам ленты и груза, а также к режимам работы конвейера методов и методики тягового расчета, основывающихся на непосредственном расчете сопротивлений движению тягового органа на каждой роликоопоре, или уточнения коэффициентов сопротивления движению тягового органа в случае применения типовой методики тягового расчета.

В подразделе **1.4 «Цель и задачи исследования»** на основании проведенного анализа научно-технической информации сформулированы цель и основные задачи исследований.

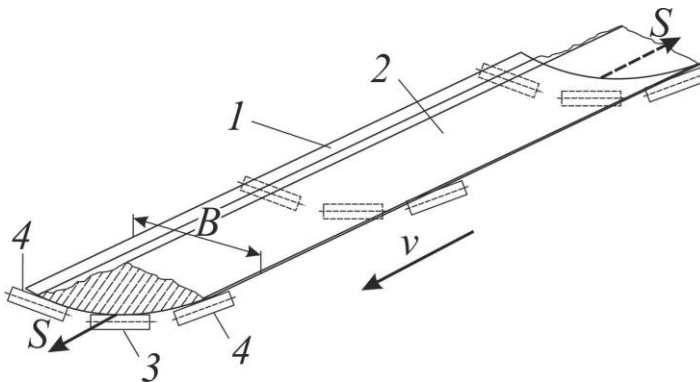
Таким образом, в первом разделе проведен критический анализ научных работ, посвященных силовому взаимодействию элементов системы «груз-лента-роликоопоры», а также известных методов и методик тягового расчета ленточных конвейеров с роликоопорами жесткого става с точки зрения их структуры, научной базы и точности расчетов по-

казателей эффективности, применяемых для обоснования режимных параметров (скорости, натяжения) конвейеров при различных условиях их эксплуатации.

Второй раздел «Исследование сопротивлений движению резиноканевой конвейерной ленты при прохождении ею роликоопоры» состоит из 7 подразделов.

В подразделе 2.1 «Подход к исследованию процессов силового взаимодействия элементов системы «груз-лента-роликоопоры» рассматриваются современные подходы к исследованиям силового взаимодействия элементов системы «груз-лента-роликоопоры».

В подразделе 2.2 «Модель системы «груз-лента-роликоопоры» в программном комплексе ANSYS Workbench» приводится разработанная с применением программного комплекса ANSYS компьютерная модель системы ГЛР (рисунок 1), при составлении которой принимаются следующие допущения: сердечник ленты представляет в виде ортотропного упруго-вязкого тела, груз в виде модели Друкера-Прагера, а резиновые обкладки в виде модели Муни-Ривлина.



1 – многослойная конвейерная лента; 2 – транспортируемый груз;
3 – средний ролик, 4 – боковые ролики

Рисунок 1 – Расчетная схема системы ГЛР
(S – натяжение; v – скорость; B – ширина ТО)

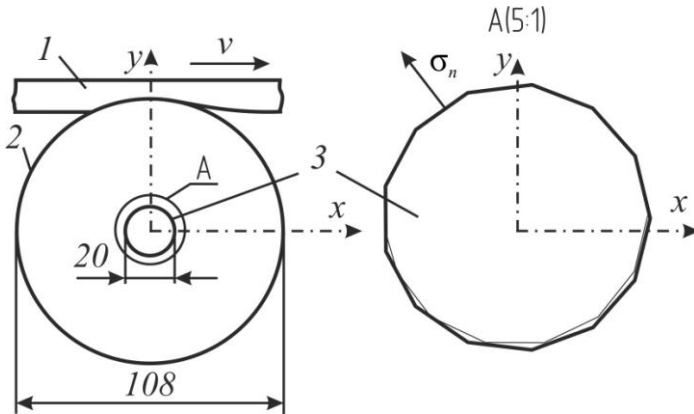
Модель позволяет исследовать сложные напряженно-деформированные состояния контактирующих элементов системы, не прибегая к характерным для известных моделей чрезмерным упрощениям и игнорированию взаимодействия факторов.

В качестве исходных данных принимаются физико-механические свойства материалов резиноканевой конвейерной ленты, сыпучего

груза, роликов, геометрические параметры системы и коэффициенты трения. Параметры моделей сердечника, резины и груза принимаются на основании экспериментальных данных.

В подразделе 2.3 «Проверка соответствия результатов моделирования известным фактам» проведена предварительная оценка результатов моделирования НДС элементов ГЛР и установлено их соответствие, в основном по качественным признакам, известным фактам и аналогичным результатам, полученным теоретически для частных видов деформаций ТО, возникающих при прохождении роликоопоры (вдавливании роликов в обкладочную резину, изгибов ленты с грузом).

Подраздел 2.4 «Метод расчета сопротивления движению ленты, вызванного ее деформированием при прохождении роликоопоры» посвящен разработке метода моделирования сопротивления движению ленты, вызванного ее деформированием при прохождении отдельной роликоопоры. Суть нового метода заключается в имитации процесса измерения реакции роликов на воздействие ленты в направлении, противоположном ее движению. При прохождении ленты с грузом или без него через роликоопору на внутренней поверхности обечайки роликов, которая в модели контактирует по всей своей длине с осью, в зоне контакта возникают нормальные напряжения σ_n (рисунок 2).



1 – конвейерная лента; 2 – обечайка ролика; 3 – ось ролика

Рисунок 2 – К расчету напряжений σ_n на оси ролика

В подразделе 2.5 «Результаты компьютерного моделирования сопротивлений движению ленты от ее деформаций» отражены результаты полного факторного эксперимента, в результате которого по-

лучены квадратичные зависимости силы сопротивления движению ленты $W'(S, v, \rho)$ от деформаций, возникающих при прохождении роlikо-опоры, от погонной массы груза ρ ($0 \text{ кг/м} \leq \rho \leq 70 \text{ кг/м}$), натяжения тягового органа S ($7,5 \text{ кН} \leq S \leq 37,5 \text{ кН}$) и скорости v ($0 \text{ м/с} \leq v \leq 2,5 \text{ м/с}$), а также соответствующего коэффициента сопротивления движению ленты $w'(S, v, \rho)$.

Для ленты шириной 0,8 м, например, получено:

$$\begin{aligned} w'(S, v, \rho) = & 0,034 - 0,97 \cdot 10^{-3} S - 3,1 \cdot 10^{-3} v + 1,07 \cdot 10^{-4} \rho + \\ & + 0,96 \cdot 10^{-4} S v + 2,5 \cdot 10^{-6} S \rho + 1,2 \cdot 10^{-4} v \rho + 7,08 \cdot 10^{-7} S v \rho + \\ & + 1,1 \cdot 10^{-5} S^2 + 7,5 \cdot 10^{-4} v^2 - 2,5 \cdot 10^{-6} \rho^2, \end{aligned} \quad (1)$$

а для ленты шириной 1 м:

$$\begin{aligned} w'(S, v, \rho) = & 0,039 - 0,99 \cdot 10^{-3} S - 3,2 \cdot 10^{-3} v + 1,08 \cdot 10^{-4} \rho + \\ & + 0,96 \cdot 10^{-4} S v + 2,6 \cdot 10^{-6} S \rho + 1,2 \cdot 10^{-4} v \rho - 7,08 \cdot 10^{-7} S v \rho + \\ & + 1,2 \cdot 10^{-5} S^2 + 8,3 \cdot 10^{-4} v^2 - 2,4 \cdot 10^{-5} \rho^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Графики расчетных зависимостей коэффициента сопротивления от деформаций ленты шириной $B=0,8 \text{ м}$ w' от исследуемых факторов представлены на рисунке 3, где v_n – номинальное значение скорости.

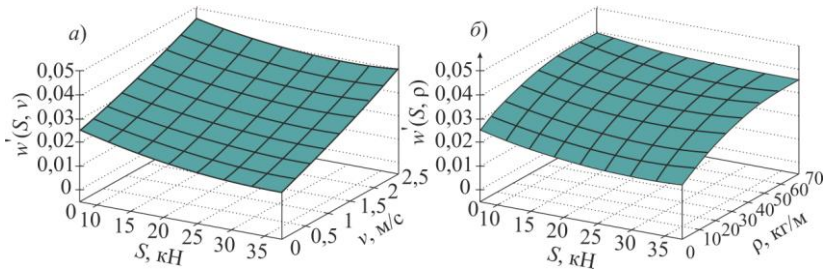
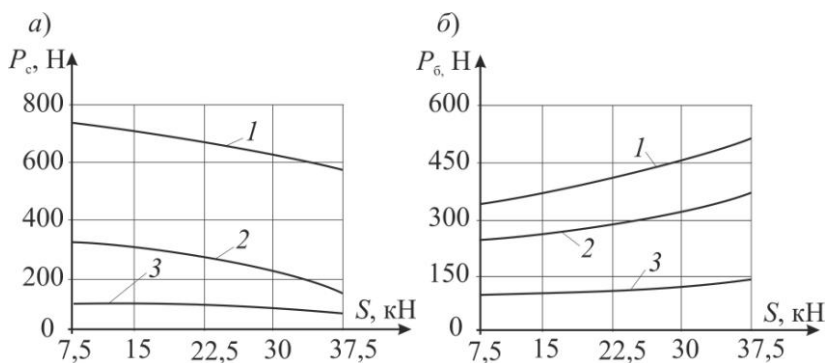


Рисунок 3 – Графики зависимостей коэффициента сопротивления движению ленты $w'(S, v)$ от натяжения S и скорости v (а) при $\rho = \rho_{\text{доп}}$, $w'(S, \rho)$ от натяжения S и погонной массы груза ρ (б) при $v = v_n$

Расчетные значения w' , полученные для всех возможных условий эксплуатации конвейерной установки и режимов ее работы, находятся в пределах от 0,022 до 0,044.

В диапазоне исследуемых значений v при $\rho = \rho_{\text{доп}}$ коэффициент сопротивления движению ленты $w'(S, v)$ (см. рисунок 3, а) изменяется, примерно, в 2 раза, практически независимо от натяжения, т. е. скорость влияет на w' почти одинаково на каждой роликоопоре конвейерного става. Из анализа кривых $w'(S, \rho)$ (см. рисунок 3, б) следует, что с ростом S при $v = v_{\text{н}}$ и максимальной загрузке конвейерного става величина w' нелинейно убывает на 10 %.

На рисунке 4 представлены результаты исследования распределения весовой нагрузки на конвейер между средним P_c (см. рисунок 4, а) и боковыми P_6 (см. рисунок 4, б) роликами роликоопоры. Установлено, что в конвейере с шириной ленты 0,8 м увеличение натяжения ленты от 7,5 до 37,5 кН приводит к нелинейному снижению нагрузки P_c на средний ролик на 21 ... 34 % и к возрастанию нагрузки P_6 на 27 ... 48 %.



1, 2, 3 – показатель загрузки ленты, равный, соответственно, 1, 0,5 и 0,2

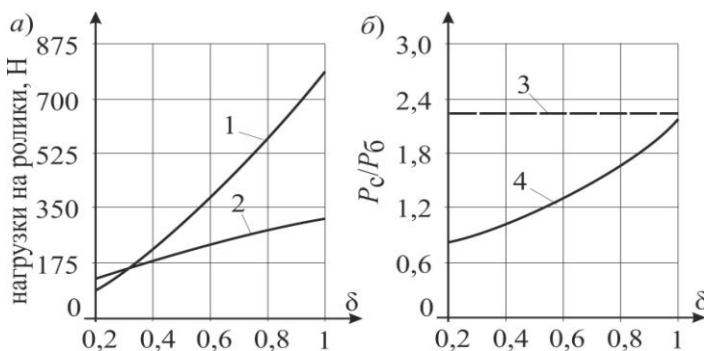
Рисунок 4 – Графики зависимости P_c (а) и P_6 (б) от натяжения тягового органа конвейера 1Л800Д

В результате компьютерного моделирования также получены зависимости отношения P_c/P_6 от натяжения ленты S и показателя загрузки ленты δ , равного отношению суммы погонной массы груза ρ и погонной массы ленты $\rho_{\text{л}}$ к максимально допустимому значению этой суммы, $\delta = (\rho + \rho_{\text{л}}) / (\rho_{\text{доп}} + \rho_{\text{л}})$.

Для конвейера с четырехпрокладочной лентой шириной 0,8 м при $0,2 \leq \delta \leq 1$ и S , равном 7,5 кН, получено:

$$P_c / P_6 = 1,39\delta^2 + 0,14\delta + 0,72. \quad (3)$$

Графики полученных зависимостей P_c , P_6 и отношения P_c/P_6 от δ отражены на рисунке 5.



1 – P_c ; 2 – P_6 ; 3 – $P_c/P_6=2,33$; 4 – P_c/P_6 как функция от δ

Рисунок 5 – Графики зависимостей нагрузок на ролики (а) и отношения нагрузок на средний и боковые ролики P_c/P_6 (б) конвейера 1Л800Д от показателя загрузки δ ленты при S , равном 7,5 кН

Установлено, что распределение нагрузки между средним и боковыми роликами, как принято считать, в соотношении 70 и 30 % отвечает лишь частному случаю полной загрузки ленты. По мере снижения уровня заполнения конвейерного става от максимального значения ($\delta=1$) до минимального ($\delta=0,2$) нагрузки на средний и боковые ролики уменьшаются на 87 и 63 %, соответственно. При этом отношение P_c/P_6 снижается с 2,25 до 0,8.

В подразделе 2.6 «**Определение силы сопротивления движению ленты от вращения роликов**» приведен алгоритм определения силы сопротивления движению от вращения роликов. Значения приведенного сопротивления движению, рассчитываемые с учетом определяемого по формуле (3) соотношения P_c/P_6 , находятся в пределах 6 ... 8 % от общего сопротивления движению на роликоопоре.

В подразделе 2.7 «**Экспериментальные исследования сопротивления движению ленты при прохождении роликоопоры**» представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие адекватность полученных зависимостей и, таким образом, разработанной модели взаимодействия элементов системы ГЛР (коэффициент вариации находится в пределах 0,019...0,074).

Разработанный во втором разделе метод определения сопротивлений движению от деформаций ленты и груза при прохождении ими роликоопоры, а также полученные зависимости вида (1) и (2) используются для разработки методики тягового расчета ленточных конвейеров и последующих исследований, направленных на обоснование режимных параметров ленточного конвейера.

Раздел 3 «Разработка и обоснование метода и методики тягового расчета ленточных конвейеров» содержит 3 подраздела.

В подразделе **3.1 «Методика тягового расчета»** представлена методика тягового расчета ленточных конвейеров.

Общая сила сопротивления движению ленты с грузом на каждой i -ой роликоопоре W_i является функцией натяжения ленты перед i -ой роликоопорой S_i , скорости движения ленты v и погонной массы груза ρ_i , приходящегося на эту роликоопору. Так как натяжения, в свою очередь, зависят от сопротивлений движению, то W_i и S_i определяются, по аналогии с методом обхода по контуру, в результате решения системы рекуррентных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} W_i(S_i) = W'_i(S_i) + W_{вр\ i}; \\ S_{i+1} = S_i + W_i(S_i) + W_{y,i,i+1}, \end{cases} \quad (4)$$

где $W_{вр\ i}$ – сила сопротивления от вращения роликов i -ой роликоопоры; $W_{y\ i,i+1}$ – сила сопротивления движению ТО от уклона на участке става между i -ой и $i+1$ -ой роликоопорами; $i=1, 2, \dots, n$, n – число роликоопор на конвейере.

Силы сопротивления $W'_i(S_i)$ и $W_{вр\ i}$ определяются в результате компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния элементов системы ГЛР.

Отличие предлагаемой методики от типовой методики, в которой применяется нормативный коэффициент сопротивления движению, инвариантный к изменению эксплуатационных параметров конвейера, заключается в способе представления сопротивлений движению ТО в виде суммы локальных сопротивлений, возникающих при взаимодействии ленты с каждой роликоопорой и зависящих от физико-механических свойств ленты и груза, эксплуатационных и конструктивных параметров конвейера. В качестве отдельного модуля (подпрограммы) в алгоритме тягового расчета рассматривается многократно повторяемое компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния, а затем сопротивления движению и натяжения ленты на каждой роликоопоре.

Подраздел **3.2 «Аналитические зависимости натяжения однородных участков ленты от координаты и эксплуатационных параметров»** посвящен определению аналитических зависимостей натяжения ленты на отдельных однородных участках тягового контура, в частном случае – на участках, отнесенных к каждой роликоопоре, от координаты участка. Вывод полученных зависимостей для конкретного конвейера основывается на установленных предварительно в результате компьютерного моделирования зависимостях коэффициентов сопротивления движению ленты, для конвейеров с шириной ленты 0,8 и 1,0 м, например, – на формулах (1) и (2).

Формула для определения натяжений ТО на любом однородном участке верхней ветви имеет вид:

$$S(x) = D \operatorname{tg} \left(AD \left(x + \frac{1}{AD} \operatorname{arctg} \frac{S_n + \frac{B}{2A}}{D} \right) - \frac{B}{2A} \right), \quad (5)$$

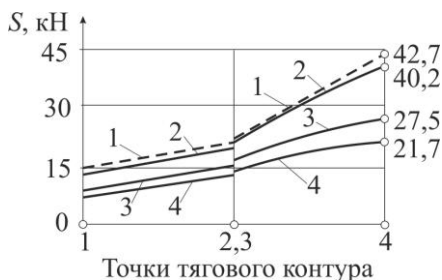
где $D = \frac{\sqrt{AC}}{A} - \frac{B}{2A}$; A, B, C – функции от параметров конвейера, вид которых определяется модификацией формулы, применяемой для расчета w' (для конвейерной ленты шириной $B=0,8$ м $A=0,016$, $B=0,32$, $C=52,72$); S_n – натяжение ТО в начале участка, которое определяется по методу итераций, x – расстояние от начала расчета до выбранной роликоопоры.

Использование полученной предварительно для конкретного конвейера формулы (5) позволяет исключить в ходе расчета компьютерное моделирование НДС ленты и, благодаря этому, сократить продолжительность расчетов на компьютере.

В подразделе **3.3 «Оценка точности расчетов по разработанной методике»** произведено сопоставление результатов тягового расчета, проведенного по типовой и по разработанной методикам.

Диаграмма натяжений ТО $S(x)$, полученная по типовой методике (кривая 1), и диаграммы натяжений, полученные при различных значениях скорости (кривые 2, 3 и 4), представлены на рисунке 6.

При базовой скорости движения ТО, равной 2 м/с, значения сопротивления движению грузовой ветви W_r на 7,4 %, а общей силы сопротивления движению W_0 до 5,4 % меньше значений, рассчитываемых по типовой методике.



- 1 – расчет по типовой методике;
 2, 3, 4 – расчет по новой методике
 (2 – $v=2$ м/с; 3 – $v=1$ м/с; 4 – $v=0,5$ м/с)

Рисунок 6 – Диаграммы натяжения тягового органа конвейера 1Л800Д

по мере увеличения номера роlikоопоры, необходимо учитывать при определении тягового усилия на приводном барабане, мощности привода и прочности ТО, а также при обосновании режимов управления натяжением ТО и (или) скоростью конвейера для снижения энергозатрат и увеличения долговечности ТО.

Четвертый раздел «Адаптация методики тягового расчета ленточных конвейеров» содержит 4 подраздела, в которых представлены результаты использования методики тягового расчета ленточных конвейеров при случайных характеристиках грузопотоков для расчета показателей эффективности регулирования скорости и (или) натяжения ТО.

В подразделе **4.1 «Моделирование шахтных углепотоков»** разработан алгоритм имитационного моделирования шахтных углепотоков. Установлено, что приемлемая точность имитационного моделирования углепотоков достигается в случае применения методов неопределённых коэффициентов или авторегрессии порядка не ниже двадцати.

В подразделе **4.2 «Методика тягового расчета конвейера, адаптированная к промышленным условиям эксплуатации»** приведен алгоритм расчета сопротивлений движению ленты, а затем и нагрузок в приводе конвейера с учётом его режимных параметров и характеристик случайного углепотока. Структурно-логическая схема предложенной методики тягового расчета представлена на рисунке 7.

В результате тягового расчета конвейера с шириной ленты 0,8 м установлено, что при поступлении на него типичного забойного углепотока средние значения нагрузок в приводе, рассчитываемые по разработанной

При значениях скорости движения ленты, равных 1 и 0,5 м/с, при одинаковой погонной нагрузке ρ значения тягового усилия W_0 , полученные по разработанной методике, отличаются от аналогичных значений, рассчитанных по типовой методике и не зависящих от скорости, соответственно, на 29,6 и 48,7 %. Полученное расхождение значений, обусловленное влиянием скорости и нелинейным характером изменения силы сопротивления на роlikоопорах, а затем и натя-

методике, меньше соответствующих значений, полученных по формулам типовой методики, на 22 %.

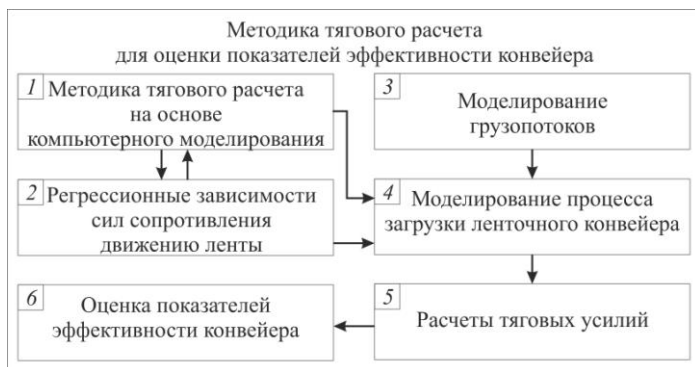


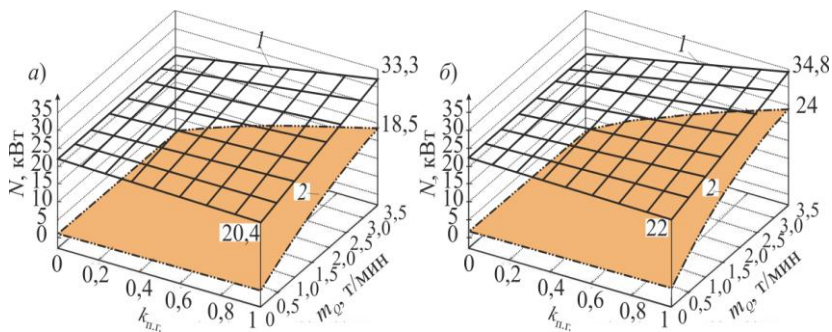
Рисунок 7 – Структурно-логическая схема методики тягового расчета

В подразделе 4.3 «Примеры применения методики тягового расчета для оценки показателей эффективности регулирования скорости конвейера» и в подразделе 4.4 «Система автоматического регулирования скорости ленточных конвейеров с упреждением» приведены примеры применения разработанной методики для обоснования эффективности регулирования скорости ленточного конвейера по фактору затрат энергии в типичных условиях поступления на конвейер неравномерных грузопотоков.

Зависимости средних значений мощности \bar{N} от математического ожидания грузопотока m_q и коэффициента поступления груза на конвейер $k_{п.г.}$, полученные для базового режима (скорость не регулируется) и режима регулирования скорости конвейера с применением типовой и разработанной методик тягового расчета, отражены на рисунке 8.

Применение новой методики тягового расчета позволило уточнить технико-экономические показатели целесообразности регулирования скорости конвейера 1Л800Д при поступлении на него неравномерных грузопотоков.

Для конвейера 1Л800Д, например, работающего в типичных условиях, ожидается снижение расхода электроэнергии на 67,7 тыс. кВт·ч/год при сроке окупаемости аппаратуры управления (в том числе преобразователя частоты) – 2 года и 3 месяца. При этом ожидаемый годовой экономический эффект составляет от 122 до 178 тыс. руб.



1 – базовый режим (скорость не регулируется);
2 – режим регулирования скорости

Рисунок 8 – Зависимости мощности конвейера 1Л800Д \bar{N} от математического ожидания минутного углетока m_q и коэффициента поступления груза на конвейер $k_{п.г.}$, рассчитанные по новой методике (а) и типовой (б)

Разработана структурная схема системы автоматического управления электроприводом конвейера (САУ). Доказана целесообразность управления скоростью с упреждением во времени, при котором в задающем устройстве САУ осуществляется прогнозирование значений случайного грузопотока, расчет ожидаемого количества груза, которое поступит на конвейер, и, наконец, соответствующего ему задаваемого значения скорости. При таком подходе обеспечивается наилучшее приближение средней на каждом шаге управления погонной массы груза на конвейере к заданному постоянному значению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой на основе впервые установленных закономерностей и параметров процесса силового взаимодействия тягового органа ленточных конвейеров с роlikоопорами решена актуальная научно-техническая задача разработки метода тягового расчета ленточных конвейеров на основе моделирования процесса силового взаимодействия ленты с роlikоопорами, что дает возможность осуществлять выбор и обоснование эффективных режимов работы конвейера.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Разработаны модель системы «груз-лента-роlikоопоры» и новый метод расчета сопротивления движению ленточных конвейеров с уче-

том взаимодействия ленты с роlikоопорами. Новый метод позволяет учитывать влияние на сопротивление движению комплекса физико-механических свойств ленты и груза, их погонной массы, а также поддающихся управлению режимных параметров конвейера: натяжения и скорости тягового органа.

2. В результате применения нового метода расчета ленточных конвейеров установлено, что зависимости сопротивления движению ленты, возникающего при прохождении ею роlikоопоры, а также коэффициенты сопротивления движению от погонной массы груза, натяжения и скорости ленты описываются квадратичными зависимостями. Повышение натяжения тягового органа конвейера 1Л800Д до допустимых значений, определяемых условиями прочности ленты и обеспечения тяговой способности привода, при $v=v_n$ способствует снижению сопротивлений движению на 15 ... 30 %, а снижение скорости при $\rho=\rho_{\text{доп}}$ в диапазоне ее возможных при регулировании значений от 0 до 2,5 м/с – к снижению сопротивлений движению на 51 %.

Расчетные значения коэффициента сопротивления движению, полученные для исследуемого диапазона изменения факторов конвейерной установки, находятся в пределах 0,022 ... 0,044.

3. В результате моделирования напряженно-деформированного состояния элементов системы «груз-лента-роlikоопоры» установлено, что отношение весовой нагрузки, приходящейся на средний ролик роlikоопоры к весовой нагрузке, приходящейся на боковые ролики, квадратично возрастает от показателя загрузки конвейерного става над этой роlikоопорой. При максимальной загрузке отношение, практически, равно общепринятому значению 2,33 (на средний ролик приходится 70, а на боковые - 30 % весовой нагрузки), при уменьшении показателя загрузки происходит снижение отношения до 0,8.

4. Разработана методика тягового расчета ленточного конвейера, в основу которой положен новый метод компьютерного моделирования сопротивлений движению ленты с грузом при прохождении ею роlikоопоры. Точность тяговых расчетов ленточного конвейера 1Л800Д при значениях скорости, равных 2, 1 и 0,5 м/с, увеличивается, соответственно, на 5,4, 29,6 и 48,7 %, в сравнении с типовой методикой.

5. Расчет по новой методике среднего значения потребляемой при вводе мощности при обосновании целесообразности регулирования скорости дает более точные результаты (например, для типичных условий эксплуатации конвейера 1Л800Д – на 22 %), чем при расчете по типовой методике.

6. Применение новой методики тягового расчета конвейера 1Л800Д позволило уточнить технико-экономические показатели целесообразно-

сти регулирования скорости конвейера при поступлении на него неравномерных грузопотоков. Для конвейера 1Л800Д, например, ожидается снижение расхода электроэнергии на 67,7 тыс. кВт·ч/год при сроке окупаемости аппаратуры управления (в том числе преобразователя частоты) – 2 года и 3 месяца.

7. Результаты диссертационной работы, в частности разработанные метод расчета сопротивления движению ленты и методика тягового расчета ленточных конвейеров, приняты к рассмотрению руководством Филиала №12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» для обоснования рациональных режимов работы ленточных конвейеров, эксплуатируемых в цехах предприятия, а также использованы Государственным унитарным предприятием Луганской Народной Республики «Луганский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по качеству и обогащению углей» при проведении тяговых расчетов ленточных конвейеров традиционной конструкции с шириной ленты 800 и 1000 мм, что позволило более обоснованно выбирать параметры и режимы работы конвейеров.

Теоретические положения диссертации используются в учебном процессе на кафедре «Горная энергомеханика и оборудование» факультета металлургического и машиностроительного производства Государственного образовательного учреждения высшего образования Луганской Народной Республики «Донбасский государственный технический институт».

Основные научные публикации по теме диссертационного исследования

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при МОН ЛНР для публикации основных результатов диссертационных исследований

1. Долгих, В.П. Анализ факторов, определяющих силу сопротивления вращению роликов ленточных конвейеров / В.П. Долгих, С.В. Корнеев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – Вып. 41. – С. 33-36.

2. Долгих, В.П. Коэффициенты модели Муни-Ривлина в пакете программ ANSYS, полученные для обкладочной резины шахтных конвейерных лент / В.П. Долгих, С.В. Корнеев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2014. – Вып. 42. – С. 45-49.

3. Долгих, В.П. Моделирование сопротивлений движению тягового органа участкового ленточного конвейера / В.П. Долгих // Сборник на-

учных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2017. – Вып. 48. – С. 185-192.

4. Долгих, В.П. Опыт моделирования забойных углепотоков / В.П. Долгих, С.В. Корнеев, В.Ю. Доброногова // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2018. – Вып. 52. – С. 21-28.

5. Долгих, В.П. Моделирование реальных нагрузок в шахтных ленточных конвейерах на основе уточнённого тягового расчёта / В.П. Долгих, С.В. Корнеев, В.Ю. Доброногова // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2019. – Вып. 56. – С. 81-90.

6. Долгих, В.П. Обоснование скоростного режима шахтных ленточных конвейеров с применением специальной методики уточнённого тягового расчёта / В.П. Долгих, С.В. Корнеев, В.Ю. Доброногова // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2019. – Вып. 58. – С. 71-77.

Статьи в журналах, сборниках научных трудов и материалов конференций

7. Долгих, В.П. Структурирование компьютерной модели системы «груз – конвейерная лента – роликоопоры» в программном комплексе ANSYS Workbench / В.П. Долгих, С.В. Корнеев // Сборник научных трудов НГУ. – Днепропетровск: НГУ, 2014. – Вып. 45. – С. 105-111.

8. Долгих, В.П. Сопротивление движению конвейерной ленты, возникающее при прохождении роликоопоры / В.П. Долгих, С.В. Корнеев // Горное оборудование и электромеханика. – Кемерово, 2015. – № 9. – С. 20-25.

9. Долгих, В.П. Методика тягового расчета шахтных ленточных конвейеров на основе компьютерного моделирования сопротивлений движению тягового органа / В.П. Долгих, С.В. Корнеев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – Екатеринбург, 2016. – № 3. – С. 81-89.

Доклады на научных конференциях

10. Долгих, В.П. О моделировании процесса движения тягового органа шахтного ленточного конвейера на роликоопорах / В.П. Долгих // «Сучасний стан та перспективи розвитку транспортних систем гірничих підприємств»: тезиси докладов Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Днепропетровск: НГУ, 2012. – С. 13-14.

11. Долгих, В.П. Моделирование системы «груз–конвейерная лента–роликоопоры» в программном комплексе ANSYS Workbench / В.П. Долгих // Форум горняков 2014: материалы международной конференции. – Днепропетровск: НГУ, 2014. – С. 121-127.

12. Долгих, В.П. Анализ методов моделирования забойных углепотоков / В.П. Долгих // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сборник тезисов докладов III Международной научно-технической конференции. – Алчевск: ДонГТУ, 2018. – С. 56-56.

13. Долгих, В.П. Анализ уточненной методики тягового расчета шахтных ленточных конвейеров / В.П. Долгих // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых: сборник тезисов докладов научно-практической конференции. – Алчевск: ДонГТУ, 2019. – С. 21-22.

АННОТАЦИЯ

Долгих В. П. Разработка метода расчета ленточных конвейеров на основе моделирования процессов силового взаимодействия ленты с роликоопорами. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) – ГОУ ВО ЛНР «Донбасский государственный технический институт». – Алчевск, 2020.

В диссертационном исследовании разработаны модель системы «груз-лента-роликоопоры» и новый метод расчета сопротивления движению ленточных конвейеров с учетом взаимодействия ленты с роликоопорами. Приведенный метод позволяет учитывать влияние на сопротивление движению комплекса физико-механических свойств ленты и груза, их погонной массы, а также поддающихся управлению режимных параметров конвейера: натяжения и скорости тягового органа.

В результате применения нового метода расчета установлены квадратичные зависимости сопротивления движению ленты при прохождении ею роликоопоры от погонной массы груза, натяжения и скорости ленты, а также возрастающие квадратичные зависимости отношения весовой нагрузки, приходящейся на средний ролик роликоопоры, к весовой нагрузке, приходящейся на боковые ролики, от показателя загрузки конвейерного става над этой роликоопорой.

Точность тягового расчета ленточного конвейера 1Л800 по новой методике при значениях скорости, равных 2, 1 и 0,5 м/с, повышается, если сравнивать с точностью расчетов по типовой методике, соответственно, на 5,4, 29,6 и 48,7 %.

Обоснована целесообразность регулирования скорости конвейера при поступлении на него шахтных углетококов и уточнено среднее значение потребляемой приводом мощности (например, для типичных условий эксплуатации конвейера 1Л800 – на 22 %).

Результаты исследования изложены в 13 научных статьях.

Ключевые слова: конвейер, лента, роликкоопера, напряженно-деформированное состояние, сопротивления движению ленты, метод расчета, режимные параметры, методика тягового расчета, грузопоток, имитационное моделирование, потребляемая мощность.

SUMMARY

Dolgih V. P. Development of the calculating method for belt conveyors through modeling the processes of force interaction between the belt and roller supports. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.02.13 - Machines, units and processes (by industry) - SEI HE LPR «Donbass State Technical Institute». - Alchevsk, 2020.

The thesis was developed the model of the «cargo-belt conveyor-roller supports» system and a new method for calculating the resistance of belt conveyors motion, considering the interaction of the belt with roller supports. Presented method allows taking into account the influence of physical and mechanical properties of the belt and cargo, their bulk weight, as well as manageable operating parameters of the conveyor (tension and speed of the traction piece) on the resistance to motion.

As a result of applying the new calculation method established quadratic dependence of the resistance to motion of the belt when passing the roller supports on the load bulk weight, belt tension and speed, and an increasing quadratic dependences of the weight load on the middle roller of roller supports to the weight load on the side rollers on the rate of conveyor line loading on this roller support.

The accuracy of traction calculation of the 1Л800 belt conveyor according to the new method at speed values equal to 2, 1 and 0.5 m/s increases, if compared with the accuracy of calculations according to the standard method, respectively, by 5,4, 29,6 and 48,7 %.

Justified the expediency of regulating conveyor speed when coal mine flows enter and updated the average value of driver power consumed (for example, in typical operating conditions for 1Л800 conveyor by 22 %).

The results of the research are presented in 13 scientific articles.

Key words: conveyor, belt, roller support, stress-strain state, resistance to belt motion, calculation method, operating parameters, method of traction calculation, cargo flow, simulation modeling, power consumption.