

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт горного дела, геологии и геотехнологий

Кафедра «Горные машины и комплексы»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
А.В. Гилев  
« 14 » 04 2017 г.

## ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

21.05.04 «Горное дело»  
(специальность)

21.05.04.09 «Горные машины и оборудование»  
(специализация)

Разработка исследовательского стенда по определению сопротивления  
вращению конвейерных роликов  
тема

Руководитель

Кафл 9.02.17.  
подпись, дата

В.А. Карепов

Выпускник

Артун 09.02.17г  
подпись, дата

П.Н. Уаров

Консультанты:

Экономическая часть

А.Д. 27.01.17г.  
подпись, дата

А.Д. Бурменко

Безопасность  
жизнедеятельности

Капч 1.02.17  
подпись, дата

Н.М. Капличенко

Нормоконтролер

Кафл 9.02.17  
подпись, дата

В.А. Карепов

Красноярск 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Виды трения, коэффициенты трения.....	6
1.1 Сухое трение.....	6
1.2 Гидравлическое трение.....	9
1.3 Смазки и область применения смазок.....	11
1.4 Износ и его виды.....	22
1.5 Основные направления снижения износа машин и механизмов путем решения трибологических проблем в промышленности и на транспорте.....	34
1.6 Примеры применения эффекта безызносности в промышленности и на транспорте.....	44
2. Сопротивление движению ленты конвейеров, доля роликов.....	53
2.1 Конструкция и классификация конвейеров.....	54
2.2 Определение сопротивлений движению ленточном конвейере.....	59
2.3 Определение распределенных сопротивлений движению ленты на прямолинейных участках трассы ленточного конвейера.....	63
3. Программа - методика проведения экспериментальных исследований.....	69
3.1 Лабораторная работа.....	69
3.2 Возможность исследовательских работ.....	70
3.2.1 Исследования различных подшипников и смазок.....	70
3.3 Определение сопротивления роликов от вдавливания в ленту и от деформирования груза и ленты.....	72
4. Результаты проведенных экспериментов.....	74
5. Методические указания к проведению лабораторной работы.....	75
6. Экономическая часть.....	77
6.1 Сетевая модель выполнения работы.....	77
6.2 Исходные данные для расчета.....	86

6.3 Смета затрат на изготовление макета.....	89
7. Безопасность жизнедеятельности.....	92
Заключение.....	96
Список использованных источников.....	97

## **Введение**

Улучшение конструкции, а вместе с ним и методика расчета ленточных конвейеров являются актуальными, так как влияют на сопротивление возникающее для перемещения ленты и груза на ней и как следствие на мощность привода конвейера. Одним из элементов оборудования конвейера, влияющими на общее сопротивление движения ленты конвейера, являются поддерживающие ленту опорные ролики, а особенно большое влияние они оказывают при значительной длине конвейера.

В настоящее время применяются стандартные ролики с подшипниками скольжения и качения. В расчетах применяются коэффициенты трения отражающие неполную степень точности действительных значений. В планируемой работе предлагается изготовить стенд на котором можно будет провести исследовательские работы по определению коэффициенты трения роликов с подшипниками скольжения и качения в зависимости от скорости движения ленты, нагрузки на подшипнике и площади их контакта трущихся поверхностей. Результаты данных исследований на стенде позволят уточнить методику расчета сопротивлений вращению роликов по длине конвейера и в целом методику расчета ленточных конвейеров, кроме этого, данный стенд может быть использован на занятиях по лабораторным работам, касающимся конвейерного транспорта.

В перспективе работы данного направления с использованием стенда, могут расширяться для определения и применения смазочных материалов для определенных типов подшипников.

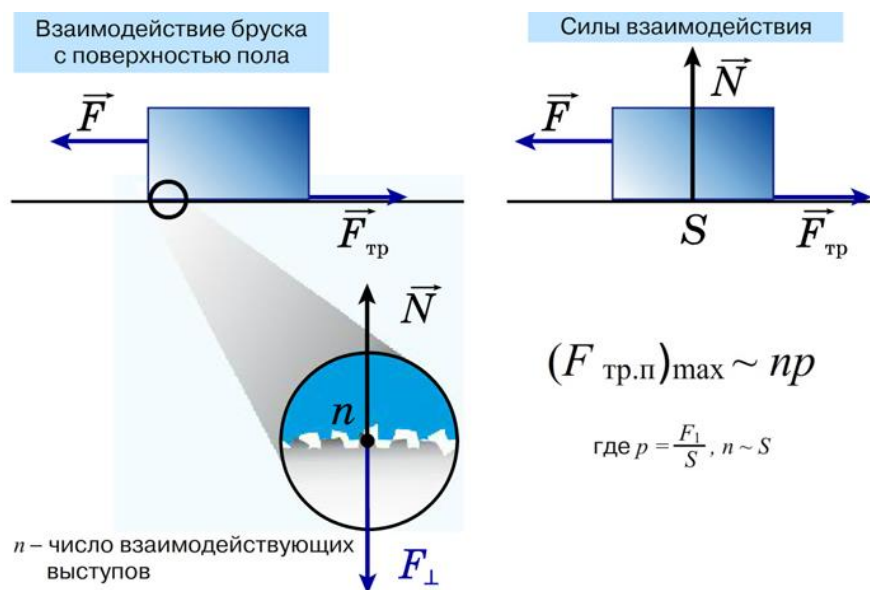
Для выполнения работы необходимо будет выполнить проектирование и разработку конструкторской документации для изготовления стенда и изготовить стенд в натуральную величину, определить его технические характеристики, а для выполнения исследовательских работ в зависимости от

их вида, разработать методику выполнения и методические обеспечения для выполнения лабораторной работы студентами.

## 1. Виды трения, коэффициенты трения

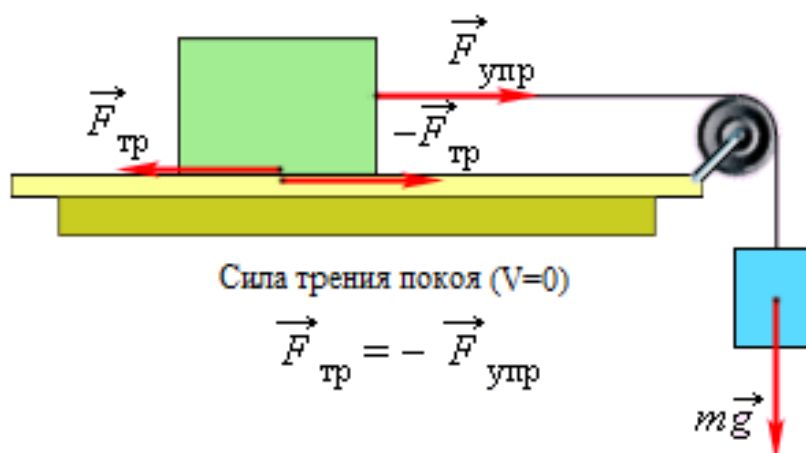
### 1.1 Сухое трение

**Трение** – один из видов взаимодействия тел. Оно возникает при соприкосновении двух тел. Трение, как и все другие виды взаимодействия, подчиняется третьему закону Ньютона: если на одно из тел действует сила трения, то такая же по модулю, но направленная в противоположную сторону сила действует и на второе тело. Силы трения, как и упругие силы, имеют электромагнитную природу. Они возникают вследствие взаимодействия между атомами и молекулами соприкасающихся тел или наличия неровностей и шероховатостей.

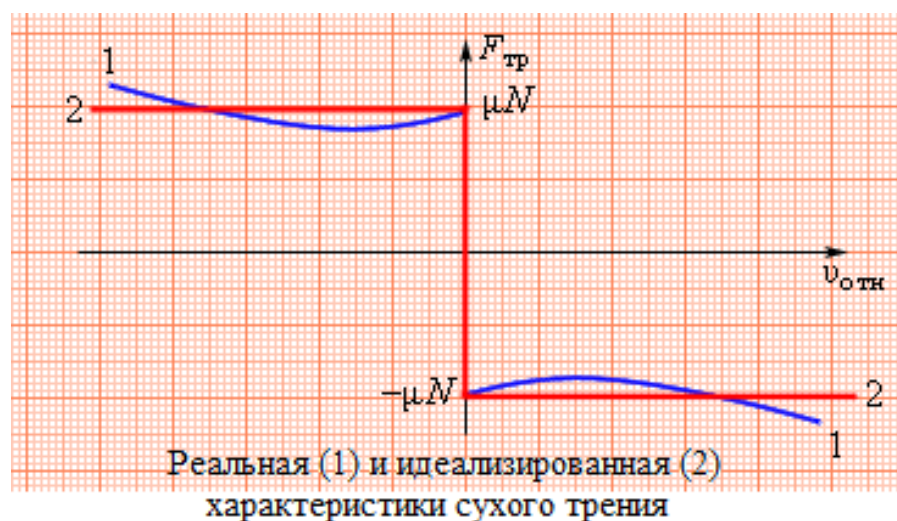


**Силами сухого трения** называют силы, возникающие при соприкосновении двух твердых тел при отсутствии между ними жидкой или газообразной прослойки. Они всегда направлены по касательной к соприкасающимся поверхностям.

Сухое трение, возникающее при относительном покое тел, называют **трением покоя**. Сила трения покоя всегда равна по величине внешней силе и направлена в противоположную сторону.



Сила трения покоя не может превышать некоторого максимального значения  $(F_{\text{тр}})_{\text{max}}$ . Если внешняя сила больше  $(F_{\text{тр}})_{\text{max}}$ , возникает относительное проскальзывание. Силу трения в этом случае называют **силой трения скольжения**. Она всегда направлена в сторону, противоположную направлению движения и, вообще говоря, зависит от относительной скорости тел. Однако во многих случаях приблизительно силу трения скольжения можно считать независимой от величины относительной скорости тел и равной максимальной силе трения покоя. Эта модель силы сухого трения применяется при решении многих простых физических задач.

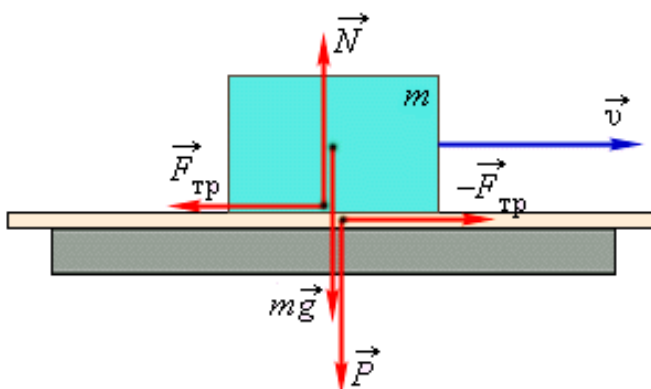


Опыт показывает, что сила трения скольжения пропорциональна силе нормального давления тела на опору, а следовательно, и силе реакции опоры  $\vec{N}$ .

$$F_{\text{тр}} = (F_{\text{тр}})_{\text{max}} = \mu \cdot N \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности  $\mu$  - называют **коэффициентом трения скольжения**.

Коэффициент трения  $\mu$  – величина безразмерная. Обычно коэффициент трения меньше единицы. Он зависит от материалов соприкасающихся тел и от качества обработки поверхностей. При скольжении сила трения направлена по касательной к соприкасающимся поверхностям в сторону, противоположную относительной скорости.



Силы трения при скольжении ( $v \neq 0$ ).  $\vec{N}$  – сила реакции опоры,  $\vec{P} = -\vec{N}$  – вес тела,  $F_{\text{тр}} = \mu N$

Таблица 1- Характерные значения коэффициентов трения для некоторых эталонных поверхностей

Сталь по стали	0,16	Целлофан по резине	0,95
Железо по железу	0,44	Сталь по льду	0,014
Кожа по чугуну	0,2-0,4	Лед по льду	0,05
Резина по чугуну	0,5-0,8	Смазанные лыжи при 0 <sup>0</sup> С	0,04
Дерево по дереву	0,4	при -3 <sup>0</sup> С	0,09
Резина по асфальту	0,6-0,8	при -10 <sup>0</sup> С	0,18
Целлофан по бумаге	0,45	при -40 <sup>0</sup> С	0,40

На практике из-за различной степени обработки, особенностей структуры поверхности и загрязненности реальные значения, как правило, отличаются от табличных на 10–30% и определяются экспериментально.

Видно, что обычно  $\mu$  редко выходит за границы диапазона 0,2–0,80,2–0,8. Но в этом стереотипе кроется ловушка. Теория не запрещает коэффициенту трения быть больше 11 (тело легче поднять, чем тянуть). Такое бывает, например, на липких и шершавых поверхностях (лейкопластырь, скотч, наждачная бумага, некоторые сорта резины).

## 1.2 Гидравлическое трение

**Гидравлическим сопротивлением** называют потери удельной энергии при переходе ее в теплоту на участках гидравлических систем, которые вызваны вязким трением.

При этом эти потери делят на:

- потери, возникающие при равномерном течении вязкой жидкости по прямой трубе, имеющей постоянное сечение. Это так называемые, потери на трение по длине, которые пропорциональны длине трубы. Сопротивление по длине вызвано силами вязкого трения;
- потери, которые порождаются местными гидравлическими сопротивлениями, например, изменение формы или (и) размера канала, которые изменяют поток. Эти потери называют местными. Местные



сопротивления объясняются изменениями скорости потока по модулю и направлению.

Потери в гидравлике измеряют в единицах длины, когда говорят о потере напора ( $\Delta h$ ) или в единицах давления ( $\Delta p$ ).

**Коэффициент Дарси при ламинарном движении жидкости.** Если жидкость по трубе течет равномерно, то потери напора по длине ( $h_l$ ) находят при помощи формулы Дарси — Вейсбаха. Эта формула является справедливой для круглых труб:

$$h_l = \lambda \frac{v^2}{2gd} \quad (2)$$

где  $\lambda$  — коэффициент гидравлического сопротивления (коэффициент Дарси),  $g$  — ускорение свободного падения,  $d$  — диаметр трубы.

Коэффициент гидравлического сопротивления ( $\lambda$ ) величина безразмерная. Этот коэффициент связан с числом Рейнольдса. Так для трубы в виде круглого цилиндра коэффициент гидравлического сопротивления считают равным:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

При ламинарном течении для нахождения гидравлического трения при  $Re < 2300$  применяют формулу:

$$\lambda = \frac{75}{Re} \quad (4)$$

Для труб, поперечное сечение которых отличается от круга коэффициент гидравлического трения принимают равным:

$$\lambda = \frac{A}{Re} \quad (5)$$

где  $A=57$ , если сечение канала квадрат. Все приведенные выше формулы справедливы при ламинарном течении жидкости.

**Коэффициент гидравлического сопротивления при турбулентном течении.** Если течение является турбулентным, то аналитического

выражения для коэффициента сопротивления нет. Для такого движения жидкости коэффициент сопротивления как функцию от числа Рейнольдса получают эмпирически. Для круглой цилиндрической гладкой трубы рассматриваемый коэффициент при  $3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^5$  рассчитывается по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (6)$$

При турбулентном движении жидкости коэффициент гидравлического трения зависит от характера движения (числа Рейнольдса) и от качества (гладкости) стенок труб. Шероховатость труб оценивают при помощи некоторого параметра, который носит название абсолютной шероховатости ( $\Delta$ ).

### **Местные сопротивления**

Местные сопротивления порождают изменения модуля и направления скорости движения жидкости на отдельных участках трубы, и это связывается с дополнительными потерями напора.

Коэффициентом местного сопротивления называют безразмерную физическую величину, часто обозначаемую как  $\xi$ , равную отношению потери напора в рассматриваемом местном сопротивлении ( $h_{ms}$ ) к скоростному напору ( $\frac{v^2}{2g}$ ):

$$\xi = h_{ms} / \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

Величину  $\xi$  определяют экспериментально.

Если скорость течения жидкости во всем сечении постоянна и равна  $v$ , то коэффициент местного сопротивления можно определить как:

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho v^2} \quad (8)$$

где  $\rho v^2$  — энергия торможения единицы объема потока относительно трубы.

Гидравлические потери давления из-за местных сопротивлений приравнивают к эквивалентным сопротивлениям по длине трубы и общие сопротивления определяют по приведенной длине трубы.

### **1.3 Смазки и область применения смазок**

Смазку получают путем добавления к смазочному маслу (дисперсионной среде) загустителя, способного образовывать “каркас”. В качестве дисперсионной среды смазок, применяемых в автомобиле, обычно берут мало-и средневязкие нефтяные смазочные масла, например, для солидола — индустриальные (в том числе машинное СУ), для Литола-24 смесь веретенного АУ и Индустриального-50. В качестве загустителя чаще всего применяют соли жирных кислот—мыла. По массе загуститель составляет обычно 10...20%. Смазка может иметь присадки для предотвращения окисления, повышения стабильности, улучшения вязкостно-температурных свойств и др., причем присадки могут содержать масло, на котором смазка готовится. Например, для повышения низкотемпературных свойств может использоваться маловязкое масло с жидкой загущающей присадкой или деспрессатором.

Кроме присадок в смазку может добавляться твердый наполнитель, который в отличие от загустителя не образует “каркаса”. Наполнитель—чаще всего чешуйчатый графит или дисульфид молибдена—улучшает антифрикционные свойства смазки.

Вода в смазке может быть составной частью или содержаться в качестве примеси. Присутствие воды в большинстве смазок (литиевых, алюминиевых, свинцовых, комплексных кальциевых и др.) не допускается, но в кальциево-натриевых смазках вода играет роль структурообразующего компонента и уменьшение ее содержания приводит к распаду смазки. Содержание воды в этих смазках колеблется от 0,5 до 5%, причем присутствие воды в данном случае никак не сказывается на коррозионных свойствах смазки.

## **Свойства смазок**

Поведение смазки гораздо сложнее, чем смазочного масла, поэтому для всесторонней оценки эксплуатационных качеств нужно рассматривать достаточно большое количество свойств.

Смазка как твердое тело характеризуется пределом прочности, а как жидкость—вязкостью.

**Прочность** смазки должна быть достаточной, чтобы смазка не сбрасывалась с движущихся деталей, не вытекала из узлов трения. Но с другой стороны, слишком прочная смазка плохо, а то и совсем не будет поступать в зону контакта трущихся пар, будет приводить к заеданию, например, таких узлов, как замки дверей, багажника, капота. Чем ниже предел прочности, тем мягче смазка.

**Вязкость** характеризует поведение смазки, когда она течет. В отличие от смазочного масла, вязкость которого при определенной температуре— величина постоянная, вязкость смазки сильно зависит от скорости деформации: с увеличением ее она понижается. Это-положительное явление, так как оно снижает энергетические потери в подшипниках качения: моменты трения в подшипнике при работе на смазке и на масле мало отличаются.

**Теплостойкость и морозостойкость.** Когда достигается температура каплепадения, смазка как твердое тело перестает существовать. Но некоторые смазки уже при меньшей температуре распадаются на масло и загуститель, другие—при нагревании и последующем охлаждении из-за химических превращений, окисления или испарения термоупрочняются, т. е. предел прочности недопустимо увеличивается и они теряют смазочные свойства. Морозостойкость смазки определяется способностью ее при низкой температуре восстанавливать свой “каркас”, а также течь, т. е. не застывать. При более низкой температуре смазка либо не позволит движущимся парам взаимно перемещаться, либо при приложении больших усилий расслоится и не будет проникать в зону контакта.

**Механическая стабильность** — это способность смазки сохранять свои свойства после деформации. После интенсивного деформирования свойства смазки меняются: у большинства смазок понижается предел прочности — происходит разупрочнение. Затем в течение некоторого времени — периода “отдыха” — предел прочности постепенно увеличивается, однако иногда он не достигает исходной величины, а иногда, наоборот, ее превосходит, происходит тикстропное упрочнение смазки. Изменение свойств зависит как от интенсивности, так и от продолжительности воздействия. В условиях эксплуатации необратимое разрушение смазки может произойти и в течение часов, и в течение месяцев.

Механически нестабильную смазку нельзя применять в недостаточно герметичных узлах.

**Физико-химическая стабильность.** Нарушение состава и свойств смазки может происходить в результате испарения или самопроизвольного выделения дисперсионной среды (физическая нестабильность) или окисления (химическая нестабильность).

**Водостойкость.** Водостойкая смазка не растворяется в воде, не смывается водой с поверхности, не поглощает воду, не вступает с ней в реакцию, а благодаря высоким водоотталкивающим свойствам не позволяет воде проникать в зону контакта трущихся поверхностей.

**Адгезия**—молекулярная связь, возникающая между поверхностью твердого тела и нанесенной на него смазкой. Смазка с хорошей адгезией—липкая, ее трудно стереть или смыть с поверхности.

**Противозадирные свойства** обусловлены способностью смазки предотвращать заедание и задиры трущихся поверхностей при высоких удельных нагрузках.

**Противоизносные свойства** определяются способностью смазки снижать износ трущихся поверхностей при невысоких удельных нагрузках. Далеко не всегда смазки, имеющие хорошие Противоизносные свойства, предотвращают возникновение задиров. На Противоизносные свойства

больше влияет дисперсионная среда, а на Противозадирные—состав смазки, в частности присутствие наполнителя.

**Противокоррозионные свойства** определяются отсутствием коррозионного действия смазки на металлические поверхности, а консервационные (защитные) свойства—способностью предохранять металлические поверхности от коррозионного действия внешней среды.

### **Типа и марки смазок**

Эксплуатационные свойства смазок главным образом определяются видом загустителя, который и дает название типу смазки. Большинство смазок для узлов трения загущают мылами—солями жирных кислот различных металлов, причем соль может быть обычная, а может быть комплексная. Практически используются мыла кальциевые, литиевые, натриевые, бариевые и алюминиевые. Кроме мыла в качестве загустителя применяют углеводороды и (редко) пигменты. Зная тип смазки, можно уже многое сказать о ее применении.

**Кальциевые смазки** называются **солидолами**. Это наиболее распространенные пока у нас в стране смазки благодаря своей дешевизне и удовлетворительным эксплуатационным характеристикам. Они могут применяться и в узлах трения, и как консервационные. Солидолы бывают синтетическими и жировыми. Жировые солидолы менее склонны к упрочнению при хранении и к тикстропному упрочнению при их “отдыхе” после разрушения, что делает их применение более предпочтительным. Однако по внешнему виду их почти невозможно отличить: и те, и другие представляют собой мягкую маслянистую мазь от светлого до темно-коричневого цвета. От смешивания разных марок солидолов (например, при добавлении смазки в узел) их свойства не ухудшаются. Солидолы выпускаются двух разновидностей — обычные и пресс-солидолы. Пресс-солидолы мягче, что облегчает их заправку через пресс-масленки при низкой температуре, но снижает верхний температурный предел применения. При нагревании примерно до 80° С солидолы необратимо распадаются, и это

делает невозможным их применение в таких узлах автомобиля, как, например, ступицы передних колес, подшипники водяного насоса, распределитель зажигания.

К солидолам относится также графитная смазка УС (А—грубая плотная мазь с серебристым оттенком. Она изготавливается на более вязком масле, чем солидол С, и в ее состав входит около 10% наполнителя— графита П грубого помола.

**Комплексные кальциевые смазки** по сравнению с солидолами термически стабильны, обладают высокими противозадирными свойствами, но склонны к термоупрочнению и гигроскопичны (хранить их надо в герметичной таре). К этим смазкам относятся униолы, которые по внешнему виду очень похожи на солидол.

Смазка Униол-1 может применяться в качестве единой автомобильной смазки взамен 1-13, ЯНЗ-2, технического вазелина и др., однако в узлах трения требует более частой замены, чем Литол-24.

Смазки Униол-3 и Униол-3М отличаются от Униола-1 тем, что готовятся не на масле МС-20, а на маловязкой смеси масел. Это делает их низкотемпературными смазками, которые целесообразно применять в северных и северо-восточных районах при круглогодичной эксплуатации. В Униол-3М добавлен в небольшом количестве дисульфид молибдена, что несколько повышает противозадирные и противоизносные свойства этой смазки.

**Натриевые и натриево-кальциевые смазки** обязаны своему распространению довольно высокой температуре плавления. Однако область их распространения ограничена, так как они неводостойки—растворяются в воде, хорошо смываются водой с поверхностей и т. д. Некоторые из них склонны к термоупрочнению и поэтому не могут длительное время обеспечивать работоспособность при повышенной температуре, например, в ступицах передних колес автомобилей с дисковыми тормозами, где

температура может повышаться до 100° С и более. Постепенно вытесняются другими смазками.

Смазка 1-13 и жировые консталины УТ-1 и УТ-2 по внешнему виду неотличимы: представляют собой зернистые желтоватые мази. Консталины отличаются от 1-13 отсутствием кальциевого мыла. Эксплуатационные свойства их практически одинаковы. По современным меркам—это устаревшие смазки, и их производство постепенно прекращается.

Смазка ЯНЗ-2 гладкая, мягкая, коричневая или черная мазь, более мягкая, чем 1-13, обладает лучшей смазывающей способностью, более водостойка, менее склонна к термоупрочнению, но все же уступает Литолу-24.

Смазка АМ—липкая, длинноволокнистая мазь светлого или темно-коричневого цвета создана специально для шаровых шарниров кардана постоянной угловой скорости ведущих осей автомобиля. Но при применении в этих шарнирах Литола-24, Униола-1 или Униола-2М изнашивание снижается, а смазку можно заменять в пять раз реже. Поэтому смазку АМ применяют все реже.

Все перечисленные натриевые смазки не могут применяться для шаровых шарниров подвески и рулевого управления, так как не исключается попадание в шарниры воды.

Единственная в своем роде смазка КСБ — гладкая желто-золотистая мазь, в которую для обеспечения токо-проводности добавляют чешуйки меди. Применяется для смазки контактов переключателя поворотов и замка зажигания и ничем заменена быть не может.

**Литиевые смазки** с каждым годом получают все большее распространение во всем мире благодаря своим ценным эксплуатационным качествам. Во многом они отвечают требованиям, предъявляемым к идеальной смазке. Первой среди них стоит чудо-смазка Литол-24 — мягкая мазь вишневого, реже коричневого цвета. Она может применяться как единая смазка для всех основных узлов трения автомобиля взамен практически всех



смазок. Кроме того, Литол-24 обладает хорошими консервационными свойствами.

Фиол-3 — мягкая зеленая мазь практически идентична Литолу-24 и допускает смешивание с ним.

Фиол-1 — очень мягкая зеленая смазка, также близка по составу к Литолу-24, но имеет меньшую вязкость, меньший предел прочности и лучшую морозостойкость.

Фиол-2 — промежуточная смазка между Фиолом-3 и Фиолом-1.

Фиол-2М — серебристо-черного цвета, отличается от Фиола-2 наличием адгезионной присадки и наполнителя—около 2% сульфида молибдена.

Северол-1 — мягкая желтая или светло-коричневая высококачественная смазка, близкая по составу к Литолу-24, но с антиокислительной и противоизносной присадками. Может заменить почти все смазки, применяемые в автомобиле, но делать такую замену целесообразно в холодных районах.

ЦИАТИМ-201—мягкая желтая или светло-коричневая мазь. Применяется в узлах всех типов при небольших удельных нагрузках и там, где требуется небольшое усилие сдвига, например, в гибком вале спидометра.

ЛСЦ-15—несменяемая высококачественная автомобильная смазка, которая отличается от Литола-24 и фиолов наличием антиокислительной присадки. Обладает высокой адгезией, водостойкостью, консервационными свойствами. Можно смешивать с Литолом-24 и фиолами.

ЛЗ-31 — специальная несменяемая, очень стабильная смазка для выжимного подшипника сцепления некоторых автомобилей. Она неводостойка, так как готовится на сложных эфирах, а не на нефтяном масле. Полноценной по стабильности замены нет.

**Бариевые смазки** несколько уступают литиевым по температурным характеристикам, не превосходят их по водостойкости. У нас выпускается

комплексная бариевая смазка ШРБ-4 — слегка волокнистая, желтая, липкая мазь. Она хорошо защищает от коррозии, сохраняет высокую работоспособность в присутствии воды, не оказывает вредного влияния на резину

ШРУС-4 — длинноволокнистая желтая или коричневая мазь, созданная специально для применения в шарнирах равных угловых скоростей автомобилей. Прогрессивным типом смазок, которые находят применение за рубежом, являются комплексные **алюминиевые смазки**. Их стоимость не превышает стоимости солидолов, в то же время они имеют высокую механическую, термическую и физико-химическую стабильность, высокую адгезию и очень высокую водостойкость

**Углеводородные смазки** имеют очень высокую водостойкость и консервационную способность и поэтому применяются как консервационные.

**Быстро и удобно.** Несколько лет назад разработано и появилось в продаже новое смазочное средство “Унисма-1”, которое неправильно назвали универсальной смазкой. В действительности в состав “Унисмы-1” входит масло, специальные растворители, ингибиторы коррозии и другие специальные добавки. Ее основная особенность—исключительно высокая проникающая способность, причем при этом она вытесняет воду. Если добавить, что смазочное средство обладает хорошим смазывающим и противозадирным свойствами, становится очевидно, что его можно с успехом применять в разных случаях и вместо масла, и вместо смазок.

### **Применение смазок**

По назначению делятся на:

- Моторные масла, которые применяются в ДВС;
- Редукторные и трансмиссионные масла, применяются в коробках передач и зубчатых передачах;
- Гидравлические масла применяются в гидравлических системах в качестве рабочей жидкости;

- Пищевые масла и жидкости. Такие материалы используются в оборудовании, предназначенном для производства пищи и упаковки;
- Индустриальные масла — применяются в различных машинах и механизмах для консервации, смазывания, охлаждения, уплотнения, выноса отходов обработки и т.д.;
- Электропроводящие смазки, или пасты. Используются для защиты от коррозии электрических контактов, а так же понижения переходного сопротивления контактов;
- Консистентные смазки (пластичные). Применяются в узлах, где конструктивно невозможно использование жидких смазочных материалов.

**Подшипники качения.** Долговечность подшипника качения, помимо нагрузки и частоты вращения, определяется правильным подбором смазки, а для регулируемых подшипников, кроме того— регулировкой.

Пластичные смазки лучше, чем масла, работают в таких узлах, как ступицы колес, поэтому в автомобилях подшипники задних колес смазываются смазкой, хотя довольно просто было бы решить вопрос о смазке их маслом, находящимся в заднем мосту. Масло и приготовленная на его основе смазка обеспечивают практически одинаковое сопротивление вращению подшипника. Однако смазка хуже, чем масло, отводит тепло, и подшипник, смазываемый смазкой, нагревается. Нагрев зависит от частоты вращения.

У нормального подшипника дорожка качения гладкая, блестящая. Если подшипник изрядно поработал, на ней может появиться розоватый или коричневатый налет — тончайшая пленка—результат так называемого окислительного изнашивания. Такой подшипник вполне работоспособен, так как окислительное изнашивание развивается очень медленно. У старого подшипника дорожка становится матовой - подшипник пора заменять.

Если смазка подобрана неправильно или ее недостаточно, на дорожке качения образуется стекловидный блестящий след. При дальнейшей работе

поверхность дорожки становится шероховатой, а затем начинает шелушиться.

Работа начавшего разрушаться подшипника сопровождается повышенным тепловыделением. Если узел с таким подшипником по всем правилам отрегулировать, то из-за теплового расширения внутреннего кольца подшипник может заклинить.

Теплостойкость — основное требование, предъявляемое к смазкам.

При сборке важно правильно дозировать смазку, закладываемую в подшипниковый узел. Обычно только 5% смазки находится в самом подшипнике, а на беговой дорожке — всего около 1 %, и это количество обеспечивает многолетнюю работу подшипника. Когда после сборки подшипник начинает работать, смазка вытесняется с дорожек качения. Например, из роликовых конических подшипников выдавливается около 40% смазки, из шариковых—от 10 до 30%. Если узел плотно забит смазкой, вытеснение ее излишка затрудняется. Это вредно: увеличиваются энергетические потери, повышается температура узла. Интенсивное перемешивание механически нестабильной смазки приводит к ее тикстропному упрочнению, и затвердевшая смазка перестает поступать в зону трения. Более того, нагревшаяся смазка расширяется и, не находя выхода, пробивает уплотнение и выдавливается наружу. Охлаждаясь, она втягивается обратно вместе с успевшей прилипнуть к ней пылью. Поэтому при заполнении полости подшипника смазкой следует поступать так: полностью заполнить смазкой пространство до торцов колец подшипника.

**Шаровые шарниры.** Ресурс шаровых шарниров подвески и рулевого управления зависит от трех факторов: категории (ровности) дороги, герметичности и применяемой смазки.

Шаровые шарниры подвески и рулевого управления по сравнению с другими узлами трения находятся в роли “мучеников”: их обильно “поливают” грязной водой, “посыпают” песком и пылью, “кидают” в них камни, а иногда “с головой” погружают в воду. Единственное утешение—их

не нагревают. В этих условиях пары трения негерметизированных (точнее — полугерметизированных) шарниров с пресс-масленками более уязвимы. Поэтому сейчас повсеместно переходят на герметизированные шарниры.

Обеспечение герметичности шарниров при эксплуатации— вот основное требование, определяющее долговечность. По сравнению с этим требованием подбор смазки хоть и не безразличен, но все же отступает на второй план.

В отличие от подшипника качения шаровой шарнир должен быть забит смазкой полностью, так как это способствует и сохранению герметичности, и защите деталей от коррозии, и увеличению срока службы смазки, которая здесь деформируется почти в полном объеме.

**Карданные шарниры.** В карданных шарнирах установлены игольчатые подшипники. Каждая иголка-ролик при работе перекачивается взад-вперед в очень небольших пределах. В этих условиях смазка играет не столько разъединяющую, сколько защитную роль. Раньше карданные шарниры смазывали трансмиссионным маслом, но оно требовало частого наполнения. Оказалось, что смазка ничуть не хуже справляется с этой функцией, однако для того, чтобы ее не надо было заменять вплоть до ремонта, от нее требуется высокая физико-химическая стабильность и водостойкость: ведь попадание воды в карданный шарнир тоже не исключается.

Смазывание карданного шарнира нужно производить только при смене крестовины, на шипах которой иголки со временем выбивают лунки и в сочленении появляется люфт. А вообще лучше заменять карданный шарнир целиком, вместе с корпусами подшипников, сохраняя заложенную туда специальную смазку (это не обязательно будет смазка № 158). Смазка, закладываемая в корпус перед сборкой, должна только покрывать иголки. Если ее будет больше, то при монтаже будет повреждена уплотнительная манжета. Другие узлы трения. Они не столь ответственны, как подшипники и шарниры, но тем не менее также требуют внимания к себе. В каждом

конкретном, случае нужно смотреть, как узел работает, чтобы подобрать нужную смазку. Например, пары трения оборудования кузова. Многие из этих деталей склонны к заеданию, так как они не закаляются до высокой твердости и не имеют высокой чистоты обработки. Следовательно, их надо смазывать смазкой, предотвращающей задиры. Большинство из них не герметизированы, не защищены от влаги и пыли, поэтому смазка должна обладать высокой механической и физико-химической стабильностью. Если детали пары трения перемещаются под действием пружины (например, защелка замка) и такие детали смазать слишком прочной смазкой, то усилия пружины не хватит, чтобы вернуть детали в исходное положение.

#### **1.4 Износ и его виды**

**Износ** — изменение размеров, формы, массы твердых тел или состояния их поверхностей вследствие либо остаточной деформации от постоянно действующих нагрузок, либо разрушения поверхностного слоя при трении.

В соответствии с ГОСТ 27674-88 **изнашивание** классифицируется как процесс отделения материала с поверхности твердого тела и увеличения его остаточной деформации.

**Износостойкость (износоустойчивость)** — сопротивление материалов деталей машин и других трущихся частей износу. Износостойкость оценивается, например, уменьшением массы литой детали за время работы, ее линейных размеров или изменением объема детали.

Следует отметить, что изнашивание — это прежде всего процесс взаимодействия поверхностей, который сопровождается не только их микрорезанием, деформированием и нагреванием, но также и изменением механических свойств, структуры, фазового состава и химической активности поверхностных слоев.

В процессе длительного воздействия на поверхность детали микро- и макроскопических абразивных частиц происходит износ, оцениваемый по

уменьшению размеров, объема, массы деталей в абсолютных или относительных единицах. Износ, отнесенный к пути трения, объему выполненной работы, работе трения и т.д., является показателем интенсивности изнашивания.

Износ и интенсивность изнашивания определяют и по другим косвенным признакам. Чаще всего под износом принято понимать постоянное срабатывание поверхности деталей в результате процесса трения. Износ, отнесенный к промежутку времени процесса трения, определяет скорость изнашивания.

Практика эксплуатации машин и другого оборудования показывает, что большая его часть теряет работоспособность не вследствие поломок, а в результате износа отдельных деталей. Высказано мнение о необходимости исследования износа и сопутствующих процессов, реализующихся при трении, и показано, что взаимодействие поверхностей при трении проявляется в формировании дискретных контактов — пятен, в котором участвуют выступы и покрывающие их пленки, а также прилегающие к этим выступам соседние участки материала. Считается, что силы, приложенные к разным участкам пятен контакта, образующихся при относительном движении сопряженных поверхностей, неодинаковы, а температура материалов, даже в пределах площади контактов, различна. Это приводит к различной реакции локальных микрообъемов материалов при износе трением.

Принят ряд классификаций по видам износа при трении, построенных в основном на базе внешних условий и признаков процесса. Различают также четыре главные формы износа и несколько второстепенных (сопутствующих) процессов, которые часто классифицируются как самостоятельные виды износа.

К главным видам износа можно отнести следующие виды:

- **Адгезионный износ** возникает в условиях трения, когда два гладких тела скользят друг по другу и частицы материала, вырванные с одной

поверхности, прилипают к другой. Этот вид износа имеет место, когда атомы контактирующих поверхностей входят в близкий контакт. На площадях контакта при скольжении поверхностей всегда существует вероятность того, что из-за адгезионных сил разрушение этого контакта происходит не по первоначальной поверхности раздела одного материала, а внутри него.

- **Абразивный износ** возникает в условиях трения, когда более твердые шероховатые поверхности скользят по более мягким, царапают или пропахивают ее, образуя свободные частицы. Абразивный износ может возникнуть и тогда, когда твердые частицы попадают между поверхностями фрикционной связи и изнашивают их.
- **Коррозионный износ** имеет место, когда контакт поверхностей происходит в коррозионных средах. В процессе скольжения образующиеся на поверхности пленки разрушаются и коррозионное воздействие распространяется вглубь материалов.
- **Поверхностная усталость** наблюдается во время многократного скольжения или качения по одним и тем же поверхностям с непрерывно повторяющимися циклами нагружения и разгрузки. По ГОСТ 27674-88 различают механическое, коррозионно-механическое и электроэрозионное изнашивание, а изнашивание деталей машин и механизмов принято классифицировать по причинам, в соответствии с которыми различают механическое, коррозионно-механическое, абразивное, гидроабразивное, газообразивное, эрозионное, кавитационное, усталостное, окислительное, электроэрозионное изнашивание и фреттинг-коррозию. К основным явлениям и процессам при трении и изнашивании относятся: схватывание, перенос материалов, задираание, выкрашивание и отслаивание. Различают схватывание 1-го рода (холодный задир) и 2-го рода (горячий задир).



Установлено два наиболее решающих фактора, влияющих на процесс схватывания трущихся тел: их температура и нагрузка.

Начало процесса заедания может быть вызвано изменением различных факторов, например, увеличением скорости скольжения, нагрузки, температуры контактируемых поверхностей, уменьшением вязкости смазывающего материала и других факторов. В процессе заедания резко возрастает интенсивность изнашивания поверхностей, что приводит к росту динамических нагрузок и выходу из строя деталей узла. В обоих случаях заедания прекращается относительное перемещение и происходит заклинивание узла механизма. Однако в настоящее время отсутствует единое мнение о природе процесса заедания, что связано со сложностью явления и трудностями прямого экспериментального наблюдения за началом его возникновения и развития.

Предложена гипотеза, утверждающая, что при работе деталей и механизмов осуществляются два процесса: схватывание металлического сплава и окисление пластически деформированных поверхностных слоев с образованием растворов и химических соединений кислорода с материалами деталей по поверхности их взаимного контакта.

Распространена и теория износа пластичных металлических сплавов посредством отслаивания тонких «листочков» от поверхности детали в результате возникновения на определенной и примерно постоянной глубине остаточных напряжений, вызванных скоплением дислокаций, под воздействием другой детали, работающей в режиме скольжения.

Допуская, что изнашивание всей поверхности детали происходит равномерно, число циклов до разрушения, необходимое для аналитической оценки интенсивности износа, может быть определено из уравнения:

$$J = \xi \frac{b\varepsilon^{v+1}h_{max}}{(v+1)nd} \eta_c \quad (9)$$

где  $b$ ,  $v$  — параметры кривой опорной поверхности;  $\varepsilon$  — относительное сближение поверхностей;  $h_{max}$  — высота максимального выступа

истирающей поверхности;  $\xi$  — коэффициент, учитывающий влияние на величину площади фактического контакта упругих деформаций,  $0,5 \leq \xi \leq 1$ ;  $\eta_c$  — относительная контурная площадь, участвующая в процессе трения;  $d$  — средний диаметр единичного пятна контакта;  $n$  — число циклов до разрушения.

В настоящее время проведена экспериментальная проверка определения числа циклов до разрушения. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по интенсивности износа показывает хорошую сходимость результатов и позволяет сделать вывод о возможности использования аналитической оценки интенсивности износа, основанной на представлении об усталостном разрушении поверхностей для металлов, самосмазывающихся материалов, полимеров и других материалов.

В ряде случаев считают, что понятие усталостного износа как вида разрушения, при котором материал подвергается повторному действию сил, приводящих к накоплению в нем повреждений, может быть использовано и для анализа процесса, который классифицируется как адгезионный износ.

В основу классификации положен механизм отделения продуктов износа от поверхности. Основными видами износа являются адгезия или перенос, резание, коррозия, пластическая деформация и усталостное разрушение, а к специфическим видам износа относят растрескивание, поверхностные реакции, отрыв, расплавление и электрохимические реакции. К последним можно отнести и фреттинг-коррозию, которая происходит в болтовых и заклепочных соединениях.

<b>ВИД ИЗНОСА</b>	<b>ТИП ДВИЖЕНИЯ</b>	<b>НАГРУЗКА</b>
Промежуточное вещество жидкость		
При скольжении со смазкой При качении со смазкой При вращении со смазкой	Скольжение Качение Вращение	Постоянная или переменная
Промежуточное вещество газ		
При скольжении со смазкой При качении со смазкой При вращении со смазкой	Скольжение Качение Вращение	—
Промежуточное вещество твердое		
Абразивный при скольжении То же при качении То же при вращении	Скольжение Качение Вращение	—
Вызываемый струей: скользящей падающей под углом падающей перпендикулярно	Закрытое истечение	Параллельно к поверхности износа Под углом к поверхности износа Перпендикулярно
Кавитационный	Удары при захлопывании пузырьков с пониженным давлением	

Обусловленный ударами капель жидкости Ударный	Удары свободно движущихся капель жидкости Повторяющееся соударение двух твердых тел
--	--

Достаточно полная классификация износа при трении (табл. 2) дана в работе, в которой для характеристики видов износа в основу положен тип относительного движения контактируемых тел. По виду движения различают износ, вызываемый скольжением, качением и вращением. Нагрузка при движении может быть статической, переменной или ударной, а также равномерной или неравномерной.

С практической точки зрения важнейшее значение имеют два вида износа:

1. вызывается трением скольжения (рис. 1);
2. вызывается трением качения (рис. 2).

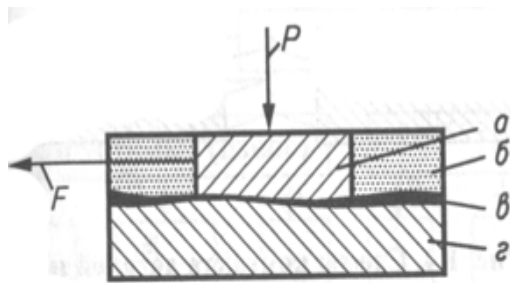


Рис. 1. Схема износа при трении скольжением:

$F$  – направление движения;  
 $P$  – усилие давления;  
 $a$  – контактирующее тело 1;  
 $б$  – окружающая среда;  
 $в$  – промежуточное вещество;  
 $z$  – контактирующее тело 2

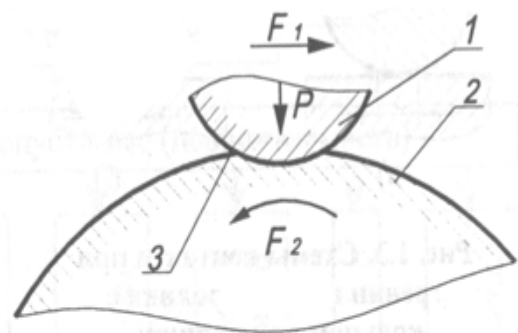


Рис. 2. Схема износа при трении качения:

$F_1$  – направление движения ролика 1;  
 $F_2$  – направление движения вала 2;  
 $3$  – упругая деформация при переменном нагружении;  
 $P$  – усилие давления

В процессе износа при скольжении материалы под действием напряжений работают на срез, а в процессе трения износа при качении

развиваются нормальные напряжения. При длительном нагружении под действием переменных давлений это приводит к выкрашиванию частиц на поверхности, т.е. образованию раковин (питтинга).

Если наряду с нормальными напряжениями развиваются также и касательные, то происходит проскальзывание, в наибольшей степени способствующее процессу износа. Нагружение, сочетающее скольжение и качение, возможно, например, в зубчатых передачах.

Износ при скольжении, вызываемый вращением, образуется в вершинах опор и в шаровых подпятниках. Это тот вид износа, при котором имеет место эффект вращения при относительном смещении соприкасающихся участков поверхности. Все три типа износа могут проявиться в смешанных формах.

Типичным примером ударного износа является износ колец седла клапана двигателя внутреннего сгорания. Ударный износ, как и износ, обусловленный трением качения, приводит к образованию питтинга.

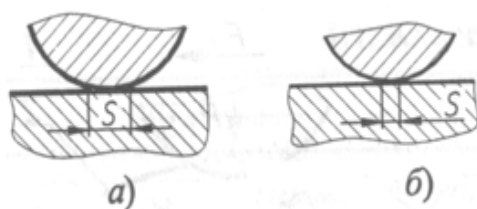


Рис. 3. Схемы контакта при трении качения ролика с кольцом при наличии граничной смазки (а) и без нее (б)

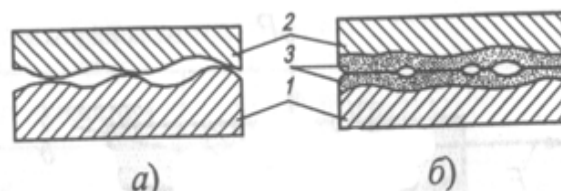


Рис. 4. Схемы контакта деталей при граничной смазке (а) и избирательном переносе (б):  
1 – сталь; 2 – бронза;  
3 – пленка меди

При обычном трении как без смазочного материала, так и при наличии граничной смазочной пленки детали контактируют на очень малой площади, составляющей 0,01 ... 0,0001 номинальной площади сопряженных поверхностей. В результате участки фактического контакта испытывают высокие напряжения, что приводит к их взаимному внедрению, пластической

деформации и интенсификации изнашивания. Схемы контакта при трении качения приведены на рис. 3, а на рис. 4 — схемы контакта стальной и бронзовой трущихся деталей при граничной смазке (рис. 3, а и рис. 4, а) и при избирательном переносе (ИП) (рис. 4, б). Если при граничной смазке контакт сопряженных поверхностей происходит только в отдельных точках, то при ИП он осуществляется через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой меди. В результате площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, а материал деталей испытывает лишь упругие деформации. При граничной смазке взаимодействие неровностей поверхностей вызывает усталостное изнашивание. При ИП трение непрерывное, площадки действительного контакта плоские. При трении с граничной смазкой и трении без смазочного материала поверхности деталей всегда покрыты окисными пленками (рис. 5), которые предотвращают непосредственный контакт металлических поверхностей и их схватывание. Однако окисные пленки хрупки, не способны многократно деформироваться и поэтому в процессе трения разрушаются в первую очередь. С повышением температуры в зоне трения окисные пленки утолщаются, при этом увеличивается и объем их разрушения.

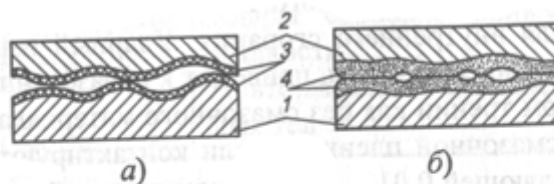


Рис. 5. Схемы контакта деталей при наличии окисла при граничной смазке (а) и избирательном переносе (б):  
 1 — сталь; 2 — бронза; 3 — окисные пленки;  
 4 — серовитные пленки

Виды разрушения деталей при трении могут быть допустимыми и недопустимыми (рис. 6).



Рис. 6. Классификация видов разрушения при трении

Частыми причинами выхода из строя опор качения являются усталостное выкрашивание дорожек и тел качения, заклинивание и разрыв сепараторов, абразивное изнашивание. При эксплуатации опор качения указанные повреждения в ряде случаев могут быть устранены или уменьшены при использовании металлоплакирующих смазочных материалов, содержащих 0,1... 10% (мас.) твердых частиц металлов, их окислов, металлоорганических соединений или твердых антифрикционных материалов (рис. 7).

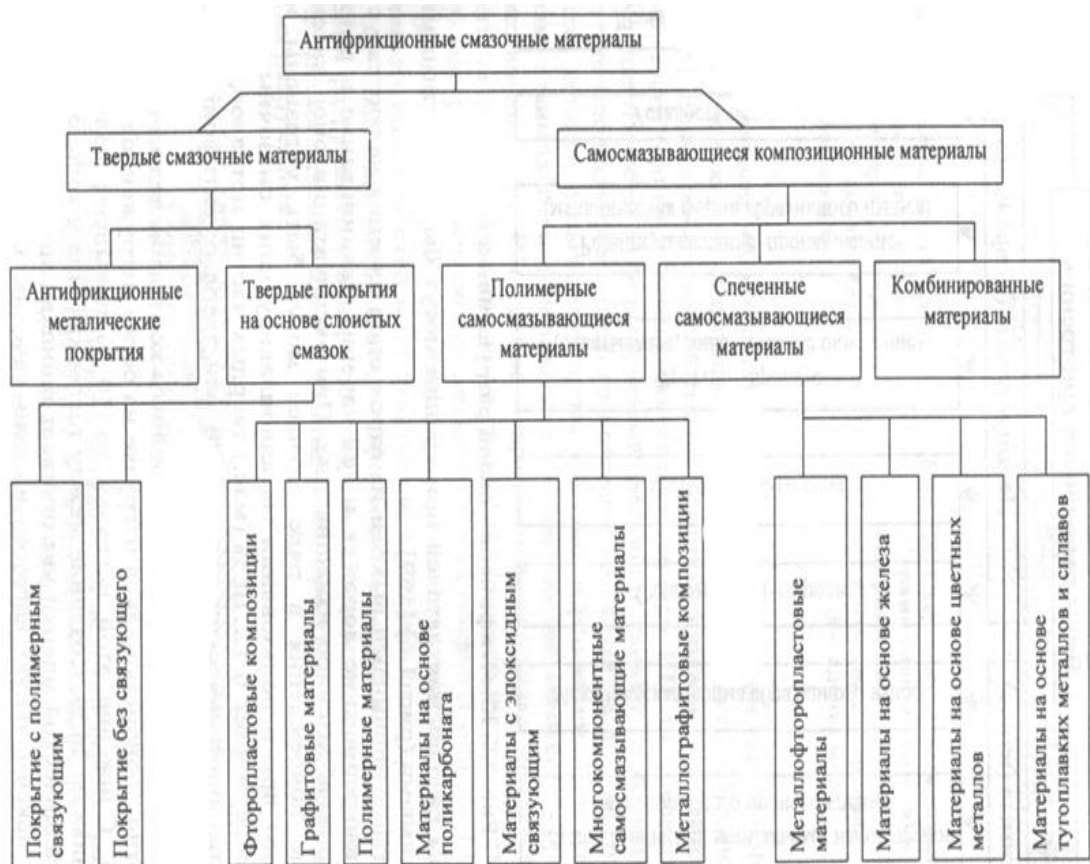


Рис. 7. Антифрикционные смазочные материалы и покрытия для узлов сухого трения

Долговечность пар трения с линейным контактом тел качения и колец обратно пропорциональна нагрузке на более нагруженное тело в степени 3,3. Снижение этой нагрузки на 10% повышает долговечность подшипника на 36%. Создание между телом качения и кольцом подшипника металлической пленки увеличивает площадь контакта и тем самым снижает максимальную нагрузку на тело качения. Сервоитная пленка толщиной 0,5... 1 мкм может увеличить даже при достаточно большой нагрузке площадь контакта в 1,5...2 раза.

Практически, все встречающиеся виды износа могут быть представлены как совокупность основных. Так, абразивный износ может быть представлен как «резание + деформация»; эрозия жидкими средами - «деформация + усталость»; кавитация — «деформация + коррозия» и износ смазываемых поверхностей — «адгезия + коррозия».



Условия перехода от одного вида износа к другому зависят от условий трения и природы материала. При интенсивном износе преобладают адгезионный и абразивный механизмы разрушения материалов, частицы износа имеют вид осколков, а на поверхности трения образуются глубокие вырывы. Интенсивный износ сопряженных поверхностей — один из существенных каналов утечки материальных и энергетических ресурсов, поэтому разработке эффективных методов борьбы с ним в последнее время уделяется огромное внимание.

По данным 85...90 % машин выходят из строя по причине износа деталей, хотя за последние годы использование эффекта безызносности значительно расширилось. В настоящее время трудно указать область машиностроения или приборостроения, в которой ИП не был бы применен или апробирован. ИП проявляется при трении: стали по стали и чугуну; чугуна по чугуну; стали по порошковому материалу, металлополимеру, стеклу, бронзе, алюминиевым сплавам, композиционным и другим материалам.

При трении сопряженные поверхности изнашиваются одновременно, что приводит к изменению их взаимного положения. Износ сопряжения характеризуется изменением взаимного расположения сопряженных деталей. Доказано, что в зависимости от характера возможного сближения поверхностей все сопряжения подразделяются на две разновидности:

1. сопряжения с изнашивающимися или малоизнашивающимися поверхностями, которые обеспечивают сближение деталей при износе только в заданном направлении;
2. самоустанавливающиеся сопряжения, в которых взаимное положение деталей зависит от формы изношенной поверхности и износ наиболее сказывается на функциональных свойствах пары.

## **1.5 Основные направления снижения износа машин и механизмов путем решения трибологических проблем в промышленности и на транспорте**

С трением связана одна из самых острых проблем современности — износ машин и механизмов. Трение — удивительный феномен природы. При трении одновременно протекают механические, электрические, магнитные, тепловые, вибрационные, химические процессы. Трение может упрочнить или разупрочнить металл, повысить или уменьшить в нем содержание углерода, насытить металл водородом или обезводить его, превратить золото и платину в окислы, отполировать детали или сварить их.

Расходы на восстановление изношенных в результате трения деталей машин и механизмов огромны, причем они ежегодно увеличиваются. Удлинение срока службы машин и оборудования равноценно вводу значительных новых производительных мощностей.

Известно, что износ трущихся деталей является главной причиной снятия машин и оборудования с эксплуатации, а на преодоление трения в транспортных машинах расходуется более половины потребляемого топлива (энергии).

Затраты на ремонт и техническое обслуживание машин в несколько раз превышают ее стоимость: для автомобилей — в 6 раз для самолетов — в 5 раз, для станков — в 8 раз. Потери от ремонта могут быть сокращены рациональным применением способов, основанных на триботехнике. Триботехника — наука о контактном взаимодействии твердых тел при их относительном движении, охватывающая весь комплекс вопросов трения, износа и смазки машин и механизмов. Исследования и разработки на основе триботехники должны обеспечивать снижение затрат труда на техническое обслуживание и текущий ремонт машин, снижение стоимости капитальных ремонтов, расходов запасных частей и горюче-смазочных материалов, снижение металлоёмкости конструкций узлов трения, а также повышение

производительности машин. В целом триботехника должна решать узловые проблемы национальной экономики, относящиеся к сырьевым, энергетическим и трудовым ресурсам и экологической безопасности страны. Ниже кратко отмечены основные проблемы триботехники и их связь с экономикой и экологией.

### **Износостойкость и использование природных ресурсов.**

Вопросы износа машин и оборудования тесно связаны с сохранением или экономией природных ресурсов, жизненно важных для поддержания современного и будущего роста страны. Потери материалов возникают на всех стадиях, например, на стадиях добычи, Извлечения и очистки руды, изготовления и ремонта изделий, а также из-за морального износа или непригодности изделия. При этом теряются затраченные денежные средства, энергия и труд. Избежать этих потерь невозможно, приходится руководствоваться их минимизацией. Значительная экономия может быть достигнута сокращением потерь на тех стадиях, где они особенно велики. При эксплуатации потери намного выше, Разработка систем с повышенной износостойкостью сокращает эти потери по двум направлениям: уменьшение числа требуемых запасных частей и повышение общего срока службы машин и оборудования. Проанализируем на примере двух деталей из десятков тысяч наименований, сколько требуется запасных частей в эксплуатации. Автомобильный завод, выпустивший 100 автомашин, должен затем ежегодно изготавливать к ним 150 крестовин карданов и 15 карданных валов. А заводу, выпустившему 100 тракторов, необходимо ежегодно изготавливать 400 крестовин карданов и 50 карданных валов. Здесь необходимо отметить один важный факт. Автомобили и тракторы на Севере требуют запасных частей в 2 раза, а в зонах с повышенной влажностью — в 1,5 раза больше, чем в средней полосе. Указанные районы значительно

отдалены от места производства запасных частей. Более 2/3 нашей страны принадлежат северным районам.

**Износостойкость и людские ресурсы.** В связи с увеличением количества действующих машин и оборудования за последние годы во всех развитых странах возникла проблема в потребности специалистов по их обслуживанию и ремонту. Рост потока матиц всюду опережает увеличение числа опытных механиков. Для подготовки механиков высокой квалификации необходимо несколько лет обучения и накопления опыта.

С каждым годом растет объем перевозок грузов автомобилями. В России на автомобильный парк приходится около 70 % перевозок (тонн), а на железнодорожный транспорт — 30 %. Однако стоимость Перевозок автотранспортом в 12 раз больше, чем по железной дороге. Очень велик л затраты на обслуживание автомобилей и их ремонт. Вопросы триботехники являются главными в снижении этих затрат. Выход из строя деталей в результате износа, разрегулировки подвижных сочленений, смазочные работы, контроль технического состояния узлов трения — все это требует привлечения к работе опытных высококвалифицированных специалистов.

Смазочные и регулировочные работы занимают около 50 % времени технического обслуживания автомобилей, 60 % времени обслуживания текстильного оборудования и до 40 % времени обслуживания самолетов.

**Надежность и безопасность механических систем.** Причинами крупных аварий и катастроф были утечки через уплотнения взрывоопасных продуктов, задиры и повышенный износ трущихся деталей, подшипников, рельсов, бандажей колес, поломки зубьев шестерен, заклинивание плунжерные дар и др. В качестве примеров приведем унесшую более 100 жизней катастрофу самолета ЯК-42 в результате полного износа зубчатого зацепления-управления стабилизатором, а также многочисленные аварии и катастрофы автомобилей в результате износа тормозных накладок и утечки через уплотнения гидравлической тормозной жидкости.

**Триботехника и экологическая безопасность.** В последние годы важность триботехнических решений стала особенно острой в связи с ухудшением экологической обстановки в городах и поселках страны. В настоящее время Россия находится на 74 месте среди самых экологически чистых стран мира, Белоруссия — на 52 месте; первые шесть мест занимают соответственно Финляндия, Норвегия, Швеция, Канада, Швейцария, Уругвай (по данным ученых Йельского и Колумбийского университетов США). Россия находится на третьем месте в мире по вредным выбросам в атмосферу (после Китая и США). Большая часть (40 %) территории России (центр, юг, Урал, Поволжье, Западная Сибирь), в которой проживает 60 % населения страны, на треть являет, собой картину экологического бедствия. Это наиболее заселенные районы страны. Более 100 млн россиян проживают в экологически неблагоприятных условиях; 2/3 водных источников России непригодны для питья. Доля загрязнения атмосферы от автотранспорта составляет 46 % общих выбросов вредных веществ и доходит до 70...80 % в таких крупных городах, как Москва и Санкт-Петербург.

На большие загрязнения атмосферы (по объему выбросов) происходят в результате деятельности предприятий энергетики — 27 % выбросов всей промышленности России; предприятий цветной металлургии — 20 %; черной металлургии — 15 %; машиностроения — 21 %. Катастрофическая загазованность (особенно крупных российских городов) связана с большой изношенностью цилиндропоршневой группы двигателей грузовых и легковых автомобилей, падением их мощности и в связи с этим высоким потреблением топлива, смазочных материалов и малым ресурсом.

Использование асбестосодержащих накладок в тормозах автомобилей, наличие паров топлива в кабинах транспортной техники, повышенные вибрации и шумы в машинах в результате износа

подшипников, биение валов, зубчатых передач — все эти и им подобные недостатки, относящиеся к низкому уровню решения вопросов триботехники, оказывают существенное влияние на здоровье обслуживающего персонала и населения городов. Перегрев подшипников, износ валов часто вызывают течи масла, топлива, рабочей жидкости гидравлических систем. Все это приводит к непроизводительному потреблению энергии, порче асфальтовых покрытий и уничтожению растительности.

И еще отметим очень важный момент, который в нашей технической литературе почти не освещен. Наибольшую опасность для окружающей среды представляют моющие присадки к маслам, что вызывает увеличение количества загрязняющих примесей и накопление их в масле при картерной смазке. Это полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) с сильно выраженными канцерогенными свойствами. При работе двигателей, особенно с картерной смазкой, ПАУ выбрасываются с выхлопом отработанных газов в атмосферу, попадают в почву при небрежной смене масла, при сливе масла в сточные воды и др. По данным зарубежной печати, около 15 % всех потребляемых моторных масел в развитых промышленных странах теряется при эксплуатации. Можно с уверенностью полагать, что в России эта цифра в несколько раз больше.

Проблема защиты от масел с ПАУ в ближайшие годы может стать даже более значимой, чем проблема загазованности атмосферы вредными газами при работе двигателей внутреннего сгорания. В значительной степени решить экологические проблемы страны может реновационное производство технических изделий на основе решения трибологических проблем при износе машин и механизмов. Это позволит многократно снизить загрязнение окружающей среды при минимальных инвестициях.

**Оптимизация конструкторских решений узлов трения.** Для обеспечения высокой износостойкости узлов трения машин и оборудования при конструировании необходимо учитывать следующие влияющие на износ

деталей факторы: исключение внешнего трения; улучшение условий трения; равноизносостойкость изнашивающихся деталей; оптимизацию форм деталей; компенсацию износа; резервирование износостойкости; индикаторы износа; применение плавающих деталей, оптимальных зазоров, жесткости или податливости деталей; температурные деформации и др.

**Снижение трения и повышение КПД машин.** Большие материальные потери народное хозяйство терпит от повышенного трения в узлах машин. Известно, что больше половины топлива, потребляемого автомобилями, тепловозами и другими видами транспорта, расходуется на преодоление сопротивления, создаваемого трением в подвижных сочленениях. В текстильном производстве в этом случае затрачивается около 80% потребляемой энергии. Так, КПД глобоидного редуктора, устанавливаемого в лифтах, в металлорежущем оборудовании, в шахтных подъемниках, в приработанном состоянии составляет только 0,65...0,70, а в такой распространенной паре, как винт — гайка, всего лишь 0,25.

Наиболее кардинальным решением снижения сил трения и повышения КПД машин и механизмов является дальнейшее развитие научных исследований по разработке и применению новых технологий, металло-плакирующих смазочных материалов, основанных на научных открытиях, изобретениях, исследованиях в стране и за рубежом.

Конечные результаты исследований и разработок по триботехнике должны обеспечивать снижение затрат труда на техническое обслуживание и текущий ремонт машин, снижение стоимости капитальных ремонтов, уменьшение расхода запасных частей, экономию горючесмазочных материалов, снижение металлоемкости конструкций узлов трения -и повышение надежности и производительности машин.

**О видах трения.** Наиболее ярким и эффективным методом снижения трения и износа в машинах явилось использование гидродинамического режима смазки, особенно в подшипниках скольжения. Начало широкого использования этого метода в промышленности относится к 30-м годам прошлого столетия и связано с бурным развитием мощных авиационных и автомобильных двигателей внутреннего сгорания. Гидродинамический эффект смазочного действия при трении был открыт петербургским профессором Н. Петровым в 1883 г. В дальнейшем гидродинамической теорией смазки занимались крупнейшие ученые мира: англичанин О. Рейнольдс (1886 г.), американец А. Кингсбери, немцы А. Зоммерфельд (физик) и Л. Гюмбель (ученый по судостроению), русские академики Н. Жуковский и С. Чаплыгин, авиаконструкторы А. Микулин, П. Орлов и многие другие ученые и инженеры. В то время в науке о трении и смазке машин-начиная с 1883 г. появился новый термин гидродинамическая смазка, или Жидкостный вид трения.

Термин жидкостное трение, как известно, определяет процесс трения при наличии между трущимися деталями промежуточного слоя, смазки, подчиняющегося законам гидродинамике ламинарного потока жидкости и, в первую очередь, уравнению Ньютона. Следовательно, этот термин определяет процессы трения, характеризующиеся вязкостью — важнейшим Физико-химическим свойством смазочной среды.

Классиками исследований граничного трения помимо В. Гарди являются Ф. П. Боуден и Д. Тейбор, С. А. Ахматов, И. В. Крагельский, Б. В. Дерягин и многие другие.

Как видим, граничное трение занимает промежуточное место между трением несмазанных поверхностей (ранее такое трение называли сухим) и гидродинамическим трением. При гидродинамическом трении износа деталей не происходит. К сожалению, гидродинамический эффект имеет ограниченное применение. При граничном трении трение и износ зависят как от вида смазочного материала, так и от материалов сопрягаемых деталей.



Таким образом к середине прошлого века триботехника четко разделилась на три в известной степени автономных, но тесно между собой связанных раздела:

- 1) трение несмазанных поверхностей;
- 2) граничное трение;
- 3) гидродинамическое трение.

Положение о трех видах трения существовало до открытия эффекта безызносности (1956 г.), когда экспериментально Д. Н. Гаркунов и И. В. Крагельский установили, что при граничном трении трущиеся детали могут самопроизвольно разделяться не только тонкой пленкой смазки толщиной около 0,1 Мкм, но и металлической пленкой толщиной 1...1,5 мкм, образующейся в процессе работы узла трения. Установленный вид трения в начале был назван избирательный переносом, а впоследствии — эффектом безызносности, или безызносным трением. Износ деталей при безызносном трении может полностью отсутствовать. Детали при этом выдерживают высокие нагрузки, а материалы деталей не соприкасаются между собой — они разделены тонкой металлической, так называемой сервовитной пленкой.

Отметим, что природа безызносности была установлена не сразу, а благодаря разработке и применению новых методов исследования поверхностей трения и притяжения к анализу явлений физики, пластичности поверхностных - слоев, теории коррозии и пассивности, химии координационных соединений и теории самоорганизации.

Приведем определение эффекта безызносности. Эффект безызносности — вид трения, который обусловлен самопроизвольным образованием в зоне контакта тонкой неокисляющейся металлической пленки с низким сопротивлением сдвигу, не способной накапливать при деформации дислокации.

При некоторой критической концентрации вакансий в сервовитной пленке происходит переход от консервативного движения дислокаций к их неконсервативному переползанию к поверхности и выходу на нее. Дислокации переходят на другой уровень взаимодействия с кристаллической решеткой металла с существенно меньшими затратами энергии, что сопровождается релаксацией напряжений.

Поскольку при эффекте безызносности трение сопровождается эволюционными процессами — образованием металлической пленки на трущихся поверхностях, то главным в этом случае становится самоорганизующийся характер трения, который обусловлен обменом трущейся пары с внешней средой энергией и веществом, а также коллективным поведением ионов металла, из которых формируется металлическая пленка. Она представляет собой металл в особом состоянии, имеющем место только в процессе трения. Трение не может уничтожить пленку, так как оно ее воспроизводит.

Пленка при трении образуется из одного из материалов, участвующих в трении (бронзы, латуни, или другого медного сплава), или же из смазочного материала, содержащего соединения металлов, металлоорганические соединения.

Массоперенос при обычном трении повышает износ или делает сопряжение неработоспособным. При эффекте безызносности это явление снижает или полностью исключает изнашивание поверхности трения.

Исследованиями установлено, что поверхностный слой (в виде сервовитных и серфинг-пленок) при трении представляет диссипативную структуру со всеми ее особенностями: гомогенная среда, наличие фазового кинетического перехода (переход от консервативного движения дислокаций к переполнению), обмен энергией и веществом с внешней средой (образование и распад комплексных соединений в смазке), высокое отклонение от равновесия (растворение легирующих элементов), ускорение потоков диффузии при пластической деформации. Благодаря этим процессам

диссипативная структура поверхностного слоя может существовать без финального исхода.

Таким образом, трение из разрушительного процесса при граничной смазке в условиях безызносности превращается в созидательный. В этом случае при трении не достигается уровень деструкции материала, при котором происходит износ, из-за периодической разрядки дислокаций на поверхности и аннигиляции их с вакансиями. Способность дислокационной системы к эволюции и кинетическому фазовому переходу на другой тип движения связана с природой материала и активных добавок к смазочному материалу, т. е. с введением особых условий.

Разработаны теоретические основы создания маслорастворимых добавок к смазочным материалам с использованием металлов переменной валентности, обеспечивающих реализацию в узлах трений эффекта безызносности.

Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что введение соединений металлов переменной валентности в смазочные масла может в значительной степени повысить антиокислительные свойства смазочных материалов и, как следствие, повысить их ресурс.

**Будущее эффекта безызносности.** При трении в режиме безызносности материал одной детали отделен от материала сопряженной детали металлическим слоем — сервовитной пленкой. На ней находится серфинг-пленка (металлоорганическая пленка). Такое строение поверхностей трения аналогично строению поверхностей трения суставов живых организмов.

Следует отметить, что человечество при своем развитии и совершенствовании научно-технических разработок не раз использовало аналогии явлений, выработанных за миллионы лет природой. Можно сказать, что в России впервые начаты работы по созданию узлов трения, которые по своему принципу напоминают

суставы живых организмов. Тут вспоминаются знаменитые слова выдающегося австрийского физика Л. Больцмана, который говорил, что "процесс познания есть отыскание аналогий".

Научных работников по изучению эффекта безызносности можно отнести к специалистам по созданию "интеллектуальных" узлов трения. Взять хотя бы метод восстановления изношенных узлов трения машин без их разборки. Это напоминает выздоровление живого организма после какой-либо травмы.

Процесс самоорганизации в триботехнике наиболее ярко проявляется в компрессоре домашнего холодильника — здесь изнашивание трущихся поверхностей деталей автоматически компенсируется образованием сервовитных пленок из материала трубок охладителя компрессора. В узлах трения компрессора износ отсутствует при непрерывной его работе более 40 лет в тяжелейших условиях (постоянные запуски и остановки).

Следует признать, что это лишь самое начало работ по данному направлению в области триботехники. Однако уже в данное время можно утверждать, что при решении такой важной проблемы на первый план теоретических исследований должны быть поставлены самоорганизующиеся процессы в зоне фрикционного контакта: диффузионно-вакансионный механизм сдвига, действие эффекта Ребиндера, электрофорез, образование координационных соединений, т. е. процессы и явления, которые и характеризуют эффект безызносности.

## **1.6 Примеры применения эффекта безызносности в промышленности и на транспорте**

1. Первый опыт применения эффекта безызносности в узлах трения относится к самолетам КБ им. П. О. Сухого, КБ им. А. Н. Туполева и КБ им. А. И. Микояна. Интенсивный износ верхних бронзовых боек основных стоек шасси самолетов приводил к необходимости замены их через 250...300 посадок. Ремонт стоек заключался в замене дорогостоящих бронзовых боек

на новые. После проведения ряда исследований, стендовых и эксплуатационных испытаний применяемая в стойках шасси спиртоглицериновая смесь была заменена на жидкость АМГ-10, которая реализовывала в парах трения бронза БрАЖМц — сталь эффект безызносности. Проблема износостойкости узлов трения была снята. Бронзовые буксы стоек шасси перестали изнашиваться, и их замену за весь период эксплуатации самолетов не проводили.

Слабым местом самолетов упомянутых фирм в отношении износостойкости были шарнирно-болтовые соединения.

В этих узлах наблюдается наиболее опасный вид изнашивания — схватывание поверхностей трения. В дальнейшем было убедительно показано, что процесс ФАБО является одним из самых эффективных методов повышения износостойкости| устранения задиров, уменьшения времени приработки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, шеек коленчатых валов, шестерней и колес зубчатых зацеплений, плунжерных и золотниковых пар топливной аппаратуры, силовых цилиндров гидравлических систем и других деталей.

Кроме метода ФАБО для смазывания тяжело нагруженных трущихся деталей авиационной техники были разработаны так называемые металлопла-кирующие смазочные материалы, которые при работе реализуют эффект безыносного трения. Это металлоплакирующая смазка "Свинцоль-01" и смазка "Атланта". Достаточно отметить, что высокая надежность работы шарнира крыла самолёта типа СУ с изменяемой стреловидностью была достигнута благодаря применению смазки "Атланта". При смазке "Атланта" пороговый коэффициент достигается после 100 применений шарнира, а при ранее применяемой смазке ЦИАТИМ-201 после всего 13...17 применений.

В целом технический эффект от применения металлоплакирующих смазочных материалов в тяжело нагруженных

узлах самолета, по данным ОКБ им. П. О. Сухого, состоит: в увеличении нагрузки узла трения в 1,5...2 раза (до 100...120 МПа); снижении массы бронзовых подшипников на 25 %; повышении износостойкости деталей в 2 раза; увеличении периода между смазыванием узлов трения не менее чем в 3 раза; снижении общих затрат на эксплуатацию в 2...3 раза.

2. Известно использование морской воды в качестве смазочной среды для дейдвудных подшипников судов морского флота. В конце прошлого столетия в одном из НИИ морского флота была решена большая научно-техническая проблема — разработана новая конструкция подшипника скольжения, которая работала в режиме избирательного переноса при смазывании морской водой при высоких нагрузках.

Благодаря такому, решению отпала необходимость подводить и отводить смазку к подшипникам, работающим за бортом. Ранее на некоторых объектах только медных трубок для подвода отвода смазочного материала требовалось несколько километров. При этом следует учесть сокращение, монтажных работ, повышение надежности работы подшипников.

Институтом "Севгипрорыбфлот (г. Мурманск) накоплен большой опыт использования эффекта безызносности в узлах трения судовых технических средств (главные и вспомогательные двигатели, подшипники валопроводов, редукторы сепараторов топлива и масла, винтовые компрессоры и др.).

3. В области химического машиностроения установлены области применения эффекта безызносности при трении стали 14X17H2 по стали 12X18H10T и материала ВК6 по ВК6. Разработана композиция Ф40Б70 на основе фторопласта 40 с добавлением 70 % бронзовой дроби для изготовления сепараторов шарикоподшипников электроприводов аппаратов с механическим перемешивающим устройством. Испытания в различных смазочных средах (кислые электролиты) выявили высокую износостойкость таких подшипников. Дорожки трения подшипников при работе покрывались

тонким слоем меди, что способствовало компенсации износа, стабильности зазоров, снижению уровня шума и вибрации электродвигателя.

Разработана конструкция торцевого уплотнения вала химических аппаратов с применением твердосплавного материала, состоящего из релита и меди. Часть деталей изготавливали из стали, легированной медью, хромом и никелем. В процессе работы поверхности трения вала и опоры работали в режиме безысности.

4. Наиболее распространенным механизмом, в котором реализуется эффект безысного трения, является компрессор бытового-холодильника. Узлы трения компрессора, изготовленные из стали (коленчатый вал, подшипники скольжения, поршеньки цилиндры), работают в режиме безысного трения в течение многих лет (более 30...40) практически без износа.

В процессе работы поверхности трения деталей самопроизвольно покрываются тонкой медной пленкой толщиной 1...2 мкм, которая предохраняет поверхности от непосредственного контакта. Пленка формируется из ионов меди, образующихся в результате избирательного растворения медных трубок охладителя маслофреоновой смесью (50 % масла и 50 % фреона). В зону контакта трущихся деталей ионы меди доставляются циркулируемым смазочным материалом.

5. Разработаны и проверены в эксплуатационных условиях методы повышения износостойкости пар трения применительно к металлообрабатывающему оборудованию: ФАБО трущихся поверхностей + металлоплакирующая смазка; замена пар трения из цветного металла на сталь — сталь + ФАБО + металлоплакирующая присадка к маслу.

В результате проведения работ установлено, что применение эффекта безысности в станкостроении позволяет обеспечить:

- снижение энергоемкости станков на 10...20 %;
- увеличение срока сохранения класса точности в 1,5...3 раза;
- снижение уровня звукового давления;
- повышение плавности перемещения рабочих органов на 40 %;
- экономию цветных металлов;
- повышение стойкости инструмента в 2...5 раз.

б. Узлы трения крупногабаритных машин в тяжелом машиностроении часто испытывают большие ударные нагрузки, недостаточное поступление смазочного материала, особенно в первоначальный период работы, низкие температуры окружающей среды, высокую влажность, вибрацию и другие неблагоприятные факторы, которые снижают долговечность трущихся деталей. Проведены обширные работы по испытанию тяжело нагруженных узлов трения оборудования и заводской продукции с применением металлоплакирующей присадки МКФ-18 к смазочным материалам. Испытанию подвергли редукторы карьерных и шагающих экскаваторов, бурового оборудования и узлы трения технологического оборудования (коробки скоростей термопластавтоматов, гидродинамические подшипники, насосы, станки и др.).

В результате испытания выявлена устойчивая тенденция к полному или частичному восстановлению или стабилизации утраченных в процессе эксплуатации служебных характеристик машин и оборудования. Например, ресурс гидронасоса увеличился в 2,5 раза; прекратилось развитие усталостного выкрашивания зубьев быстроходной зубчатой передачи с зацеплением Новикова; снизилась шумность коробки на 15 % и вибрации на 25 %; в зубчатых передачах наблюдалось "залечивание" мелких питтингов; снизилась температура на выходе из подшипника в 5-валковом каландре; расход смазочных материалов снизился в 2 раза в редукторах карьерных экскаваторов ЭКГ-20; уменьшилось время приработки зубчатых передач. Установлено, что с I возрастанием в масле абразивных частиц эффективность действия присадки МКФ-18 снижается.



7. Наиболее изнашиваемыми деталями тепловозов, лимитирующими их ресурс, являются поршневые кольца и цилиндрические втулки дизелей. Малый ресурс у тепловозов и вагонов имеют подшипники качения, устанавливаемые в колесных парах. Кроме того, к быстро изнашиваемым деталям железнодорожного транспорта относятся сами колеса. Роликовые подшипники колесных пар часто выходят из строя по причине разрушения контактных поверхностей колец и роликов до выработки их ресурсов. В последнее время проблема износа трущейся пары колесо — рельс в России весьма обветрилась. По литературным данным, ресурс работы рельсов на кривых участках вследствие износа за период 1985—1996 гг. снизился в 3...10 раз. Износ колесных пар подвижного состава увеличился в 10...15 раз.

В результате исследований установлено, что рельсы и сопрягаемые с ними колеса изнашиваются, главным образом, в результате водородного изнашивания. Этому, прежде всего, способствуют условия работы деталей, характерные для водородного изнашивания и насыщения поверхностей трения колесной пары водородом в процессе работы.

Ранее было показано, что подшипники качения и цилиндры двигателей внутреннего сгорания изнашиваются также в результате водородного изнашивания.

Таким образом, можно отметить, что характерные три группы деталей железнодорожного транспорта: цилиндрические втулки двигателей тепловозов и поршневые кольца, подшипники качения букс тепловозов и вагонов, а также рельсы и сопрягаемые с ними колеса — выходят из строя, главным образом, в результате водородного изнашивания.

Если это так, то можно полагать, что метод повышения износостойкости указанных трех групп деталей может быть

универсальным. Наиболее приемлемым методом защиты от водородного изнашивания выбран метод, основанный на образовании в зоне контакта металлоплакирующей пленки, исключая диффузию водорода в металл детали. Для этого была разработана металлоплакирующая многофункциональная композиция "Валена" к маслам и смазкам, реализующая в узлах трения эффект безыносности. Композиция прошла широкую проверку как в лабораторных, так и в эксплуатационных условиях и показала весьма положительные результаты. Износ цилиндрических втулок и поршневых колец, рельсов и колес резко снизился. Уменьшились шум подшипников качения и повреждения дорожек колец и роликов, снизилось потребление смазочных материалов.

8. В сельском хозяйстве эксплуатируется огромное количество тракторов, комбайнов, грузовых автомобилей и другой сельскохозяйственной техники только одних двигателей внутреннего сгорания имеется более 2,5 млн. Основная часть машин работает после капитального ремонта с ресурсом 30...50 % ресурса новых машин.

Путем использования ФАБО цилиндров двигателей и применения разработанных присадок смазочным материалам удалось в 2,5 раза увеличить ресурс машин, применяемых в сельском хозяйстве, а после капитального ремонта — в 2,5...3 раза.

9. Новые износостойкие материалы, реализующие эффект безыносности:

- антифрикционный материал ТМ-1 для торцевых уплотнений магистральных нефтепроводов, а также для многоступенчатых секционных центробежных насосов (разгрузочные устройства). Материал получают путем спекания смеси разнозернистых порошков карбида вольфрама и кобальта с одновременной их пропиткой медно-никелевыми сплавами в водородной среде. Медь, рассеянная по микропорам сплава, в условиях трения создает предпосылки для возникновения режима безыносности трения при работе трущихся

пар, работающих в нефти и воде. Материал ТМ-1 может работать в отличие от других антифрикционных материалов по одноименному материалу ТМ-1;

- материал (подобный материалу ТМ-1) для торцевых уплотнений погружных насосов ГНОМ 100-25, применяемых при откачке воды. Материал по сравнению с печеными вольфрамокобальтовыми твердыми сплавами ВКЗ, ВК8 и В К15 менее хрупок и меньше подвергается терморастрескиванию;
- металлостеклянный материал ЖГрзСТ7Д9 с высокими антифрикционными свойствами для узлов трения, работающих в растворах щелочей. В состав материала вводится 3% меди путем химического восстановления ее на частицах стеклянного порошка. Медь в процессе работы материала создает сервовитную пленку и уменьшает коэффициент трения с 0,08...0,12 до 0,001...0,0015, а износ материала трудно фиксируется;
- антифрикционный материал "Афтал", представляющий собой многослойную волокнистую структуру, состоящую из различного сочетания по слоям политетрафторэтиленовых, стеклянных, металлических и других нитей, заключенных в металлическую матрицу. В зависимости от назначения и условий эксплуатации материал выпускается в виде листа толщиной 0,5...0,8 мм в нескольких модификациях. Из материала "Афтал" изготавливают подшипники скольжения и другие детали триботехнического назначения. Материал "Афтал" обладает как свойствами полимеров (сравнительно небольшим удельным весом и эластичностью), так и свойствами металлов (высокой электропроводностью);
- манжетные полиуретановые уплотнения, реализующие при работе со стальным валом эффект безыносного трения путем введения антифрикционного наполнителя, содержащего порошкообразные медь, графит, дисульфид молибдена, нитрид бора и сшивающий реагент. В

результате образования на сопряженной стальной поверхности тонкой серво-витной пленки меди стальная поверхность перестает изнашиваться. Уплотнения нашли применение в перекачивающих грунтовых и буровых насосах. Срок службы разработанных уплотнений насосов по сравнению с обычными резиновыми уплотнениями увеличился в 10 раз. В процессе работы новых уплотнений их поверхностный слой трансформируется — происходит распад больших молекул и формирование более устойчивой к трению структуры с образованием сервовитной и серфинг-пленок.

Разработанные новые конструкции узлов трения, износостойкие антифрикционные материалы, новые смазочные материалы и присадки к ним, приработочные покрытия, финишная антифрикционная безабразивная обработка поверхностей стальных и чугунных деталей, технологии безразборного восстановления узлов деталей машин опробованы и широко применяются в течение многих лет в ряде отраслей промышленности при производстве и ремонте самолетов, автомобилей, тракторов, редукторов лифтов и метро, холодильников, горнорудного оборудования, химического оборудования, подъемно-транспортных устройств, дизелей судов и тепловозов, металлообрабатывающего оборудования. Использование новых технологий и материалов позволяет:

- повысить ресурс машин и оборудования в 1,5...2 раза;
- сократить расход смазочных материалов в 2...3 раза и топлива на 3...5%;
- повысить надежность работы узлов трения и тем самым уменьшить аварийность машин;
- ускорить время приработки машин в 2...3 раза и сократить потребление топлива и смазочных материалов;
- снизить потребление запасных частей в 2 раза и более;
- в ряде случаев заменить капитальный ремонт машины на ремонт без разборки;

- снизить загазованность атмосферы при работе автомобилей в 1,5...3 раза.

## **2. Сопротивление движению ленты конвейеров, доля роликов**

Конвейерный транспорт – технологический процесс перемещения горных масс в составе комплексов непрерывного действия.

В состав конвейерного транспорта входят конвейера, бункеры, питатели, пункты перегрузки и отвалообразователи.

Конвейерный транспорт на карьерах применяют в основном при большой производственной мощности предприятия.

Использование конвейерного транспорта при циклично-поточной технологии разработки по сравнению с циклической позволяет увеличить производительность в 1,5-2 раза, снизить затраты на разработку на 25-30%, увеличить производительность экскаваторов на 25-30%, также появится возможность осуществить комплексную автоматизацию производства.

Основные преимущества конвейерного транспорта:

- Поточность транспортирования как технологического процесса;
- Автоматичность действия;
- Возможность перемещать материал при углах наклона трассы 16-18 град;
- Сокращение расстояния транспортирования и объема горно-капитальных работ по строительству траншей;
- Экологичность;

Недостатки конвейерного транспорта:

- Жесткие требования к влажности, абразивности и кусковатости материала;
- Зависимость от климатических условий;
- Высокая энергоемкость.

Конвейерный транспорт эффективно применяется при перевозке 20-40 млн. т/год и более. Рациональное расстояние транспортирования обычно не превышает 4-6км. Высота подъема груза составляет 250-300 м.

## **2.1 Конструкция и классификация конвейеров**

Наибольшее распространение на обогатительных фабриках получили ленточные конвейера. Схемы конвейерного транспорта укомплектовывают различными типами и параметрами ленточными конвейерами: забойными, отвальными, подъемными, магистральными, соединительными, вспомогательными.

Обозначение российских конвейеров производится следующим образом: забойные - КЛЗ; передаточные – КЛП; магистральные – КЛМ; отвальные – КЛЮ. Существует также обозначения ленточных конвейеров через ширину и скорость движения ленты и другие параметры.

Забойные и отвальные конвейеры имеют однотипную конструкцию и являются передвижными. Различие между ними состоит в том, что забойные конвейеры снабжены передвижными загрузочными, а отвальные – передвижными разгрузочными тележками.

Соединительные конвейеры, используемые для передачи породы от забойных линий до магистральных, по мере подвигания забоя передвигаются вдоль своей продольной оси. Они снабжены ходовым оборудованием рельсового типа или наращиваются отдельными секциями, а их приводные станции передвигаются с помощью собственных ходовых приводных устройств или с помощью других средств. Для компенсации возникающего в процессе эксплуатации изменения расстояния между конвейерными линиями применяют телескопические передаточные конвейеры.

Подъемные и магистральные конвейера являются стационарными, Стационарные конвейера собирают из отдельных секций, устанавливаемых

на бетонных основаниях или шпалах. В отличие от забойных они загружаются на концевых станциях.

Конвейеры конструктивно различают по массе, способности преодолевать различные углы подъема, удобству перемещения на новую трассу и т.п.

Основные части конвейера: линейные и переходные секции с верхними и нижними роlikоопорами, замкнутая в вертикальной плоскости конвейерная лента, приводная и концевая станции.

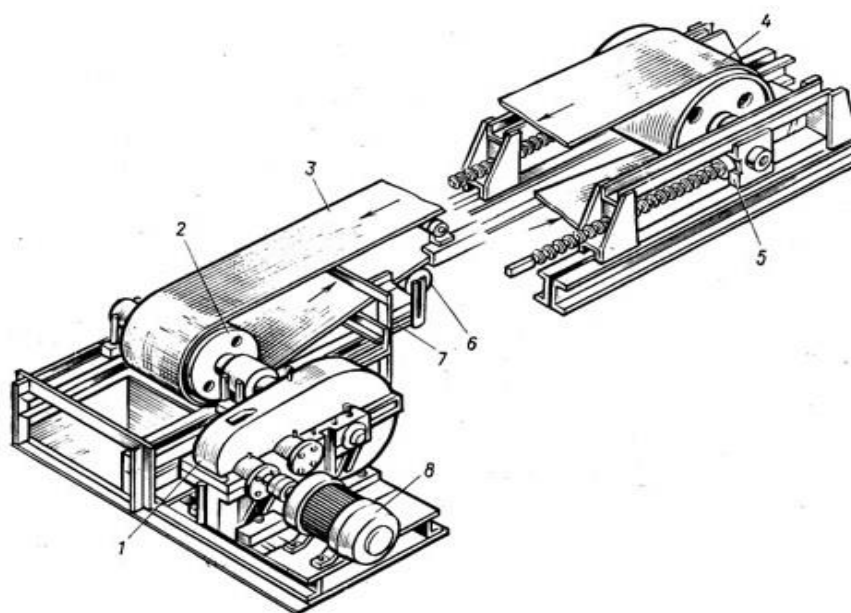


Рисунок 8 – Ленточный конвейер: 1) редуктор; 2) приводной барабан; 3) прорезиненная лента; 4) обводной (натяжной) барабан; 5) натяжное устройство; 6) роlikовые опоры; 7) рама; 8) электродвигатель.

Основными частями привода ленточного конвейера являются один или два (реже три) приводных барабана и приводные блоки, состоящие из электродвигателя, редуктора, соединительных муфт и тормоза.

Ленточные конвейеры, используемые в поточных и циклично-поточных схемах, можно классифицировать по следующим признакам:

- По назначению – забойные, передаточные (торцевые), отвальные, магистральные;

- По типу установки – передвижные с помощью специальных передвижчиков, продольно-передвижные на собственном ходовом оборудовании, стационарные;
- По типу транспортируемого груза – вскрышные (для мягких пород, для мягких пород с крепкими включениями, для дробленых крупнокусковых пород), добычные (для полезных ископаемых);
- По углу установки – горизонтальные, наклонные, крутонаклонные;
- По конструкции линейной части – с жесткими ставами и жесткими роlikоопорами, с жесткими ставами и подвесными шарнирными роlikоопорами, с канатными ставами и подвесными шарнирными роlikоопорами;
- По типу привода – с одно-, двух- и трехбарабанным приводом; многоприводные; с промежуточными приводами;
- По реверсивности хода ленты – реверсируемые и нереверсируемые;
- По изменяемости длины конвейера – телескопические, нетелескопические.

### **Конструкция конвейерной ленты**

Конвейерные ленты используются резиноканевые и резинотросовые с шириной от 800 до 3000 мм. И толщиной 22-37мм.

Преимущество резиноканевых лент – их относительно небольшая масса, недостаток – значительное удлинение под рабочей нагрузкой (2-3% длины), что требует устройства громоздких натяжных устройств. Основные преимущества резинотросовых лент: высокая прочность, обеспечивающая возможность создания конвейеров большой длины и производительности; незначительная вытяжка, не превышающая 0,25%. Недостатки – значительная масса, сложность соединения стыков ленты.

### **Роликовые опоры**

Роликовый став предназначен для поддержания верхней и нижней ветвей ленты, придания ей желобчатости и обеспечения устойчивого



движения. Роликовый став выполняют либо жестким, состоящим из отдельных линейных секций (рис. 9, а), либо канатным, состоящим из двух параллельно натянутых канатов, опирающихся на стойки (рис. 9, б).

Наибольшее распространение получили ленточные конвейеры с жестким ставом. Линейные секции става выполняют из швеллеров, соединенных болтами. Стойки секций крепят костылями к брусам, расположенным на почве выработки. Для защиты нижней ветви ленты от заштыбовки и возможных попаданий горной массы с рабочей ветви ленты на нижнюю ветвь секции накрывают стальными листами.

В подземных горизонтальных выработках (например, панельных) для транспортирования калийных руд применяют ленточные конвейеры с канатным ставом. Концы канатов через винтовые вертлюги, предназначенные для натяжения канатов, закрепляют анкерами к почве выработки. Верхние трехроликовые опоры закрепляют на канатах, а нижние — на стойках. По сравнению с жестким канатный став обладает рядом преимуществ: меньшая металлоемкость, лучшее центрирование ленты, снижение ударных нагрузок на ленту.

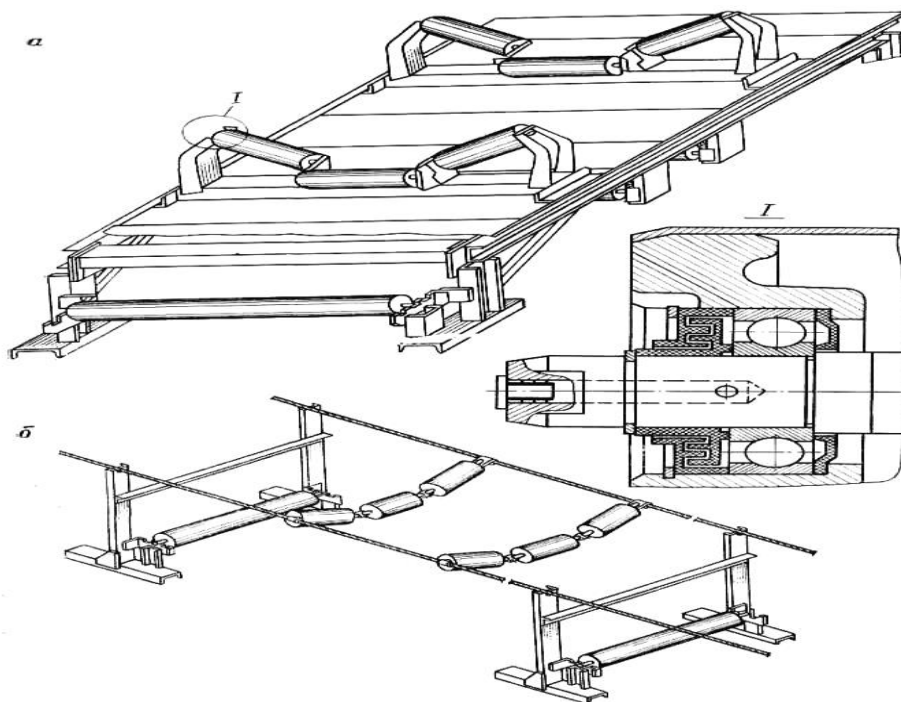


Рисунок 9 - Роликовые става ленточных конвейеров

Для поддержания верхней рабочей ветви ленты по длине конвейера применяют, в основном, трехроликовые опоры с углом наклона боковых роликов 30—40° (для широких лент на открытых работах применяют пятироликовые опоры). Три ролика, образующие желоб для ленты, жестко закрепляют на кронштейнах в единую опору (рис. 10, а, б) или соединяют между собой шарнирно (рис. 10, в). Роликоопоры с шарнирным соединением роликов, называемые гирляндными, улучшают центрирование ленты и обеспечивают ее большую желобчатость.

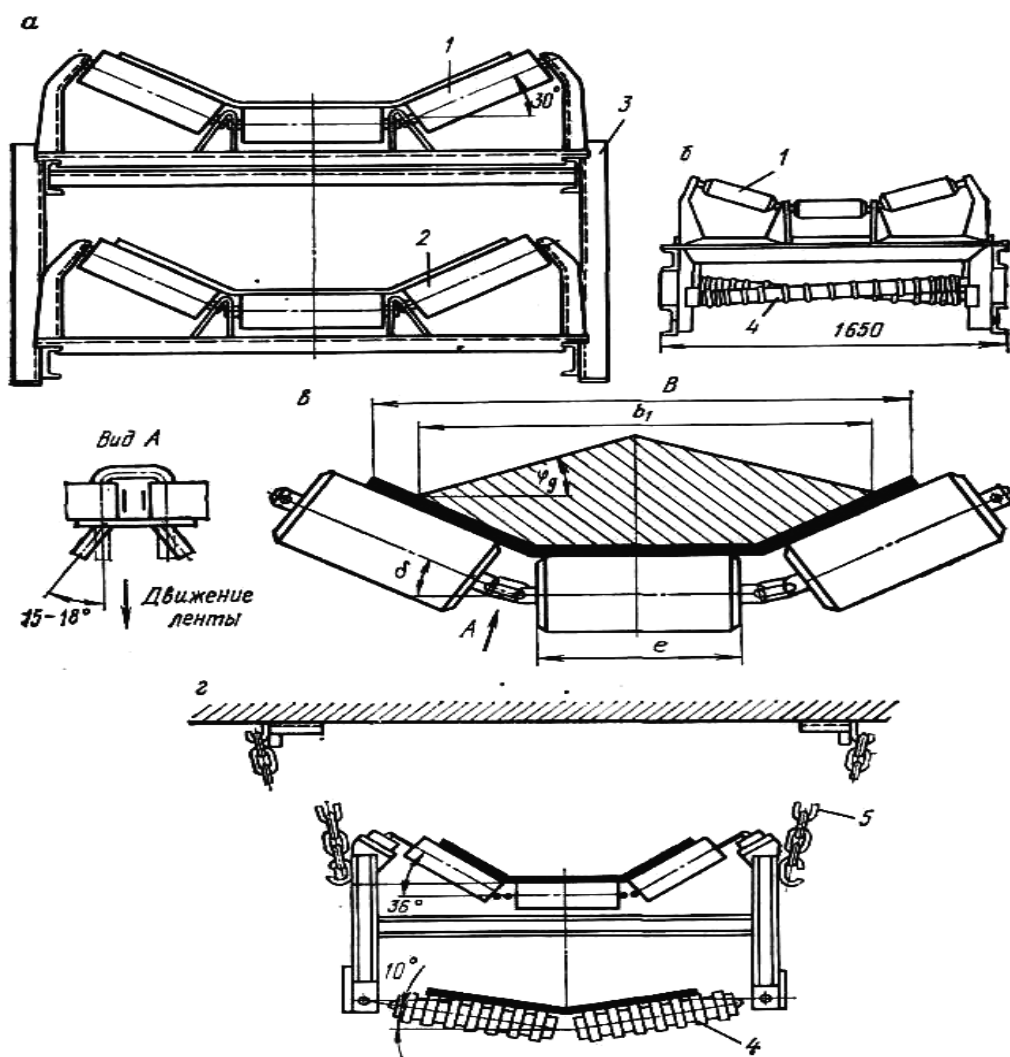


Рисунок 10 - Роликоопоры ленточного конвейера: 1,2 — ролики соответственно верхней и нижней ветвей ленты; 3 — секции става конвейера; 4 — центрирующая роликоопора нижней ветви ленты; 5 — цепи;

Ролики выполняют на шарикоподшипниках с лабиринтными уплотнениями, исключающими попадание пыли в подшипниковые узлы и сохраняющими смазку в течение всего периода эксплуатации роликов (см. рис. 9, *a*, вид I).

На нижней (порожней) ветви устанавливают опоры: однороликовые; трехроликовые, как и на верхней ветви (см. рис. 10, *a*); V-образные двухроликовые с углом наклона роликов  $10\text{—}15^\circ$  (см. рис. 10, *b*), улучшающие центрирование нижней ветви ленты. С целью предотвращения налипания частиц груза нижние ролики футеруют резиновыми кольцами.

Линейные роlikоопоры устанавливаются на ставе на расстоянии 1200—1400 мм друг от друга для верхней ветви ленты и 2400—2800 — для нижней ветви ленты.

Кроме линейных роlikоопор применяют специальные роlikоопоры: центрирующие, предотвращающие боковой сход ленты; амортизирующие, располагаемые под лентой в местах подачи на нее горной массы (набор резиновых цилиндрических роликов или ролики, футерованные резиновыми кольцами).

Став конвейера с роlikоопорами, как правило, располагают на почве выработки, однако при пучащей почве или большой обводненности его подвешивают на цепях к кровле (рис. 10, *z*). Для полустационарных конвейеров жесткий став выполняют из отдельных линейных секций с бесболтовыми легкоразборными соединениями.

## **2.2 Определение сопротивлений движению ленточном конвейере**

Выполняется по методике [“Вспомогательные процессы обогатительных фабрик. Расчет устройств” – Р. С. Марков, 21 с].

При равномерной загрузке ленты по всей длине  $L$  наклонного конвейера (рис. 11) сопротивление загруженной ветви:

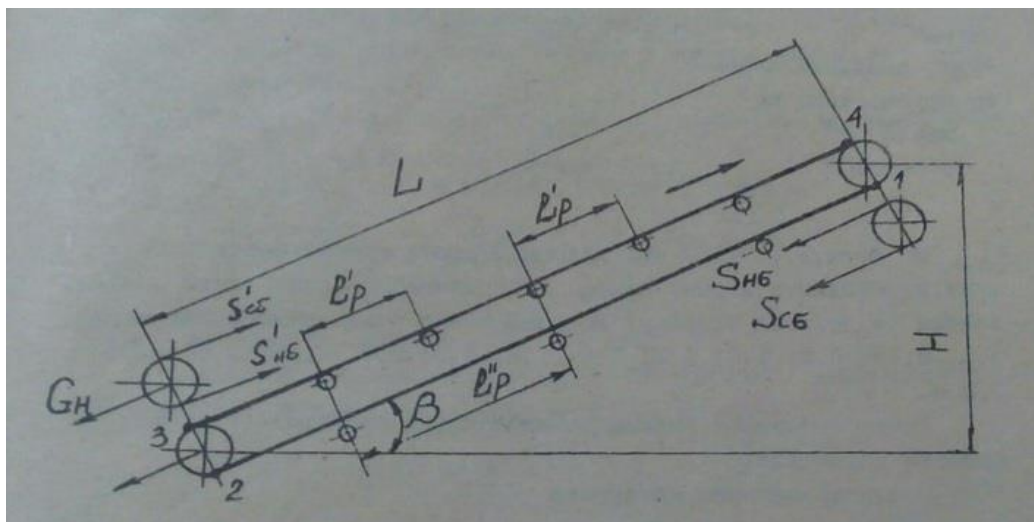


Рисунок 11 – Расчетная схема ленточного конвейера

$$W_{гр} = (q + q_{л} + q'_{р}) L \omega \cos \beta \pm (q + q_{л}) L \sin \beta, H \quad (10)$$

Сопротивление порожней ветви:

$$W_{пор} = (q_{л} + q''_{р}) L \omega' \cos \beta \pm (q_{л}) L \sin \beta, H \quad (11)$$

В этих формулах  $q$  – погонный вес груза, Н/м;  $q_{л}$  – погонный вес ленты, Н/м;  $q'_{р}$  и  $q''_{р}$  – соответственно, погонный вес вращающихся частей роlikоопор грузеной и порожней ветвей ленты, Н/м;  $\omega'$  – коэффициент сопротивления движению ленты;  $\beta$  – угол наклона конвейера.

Знак “+” применяют при движении ветви ленты вверх, “-” – вниз.

Погонный вес груза определится по формуле:

$$q = \frac{Qg}{3,6v}, \text{ Н/м} \quad (12)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ .

Погонный вес ленты принимается по каталогу завода – изготовителя или определяется приближенно по формуле:

$$q_{л} = 11,0B(ai + S' + S''), \text{ Н/м} \quad (13)$$

где  $B$  – ширина ленты, м;  $a$  – толщина одной прокладки, мм;  $S'$  и  $S''$  – толщина верхней и нижней обкладок, мм.

Погонный вес вращающихся частей роликов грузовой и порожней ветвей ленты:

$$q'_p = \frac{G'_p}{l'_p}, \text{ Н/м} \quad (14)$$

$$q''_p = \frac{G''_p}{l''_p}, \text{ Н/м} \quad (15)$$

где  $G'_p$  и  $G''_p$  - вес вращающихся частей роликоопор грузовой и порожней ветвей ленты, Н (табл. 3);  $l'_p$  и  $l''_p$  - расстояние между роликовыми опорами на грузовой и порожней ветвях ленты, м (табл. 4).

Таблица 3 – Вес вращающихся частей роликоопор

Ширина ленты, мм	Трехроликовая опора				Однороликовая опора	
	В нормальном исполнении		В тяжелом исполнении			
	Диаметр ролика, мм	Вес, Н	Диаметр ролика, мм	Вес, Н	Диаметр ролика, мм	Вес, Н
1	2	3	4	5	6	7
400	102	100	-	-	102	60
500	102	115	-	-	102	75
650	102	125	-	-	102	105
800	89	85	-	-	89	77
850	127	220	159	450	127	190
900	159	275	159	450	159	200
1000	127	250	159	500	127	215
1000	159	320	-	-	159	240
1200	127	290	159	570	127	260
1200	159	360	-	-	159	280
1400	159	500	194	1080	159	400
1600	159	600	194	1150	159	480
2000	-	-	219	1940	-	-

Таблица 4– Расстояние между роликовыми опорами грузовой ветви ленты, м

Ширина ленты, мм	Насыпная масса груза $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>		
	До 1,0	До 1,5	До 2,5
500	1,3 – 1,4	1,2 – 1,3	1,1 – 1,2
650	1,2 – 1,4	1,1 – 1,2	1,0 – 1,1
800	1,2 – 1,4	1,1 – 1,2	0,9 – 1,1
1000	1,0 – 1,1	1,0	0,9 – 1,0
1200	1,0 – 1,1	0,9 – 1,0	0,8 – 0,9
1400	1,0 – 1,1	0,8 – 1,0	0,7 – 0,8
1600	0,9 – 1,0	0,7 – 0,9	0,6 – 0,7

Расстояние между роликовыми опорами порожней ветви ленты принимают в расчетах равным 3,0 м при ширине 0,5 – 0,8 м и 2,5 м для лент большей ширины.

Коэффициент сопротивления движению ленты при роликах с подшипниками качения принимают для:

- Работы в запыленной среде  $\omega' = 0,03 \div 0,04$ ;
- Широких условий (чистые, сухие помещения)  $\omega' = 0,02 \div 0,025$ ;
- Для подшипников скольжения  $\omega' = 0,05 \div 0,06$ ;

Сопротивления на поворотных (отклоняющих) барабанах находят с учетом угла обхвата. В практических расчетах эти сопротивления можно принимать для углов обхвата 90° равными 3 - 4 % от натяжения ленты в точке набегания на этот барабан, а для углов обхвата 180° 4 – 5 %. Т. е в общем случае:

$$W_{\text{откл}} = (0,03 \div 0,05)S_{\text{нб}} \quad (16)$$

Сопротивления на приводном барабане можно считать равным 4 -5 % от тягового усилия, т. е:

$$W_{\text{прив}} = (0,04 \div 0,05)W_0 \quad (17)$$

Сопротивления на разгрузочных устройствах могут быть определены следующим образом.

При разгрузке плужковым сбрасывателем сопротивление определяют по формуле:

$$W_p \approx 2,7qB, \text{ Н} \quad (18)$$

где  $q$  – погонная нагрузка, Н/м;  $B$  – ширина ленты, м.

Сопротивление на двухбарабанной разгрузочной тележке с индивидуальным приводом для передвижения определяют по общим правилам учета сопротивлений на наклонных прямолинейных и криволинейных участках.

Для двухбарабанной разгрузочной тележки с приводом от ленты должны быть учтены сопротивления передвижению тележки.

### 2.3 Определение распределенных сопротивлений движению ленты на прямолинейных участках трассы ленточного конвейера

Выполняется по методике [1] Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. “Теория и расчет ленточных конвейеров”. – М.: Машиностроение, 1978, – 392 с.; 2) Сергеева Н. В. “Определение силы сопротивления от деформирования груза на ленте ленточного конвейера”; 3) Камке Э. “Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям”. – М.: ГИФМЛ, 1961, - 703 с.].

- сила сопротивления движению от вращения роликов:

$$U_{вpi} = \sum_1^6 U_{bpi} = ((a + bv) + C_0 F_i + C_p P_i) \cdot \psi(\theta) \quad (19)$$

где  $a, b$  – константы, зависящие от конструкции ролика;  $v$  – скорость ленты;  $P, F$  – радиальная и осевая нагрузки на ролики;  $\psi(\theta)$  – усредненный температурный коэффициент;

- от вдавливания роликов в ленту:

$$U_{вди} = \sum_1^6 U_{вди} = \sum_1^6 f(\delta_i) \left( \frac{Z}{E'_k \cdot D^2 \cdot I_R} \right)^{1/3} \cdot F_{Ri}^{4/3} \cdot x(\theta) \quad (20)$$

где  $f(\delta_i) = \frac{1}{2} \pi t g \delta_c \left[ \frac{(\pi + 2\delta_c) \cos \delta_c}{4\sqrt{1 + \sin \delta_c}} \right]^{4/3}$ , для обкладок из резины

современных типов  $0 < tg \delta_c < 0,4$ , при этом  $f(\delta_c) \approx 1,14 tg \delta_c$ ;  $Z$  –

толщина нижней обкладки ленты;  $E'_k$  – динамический модуль упругости ленты;  $I_R$  – длина участка контакта ленты с роликом;  $F_{R_i}$  – нагрузка на отдельный опорный ролик;  $\chi(\theta)$  – температурный коэффициент;  $D$  – фиктивный диаметр, определяемый из соотношения  $D^{-1} = D_p^{-1} - (2\rho_l)^{-1}$ ;

где  $D_p$  – диаметр ролика,  $\rho_l$  – радиус кривизны ленты в непосредственной близости от ролика. Приведенный диаметр  $D$  зависит в общем случае от натяжения, однако как показали экспериментальные исследования эта зависимость не очень существенна и в первом приближении ее можно не учитывать.

- сила сопротивления от деформирования груза и ленты:

$$U_{\text{деф.г}} = \frac{b'}{sm}, m \geq 1 \quad (21)$$

где  $b'$  и  $m$  – константы, зависящие от ширины ленты, типа груза, расстояния между роликостропами, модуля упругости ленты и др.

Сила сопротивления от деформирования ленты на грузовой ветви может быть принята равной 3 ÷ 5 % от  $U_{\text{деф.г}}$ .

В этом случае:

$$U_{\text{деф.л}} = 1,05 \cdot U_{\text{деф.г}} = \frac{1,05b'}{sm} = \frac{b}{sm} \quad (22)$$

На основании экспериментально определенных сил сопротивления движению запишем выражения для коэффициентов сопротивления:

от вращения роликов:

$$w'_{\text{вр}} = \frac{U_{\text{вр}}(\theta)}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}} + q'_{\text{р}})I'_p} = C_{\text{вр}} \cdot \varphi(\theta) \quad (23)$$

$$\text{где } C_{\text{вр}} = \frac{U_{\text{вр}}}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}} + q'_{\text{р}})I'_p};$$

от вдавливания роликов:

$$w'_{\text{вд}} = \frac{U_{\text{вд}}(\theta)}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}})I'_p} = C_{\text{вд}} \cdot \chi(\theta) \quad (24)$$



$$\text{где } C_{\text{вд}} = \frac{U_{\text{вд}}}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}})I_p'};$$

от деформирования груза и ленты:

$$w'_{\text{деф}} = \frac{U_{\text{деф}}(\theta)}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}})I_p'} = C_{\text{деф}} \cdot \frac{1}{sm} \quad (25)$$

$$\text{где } C_{\text{деф}} = \frac{b}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}})I_p'};$$

Общий коэффициент сопротивления движению:

$$w' = w'_{\text{вр}} + w'_{\text{вд}} + w'_{\text{деф}} = C_{\text{вр}} \cdot \varphi(\theta) + C_{\text{вд}} \cdot x(\theta) + C_{\text{деф}} \cdot \frac{1}{sm} \quad (26)$$

Рассмотрим грузовую ветвь уклонного конвейера, установленного под углом  $\beta$ , ось  $x$  направим вдоль конвейера (см. рисунок 12). Выделим на ветви ленты, находящейся под натяжением  $S$ , элемент длиной  $dx$  и составим выражение для приращения натяжения  $dS$ :

$$dS = \left[ (q_{\Gamma} + q_{\text{л}} + q_p') \cdot \cos\beta \cdot C_{\text{вр}} \cdot \varphi(\theta) + (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \cos\beta \cdot C_{\text{вд}} \cdot x(\theta) + (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \frac{\cos\beta}{sm} + (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \sin\beta \right] dx \quad (27)$$

$$\text{или } \frac{dS}{dx} = C_1 + \frac{C_2}{sm} \quad (28)$$

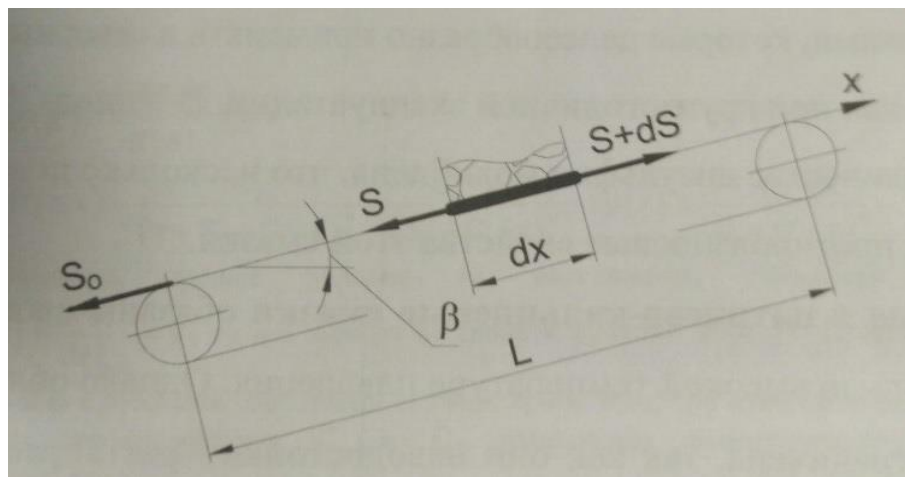


Рисунок 12 – Схема для расчета натяжений в ленте конвейера

$$\text{где } C_1 = (q_{\Gamma} + q_{\text{л}} + q_p') \cdot \cos\beta \cdot C_{\text{вр}} + (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \cos\beta \cdot C_{\text{вд}} + (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \sin\beta$$

$$C_2 = (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \cos\beta \cdot C_{\text{деф}}$$

Дифференциальное уравнение (28) решаем при граничном условии  $S(0) = S_0$ , т.е. натяжение в начале грузовой ветви равно  $S_0$ . Согласно методике для приближенного решения уравнения (28) важно оценить асимптотику решения  $S(x)$  при  $x \rightarrow \infty$ . При  $C_2 = 0$  решением уравнения является выражение:

$$S(x) = S_0 + C_1 \cdot x \quad (29)$$

Ввиду того, что показатель степени  $m \geq 1$ , можно ожидать, что вторая составляющая сопротивления движению – сила сопротивления от деформирования груза и ленты  $W_{\text{деф}}$  в уравнении (28) дает ограниченную сверху добавку к решению (29), то есть:

$$W_{\text{деф}} = \lim_{x \rightarrow \infty} z(x) = \lim_{x \rightarrow \infty} \int_0^x \frac{C_2}{S^m} dx = \text{const} \neq \infty \quad (30)$$

Это означает, что при увеличении длины конвейера сила сопротивления  $W_{\text{деф}}$  (30) должна асимптотически стремиться к некоторой постоянной величине. Приведем уравнение (28) к квазилинейному уравнению относительно  $z(x) = S(x) - S_0 - C_1 \cdot x$ . Имеем:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{C_2}{(z+C_1 \cdot x)^m} \quad (31)$$

$$\text{или } \frac{dz}{dx} = \frac{C_2 \cdot z \cdot m}{(S_0 + C_1 \cdot x)^{m+1}} + \frac{C_2}{(z + S_0 + C_1 \cdot x)^m} + \frac{C_2 \cdot z \cdot m}{(S_0 + C_1 \cdot x)^{m+1}}$$

Для существования предельного значения  $z(x)$  при  $x \rightarrow \infty$  необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} z(x) = \frac{F(0, x)}{g(x)} = 0$$

$$\text{где } F(z, x) = \frac{C_2}{(z + S_0 + C_1 \cdot x)^m} - \frac{C_2 \cdot z \cdot m}{(S_0 + C_1 \cdot x)^{m+1}}$$

$$g(x) = \frac{C_2 \cdot m}{(S_0 + C_1 \cdot x)^{m+1}}$$

Очевидно, данное условие не выполняется. Поскольку функция

$$g(x) = \frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{z=0}, \text{ то все зависит от свойств функции } F(z, x). \text{ Сконструировать}$$

функцию с нужными свойствами сложно; кроме того, при изменении соотношения между коэффициентами  $C_1$  и  $C_2$  изменяются асимптотические свойства решения  $S(x)$ .

Разложение решения  $S(x)$  в ряд Тейлора приводит к расходящимся рядам, то же самое дает метод последовательных приближений (метод Пикара). Рассмотрим один из возможных подходов, сохраняющих физический смысл решаемой задачи при  $C_1 < \frac{C_2}{S_0^m}$ .

Выполним в уравнении (31) замену переменной  $x$  на  $y = \frac{1}{S_0 + C_1 \cdot x}$ , тогда

$dx = -\frac{1}{C_1 y^2} dy$  уравнение принимает вид:

$$\frac{dz}{dx} = -\frac{C_2}{C_1 \cdot y^2 \cdot \left(z + \frac{1}{y}\right)^m} = -\frac{C_2 \cdot y^{m-2}}{C_1(z \cdot y + 1)}$$

Введем переменную  $\varphi$  равную  $\varphi = z \cdot y$ , тогда  $z = \frac{\varphi}{y}$ , и  $\frac{dz}{dx} = \frac{\frac{d\varphi}{dy} \cdot y - \varphi}{y^2}$ ,

откуда получаем следующее уравнение  $\frac{d\varphi}{dy} \cdot y - \varphi = -\frac{C_2}{C_1} \cdot \left(\frac{y}{\varphi+1}\right)^m \approx -\frac{C_2}{C_1} \cdot$

$y^m$ , причем при  $x = 0$ ,  $y = \frac{1}{S_0}$ ,  $z = 0$ ,  $\varphi = 0$ .

При  $m \neq 1$  и  $\varphi$  имеем  $\varphi \ll 1$  имеем:

$$\varphi = A \cdot y - \frac{C_2/C_1}{(m-1)} \cdot y^m$$

где постоянная  $A$  определяется из начального условия  $\varphi\left(\frac{1}{S_0}\right) = 0$ :

$$A = \frac{C_2/C_1}{(m-1)} \cdot \frac{1}{S_0^{m-1}}$$

$$\text{Отсюда } z(y) = \frac{\varphi}{y} = A - \frac{\frac{C_2}{C_1}}{(m-1)} \cdot y^m = \frac{\frac{C_2}{C_1}}{(m-1)} \cdot \left(\frac{1}{S_0^{m-1}} - y^{m-1}\right)$$

При переходе к первоначальным переменным и функциям получим следующее выражение для изменения натяжения по длине конвейера:

$$S(x) = S_0 + C_1 \cdot x + \frac{C_2}{C_1} \cdot \frac{1}{(m-1) \cdot S_0^{m-1}} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{S_0}{S_0 + C_1 \cdot x} \right)^{m-1} \right], m > 1 \quad (32)$$

При  $m = 1$ , т.е. для случая, когда сила сопротивления от деформирования груза и ленты описывается зависимостью  $U_{\text{деф}} = \frac{b'}{S}$ , имеем:

$$\varphi = A \cdot y - \frac{C_2}{C_1} \cdot y \cdot \ln y = \frac{C_2}{C_1} \cdot y \cdot \ln \frac{1}{S_0 \cdot y}$$

$$z \approx \frac{C_2}{C_1} \cdot \ln \left( 1 + \frac{C_1 \cdot x}{S_0} \right)$$

а изменение натяжения по длине конвейера описывается выражением:

$$S(x) = S_0 + C_1 \cdot x + \frac{C_2}{C_1} \cdot \ln \left( 1 + \frac{C_1 \cdot x}{S_0} \right) \quad (33)$$

или с использованием значений констант  $C_1$  и  $C_2$  для конвейера длиной  $L$ :

$$\begin{aligned} S(L) = & S_0 + \left[ (q_{\Gamma} + q_{\text{л}} + q'_{\text{р}}) \cdot \cos \beta \cdot C_{\text{вр}} + (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \cos \beta \cdot C_{\text{вд}} \right] \cdot L \\ & + \frac{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \cos \beta \cdot C_{\text{вд}}}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}} + q'_{\text{р}}) \cdot \cos \beta \cdot C_{\text{вр}} + (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \cos \beta \cdot C_{\text{вд}} + (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \sin \beta} \cdot \ln \left( 1 + \frac{[(q_{\Gamma} + q_{\text{л}} + q'_{\text{р}}) \cdot \cos \beta \cdot C_{\text{вр}} + (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \cos \beta \cdot C_{\text{вд}} + (q_{\Gamma} + q_{\text{л}}) \cdot \sin \beta] L}{S_0} \right) \end{aligned}$$

Аналогичная формула может быть записана и для порожняковой ветви с использованием соответствующих констант.

Для решения поставленной цели в дипломной работе в данном расчете представляет интерес расчет силы сопротивления движению от вращения ролика.

### **3. Программа-методика проведения экспериментальных исследований**

#### **3.1 Лабораторная работа**

Данный лабораторный стенд будет использоваться в учебном процессе, для проведения лабораторных работ студентами ИГДГиГ СФУ, в котором будут рассчитывать коэффициенты сопротивления вращению роликов ленточных конвейеров с подшипниками качения и с подшипниками скольжения.

Разрабатываемый лабораторный стенд располагается в лабораторном корпусе ИГДГиГ СФУ “Горных Машин и Комплексов” в аудитории 252 (л).

#### **Порядок выполнения работы**

Испытание конвейерных роликов на стенде производится следующим образом:

- 1) Рычаг закрепляется в средней части ролика так, чтобы плоскости его плеч пересекали центр ролика;
- 2) Ролик устанавливается в центре и ось ролика закрепляется во вращающейся втулке;
- 3) К двум концам рычага подвешиваются грузы и с помощью разновесов и уровня рычаг уравнивается в горизонтальном положении;
- 4) Включается электродвигатель, вращающий ось ролика, при этом возникает момент, выводящий рычаг из положения равновесия;
- 5) При помощи разновесов рычаг приводится в горизонтальное положение;
- 6) По формуле подсчитывается величина коэффициента сопротивления вращения ролика.

Опыты проводятся с роликом на подшипниках качения и с роликом на подшипниках скольжения. Для каждого ролика необходимо провести не менее трех замеров и затем определить среднее значение.

## 3.2 Возможность исследовательских работ

### 3.2.1 Исследования различных подшипников и смазок

При работе подшипника сопротивление вращению складывается из нескольких составляющих:

- Трения между шариками (роликами) и дорожками качения колец подшипника, складывающегося, в свою очередь, из трения качения и дополнительного трения скольжения, возникающего на площадках контакта, вследствие сдвиговых деформаций материала и неравенства окружных скоростей отдельных точек контакта;
- Вязкого сопротивления смазочного материала.

В конических роликовых подшипниках значительные дополнительные потери энергии возникают на преодоление трения между торцовыми поверхностями роликов и упорным бортиком внутреннего кольца. В ненагруженных или легконагруженных подшипниках момент вращения связан, в основном, с сопротивлением смазочного материала, трением тел качения и зависит от способа смазки (окунанием, разбрызгиванием, масляным туманом), количества и вязкости масла. В нагруженных подшипниках преобладающим становится трение на площадках контакта между телами качения и кольцами, а для конических подшипников добавляется трение между роликами и опорным бортиком. С ростом нагрузки силы трения на площадках контакта тел качения увеличиваются, соответственно увеличивается и момент вращения.

Как уже отмечалось, сопротивление вращению зависит от многих факторов и достоверную величину момента вращения можно определить только опытным путем. Однако при определенных условиях эксплуатации некоторых подшипников момент вращения может быть оценен по формуле:

$$T_{вр} = F \cdot f \cdot d/2 \quad (34)$$

где  $F = \sqrt{F_r^2 + F_a^2}$  - результирующая нагрузка, воспринимаемая подшипником, а  $F_r$  и  $F_a$  – соответственно радиальная и осевая составляющие нагрузки;  $f$  – коэффициент трения условно приведенный к внутреннему диаметру подшипника или диаметру вала  $d$ . Средние значения коэффициентов трения  $f$  приведены в табл. 5.

Значения коэффициента трения  $f$ , указанные в таблице, соответствуют рабочей температуре подшипника 50...80°C и смазке индустриальными маслами при умеренных нагрузках и частотах вращения  $n \leq 4000 \dots 5000$  об/мин. При избыточном количестве смазки, высокой её вязкости, износ поверхностей качения и перекосах колец подшипников коэффициент трения может значительно превысить значения, приведенные в таблице.

Таблица 5 – Среднее значение коэффициентов трения стандартных подшипников

Тип подшипника	Коэффициент трения $f$	
	Радиальная нагрузка	Осевая нагрузка
Шариковые радиальные однорядные	0,001...0,002	0,002...0,003
Шариковые радиальные сферические двухрядные	0,002...0,004	-
Шариковые радиально-упорные	0,002...0,003	0,0025...0,004
Конические роликовые радиально-упорные	0,004...0,008	0,01...0,02
Упорные шариковые	-	0,004...0,006

Самой популярной отечественной литиевой смазкой является всем известный Литол-24 (загуститель — литиевое мыло 12 оксистеариновой кислоты). Литол-24 представляет собой мягкую мазь вишневого или коричневого цвета. Она используется во всех основных узлах трения и способна заменить солидолы, смазку 1-13, «ЯНЗ-2», ЦИАТИМ-201 и др.

смазочные материалы. В результате такой замены узлы трения меньше изнашиваются, а интервалы замены смазки увеличиваются.

Следующее преимущество использования смазки Литол-24 — ее хорошие консервационные свойства. Все литиевые смазки стойки к воде, способны выдерживать широкий диапазон температур, имеют отличную механическую стабильность. Они применяются как в герметизированных, так и в негерметизированных узлах: шарнирах рулевого управления и подвесок, карданных шарнирах, ступицах передних колес с дисковыми тормозами и др.

Одним из основных видов повреждения подшипников в процессе эксплуатации является питтинг поверхностей трения. Его появление зависит от того, обладает ли та или иная пластичная смазка антипиттинговыми свойствами. По наличию данных свойств лидирующие позиции занимают смазки Литол-24 и № 158. Солидол С, ЦИАТИМ-201, ЯНЗ-2 и 1-13 в меньшей степени обладают антипиттинговыми свойствами.

### **3.3 Определение сопротивления роликов от вдавливания в ленту и от деформирования груза и ленты**

На основании экспериментально определенных сил сопротивления движению запишем выражения для коэффициентов сопротивления:

от вращения роликов:

$$w'_{\text{вр}} = \frac{U_{\text{вр}}(\theta)}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}} + q'_{\text{р}})I'_{\text{р}}} = C_{\text{вр}} \cdot \varphi(\theta) \quad (35)$$

$$\text{где } C_{\text{вр}} = \frac{U_{\text{вр}}}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}} + q'_{\text{р}})I'_{\text{р}}};$$

от вдавливания роликов:

$$w'_{\text{вд}} = \frac{U_{\text{вд}}(\theta)}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}})I'_{\text{р}}} = C_{\text{вд}} \cdot x(\theta) \quad (36)$$

$$\text{где } C_{\text{вд}} = \frac{U_{\text{вд}}}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}})I'_{\text{р}}};$$

от деформирования груза и ленты:



$$W'_{\text{деф}} = \frac{U_{\text{деф}}(\theta)}{(q_{\Gamma}+q_{\text{л}})I'_p} = C_{\text{деф}} \cdot \frac{1}{Sm} \quad (37)$$

$$\text{где } C_{\text{деф}} = \frac{b}{(q_{\Gamma}+q_{\text{л}})I'_p};$$

#### 4. Результаты проведенных экспериментов

Результаты опытов по определению коэффициентов сопротивления вращению роликов заносятся в табл. 6.

Таблица 6 – Результаты опытов

№ замера	Тип ролика	Общ. нагрузка G, Н	Радиус ролика R, м	Длина плеча l, м	Вес разновесов, Q, Н		Коэф. Сопротивления $\omega$	Ср. коэф. Сопротивления для каждого типа ролика $\omega_{ср}$
					Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>		
1	С подш. качения							
2	С подш. качения							
3	С подш. качения							
4	С подш. скольжения							
5	С подш. скольжения							
6	С подш. скольжения							

## 5. Методические указания к проведению лабораторной работы

### Определение коэффициентов сопротивления вращению конвейерных роликов

**Цель работы:** Изучение подшипниковых узлов конвейерных роликов, определение коэффициентов сопротивления вращению конвейерных роликов на подшипниках качения и на подшипниках скольжения и анализа полученных результатов.

#### Общие сведения

При вращении оси ролика при помощи электродвигателя возникает момент, равных произведению силы сопротивления в подшипниках и уплотнениях на радиус оси:

$$M_1 = w \cdot r, H \cdot \text{м} \quad (38)$$

где  $w$  – сопротивление вращения ролика в подшипниках, Н;

$r$  – радиус оси ролика, м.

Момент  $M_1$  выводит рычаг установки из положения равновесия. Этот момент может быть уравновешенным моментом, созданным при помощи разновесов и направленным в обратную сторону:

$$M_2 = Q \cdot l, H \cdot \text{м} \quad (39)$$

где  $Q$  – вес разновесов, Н;

$l$  – плечо рычага, м.

Момент  $M_2$  приводит рычаг в горизонтальное положение, следовательно:

$$M_1 = M_2, \text{ или } w \cdot r = Q \cdot l, H \cdot \text{м} \quad (40)$$

Откуда сила сопротивления вращения ролика равна:

$$w = \frac{Q \cdot l}{r}, H \quad (41)$$

Тогда коэффициент сопротивления вращению, отнесенный к радиусу ролика, определится по формуле:

$$\omega = \frac{Q \cdot l}{G \cdot R} \quad (42)$$

где  $G$  – общая нагрузка на подшипник ролика, Н;

$R$  – радиус ролика, м.

Общая нагрузка на подшипник ролика складывается из веса рычага, грузов и разновесов, подвешиваемых при первоначальном уравнивании и роликов подшипник качения и скольжения.

Эта нагрузка примерно соответствует нагрузке, приходящейся на один ролик конвейера в производственных условиях.

### **Содержание отчета**

Вычертить схемы роликов на подшипниках качения и подшипниках скольжения, схему экспериментального стенда, привести результаты опытов и анализа полученных данных, выводы, список литературы.

## **6. Экономическая часть**

### **6.1 Сетевая модель выполнения работы**

Работа выполнялась с использованием сетевой модели это позволило рационально распределить время по видам работ и выполнить дипломную работу в установленном учебным графиком срок.

В основе сетевого планирования и управления (СПУ) лежит сетевая модель – графическое изображение, которое получило название сетевого графика.

Целью применения СПУ является разработка оптимального или достаточно близкого к нему варианта выполнения работ, обеспечивающего рациональную увязку во времени и пространстве выполняемых работ, наилучшее использование ресурсов, а также эффективное управление процессом реализации этого плана.

Элементами сетевого графика, построенного в форме работа-стрелка, являются работа, событие, путь.

Работа (операция) - основной элемент сетевого графика. Различаются действительная работа, работа-ожидание и фиктивная работа.

Действительная работа - это трудовой процесс, в котором участвуют люди, машины, потребляются материально - технические и денежные ресурсы (устройство перемычек, изготовление макета, монтаж металлоконструкций и т.д.). Она изображается в виде сплошной стрелки; над стрелкой пишется наименование (содержание) работы, а под стрелкой - продолжительность выполнения работы в выбранных единицах времени. Выбор единицы измерения продолжительности работы зависит от уровня руководства, которому предназначен сетевой график. Так, в проекте

организации строительства в качестве единицы принимаются месяц или квартал, в проектах производства работ - дни, недели, месяцы; при планировании работы комплексных бригад - смены, часы.

Продолжительности выполнения всех работ в одном сетевом графике должны быть определены в одних единицах. Предполагается, что время течет в направлении, указанном стрелкой: хвост стрелки - начало, а острие - окончание работы.

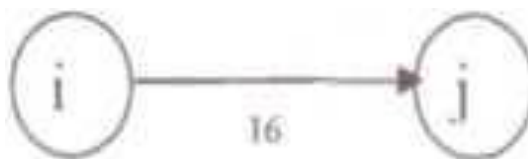


Рисунок 13 - Изготовление макета

Работа-стрелка соединяет два события:  $i$  - предшествующее и  $j$  - последующее. Пара номеров событий образуют код (шифр) работы. Первым читается номер события, стоящего в хвосте стрелки, и вторым - у острия. Как уже отмечалось, расчеты сетевых графиков и решение различных задач на их основе выполняются на ЭВМ, при этом машина различает работы только по их коду. Продолжительность работы обозначается  $t_{ij}$ .

Ожидание - работа, для выполнения которой требуется только время, ресурсы при этом не тратятся (твердение бетона, наполнение водохранилища). Работа - ожидание изображается так же, как и действительная работа.

Фиктивная работа - вспомогательный элемент сетевого графика, позволяющий сделать график более удобным для восприятия, правильно указать организационные и технологические связи между работами. Фиктивная работа не потребляет ресурсов и продолжительность ее равна нулю. Обозначается она пунктирной стрелкой.

Событие - есть факт окончания одной работы и начала другой. Событие обычно изображается кружком, в котором указан номер.

Событие не связано с потреблением ресурсов и продолжительность его равна нулю. Считается, что работа выходит из одного события и входит в

другое.

Различают начальные и конечные события. Конечное событие иногда называют целью. По числу конечных событий различают одно- и многоцелевые сетевые графики.

Путь - это последовательность работ в сетевом графике, при которой окончание предшествующей работы совпадает с началом последующей.

Для работы или события существует предшествующий путь, ведущий из начального события к данному или из начального события к событию, предшествующему данной работе.

Аналогично для работы и события существуют последующие пути, связывающие данное событие с конечным или событие, последующее за данной работой, с конечным.

Полный путь связывает начальное событие с конечным. Самый длинный полный путь называется критическим.

Сетевой график в форме работа - стрелка получил наибольшее распространение, так как содержит текстовую информацию (наименования работ, указанных над стрелками) и облегчает восприятие графика человеком.

Для обработки на ЭВМ график должен быть представлен в форме, «понятной» для машины. Наиболее распространенной является так называемая списочная форма задания сетевого графика.

Каждая строка таблицы содержит информацию об одной работе графика. Число строк равно числу работ в сетевом графике (для сети в форме работа-стрелка включаются и фиктивные работы). В первой колонке записаны начальные числа кодов работ  $I$ , во второй - конечные числа этих кодов  $j$ , в третьей колонке - продолжительность выполнения этих работ  $t_{ij}$ .

Число столбцов может быть большим: например, в дополнительном столбце можно указать число рабочей силы, занятой на выполнении работы, количество материально-технических ресурсов, потребляемых на работе, и т.д.

Все события (вершины) в сетевом графике в форме работа-стрелка

должны быть пронумерованы. Предпочтительной является так называемая упорядоченная нумерация, при которой номер вершины, стоящей в начале дуги (в хвосте стрелки), будет меньше номера вершины, стоящей в конце дуги (у острия стрелки), т.е. для любой дуги  $i < j$ . Большинство алгоритмов, по которым производятся расчеты, связанные с сетевыми графиками, ориентированы именно на упорядоченную нумерацию вершин.

Упорядочение вершин может быть выполнено самой ЭВМ по специальной программе. При списочном задании сетевого графика упорядочение производится вручную до записи информации на машинные носители. Для этого применяется алгоритм, который называется **способ вычерчивания выходящих дуг**. Он состоит в следующем: на графике отыскивается вершина (или вершины), не имеющая входящих дуг; этой вершине (вершинам) присваивается очередной порядковый номер (очередные порядковые номера); вычеркиваются все дуги, выходящие из отмеченной вершины (из отмеченных вершин) и в предположении, что вычеркнутых дуг больше нет, алгоритм начинают сначала, пока не будет пронумерована последняя вершина.

Формальные правила построения сетевых графиков являются общими для всех сетевых графиков независимо от того, какие проекты они моделируют; строительство гидроузла, разработку проекта турбогенератора или организацию учебного процесса в вузе. Соблюдение правил позволяет применять к обработке всех сетевых графиков одни и те же алгоритмы и программы для ЭВМ.

**Правило 1** - Ни одна работа в сетевом графике не может начаться прежде, чем будут окончены все без исключения предшествующие ей работы. Следствием этого правила является требование, чтобы в сетевом графике не было циклов.

**Правило 2** - В сетевом графике не должно быть двух и более работ, имеющих одинаковый код (это правило называют правилом изображения параллельных работ, т.е. таких, которые могут выполняться одновременно).



Так как ЭВМ различает работы только по коду, то она не сумеет отличить в данном случае одну работу от другой. Для правильного изображения этого фрагмента нужно ввести два дополнительных события и две фиктивные работы. В форме стрелка-связь фиктивных работ не требуется.

**Правило 3** - В сетевом графике не должно быть ни одного события, кроме начального, не имеющего предшествующих работ.

**Правило 4** - В одноцелевом сетевом графике не должно быть ни одного события, кроме конечного, не имеющего последующих работ.

**Правило 5** - Правило изображения сложных работ. Сложной может называться работа, выполнение части которой достаточно для начала одной из последующих работ. Для сокращения общей продолжительности выполнения проекта сложная работа должна быть поделена на простые, и последующие работы должны начинаться сразу, как только это физически окажется возможным.

**Правило 6** - Правило употребления фиктивных работ. Как уже отмечалось, фиктивные работы - это вспомогательный элемент при изображении сетевых графиков в форме работа - стрелка. В ряде случаев в сетевой график целесообразно ввести дополнительные фиктивные работы, которые будут избыточными, но позволят сделать график более наглядным.

Однако при этом следует помнить, что увеличение числа фиктивных работ соответственно увеличит объем работы по подготовке исходных данных для расчета сетевого графика и время расчетов. Таким образом, следует стремиться к тому, чтобы по крайней мере не вводить совершенно бесполезные фиктивные работы.

Временной характеристикой всего сетевого графика является продолжительность критического пути  $T_{кр}$ . В одноцелевом графике существует по крайней мере один критический путь, хотя таких путей может быть и несколько. Возможны случаи, когда все пути в сетевом графике будут критическими. В многоцелевом сетевом графике минимальное количество критических путей равно числу конечных событий (целей), причем

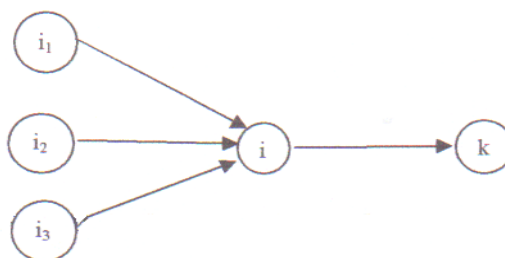
продолжительности этих путей могут быть разными.

Для каждой работы в сетевом графике определяют 6 временных параметров:  $t_{ij}^{PH}$  - раннее начало;  $t_{ij}^{PO}$  - раннее окончание;  $t_{ij}^{PN}$  - позднее начало;  $t_{ij}^{PN}$  - позднее окончание;  $R_{ij}^n$  - полный резерв времени;  $R_{ij}^c$  - свободный резерв времени.

Ранние начала и ранние окончания находятся в процессе расчета графика от начального события к конечному. Раннее окончание работы связано с ее ранним началом зависимостью:  $t_{ij}^{PO} = t_{ij}^{PH} + t_{ij}$ .

где  $t_{ij}$  - продолжительность выполнения работы.

**Раннее начало работы** есть самый ранний срок, в который работа может начаться. Численно он равен продолжительности самого длинного предшествующего данной работе пути. Как бы много ни было этих предшествующих путей им всегда будут принадлежать работы, непосредственно предшествующие данной.



Из рисунка и правила построения сетевого графика следует, что:

$$t_{jk}^{PH} = \max\{t_{ij}^{PO}\} \quad (43)$$

Вычисления по этой формуле производятся шаг за шагом в направлении от начального события к конечному.

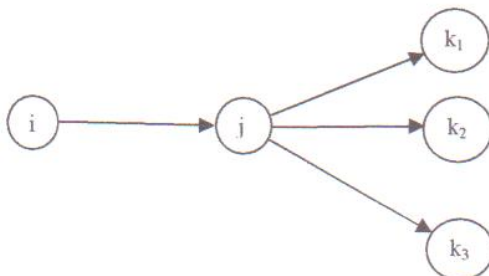
Поздние начала и поздние окончания отыскиваются в процессе расчета графика «ходом назад» - от конечного события к начальному. Они связаны зависимостью:

$$t_{ij}^{PN} = t_{ij}^{PO} - t_{ij} \quad (44)$$

**Позднее окончание работы** определяет самый поздний срок, в который работа может окончиться, не увеличивая продолжительности критического пути. Численно позднее окончание работы равно разности

между продолжительностью критического пути и самого длинного последующего за

данной работой пути. Как бы много ни было таких путей им всегда будут принадлежать работы, непосредственно последующие за данной.



В соответствии с определением и рисунком следует, что:

$$t_{ij}^{no} = \min\{t_{jk}^{pn}\} \quad (45)$$

Действительно, если из постоянной продолжительности критического пути вычитать длины разных по продолжительности путей, то минимум разности получится тогда, когда будет вычитаться путь максимальной длины. Вычисления по этой формуле происходят шаг за шагом от конечного события к начальному.

Полный резерв времени работы показывает, на какой промежуток времени можно отодвинуть сроки выполнения работы вправо (в сторону их увеличения), не увеличивая продолжительности критического пути:

$$R_{ij}^n = t_{ij}^{no} - t_{ij}^{po} = (t_{ij}^{pn} + t_{ij}) - (t_{ij}^{pn} + t_{ij}) = t_{ij}^{pn} - t_{ij}^{pn} \quad (46)$$

Если на какой-то работе использован весь полный резерв времени, то по крайней мере один из последующих за данной работой путей станет критическим.

Свободный резерв времени определяет промежуток времени, на который можно отодвинуть сроки выполнения работы вправо, не меняя ранних начал последующих за ней работ, и вычисляется как:

$$R_{ij}^c = t_{ik}^{pn} - t_{ij}^{po} \quad (47)$$

Так как работы  $jk$ , последующие за работой  $ij$ , все равно не могут начаться раньше, чем это определено их ранним началом  $t_{ik}^{pn}$ , то

использование свободного резерва на данной работе никак не отражается на сроках выполнения последующих работ.

Между резервами времени, которыми располагают работы, существует соотношение:

$$R_{ij}^n > R_{ij}^c;$$

Кроме того, резервы не отрицательны:  $R_{ij}^n > 0$  и  $R_{ij}^c > 0$ .

Работы, принадлежащие критическому пути, имеют резервы времени, равные нулю, т.е. для них  $R_{ij}^n = R_{ij}^c = 0$ .

При расчете сетевых графиков в табличной форме используется списочная форма задания сетевого графика в котором указываются цифровые коды  $ij$  и продолжительность работ  $t_{ij}$ .

Обязательна упорядоченная нумерация событий. Работы заносятся в список в порядке возрастания первых чисел их кодов  $I$ , при этом вначале записываются все работы, выходящие из 1-го (начального) события и имеющие первое число кода 1, затем - все работы, выходящие из 2-го события (начальное число кода - 2); потом из 3-го и т.д. Работы, выходящие из одного события, заносятся в список в порядке возрастания вторых чисел их кодов  $j$ . Так, если из события 5 выходят работы 5-6, 5-9, 5-8, то в список они должны заноситься в порядке 5-6, 5-8, 5-9.

При упорядоченной нумерации событий (для всех работ) и соблюдении правил занесения работ в список для любой работы  $ij$  вся информация о предшествующих работах будет расположена в строках таблицы, находящихся выше той, в которой записана информация о данной работе. При этом работы, непосредственно предшествующие данной, последним числом кода будут иметь  $i$ , т.е. начальное число кода данной работы. Вся информация о работах, последующих за работой  $ij$ , будет записана в строках таблицы, лежащих ниже. При этом работы, непосредственно последующие за данной, первым числом кода будут иметь  $j$ , т.е. последнее число кода данной работы.

Цель расчета состоит в определении ранних и поздних сроков

выполнения работ, резервов времени, которыми располагают работы, а также в индикации критического пути и определении календарных сроков выполнения работ, например, по их ранним началам.

Расчет ранних сроков выполнения работ производится «ходом вперед», что соответствует движению в направлении от первой строки к последней.

Алгоритм расчета ранних сроков следующий:

- 1) определяются ранние начала работ, выходящих из начального события (первое число кода этих работ  $i = 1$ );
- 2) по формуле находят ранние окончания тех работ, для которых определены их ранние начала (если определено раннее окончание последней работы, переходят к п.4);
- 3) по формуле определяются ранние начала работ, первое число кода которых равно  $i + 1$  (переход к п.2);
- 4) конец.

Продолжительность критического пути равна максимальному из чисел 5-го столбца таблицы.

Расчет поздних сроков выполнения работ ведется «ходом назад».

Алгоритм расчета поздних сроков такой:

- 1) определяется позднее окончание работ, входящих в последнее событие (последнее число кода этих работ равно числу событий в графике  $j$ ), оно равно продолжительности критического пути;
- 2) по формуле находят поздние начала работ, для которых найдены их поздние окончания, если определено позднее начало работы, код которой записан в первой строке, переходят к п.4;
- 3) по формуле находят поздние окончания работ, последнее число кода которых равно  $j - 1$ , переход к п.2;
- 4) конец.

Далее следует расчет резервов времени, который можно выполнять в произвольном порядке. Однако целесообразно вначале вычислить полные резервы времени и если они окажутся равными нулю, то для этих работ

можно будет не вычислять свободных резервов, ибо последние будут равны нулю.

По формуле определяют свободные резервы для всех остальных работ.

## 6.2 Исходные данные для расчета

Исходные данные для расчета сетевого графика изготовления макета приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Перечень работ

Код работы	Наименование работы	Код события	Наименование события	Продолжительность работы, дн
1-2	Изучение литературы	2	Устройство и принцип действия стенда по определению сопротивления конвейерных роликов	5
2-3	Составление технического задания	3	Изучены технические характеристики	5
2-12	Изучение литературных источников	12	Составление пояснительной записки	4
3-4	Поиск материалов	4	Материалы выбраны	5
4-5	Создание эскизного проекта	5	Эскиз готов	10
5-6	Закупка материалов	6	Подготовка к использованию материала	5
6-7	Обработка материала	7	Материал готов к использованию	10
7-8	Изготовления узлов	8	Узлы изготовлены	15
8-9	Соединение узлов	9	Узлы собраны	2
9-10	Конструирование установки	10	Конструкция готова	10
10-11	Монтаж и наладка макета	11	Установка готова	2
11 - 12	Окраска макета	11	Окрашен по ГОСТ	2
12-13	Составление пояснительной записки	12	Пояснительная записка готова	10

13 -14	Защита дипломного проекта	14	Диплом защищен	1
--------	---------------------------	----	----------------	---

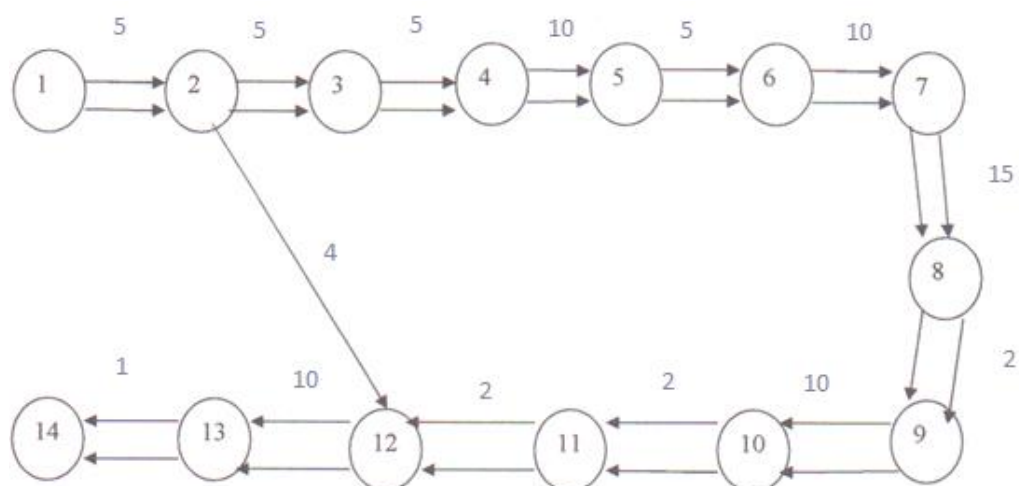


Рисунок 14 - Сетевой график процесса выполнения дипломной работы

Таблица 8 - Расчет параметров сетевого графика табличным методом

Предшес твующее событие i	Послед ующее событие j	Продол жительность работы $t_{ij}$	Раннее начало работ $t_{р.н.(ij)}$	Раннее окончан ие работ $t_{р.о.(ij)}$	Позднее начало работ $t_{п.н.(ij)}$	Позднее окончан ие работ $t_{п.о.(ij)}$	Полный резерв времени работ $R_n(ij)$	Частный резерв времени работ $\Psi_{(ij)}$
1	2	5	0	5	0	5	0	0
2	3	5	5	10	5	10	0	0
2	12	4	5	40	5	42	2	35
2	3	5	10	15	10	15	0	0
3	4	5	15	20	15	20	0	0
4	5	10	20	30	21	31	1	10
5	6	2	30	32	31	33	1	2
6	7	2	32	34	32	34	0	0
7	10	2	34	36	36	38	2	2
8	9	2	38	40	38	40	0	0
9	11	2	40	42	40	42	0	0

10	12	2	42	44	42	44	0	0
11	12	2	40	44	44	46	2	4
12	13	10	44	54	44	54	0	0
13	14	1	54	55	54	55	0	0

$i$  - предшествующее событие;

$j$  - последующее событие;

$t_{ij}$  - продолжительность работы;

$t_{p.n(ij)}$  - раннее начало работ;

$t_{p.o(ij)}$  - раннее окончание работ;

$t_{n.n(ij)}$  - позднее начало работ;

$t_{n.o(ij)}$  - позднее окончание работ;

$R_n(ij)$  - полный резерв времени работ;

$Ч_{(ij)}$  - частный резерв времени работ.

Для расчета полного и частного резервов времени работ используются следующие формулы:

$$R_n(ij) = t_{n.o(ij)} - t_{p.o(ij)} \quad (48)$$

$$Ч_{(ij)} = t_{p.n(jh)} - t_{p.o(ij)} \quad (49)$$

где  $t_{p.n(jh)}$  - раннее начало последующей работы.

Выводы: Сетевой график изготовления стенда, имеет пути:

$L_1$ : 1 -2- 12-13- 14;  $t_{L1} = 51$  дн.

$L_2$ : 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8- 9- 10 - 11- 12 - 13 - 14;  $t_{L2} = 55$  дн.

Критический путь равен 55 дней и не имеет резервов времени.

Для расчета резервов времени событий необходимо определить ранние и поздние сроки наступления событий.

Таблица 9 - Расчет ранних и поздних сроков свершения событий и резервов времени событий

Код событий	$t_{pi}$	$t_{ai}$	$R_i$
1	0	0	0
2	5	5	0
3	10	10	0



4	15	15	0
5	20	20	0
6	30	31	1
7	32	33	1
8	34	34	0
9	36	48	2
10	40	40	0
11	42	42	0
12	44	46	2
13	54	54	0
14	55	55	0

### 6.3 Смета затрат на изготовление макета

Себестоимость продукции - это стоимостная оценка используемых в процессе производства продукции природных ресурсов, сырья, материалов, топлива, энергии, основных фондов, трудовых ресурсов, а также других затрат на её производство и реализацию. Состав себестоимости регламентируется Постановлением Правительства РФ №552 от 05.08.92 г. с учетом изменений и дополнений №661 от 01.07 95 г. и главой 25 Налогового кодекса РФ:

- Материальные затраты (за вычетом стоимости возвратных отходов);
- Затраты на оплату труда (все виды оплаты труда и другие выплаты);
- Отчисления на социальные нужды;
- Амортизация основных фондов;
- Прочие денежные затраты.

Таблица 10 - Расчет стоимости материалов, необходимых для изготовления стенда

Наименование материалов	Количество	Цена, руб	Сумма, руб
Уголки, м	5	250	1250
Краска, кг	8	150	1200
Грунтовка, кг	5	130	650
Провод, м	4	60	240
Металл (лист 2мм) м <sup>2</sup>	1	400	400

Пускатель, шт	1	550	550
Шестерни, шт	2	850	1700
Двигатель, шт	1	1800	1800
Подшипники, шт	4	225	900
Итого:			8690

Расчет расходов на оплату труда исполнителю, занятому изготовлением стенда, руководителю дипломной работы, консультантам по экономике и БЖД.

Исполнитель - тарифная ставка - 8 000 рублей в месяц;

Районный коэффициент - 30%;

Северная надбавка - 30%;

Месячный оклад 8 700 рублей  $\times$  30%  $\times$  30% = 13 920 рублей

Продолжительность выполнения работ - 2 календарных месяца.

13 920 рублей  $\times$  3 месяца = 41 760 рублей

Руководитель – доцент к.т.н.

Тарифная ставка: 16 разряд 197 руб\час.

Продолжительность консультаций - 20 часов.

197 рублей  $\times$  20 часов = 3940 рублей.

Консультации по экономики: доцент к. х. н.

Тарифная ставка: 13 разряд 150 руб\час.

Продолжительность консультаций - 5 часов.

150 рублей  $\times$  5 часов = 750 рублей.

Консультации по БЖД: доцент к. т. н.

Тарифная ставка: 13 разряд 150 руб\час

Продолжительность консультаций - 5 часов.

150 рублей  $\times$  5 часов = 750 рублей.

Таблица 11 - Смета затрат на изготовление стенда.

Элементы	Сумма, руб
Материалы	8690
Оплата труда исполнителя	41760

Оплата труда руководителя	3940
Оплата труда консультанта по экономике	750
Оплата труда консультанта по БЖД	750
Единый Социальный Налог - 26,2 %	12367
АМОРТИЗАЦИОННЫЕ ОТЧИСЛЕНИЯ	1000
Итого:	69257
НАКЛАДНЫЕ РАСХОДЫ -15%	10388
Всего:	79645

Вывод: Разработана сетевая модель выполнения работы. Критический путь составляет 55 дней, что свидетельствует о выполнении работы в установленный учебным графиком срок. Составлена смета затрат на выполнение работы, равная 79 645 рубля.

## **7. Безопасность жизнедеятельности**

Лабораторный стенд располагается в лаборатории кафедры «Горные Машины и Комплексы» Сибирского федерального университета.

### **Общие положения**

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 23 мая 2002г. № 399 «О нормативных актах, содержащих государственные нормативные требования охраны труда» к нормативным актам относятся инструкции по охране.

Порядок разработки, согласования, утверждения и учета инструкций по охране установлен Постановлением Министерства труда и социального развития Российской Федерации от 27 декабря 2002 г. № 80 «Об утверждении методических рекомендаций по разработке государственных нормативных требований охраны труда».

В соответствии со статьей 212 Трудового Кодекса Российской федерации ректор университета обязан обеспечить разработку и утверждение инструкций по охране труда здоровья обучающихся с учетом мнения выборного органа первичной профсоюзной организации в порядке, установленном статьей 372 ТК РФ для принятия локальных нормативных актов.

На основании положения по охране труда университета организация разработки инструкций для учебных кабинетов, лабораторий возлагается на руководителей структурных подразделений университета.

Непосредственными составителями инструкций являются заведующие кабинетами и лабораториями.

## **Инструкция по охране труда при работе на стенде по определению коэффициентов сопротивления вращению конвейерных роликов**

### **1. Общие требования охраны труда**

1.1. Настоящая инструкция устанавливает требования, обязательные для исполнения студентами в учебно-научной лаборатории (далее - лаборатории).

1.2. Нарушения (невыполнение, ненадлежащее выполнение или уклонение от выполнения) требований данной инструкции, в зависимости от наступивших последствий, влечет уголовную, административную, дисциплинарную или иную ответственность в соответствии с действующим законодательством РФ.

1.3. К работе в лабораториях кафедры допускаются студенты прошедшие инструктаж по охране труда и пожарной безопасности.

1.4. В лаборатории запрещается курить, принимать пищу и напитки.

1.5. Запрещается работать в лаборатории в отсутствие преподавателя или лаборанта, а также выполнять в лаборатории экспериментальные работы, не связанные с выполнением учебного практикума.

1.6. Во время работы в лаборатории необходимо соблюдать чистоту, тишину и порядок. При всех работах необходимо соблюдать максимальную осторожность, помня, что неаккуратность, невнимательность, недостаточное знакомство с приборами могут повлечь за собой несчастный случай.

1.7. Запрещается подключать неизвестные приборы к лабораторным розеткам.

1.8. Запрещается переносить включенные приборы.

1.9. Все вопросы по выполнению эксперимента, возникающие в процессе работы, следует немедленно выяснить у преподавателя.

1.10. Возможные опасности при работе в лаборатории:

- поражение электрическим током;
- травмирование при нарушении правил безопасности при работе с приборами и оборудованием.

## **2. Требования охраны труда перед началом работы**

2.1. Студент должен быть информирован о содержании предстоящей работы и знать ее методические особенности по учебному практикуму.

2.2. Ознакомиться с настоящей инструкцией и расписаться в журнале по технике безопасности.

2.3. Работа в лаборатории должна производиться на исправном стенде.

2.3. Приступать к выполнению работы студенты могут только с разрешения преподавателя.

2.4. Студентам запрещается доступ к распределительным щитам и установкам, не относящимся к выполняемой ими работы.

2.5. До начала работы все ее участники должны на месте подробно ознакомиться со схемой лабораторной установки, обратив особое внимание на место расположения выключателя со стороны питающей сети. Особое внимание обращать на цепи возбуждения двигателя постоянного тока.

## **3. Требования охраны труда во время работы**

3.1. Включение напряжения производить только после проверки стенда преподавателем и с его разрешения.

3.2. Если по ходу работы установку требуется неоднократно включать или выключать, то эти операции должен производить один человек.

3.3. Во время работы запрещается снимать ограждения с вращающихся частей машины.

3.4. Запрещается работать в шарфах, косынках (на плечах), с распущенными волосами.

3.5. Не оставлять включенную установку без присмотра.

#### **4. Требования охраны труда в аварийных ситуациях**

4.1. О любом несчастном случае пострадавший или очевидцы обязаны незамедлительно сообщить руководителю.

4.2. При возникновении несчастного случая преподаватель или лаборант обязаны принять меры по предотвращению воздействия травмирующего фактора на потерпевшего и оказать первую помощь либо обратиться в здравпункт, либо вызвать «Скорую помощь» (вызов со стационарного телефона – 03; с сотового телефона – 112), либо доставить потерпевшего в организацию здравоохранения.

4.3. При обнаружении пожара или признаков горения (задымление, запах гари, повышение температуры и т.п.) немедленно сообщить преподавателю (лаборанту) и следовать его указаниям.

#### **5. Требования охраны труда по окончании работы**

5.1. По окончании работы необходимо отключить все источники питания.

5.2. Снять средства индивидуальной защиты (если есть).

5.3. После выполнения работы студенты должны прибрать свое рабочее место и сдать лаборанту.

В соответствии с действующими санитарными нормами все кабинеты и лаборатории университета оборудованы освещением, отоплением и вентиляцией. Каждый кабинет и лаборатория укомплектованы санитарной аптечкой и средствами пожаротушения (АПС, огнетушители марки ОП-4Г).

## **Заключение**

В данной дипломной работе был изготовлен лабораторный стенд по “Определению сопротивления вращению роликов конвейера”, а вместе с ним методика расчета ленточных конвейеров. Одним из элементов оборудования конвейера, влияющими на общее сопротивление движения ленты конвейера, являются поддерживающие ленту опорные ролики, а особенно большое влияние они оказывают при значительной длине конвейера.

В настоящее время применяются стандартные ролики с подшипниками скольжения и качения. В расчетах применяются коэффициенты трения отражающие неполную степень точности действительных значений. В планируемой работе предлагается изготовить стенд на котором можно будет провести исследовательские работы по определению коэффициентов трения роликов с подшипниками скольжения и качения в зависимости от скорости движения ленты, нагрузки на подшипнике и площади их контакта трущихся поверхностей. Результаты данных исследований на стенде позволят уточнить методику расчета сопротивлений вращению роликов по длине конвейера и в целом методику расчета ленточных конвейеров, кроме этого, данный стенд может быть использован на занятиях по лабораторным работам, касающимся конвейерного транспорта.

В перспективе работы данного направления с использованием стенда, могут расширяться для определения и применения смазочных материалов для определенных типов подшипников.

Для выполнения работы выполнено проектирование и разработка конструкторской документации для изготовления стенда и изготовлен стенд



в натуральную величину, определены его технические характеристики, а для выполнения исследовательских работ в зависимости от их вида, разработано методика выполнения и методические обеспечения для выполнения лабораторной работы студентами.

### **Список использованных источников**

1. Марков Р. С., “Вспомогательные процессы обогатительных фабрик. Расчет устройств”;
2. Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г. “Теория и расчет ленточных конвейеров”. – М.: Машиностроение, 1978, – 392 с.;
3. Сергеева Н. В. “Определение силы сопротивления от деформирования груза на ленте ленточного конвейера”;
4. Камке Э. “Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям”. – М.: ГИФМЛ, 1961, - 703 с.
5. Пухов Ю. С. Рудничный транспорт: учебник для вузов; М.: Недра; 1991 - 255 с.
6. Клорикьян С.Х., Старичнев В.В., Сребный М.А., и др. Машины и оборудование для шахт и рудников: Справочник. М., Издательство МГГУ, 2002 – 471с